ВЕСТНИК

Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 4 (37)

Красноярск 2011

ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 4 (37)

Главный редактор
доктор технических наук
Ковалев И. В.

Заместители главного редактора:
доктор физико-математических наук
Логинов Ю. Ю.

доктор физико-математических наук
Сенашов С. И.

доктор технических наук
Михеев А. Е.

кандидат технических наук
Зеленков П. В. (отв. секретарь)

Редакционная коллегия:
Аплеснин С. С.
Головенкин Е. Н.
Ерыгин Ю. В.
Краев М. В.
Лаптенок В. Д.
Ловчиков А. Н.
Медведев А. В.
Москвичев В. В.
Сафонов К. В.
Смирнов Н. А.
Сомов В. Г.

Учредитель
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2011
© Коллектив авторов, 2011

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева» (Вестник СибГАУ) – межрегиональный научный журнал, содержащий результаты научных исследований в области естественных, технических и прикладных наук по вопросам проектирования, производства и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники, а также экономики

Представленные в журнал статьи публикуются после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.vestnik.sibsau.ru)

Периодичность – 4 раза в год
Специальный выпуск – 1 раз в год

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (http: //www.elibrary.ru) и сайте журнала (www.vestnik.sibsau.ru)

Журнал включен в каталоги:
российской прессы «Роспечать» (МАП) – 11399;
объединенный «Пресса России» – 39263

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий, 31, П-415
Тел./факс (391)291-90-19
E-mail: vestnik@sibsau.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия, свидетельство ПИ № ФС77-22189 от 27.10.2005 г.

Журнал включен ВАК России в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Вестник СибГАУ» ссылка обязательна

Редакторы К. С. Мирошникова, О. А. Плехова, Т. Е. Ильющенко, Е. Г. Некрасова, Т. А. Ермолаева
Редактор английского текста А. Г. Никитина
Компьютерная верстка М. А. Белоусовой
Подп. в печать 20.12.2011. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 31,4.
Уч.-изд. л. 39,5. Тираж 1000 экз. С 168/11. Заказ 87/124.
Редакционно-издательский отдел
Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
660014, г. Красноярск,
просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
Отпечатано в типографии ИП Суховольской Ю. П.
660125, г. Красноярск, ул. Водопьянова, 2.

Раздел
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

УДК 519.235

А. Н. Антамошкин, О. А. Бакаева

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ «ПЕРВЫХ» КРИТЕРИЕВ ВЫЯВЛЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ КАЧЕСТВЕННЫМИ ПЕРЕМЕННЫМИ

Проведен сравнительный анализ использования «первых» критериев оценки связи между категориальными переменными. Показана согласованность этих критериев на примере выявления связи между типом авиарейса и числом крушений.

Ключевые слова: коэффициент ассоциации, коэффициент коллигации Юла, коэффициент контингенции, быстрый критерий, оценки связи.

Признак – это свойство, характерная черта явления, подлежащая статистическому изучению. Признаки в зависимости от своей природы классифицируются на количественные и качественные (атрибутивные). Признаки, отдельные значения которых различаются по величине, называются *количественными* (например, возраст, рост, вес). Качественные признаки выражают существенное неотъемлемое свойство предмета. Противоположные качественные признаки называются *альтернативными* (например, мужчина – женщина, ребенок – взрослый). Любой качественный признак можно свести к альтернативному (например, студент, обучающийся на «отлично», – студент, не обучающийся на «отлично», полет прошел в штатном режиме – возникла аварийная ситуация).

Как известно, основная задача статистики состоит в выявлении связи между признаками независимо от того, какую природу они имеют. Если связь имеется и она значимая, то вопрос о существовании связи влечет за собой вопрос о силе данной связи. Методов измерения тесноты взаимосвязи довольно много, но все они условно делятся на параметрические и непараметрические.

Непараметрические методы были первыми из методов измерения тесноты взаимосвязи количественных признаков. Эти методы применяются для измерения тесноты связи качественных и альтернативных признаков, а также количественных признаков, распределение которых отличается от нормального распределения. Непараметрические методы учитывают направление изменения значений признаков, но не зависят от того, насколько интенсивно колеблются значения результативного признака при изменении факторного признака, что позволяют сделать параметрические методы.

Для измерения связи альтернативных признаков применяются коэффициент ассоциации и коэффициент контингенции. Для расчета этих и других показателей применяется следующая матрица взаимного распределения частот (табл. 1).

Таблица 1

Таблица сопряженности 2 × 2

Категории	B_1	B_2	Всего
A_1	f_{11}	f_{12}	f_{10}
A_2	f_{21}	f_{22}	f_{20}
Всего	f_{01}	f_{02}	f_{00}

В табл. 1 приняты следующие обозначения: f_{11} – число элементов выборки, обладающих признаками A и B одновременно; f_{12} – число элементов выборки, обладающих признаком A, но не обладающих признаком B; f_{21} – число элементов выборки, обладающих признаком B, но не обладающих признаком A; f_{22} – число элементов выборки, не обладающих ни одним из признаков.

Таким образом, f_{ij} можно определить как наблюдаемую частоту респондентов или каких-то определенных признаков, попавших в ячейку (A_i, B_j). Символ f_{i0} обозначает частную сумму всех значений признака, попавших в категорию A_i, аналогично символ f_{0j} обозначает сумму значений сопряженного ему признака, относящихся к категории B_j, а символ f_{00} – общий итог всех рассмотренных случаев. Представим все сказанное выше на языке формул [1]:

$$f_{i0} = \sum_j f_{ij}, \quad f_{0j} = \sum_i f_{ij}, \quad f_{00} = \sum_i f_{i0} = \sum_j f_{0j} = \sum_i \sum_j f_{ij}.$$

Суммарные частоты по строке или по столбцу называются *маргинальными частотами*. Их значения важны, так как они позволяют оценить распределение частот в отдельных столбцах и строках таблицы. Сумма маргинальных частот равна объему выборки $f_{00} = n$, а их распределение представляет собой одномерное распределение переменной, образующей строки или столбцы таблицы.

Критериев выявления связи между качественными признаками существует достаточно много. Среди них можно выделить критерий Фишера, который позволяет сделать максимально точный вывод о наличии или отсутствии связи, но расчет которого затруднен, классический критерий χ^2 и G-критерий Вульфа, точность которых можно увеличить, используя поправку Йетса. Однако суть этих критериев состоит в том, что все они не выявляют связь между переменными, а только проверяют заранее выдвинутую гипотезу о наличии связи. Поэтому сначала следует воспользоваться одним из так называемых «первых» критериев, которые позволяют предварительно оценить возможность существования связи между переменными и выдвинуть правдивую нулевую гипотезу. К таким критериям относятся коэффициент ассоциации, коэффициент коллигации Юла, коэффициент контингенции и быстрый критерий оценки связи.

Коэффициент ассоциации. Метод измерения связи с помощью четырехклеточной таблицы был предложен английскими статистиками Э. Дж. Юлом и М. Дж. Кендаллом. Числитель этого коэффициента, называемого коэффициентом ассоциации, представляет собой определитель исследуемой четырехклеточной таблицы сопряженности, а знаменатель – сумму тех же произведений, разность которых стоит в числителе:

$$Q = \frac{f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21}}{f_{11}f_{22} + f_{12}f_{21}}. \qquad (1)$$

Если признаки A и B независимы, то $Q = 0$. В случае полной связи между признаками $Q = \pm 1$.

Самым существенным недостатком использования коэффициента ассоциации является его непригодность в случае, если одна из частот равна 0. При этом коэффициент ассоциации всегда равен ±1, а это можно ложно трактовать как полную зависимость между признаками. Поэтому если хотя бы одна из частот в таблице сопряженности равна 0, то критерий ассоциации применять нельзя и вместо него используется коэффициент контингенции.

Коэффициент ассоциации в плане расчета является относительно простым показателем сопряженности величин. Он применяется к вариации двух качественных признаков, распределенных по двум группам. Его значения принадлежат промежутку от –1 до +1. Интерпретируется он следующим образом: чем ближе коэффициент по абсолютной величине к 1, тем теснее связь (прямая или обратная). Считается, что если значение коэффициента ассоциации достигает 0,3, то это свидетельствует о возможной существенной связи между признаками. Однако можно сказать, что этот показатель очень либерально оценивает тесноту связи, завышая ее.

Если предположить, что суммарная частота f_{00} достаточно велика, то величина Q имеет нормальное распределение с дисперсией [2]:

$$D(Q) = \frac{1}{4}(1-Q^2)\left(\frac{1}{f_{11}} + \frac{1}{f_{12}} + \frac{1}{f_{21}} + \frac{1}{f_{22}}\right), \qquad (2)$$

благодаря чему можно найти приближенные доверительные границы для Q. Сравнение Q с полученным значением дисперсии (с учетом масштаба $\sqrt{D(Q)}$) позволяет получить хотя бы первое приближение по оценке связи. Но так как в формуле (2) присутствуют дроби, то, исходя из области определения, дисперсию в виде конечного числа можно вычислить только в том случае, если все значения в ячейках таблицы сопряженности отличны от нуля.

Коэффициент коллигации Юла. Этот способ выявления связи между переменными мало известен и практически не используется.

Существует выражение, позволяющее найти его приближенное значение, зная значение коэффициента ассоциации Q:

$$Q = \frac{2K_{\text{Ю}}}{1 + K_{\text{Ю}}},$$

где $K_{\text{Ю}}$ – коэффициент коллигации Юла.

Статистика коэффициента коллигации имеет вид

$$K_{\text{Ю}} = \frac{\sqrt{f_{11}f_{22}} - \sqrt{f_{12}f_{21}}}{\sqrt{f_{11}f_{22}} + \sqrt{f_{12}f_{21}}},$$

а дисперсия вычисляется по формуле

$$D(K_{\text{Ю}}) = \frac{1}{16}(1 - K_{\text{Ю}}{}^2)\left(\frac{1}{f_{11}} + \frac{1}{f_{12}} + \frac{1}{f_{21}} + \frac{1}{f_{22}}\right).$$

Коэффициент контингенции (сходства). Этот коэффициент используется для выявления связи между признаками, не имеющими количественного выражения (альтернативная вариация, или изменчивость качественных признаков), и применяется только в том случае, когда исследуемые признаки имеют лишь две градации.

В математической формуле, описывающей статистику коэффициента контингенции, его числитель аналогичен коэффициенту ассоциации, т. е. представляет собой разность произведения частот на главной и побочной диагоналях, а знаменатель является квадратным корнем из произведения всех четырех маргинальных частот. В буквенных обозначениях табл. 1 имеем:

$$V = \frac{f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21}}{\sqrt{(f_{11} + f_{12})(f_{11} + f_{21})(f_{22} + f_{12})(f_{22} + f_{21})}}.$$

Связь считается подтвержденной, если коэффициенты $|Q| \geq 0{,}5$ и $|V| \geq 0{,}3$, в противном случае признаки A и B альтернативны. Это означает, что данный объект либо обладает признаком, либо не обладает (знак «минус» показывает наличие обратной связи при условии ее подтверждения). В случае $|Q| > 0{,}5$ и $|V| < 0{,}3$ ($|Q| < 0{,}5$ и $|V| > 0{,}3$) точного ответа о наличии или отсутствии связи нет.

Свойства коэффициента контингенции те же, что и у коэффициента корреляции. Коэффициент контингенции обращается в 0, если оба произведения в числителе точно уравновешиваются (что крайне маловероятно). Коэффициент контингенции равен +1 лишь в том случае, когда f_{12} и f_{21} одновременно равны 0 и –1 или когда f_{11} и f_{22} одновременно равны 0. В отличие от него коэффициент ассоциации равен 1 уже в случае, если одно из чисел в клетках таблицы оказалось равным 0, как это уже отмечалось ранее. Величина коэффициента контингенции всегда меньше величины коэффициента ассоциации.

На практике для проверки гипотезы о существовании взаимосвязи между изучаемыми признаками используется величина $\chi^2 = nV^2$, имеющая при отсутствии связи распределение χ^2 с $d = 1$ степенью свободы.

С учетом поправки на непрерывность статистика критерия контингенции имеет вид

$$\chi^2 = \frac{f_{00}\left(\left|f_{11}f_{22} - f_{21}f_{12}\right| - \frac{f_{00}}{2}\right)^2}{(f_{11} + f_{12})(f_{11} + f_{21})(f_{12} + f_{22})(f_{21} + f_{22})},$$

где f_{00} – общее число данных в таблице, $f_{00} = f_{11} + f_{12} + f_{21} + f_{22}$.

Если $\chi^2 > \chi_\alpha^2$, то зависимость признаков A и B с достоверностью α признается значимой.

Критерий $\chi^2 = nV^2$ применяется при $f_{00} \geq 40$ и $f_{11}, f_{12}, f_{21}, f_{22} \geq 5$ [3].

Быстрый критерий оценки связи. Предыдущие коэффициенты позволяют грубо оценить меру связи между качественными переменными и дают возможность получить хотя бы предварительное представление о наличии связи и ее величине, а это в свою очередь позволяет корректно сформулировать нулевую гипотезу о зависимости или независимости переменных и далее проверить ее с помощью более точных критериев. Но кроме грубых оценок связи, позволяющих предварительно оценить ее меру, существуют математически более тонкие и быстрые, хотя также носящие скорее вспомогательный характер, способы оценки связи. К таким оценкам относится быстрый критерий.

В зависимости от некоторых особенностей расположения и значений частот в таблице сопряженности применяются разные статистики.

При $f_{11} + f_{12} + f_{21} + f_{22} \geq 25$ и при условии $f_{11} + f_{12} = f_{21} + f_{22}$ или $f_{11} + f_{21} = f_{12} + f_{22}$ быстрым критерием оценки связи является величина

$$z = \frac{(f_{11} + f_{22}) - (f_{12} + f_{21})}{\sqrt{f_{11} + f_{12} + f_{21} + f_{22}}}. \qquad (3)$$

Связь признаков в таблице сопряженности частот с достоверностью α признается значимой, если $z > u_\alpha$, где u_α – α-квантиль стандартного нормального распределения.

Если $f_{11} + f_{12} \geq 10$ при условии $f_{11} + f_{12} << f_{21} + f_{22}$ или $f_{11} + f_{21} << f_{12} + f_{22}$, то справедлив критерий

$$\tilde{z} = \frac{f_{11} - f_{12} + \dfrac{(f_{11} + f_{21} - f_{12} - f_{22})(f_{11} + f_{12})}{f_{11} + f_{12} + f_{21} + f_{22}}}{\sqrt{f_{11} + f_{12}}}. \qquad (4)$$

Если $|\tilde{z}| > u_\alpha$, то связь признаков признается значимой [3].

По внешнему виду таблицы сопряженности частот можно увидеть следующую закономерность. Если связь между признаками является прямой, то частоты значений признаков сконцентрированы на главной диагонали, т. е. в ячейках f_{11} и f_{22}. При наличии обратной связи значения сосредоточены на побочной диагонали, т. е. в ячейках f_{12} и f_{21}. При отсутствии связи частоты практически равномерно распределены по всему полю таблицы.

Рассмотренные выше «первые» критерии выявления взаимосвязи имеют ряд преимуществ, к которым относятся простота, легкость в расчетах, получение быстрого ответа на вопрос, существует ли какая-то зависимость между исследуемыми переменными. Но эти преимущества влекут за собой и недостатки их использования, среди которых самыми явными являются неудовлетворительная точность полученных выводов, в основном – завышение оценки силы связи, и отсутствие точного и прямого ответа на вопрос, зависимы ли переменные, потому что «первые» критерии не утверждают, а лишь предполагают отсутствие или наличие связи.

Пример. В последнее десятилетие в связи со все большей востребованностью и доступностью гражданского авиатранспорта появляется много чартерных рейсов. При этом существует точка зрения, что число авиакрушений чартерных рейсов больше, чем обычных – см. данные таблицы 2 [4]. Проверим с помощью всех вышеперечисленных способов выявления связи, действительно ли существует зависимость между типом рейса и количеством аварий.

Таблица 2

Таблица авиакрушений с жертвами за 1959–2007 гг. [4]

Тип рейса	Количество авиакрушений с жертвами		Всего
	1959–1997 гг.	1998–2007 гг.	
Обычный	341	74	415
Чартерный	39	4	43
Всего	380	78	458

Расчет коэффициента ассоциации. Так как в таблице сопряженности все ячейки с частотами отличны от нуля, то по формуле (1) можно вычислить значение коэффициента ассоциации:

$$Q = \frac{341 \cdot 4 - 39 \cdot 74}{341 \cdot 4 + 39 \cdot 74} = -0,358.$$

В данном случае знак «минус» говорит о том, что связь обратная, т. е. с течением времени количество авиакрушений уменьшается. Модуль значения коэффициента равен 0,358, т. е. больше 0,3, что говорит о возможной существенной связи между признаками «тип рейса» и «количество аварий».

Исходя из полученного значения коэффициента ассоциации определим дисперсию:

$$D(Q) = \frac{1}{4}\left(1 - (-0,358)^2\right)\left(\frac{1}{341} + \frac{1}{74} + \frac{1}{39} + \frac{1}{4}\right) = 0,064,$$

$$\sqrt{D(Q)} = \sqrt{0,064} = 0,253.$$

Анализируя полученные данные, можно сделать промежуточный вывод о том, что связь между типом рейса и числом аварий скорее не существует, так как коэффициент $Q = -0,358$ недостаточно велик по сравнению со своими среднеквадратическим отклонением, т. е. не превышает его более чем в три раза.

Зная дисперсию, рассчитаем приближенный доверительный интервал для истинного значения связи, измеряемой с помощью коэффициента ассоциации Q: $Q \pm 1,96\sqrt{D(Q)}$. В результате получим:

$$-0,358 \pm 1,96\sqrt{0,064} \text{ или } (-0,854;\ 0,138).$$

Нетрудно заметить, что этот интервал накрывает значение 0, соответствующее независимости признаков. Следовательно, имеющиеся данные не дают оснований для отбрасывания возможности независимости. Таким образом, коэффициент ассоциации гово-

рит о возможной существенной связи между признаками, не исключая возможности их независимости.

Расчет коэффициента коллигации Юла. Коэффициент коллигации в данном случае составит

$$K_{\text{Ю}} = \frac{\sqrt{341 \cdot 4} - \sqrt{39 \cdot 74}}{\sqrt{341 \cdot 4} + \sqrt{39 \cdot 74}} = -0{,}185,$$

а дисперсия будет

$$D(K_{\text{Ю}}) = \frac{1}{16}\left(1 - (-0{,}185)^2\right)\left(\frac{1}{341} + \frac{1}{74} + \frac{1}{39} + \frac{1}{4}\right) = 0{,}018,$$

$$\sqrt{D(K_{\text{Ю}})} = 0{,}133.$$

По рассчитанным показателям можно сделать предварительный вывод о том, что между переменными «тип рейса» и «безопасность полета» связи не существует. Мы имеем право это утверждать, поскольку значение коэффициента коллигации невелико и больше своего среднеквадратического отклонения только в 1,39 раза.

Расчет коэффициента контингенции. По данным табл. 2 рассчитаем коэффициент контингенции:

$$V = \frac{341 \cdot 4 - 39 \cdot 74}{\sqrt{(341+74)(341+39)(4+74)(4+39)}} = \frac{-1\,522}{\sqrt{528\,925\,800}} = -0{,}066.$$

Абсолютное значение коэффициента коллигации $|V| = 0{,}066$ можно трактовать как отсутствие связи между переменными. Значение коэффициента ассоциации $|Q| = 0{,}358 < 0{,}5$ свидетельствует лишь о возможной существенной связи. Также подтверждается то, что величина коэффициента контингенции всегда меньше величины коэффициента ассоциации: $0{,}066 < 0{,}358$. Вывод об отсутствии связи очевиден. Но не стоит забывать о том, что коэффициент ассоциации и коэффициент контингенции являются предварительными критериями и делать по ним достоверные выводы нельзя. К тому же, как упоминалось выше, коэффициент ассоциации очень либерально оценивает тесноту связи, завышая ее. Поправку на непрерывность при данном расчете также использовать нельзя, потому что, несмотря на то что объем выборки больше 40 ($f_{00} = 458$), частота в одной ячейке меньше 5. Поэтому необходимо воспользоваться одним из более точных критериев.

Быстрый критерий оценки связи. Первое условие, состоящее в том, что сумма всех частот должна быть не меньше 25, для данной задачи выполняется, а второе условие, что суммы частот по строкам или столбцам должны совпадать, не соблюдается. Поэтому формулу (3) применять нельзя.

Сумма частот первой строки $f_{11} + f_{12} = 415 > 10$, но она намного больше суммы частот второй строки: $415 \gg 43$, и сумма частот первого столбца также намного больше суммы частот второго столбца: $380 \gg 78$. Следовательно, формула (4) неприменима.

Таким образом, значение коэффициента ассоциации говорит лишь о возможной связи между переменными, коэффициенты коллигации и контингенции свидетельствуют об отсутствии связи, т. е. видна согласованность «первых» критериев.

Итак, практически все критерии показали независимость возникновения аварийных ситуаций и крушений самолетов от типа рейса при общей тенденции к снижению аварийности. Следовательно, при полете на чартерных и обычных рейсах риск потерпеть крушение одинаков и с течением времени он уменьшается.

Библиографические ссылки

1. Аптон Г. Анализ таблиц сопряженности. М. : Финансы и статистика, 1982.

2. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М. : Наука, 1973.

3. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006.

4. Статистика авиакатастроф, причины авиакатастроф [Электронный ресурс]. URL: http://www.letaem-bez-straha.ru/otzyvy.html (дата обращения: 21.10.2011).

A. N. Antamoshkin, O. A. Bakaeva

COMPARATIVE ANALYSIS OF «THE FIRST» CRITERIA OF DIAGNOSIS OF RELATION AMONG QUALITATIVE VARIABLES

A comparative analysis of the use of the «first» criteria of estimation of relation among categorical variables is presented in the article. Compatibility of the criteria presented, on the example of revealing of relation of the type of a flight and the number of wreckages, is given.

Keywords: coefficient of association, coefficient of colligacy of Yule, coefficient of contingency, rapid criterion.

© Антамошкин А. Н., Бакаева О. А., 2011

УДК 519.866

М. А. Горбунов, А. В. Медведев, Е. С. Семенкин

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ

Проанализирована возможность применения генетических алгоритмов для решения сложных задач оптимизации на примере задачи оценки эффективности региональной промышленной политики. Приведено сравнение расчета по линейной модели региона двумя методами – генетическим и симплекс-методом. Показана возможность применения генетических методов к модели, спрос в которой задается в виде логистической кривой.

Ключевые слова: основная задача социально-экономического развития региона, математическая модель региона, генетические алгоритмы.

Общий уровень износа основных фондов в промышленности составляет почти 50 %, а в некоторых отраслях достигает 80 %. Поэтому на производственных предприятиях инвестиционная деятельность сводится преимущественно к операциям реального инвестирования: приобретения целостных имущественных комплексов, ведения реконструкции и технического перевооружения, нового строительства, модернизации действующего оборудования. В связи с этим остро стоит задача разработки и совершенствования методов и инструментов оценки и анализа эффективности развития социально-экономических систем на уровне предприятия, отрасли, региона и государства в целом. Используемые для этих целей пакеты экономического и финансового анализа, такие как «БЭСТ-Офис», «ИНЭК-Аналитик», «Альт-Инвест», «Галактика», Project Expert и др., позволяют получать показатели производственной, инвестиционной и финансовой деятельности предприятий в широком диапазоне параметров, в том числе рассматривать динамику их развития при заданных в каждый момент характеристиках движения. Это вполне устраивает финансовых аналитиков, о чем говорит широкое использование данных программных продуктов в практической деятельности планово-аналитических служб различных предприятий. Вместе с тем в этих пакетах практически отсутствуют возможности непосредственного получения *оптимальных значений показателей экономического развития во временной динамике*, что не позволяет относительно быстро выйти на оптимальные или субоптимальные траектории развития экономических агентов. Кроме того, существующие программные продукты если и позволяют менять алгоритмы расчетов, то для этого нужны специальные знания в области программирования или наличие навыков и опыта работы со слишком специфическими инструментами. Поэтому, наряду с построением математических моделей региона, актуальным является сравнение различных методов их анализа, а также применение этих методов к расчету практически значимых задач регионального социально-экономического развития.

Сформулируем основную задачу социально-экономического развития региона [1]. Положим, что планирование экономической деятельности в виде совокупности инвестиционных проектов (ИП) в регионе осуществляется экономическими агентами, заинтересованными в эффективном функционировании региональной экономики. К таким экономическим агентам следует отнести обобщенного производителя (производственный сектор), обобщенного потребителя (население региона) и управляющий их взаимодействием региональный (налоговый) центр. Пусть, кроме того, в развитии регионального рынка заинтересован обобщенный инвестор – физическое или юридическое лицо любой формы собственности, готовое вложить в развитие региона свои свободные денежные средства (капитал). Региональный центр призван установить согласованное взаимодействие региональных социально-экономических комплексов: производственного и социального – путем увязки их интересов, которое может происходить через распределение и перераспределение региональных экономических ресурсов: реальных (земли, зданий, сооружений, оборудования), финансовых (инвестиций, дотаций) и др.

Предположим, что распределение финансового ресурса производится из сумм налоговых поступлений производственного сектора и имеет целью развитие производства, повышение платежеспособного спроса на производимую продукцию, рост налоговых поступлений в бюджет региона. Производитель и потребитель рассматривают региональный центр как регулирующий орган, способный обеспечивать их взаимодействие путем поддержки инвестиционных проектов с высоким уровнем общественной эффективности. В свою очередь региональный центр рассматривает производителя и потребителя как неотъемлемые, жизненно важные составляющие процесса регионального развития, существенные интересы которых он поддерживает.

В работах [1; 2] предложены соответствующие динамическая и статическая модели развития региона, представляющие собой многокритериальную многошаговую задачу линейного программирования (ММЗЛП) и соответствующую ей агрегированную методами операционного исчисления версию. На базе указанных моделей в работе [3] построена следующая статическая модель регионального экономического развития:

$$J_{\text{inv}} = \frac{\sum_{k=1}^{n}\sigma_k x_k + \gamma\sum_{k=1}^{n} x_{n+k}}{1+r} - x_{2n+1} - x_{2n+2} - \varepsilon_2 x_{2n+4} \to \max,$$

$$J_{\text{cons}} = \frac{\beta\sum_{k=1}^{n} x_{n+k}}{1+r} - \varepsilon_1 x_{2n+3} \to \max,$$

$$J_{\text{max}} = \frac{-\sum_{k=1}^{n}\sigma_k x_k + \left(\alpha_3 - \beta\left(\alpha_3 - \alpha_4\right)\right)\sum_{k=1}^{n} x_{n+k}}{1+r} - (1-\varepsilon_1)x_{2n+3} - (1-\varepsilon_2)x_{2n+4} \to \max,$$

$$\sum_{k=1}^{n}\gamma_k x_k + \gamma\sum_{k=1}^{n} x_{n+k} + x_{2n+1} + x_{2n+2} + x_{2n+4} \ge 0, \qquad (1)$$

$$-\sum_{k=1}^{n}\theta_k x_k + \rho\sum_{k=1}^{n} x_{n+k} \ge 0,$$

$$\beta\sum_{k=1}^{n} x_{n+k} + x_{2n+3} + M_0 - \sum_{k=1}^{n} q_k \ge 0,$$

$$-\sum_{k=1}^{n}\sigma_k x_k + \left(\alpha_3 - \beta\left(\alpha_3 - \alpha_4\right)\right)\times \sum_{k=1}^{n} x_{n+k} + (1-\varepsilon_1)x_{2n+3} + (1-\varepsilon_2)x_{2n+4} + N_0 \ge 0,$$

$$x_{n+k} \le q_k,\ x_{n+k} \le \delta_k x_k\ \ (k=1,...,n),\ x_{2n+1} \le I_0,$$

$$x_{2n+2} \le K_0,\ x_{2n+3} + x_{2n+4} \le L_0,\ x_k \ge 0\ (k=1,...,2n+4),$$

$$W = (1-\alpha_3)(1-\beta)R - (1-\alpha_3)(\text{Am} + N_2) = (1-\alpha_3)\left[-\sum_{k=1}^{n}\theta_k x_k + (1-\beta)\sum_{k=1}^{n} x_{n+k}\right] \ge 0,$$

В этой модели приняты следующие обозначения:

– c_k – стоимость ОПФ k-го типа;

– m_k – количество приобретаемых ОПФ k-го типа;

– V_k – проектная производительность ОПФ k-го типа;

– P_k – стоимость единицы продукции k-го типа;

– $\delta_k = P_k V_k / c_k$ – фондоотдача ОПФ k-го направления деятельности;

– y_k – объем выпуска по k-му виду продукции;

– q_k – прогнозный спрос на продукцию k-го типа;

– T_k – срок службы ОПФ k-го типа;

– T – горизонт планирования (срок действия) ИП;

– I – внешние инвестиции;

– $\bar{I}$ – внутренние инвестиции;

– I_0 – максимальная сумма внешних инвестиций;

– Am – амортизационные отчисления;

– $\text{Am}(t) = T\sum_{k=1}^{n}\frac{c_k m_k}{T_k} = \sum_{k=1}^{n}\frac{T}{T_k}x_k$ – сумма амортизационных отчислений по всем видам ОПФ;

– W – прибыль;

– K_0 – начальный собственный капитал предприятия;

– M_0 – начальные собственные средства потребителей;

– N_0 – начальные собственные средства налогового центра;

– $N_2 = \alpha_2 S^0$ – налог на имущество;

– L_0 – максимальная сумма дотаций за весь период действия ИП;

– $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – соответственно ставки налогов на добавленную стоимость (НДС), на имущество (НИ), на прибыль (НП), на доходы физических лиц (НДФЛ);

– $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – проценты возврата дотаций потребителем и производителем;

– β – часть выручки, поступающая в фонд оплаты труда;

– r – ставка дисконтирования, учитывающая инфляцию, требования инвестора по доходности и различные риски проекта;

– J_{inv}, J_{cons}, J_{max} – критерии инвестора, потребителя и управляющего центра;

– $x_k = c_k m_k$ $(k=1,...,n)$ – общая стоимость ОПФ, приобретаемых в ИП;

– $x_{n+k} = P_k m_k y_k$ $(k=1,...,n)$ – выручка от реализации продукции k-го типа;

– $x_{2n+1} = I$ – внешние (возвратные) инвестиции (инвестора);

– $x_{2n+2} = \bar{I}$ – внутренние инвестиции производителя;

– $x_{2n+3} = \text{Dot}_1$ – дотации потребителям;

– $x_{2n+4} = \text{Dot}_2$ – дотации производителям;

– $R = \sum_{k=1}^{n} P_k m_k y_k = x_{n+k}$ – выручка от реализации по всем видам продукции;

– $S^0 = \sum_{k=1}^{n}\left(1 - \frac{T}{T_k}\right)c_k m_k = \sum_{k=1}^{n}\left(1 - \frac{T}{T_k}\right)x_k$ – остаточная стоимость ОПФ;

– $\gamma_k = \left(2\alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_2\alpha_3\right)\frac{T}{T_k} + \alpha_2\alpha_3 - 2\alpha_2 - 1$;

– $\sigma_k = \left(\alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_2\alpha_3\right)\frac{T}{T_k} - \alpha_2(1-\alpha_3)$;

– $\theta_k = (1-\alpha_2)T / T_k - \alpha_2$ $(k=1,...,n)$;

– $\rho = 1 - \alpha_1 - \beta$, $\gamma = (1-\alpha_3)\rho$;

– $\tau = \rho\alpha_3 + \beta\alpha_4$.

Представленная модель является ММЗЛП и может быть решена симплекс-методом.

Авторами разработана система поддержки принятия решений при управлении региональным экономическим развитием, состоящая из совокупности линейных математических моделей, алгоритмов их анализа и комплекса программ «Карма» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2008614387 от 11 сентября 2008 г.), который можно использовать

для решения различных задач управления реальными инвестициями на предприятиях:

– определения оптимального количества основных производственных фондов и режима их закупки;

– расчета оптимального объема инвестиционных вложений и определения режима их расходования;

– определения оптимального соотношения общих и оборотных затрат, затрат на оплату труда, методов амортизации, соотношения производительности, стоимости основных фондов и продукции и др.

Решение задачи, соответствующей предложенной выше математической модели, изначально было получено с помощью пакета «Карма» и генетического алгоритма с целью их последующего сравнения.

Вместе с тем большое количество задач в экономике имеет нелинейный характер. Например, из экономической практики известно, что спрос q_i ($i = 1,\ldots,n$) на продукцию i-го вида может быть описан логистическим законом, отражающим его зависимость от доходов D потребительского сектора в соответствии с функцией

$$q_i(D) = \frac{k_i}{1 + b_i e^{a_i / D}}.$$

Если, например, в ограничении $x_{n+k} \le q_k$ модели (1) заменить $D = \beta x_{n+k}$, то, в соответствии с логистическим законом, будет получено нелинейное ограничение

$$x_{n+k} \le \frac{k_i}{1 + b_i e^{a_i / (\beta x_{n+k})}}. \qquad (2)$$

Это превращает предложенную выше задачу в нелинейную, которая уже не может быть решена симплекс-методом. Для решения таких задач необходимо применять другие методы, одним из которых может явиться хорошо зарекомендовавший себя генетический метод.

Для решения задачи управления промышленной политикой региона среди генетических алгоритмов был выбран алгоритм, основанный на методе SPEA [4], как один из наиболее эффективных алгоритмов решения условных многокритериальных задач.

С использованием региональной экономической статистики [5] были рассмотрены четыре отрасли (вида) экономической деятельности:

1) добыча полезных ископаемых;

2) обрабатывающие производства;

3) производство и распределение электроэнергии, газа и воды;

4) строительство.

По указанным видам деятельности в [5] представлены следующие статистические данные:

1. Сальдированный финансовый результат за январь–ноябрь 2006 г. (млн руб.): 1) 12 137,7; 2) 141 120,2; 3) 331; 4) 285,3.

2. Структура финансовых вложений (инвестиции) организаций (крупных и средних) (млн руб.): 1) 31 495,4; 2) 27 259,8; 3) 1 606,7; 4) 662,1.

Отношение статистических данных пп. 1 и 2 можно трактовать как эффективность работы производственных предприятий по указанным видам экономической деятельности.

Кроме того, в [5] приведены сводные статистические данные по объему отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг по видам экономической деятельности (в млн руб. в действующих ценах, без НДС, акцизов и других аналогичных платежей), которые можно трактовать как задающие нижнюю границу спроса на продукцию соответствующих видов экономической деятельности: 1) 28 046,6; 2) 438 878,5; 3) 45 833,4; 4) 24 616,6.

Исходя из такой трактовки статистических данных рассмотрим следующую задачу управления промышленной политикой: найти такие общий объем инвестиций, объем инвестиций в приобретение ОПФ указанных видов (отраслей) экономической деятельности, а также планируемую выручку от реализации продукции, чтобы чистый приведенный доход (NPV) инвестиционного проекта по развитию указанных видов экономической деятельности в регионе был максимальным.

Расчеты производились по модели со следующими входными параметрами: $N = 3$ – количество критериев; $n = 4$; $I_0 = 500$; $r = 0{,}1$; $\delta_1 = 0{,}39$; $\delta_2 = 5{,}18$; $\delta_3 = 0{,}21$; $\delta_4 = 0{,}43$; $M_0 = 1\ 000\ 000$; $L_0 = K_0 = N_0 = 0$; $\alpha_1 = 0{,}0$; $\alpha_2 = 0{,}02$; $\alpha_3 = 0{,}24$; $\alpha_4 = 0{,}26$; $\beta = 0{,}05$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$.

Результаты расчетов, полученные симплекс-методом и модифицированным алгоритмом SPEA для линейных ограничений, показывают, что как по распределению оптимальных значений переменных, так и по значению целевого критерия, наблюдается хорошее согласование сравниваемых методов (различие в значениях критериев, например, составляет 0,15 %) (табл. 1).

Для тестирования генетических алгоритмов была рассмотрена модель (1) с единственным изменением – заменой в ограничении $x_{n+k} \le q_k$ $(k = 1,\ldots,n)$ на логистическую зависимость (2). Числовые параметры таких зависимостей, соответствующих заданным спросам по видам экономической деятельности, приведены в табл. 2.

В результате решения сформулированной выше задачи в [3] было получено множество недоминируемых точек, состоящее из десяти индивидов (табл. 3).

Для оценки качества полученных точек рассчитывались численные показатели эффективности для трех алгоритмических схем: стандартной, гибридной и модифицированной (их значения, усредненные по десяти запускам алгоритма, представлены в табл. 4).

Следует отметить, что точки, полученные с использованием модифицированной схемы, распределены более равномерно, чем точки, полученные двумя другими схемами. В связи с этим можно утверждать, что модифицированная схема является более эффективной при решении задачи управления промышленной политикой региона.

Для подтверждения сделанных выводов были рассмотрены лучшие решения по каждому критерию отдельно и их усредненные значения по десяти запускам алгоритма (табл. 5–7).

Таблица 1

Результаты расчетов симплекс-методом и модифицированным алгоритмом SPEA для линейных ограничений

x	Симплекс-метод	ГА
x_1	72 848,31	73007,44
x_2	84 774,68	85331,24
x_3	129 242,2	135 649,19
x_4	57 115,08	58 170,4
x_5	28 046,6	28 016,63
x_6	438 878,5	438 763,51
x_7	26 623,9	27 934,7099
x_8	24 616,6	24 575,99
x_9	0	0
x_{10}	0	0
x_{11}	0	0
x_{12}	0	0
Значение критерия	326 669,590 6	326 208,370 8

Таблица 2

Числовые параметры нелинейных ограничений

q_i	k_i	b_i	a_i
Спрос q_1 на 1-й вид продукции	56	1	5
Спрос q_2 на 2-й вид продукции	90	1	5
Спрос q_3 на 3-й вид продукции	105	1	5
Спрос q_4 на 4-й вид продукции	52	1	5

Таблица 3

Множество недоминируемых точек, полученное при использовании модифицированной схемы

Индивид	Критерий 1	Критерий 2	Критерий 3
1	17 651,1	2 865,82	13 319,7
2	–220 710	6 731,14	28 831,6
3	–173 634	5 907,73	25 493,3
4	28 645,4	2 422,68	11 387
5	–235 182	6 883,09	29 430,4
6	–35 069	4 241,27	19 135,8
7	–213 140	6 684,59	28 683,7
8	–231 083	6 883,41	29 432
9	–227 021	6 882,91	29 458,3
10	–173 653	5 907,73	25 512,6

Таблица 4

Численная оценка эффективности алгоритмических схем

Показатель	Алгоритм		
	стандартный	гибридный	модифицированный
Рассеяние в пространстве переменных	0,358 66	0,345 72	0,367 05
Рассеяние в критериальном пространстве	0,465 80	0,452 56	0,482 81
Процент допустимых решений	53	50	49

Таблица 5

Лучшее решение по критерию 1

Показатель	Алгоритм		
	стандартный	гибридный	модифицированный
ЦФ	25 457,832 8	28 324,161 2	28 110,299 4
Среднее значение	15 295,634 6	17 172,468 3	23 540,264 3

Таблица 6

Лучшее решение по критерию 2

Показатель	Алгоритм		
	стандартный	гибридный	модифицированный
ЦФ	6 553,598 1	6 862,194 5	6 879,881 8
Среднее значение	6 050,898 8	6 626,671 6	6 651,650 5

Таблица 7

Лучшее решение по критерию 3

Показатель	Алгоритм		
	стандартный	гибридный	модифицированный
ЦФ	28 052,134 7	29 344,557 1	29 430,755 8
Среднее значение	25 997,153 7	28 388,298 3	28 567,095 6

Таким образом, приведенные данные позволяют рассчитывать на успешное применение генетических алгоритмов при анализе статических многопараметрических моделей как в линейной, так и в нелинейной постановке для решения задач поддержки принятия решений при управлении организационными системами.

Библиографические ссылки

1. Медведев А. В. Применение *z*-преобразования к исследованию многокритериальных линейных моделей регионального экономического развития : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008.

2. Медведев А. В., Победаш П. Н. Оптимизационная модель региона среднесрочного характера и ее численный анализ // Инновационные недра Кузбасса. IT-технологии : сб. науч. тр. Кемерово : ИНТ, 2008. С. 404–409.

3. Терновская М. А. Гибридный генетический алгоритм с двумя типами хромосом для решения сложных задач оптимизации : магистер. дис. / Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2010.

4. Zitzler E., Thiele L. Muptiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach // IEEE Trans. on Evolutionary Computation. San Diego, 1999.

5. Социально-экономическое положение Красноярского края в 2006 году : докл. № 1-1 / Террит. орган федер. службы гос. статистики по Краснояр. краю (Красноярскстат). Красноярск, 2007.

M. A. Gorbunov, A. V. Medvedev, E. S. Semenkin

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS TO COPE WITH A TASK OF ESTIMATION OF REGIONAL INDUSTRIAL POLITICS EFFECTIVE STRENGTH

In this article the the authors analyze the possibility of application of genetic algorithms to cope with tasks of optimization on an example of a problem of estimation of the regional industrial efficiency. A calculation comparison on the linear model of the region, made by means of genetic and simplex methods, is presented, and a possibility of application of the genetic methods to the model, in which the demand is prescribed to be a logistic curve, is described.

Keywords: main task of social-economic development of the region, mathematic model of the region, genetic algorithms.

© Горбунов М. А., Медведев А. В., Семенкин Е. С., 2011

УДК 621.314

Н. Н. Горяшин, А. А. Соломатова

ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В КВАЗИРЕЗОНАНСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ*

Проведен сравнительный анализ статических потерь в силовых полупроводниковых элементах традиционного преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией и квазирезонансного преобразователя с переключением ключевого элемента при нулевых значениях тока.

Ключевые слова: квазирезонансный преобразователь напряжения, статические потери мощности.

Одним из перспективных направлений в развитии импульсных преобразователей электроэнергии является применение резонансных контуров (РК) в цепи электронных ключей, которое позволяет распределить энергию между элементами РК внутри одного цикла коммутации и за счет этого осуществлять переключение при нулевом значении тока или напряжения, что позволяет повысить КПД и удельную мощность преобразователя. Под влиянием элементов РК форма тока и напряжения становится близкой к синусоидальной, благодаря чему снижаются потери на высших гармониках в магнитных компонентах фильтров и трансформаторов, а также уровень коммутационных помех [1; 2].

Однако несмотря на все достоинства резонансных и квазирезонансных преобразователей по сравнению с классическими импульсными преобразователями напряжения (ПН) с прямоугольной формой сигналов в силовой цепи и широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) пиковые значения тока и напряжения в резонансном цикле могут существенно превышать аналогичные показатели традиционных ПН, что в свою очередь повышает требования к предельным характеристикам полупроводниковых силовых компонентов. Если принять во внимание частотно-импульсный закон регулирования в ПН резонансного типа и зависимость эффективного тока, протекающего через полупроводниковые компоненты силовой части ПН от текущего режима (входных и входных тока и напряжения) и параметров РК, то в заданном диапазоне регулирования выходной величины ПН можно подобрать такие параметры, при которых статические потери будут минимальными.

Проведем сравнительный анализ статических потерь в полупроводниковых ключах традиционного ПН с ШИМ и квазирезонансного ПН с переключением ключевого элемента (КЭ) при нулевых значениях тока (ПНТ) (рис. 1).

Возможны два режима ПНТ [3] (рис. 2): в режиме ПНТ-1 используется половина волны тока резонансного цикла (рис. 2, *а*), в режиме ПНТ-2 – полная волна тока резонансного цикла (рис. 2, *б*). Режим ПНТ-1 реализуется в ПН, схема которого приведена на рис. 1. Для режима ПНТ-2 из этой схемы необходимо исключить диод VD1, чтобы обеспечить протекание тока в обратном направлении через обратный диод, шунтирующий МДП-транзистор.

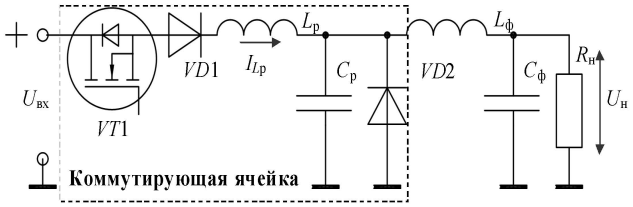


Рис. 1. Схема силовой части ПН с ПНТ:
$U_{вх}$ – входное напряжение; $VT1$ – МДП-ключ; $L_р$ и $C_р$ – индуктивность и емкость РК; $L_ф$ и $C_ф$ – индуктивность и емкость выходного фильтра; $R_н$ – сопротивление нагрузки

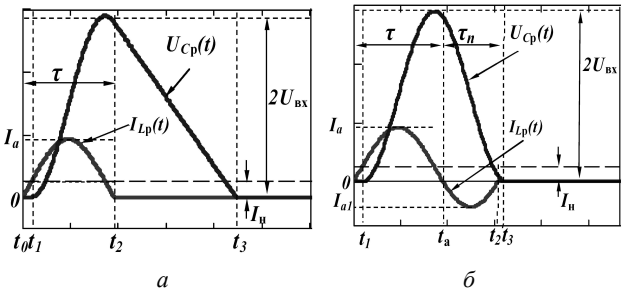


Рис. 2. Идеализированные сигналы в цепи РК ПН с режимами ПНТ-1 (*а*) и ПНТ-2 (*б*)

Каждый резонансный цикл работы ПНТ-преобразователя можно условно разбить на четыре временных интервала, функции тока и напряжения РК для которых описываются уравнениями, приведенными в табл. 1, при допущении, что ток дросселя выходного фильтра является постоянной величиной, равной току нагрузки в установившемся режиме $I_н$ [4].

Оценим статические потери в коммутирующих транзисторных и диодных элементах путем их сравнения с аналогичными потерями в классическом ПН с ШИМ с такой же топологией и жестким переключением КЭ при прочих равных условиях: входном и выходном напряжениях, токе нагрузки, используемой элементной базе.

*Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 года)» (проект № 2.1.2/9671) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

Таблица 1

Интервал времени	ПНТ-1	ПНТ-2
$0 \le t < t_1$	$I_{L_p}(t) = (U_{\text{вх}} / L_p)t,\ U_{C_p}(t) = 0,\ I_{\text{VD}}(t) = I_{\text{н}} - (U_{\text{вх}} / L_p)t,\ \Delta t_1 = t_1 = I_{\text{н}} L_p / U_{\text{вх}}$	
$t_1 \le t < t_2$	$I_{L_p}(t) = I_{\text{н}} + Z_0^{-1} U_{\text{вх}} \sin(\omega_0 (t - t_1)),$ $U_{C_p}(t) = U_{\text{вх}} (1 - \cos(\omega_0 (t - t_1))),$ $\Delta t_2 = t_2 - t_1 = \omega_0^{-1} [\pi + \arcsin(Z_0 I_{\text{н}} / U_{\text{вх}})]$	$I_{L_p}(t) = I_{\text{н}} + Z_0^{-1} U_{\text{вх}} \sin(\omega_0 (t - t_1)),$ $U_{C_p}(t) = U_{\text{вх}} (1 - \cos(\omega_0 (t - t_1))),$ $\Delta t_2 = t_2 - t_1 = \omega_0^{-1} [2\pi - \arcsin(I_{\text{н}} Z_0 / U_{\text{вх}})]$
$t_2 \le t < t_3$	$U_{C_p}(t) = -(t - t_2) I_{\text{н}} C_p^{-1} + U_{\text{вх}} (1 - \cos(\omega_0 (t_2 - t_1))),$ $I_{L_p}(t) = 0,$ $\Delta t_3 = t_3 - t_2 = I_{\text{н}}^{-1} C_p U_{\text{вх}} (1 - \cos(\omega_0 (t_2 - t_1)))$	$U_{C_p}(t) = U_{\text{вх}} \left[1 - \sqrt{1 - (Z_0 I_{\text{н}} / U_{\text{вх}})^2}\right] - I_{\text{н}} C_p^{-1} (t - t_2),$ $I_{L_p}(t) = 0,$ $\Delta t_3 = t_3 - t_2 = (I_{\text{н}} Z_0 \omega_0)^{-1} U_{\text{вх}} \left[1 - \sqrt{1 - (Z_0 I_{\text{н}} / U_{\text{вх}})^2}\right]$

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения: $Z_0 = (L_p / C_p)^{0,5}$ – волновое сопротивление РК; $\omega_0 = (L_p C_p)^{-0,5}$ – собственная частота РК.

При этом будем считать, что основную часть потерь мощности составляют потери на КЭ, которые в свою очередь существенно зависят от режима (ПНТ-1 или ПНТ-2), параметров РК и типов полупроводниковых ключей. Отсюда задачу анализа можно свести к поиску значения соотношения $P_{\text{КЭ ПНТ}} / P_{\text{КЭ ШИМ}}$ для интересующего нас диапазона нагрузок и входных напряжений, где $P_{\text{КЭ ШИМ}}$ – статическая мощность, рассеиваемая на КЭ в открытом состоянии в режиме ШИМ; $P_{\text{КЭ ПНТ}}$ – мощность, рассеиваемая на КЭ в открытом состоянии в режиме ПНТ. Тогда это отношение будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{P_{\text{КЭ ШИМ}}}{P_{\text{КЭ ПНТ}}} = \frac{\int_0^T U_{\text{о}}(t) \cdot I_{\text{ШИМ}}(t) dt}{\int_0^T U_{\text{о}}(t) \cdot I_{\text{ПНТ}}(t) dt}, \qquad (1)$$

где $U_{\text{о}}(t)$ и $I(t)$ – напряжение на КЭ в открытом состоянии и ток, протекающий через КЭ, соответственно; T – период преобразования. В случае использования в качестве ключа МДП-транзистора искомое соотношение находится так:

$$\frac{P_{\text{КЭ ШИМ}}}{P_{\text{КЭ ПНТ}}} = \frac{R_{\text{о}} \left(I_{\text{эф ШИМ}}\right)^2}{R_{\text{о}} \left(I_{\text{эф ПНТ}}\right)^2} = \left(\frac{I_{\text{эф ШИМ}}}{I_{\text{эф ПНТ}}}\right)^2, \qquad (2)$$

где $R_{\text{о}}$ – сопротивление открытого канала МДП-транзистора; $I_{\text{эф}}$ – эффективное значение тока, протекающего через устройство. Таким образом, для оценки отношения статических потерь достаточно знать соотношение эффективных значений токов.

В общем случае эффективное значение тока произвольной формы для периодического сигнала соответствует его среднеквадратичному значению [5].

Для ПН с ШИМ при условии, что форма тока имеет строго прямоугольную форму, эффективное значение этого тока может быть определено как

$$I_{\text{эф ШИМ}} = I_{\text{а}} \sqrt{\gamma}, \qquad (3)$$

где $\gamma = \tau / T \approx U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$, здесь τ – длительность открытого состояния КЭ, $I_{\text{а}} \approx I_{\text{н}}$ – амплитудное значение тока через МДП-ключ. Такое приближение возможно при $\Delta I_{L_{\text{ф}}} \le 2 I_{\text{н}}$ в установившемся режиме, где $\Delta I_{L_{\text{ф}}}$ – размах пульсаций тока дросселя выходного фильтра; $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки. Так, например, для $\Delta I_{L_{\text{ф}}} / I_{\text{н}} = 1$ отношение среднеквадратичных значений тока между строго прямоугольной и реальной формой импульса при $\gamma = 0{,}5$ равно 1,041.

Для определения эффективного значения тока КЭ в режиме ПНТ можно исходить из предположения, что положительная полуволна тока соответствует полуволне синусоиды с такой же амплитудой, по крайней мере при $0{,}75 > I_{\text{н}} Z_0 / U_{\text{вх}}$, учитывая необходимое условие выполнения режима ПНТ $0 < I_{\text{н}} Z_0 / U_{\text{вх}} < 1$ [2; 4]. Тогда упрощенное выражение, описывающее форму тока КЭ для режима ПНТ-1 и положительной полуволны тока для режима ПНТ-2, можно записать в виде

$$I_{L_p}(t) = \begin{cases} (I_{\text{н}} + U_{\text{вх}} / Z_0) \sin(t\pi / \tau), 0 \le t \le \tau, \\ 0, t_{\text{и}} < t \le f_{\text{к}}^{-1}. \end{cases} \qquad (4)$$

Основные расчетные соотношения по определению эффективного значения тока КЭ для обоих режимов ПНТ представлены в табл. 2.

Далее введем параметр, показывающий отношение эффективного значения тока КЭ в режиме ШИМ к эффективному значению тока исследуемых резонансных режимов при прочих равных условиях, определив этот параметр как функцию от тока нагрузки:

$$M_{\text{отн КЭ}}(I_{\text{н}}) = \frac{I_{\text{эф ШИМ}}(I_{\text{н}})}{I_{\text{эф ПНТ}}(I_{\text{н}})} = \sqrt{\frac{{I_{\text{а}}}^2 \gamma}{f_{\text{к}} \int_0^T \left[I_{L_{\text{р}}}(t)\right]^2 dt}}. \qquad (6)$$

Используя (3) и (4), получим

$$M_{\text{отн КЭ}}(I_{\text{н}}) \approx \frac{I_{\text{н}}}{(I_{\text{н}} + U_{\text{вх}} / Z_0)} \sqrt{\frac{2K(I_{\text{н}})}{f_0 \cdot \tau(I_{\text{н}})}}, \qquad (7)$$

где $K(I_{\text{н}})$ – коэффициент, рассчитанный в соответствии с (5).

Таблица 2

Параметр	ПНТ-1	ПНТ-2
$I_{эф}$	$I_{эф} = I_а\sqrt{0,5\tau / T}$	
$I_а$	$I_а = I_н + U_{вх} / Z_0$	
$I_{а_1}$	–	$I_{а_1} = I_н - U_{вх} / Z_0$
τ	$\tau = L_р I_н / U_{вх} + \left(\pi + \arcsin\left(I_н Z_0 / U_{вх}\right)\right)\omega_0^{-1}$	
τ_n	–	$\left(\pi - 2\arcsin\left(I_н Z_0 / U_{вх}\right)\right)\omega_0^{-1}$
T	$T = \frac{U_{вх} K_1\left(I_н\right)}{U_{вых} f_0}$	$T = \frac{U_{вх} K_2(I_н)}{U_{вых} f_0} \approx \frac{U_{вх}}{U_{вых} f_0}$
$J(I_н)$	$J(I_н) = I_н Z_0 / U_{вх}$	
K_U	$U_{C_р} / U_{вх} = (f_к / f_0) K_1(I_н)$	$U_{C_р} / U_{вх} = (f_к / f_0) K_2(I_н) \approx f_к / f_0$

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения: $I_{эф}$ – эффективное значение тока КЭ для режимов ПНТ-1 и ПНТ-2; $U_{C_р}$ – усредненное по времени значение напряжения на конденсаторе РК, равное выходному напряжению в установившемся режиме при условии идеальности выходного фильтра; K_U – коэффициент передачи по напряжению, где $K_1(I_н)$ и $K_2(I_н)$ – коэффициенты, зависящие от тока нагрузки $I_н$ для режимов ПНТ-1 и ПНТ-2 соответственно:

$$\begin{cases} K_1(I_н) = \frac{1}{2\pi}\left[\pi + 0,5J(I_н) + \arcsin\left(J(I_н)\right) + \left(1 + \sqrt{1 - \left(J(I_н)\right)^2}\right) J(I_н)^{-1}\right], \\ K_2(I_н) = \frac{1}{2\pi}\left[2\pi + 0,5J(I_н) - \arcsin\left(J(I_н)\right) + \left(1 - \sqrt{1 - \left(J(I_н)\right)^2}\right) J(I_н)^{-1}\right]; \end{cases} \quad (5)$$

$f_к$ – частота коммутации; $f_0 = \omega_0$, параметры $I_а$, $I_{а_1}$, τ, τ_n определены на рис. 2

С учетом того, что режимы ПНТ-1 и ПНТ-2 имеют граничное условие по максимальному току нагрузки при прочих фиксированных параметрах $I_н Z_0 / U_{вх} = 1$ [3], определим теоретический предел функции (6) для обоих режимов ПНТ:

$$\left.\frac{I_{эф\,ШИМ}(I_н)}{I_{эф\,ПНТ}(I_н)}\right|_{\frac{I_н Z_0}{U_{вх}}=1} \approx 0,737. \quad (8)$$

Отношение между эффективными значениями тока через открытый канал МДП-ключа для режимов ПНТ и ШИМ в зависимости от тока нагрузки при параметрах, указанных в табл. 3, можно представить в виде соответствующих кривых (рис. 3). Для режима ПНТ-2 отрицательная полуволна тока течет через диод, шунтирующий МДП-ключ, поэтому отношение между эффективными значениями токов через шунтирующий диод и КЭ в режиме ШИМ определяется отдельно по формуле

$$M^*_{отн\,КЭ}(I_н) = \frac{I_{эф\,ШИМ}(I_н)}{I_{эф\,ПНТ*}(I_н)} \approx \approx \frac{I_н\sqrt{\gamma}}{\left(-I_н + U_{вх} / Z_0\right)\sqrt{\frac{\pi - 2\arcsin\left(Z_0 I_н / U_{вх}\right)}{4\pi \cdot U_{вх} / U_{вых}}}}. \quad (9)$$

Кривые на рис. 3 получены численным методом с использованием функции (6) (пунктирные линии) и функции (7) (сплошные линии). Следует отметить, что в рабочем диапазоне $I_н \le U_{вых} / Z_0$, где $U_{вых} / Z_0 = I_{max}$, функция (7), при выводе которой использован ряд приближений, дает высокое совпадение с точным значением на большей части графика, однако при более высоких значениях нагрузки, т. е. при отношении $I_н Z_0 / U_{вх}$, близкому к единице, расхождение графиков становится заметным. Таким образом, уточненный теоретический предел исходного отношения (8) будет равен 0,813.

Таблица 3

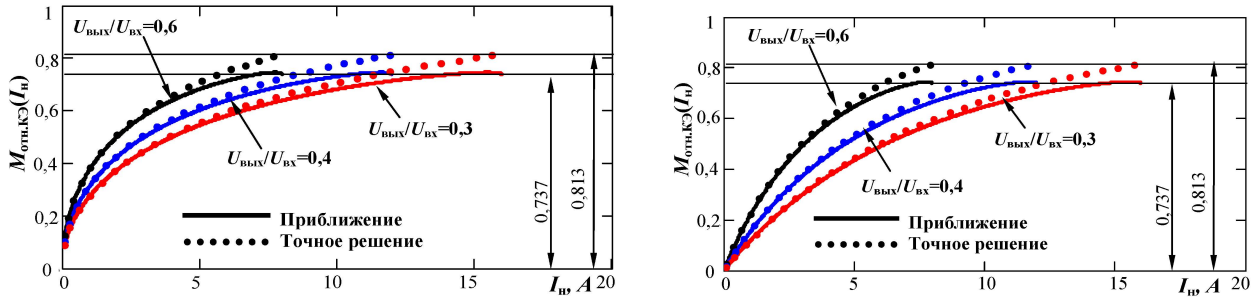
Параметр	$L_р$	$C_р$	$L_ф$	$C_ф$	$U_{вых}$
Значение	1,04 мкГн	22 нФ	45 мкГн	20 мкФ	24 В

Параметр, показывающий отношение между эффективными значениями тока через рекуперативный диод $I_{D_{эф}}$ для режимов ШИМ и ПНТ в зависимости от тока нагрузки при разных значениях коэффициента передачи в установившемся режиме (рис. 4), определим с помощью следующей формулы:

$$M_{отн\,VD}(I_н) = \frac{I_{D_{эф}ШИМ}(I_н)}{I_{D_{эф}ПНТ}(I_н)} = = \sqrt{\frac{I_а{}^2(1-\gamma)}{f_к \int_0^T \left[I_{D_{эф}ПНТ}(t)\right]^2 dt}}. \quad (10)$$

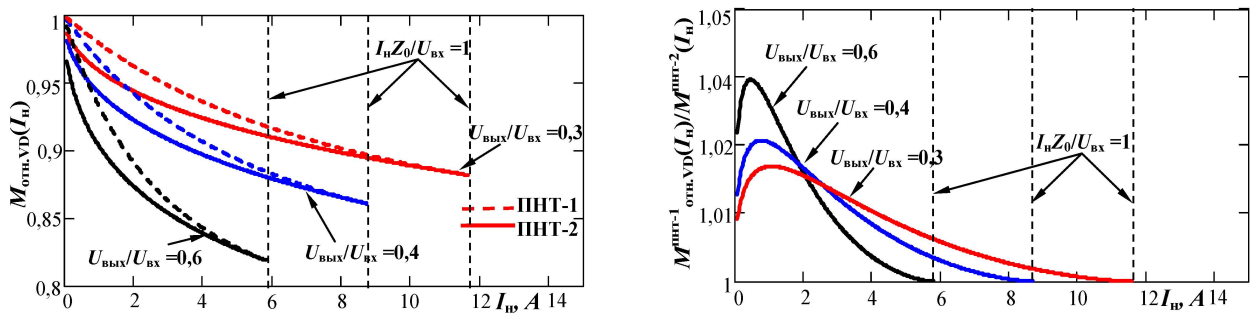
Анализ графиков, приведенных на рис. 4, показывает, что статические потери на рекуперативном диоде для режимов ПНТ-1, ПНТ-2 и ШИМ имеют близкие значения при прочих равных условиях. Это объясняется тем, что форма тока во всех случаях имеет схожий характер. Таким образом, для обоих режимов ПНТ можно ввести следующее допущение:

$$(t_3 - t_1) f_к \approx U_{вых} / U_{вх}.$$



а *б*

Рис. 3. Кривые зависимости $M_{отн\ КЭ}(I_н)$ для режимов ПНТ-1 (*а*) и ПНТ-2 (*б*)



а *б*

Рис. 4. Зависимость отношения эффективных значений токов, протекающих через рекуперативный диод, для режимов ПНТ (*а*) и ШИМ (*б*)

На основании полученных выше результатов можно сделать два вывода:

– статические потери на КЭ в обоих режимах ПНТ выше аналогичных потерь в традиционном ПН с ШИМ при прочих равных условиях, а их отношение $M_{отн}$ имеет предел, который не зависит от параметров РК, коэффициента передачи, тока нагрузки и типа режима ПНТ;

– статические потери на КЭ для двух режимов ПНТ будут тем ближе к аналогичным потерям в классическом ПН при прочих равных условиях, чем $I_нZ_0/U_{вх}$ будет ближе к единице. Однако в реальных условиях невозможно обеспечить выполнение даже приближенного равенства $I_нZ_0/U_{вх} \approx 1$, так как ПН постоянного тока обычно применяются в условиях изменения напряжения первичного источника электропитания и тока нагрузки. В свою очередь выходное напряжение остается стабильным за счет замкнутого регулирования выходной величины, при этом требования к отклонению выходной величины могут быть от единиц до сотых долей процента.

Таким образом, дальнейший анализ будет сводиться к сравнению статических потерь на КЭ между исследуемыми типами ПН в широком диапазоне регулирования, т. е. к оценке разницы между статическими потерями КЭ при максимальном и минимальном входном напряжении и фиксированном значении тока нагрузки I_{const} и при максимальном и минимальном выходном токе и фиксированном значении входного напряжения U_{const}. В этом случае максимальное значение тока нагрузки будет $I_{max} = U_{const}/Z_0$.

Произведем замену аргумента в функции $J(I_н)$ (см. табл. 1) на I_{max}:

$$J^* = J(I_{max}) = \frac{Z_0}{U_{вх}} \cdot \frac{U_{const}}{Z_0} = U_{const}/U_{вх}, \quad (11)$$

где $0 < J^* < 1$.

При фиксированном значении входного напряжения $U_{вх}$ и меняющемся токе нагрузки $I_н$ в качестве аргумента функции (11) можно использовать минимальное входное напряжение $U_{min} = I_{const}/Z_0$:

$$J^* = J(U_{min}) = \frac{Z_0}{I_{const}} \cdot \frac{I_н}{Z_0} = I_н / I_{const}. \quad (12)$$

Таким образом, разница между J^* и J состоит в том, что J^* вычисляется при фиксированном токе нагрузки или при фиксированном входном напряжении.

Функция (7) с использованием (11) и (12) для режимов ПНТ-1 и ПНТ-2 может быть определена как

$$M_{max\ КЭ\ ПНТ\text{-}1}(J^*) = \frac{1}{1+(J^*)^{-1}} \sqrt{\frac{4\pi K_1(J^*)}{\pi + \arcsin(J^*) + J^*}}, \quad (13)$$

$$M_{max\ КЭ\ ПНТ\text{-}2}(J^*) = \frac{1}{1+(J^*)^{-1}} \sqrt{\frac{4\pi K_2(J^*)}{\pi + \arcsin(J^*) + J^*}}, \quad (14)$$

где $K_1(J^*)$ и $K_2(J^*)$ – коэффициенты передачи для обоих режимов ПНТ в соответствии с (5) для аргу-

мента J^*. Выражения (13) и (14) показывают зависимость эффективных значений токов, проходящих через КЭ, для обоих режимов ПНТ по отношению к эффективному току для режима с ШИМ.

Для того чтобы оценить статические потери при протекании отрицательной полуволны тока через шунтирующий КЭ диод в режиме ПНТ-2, можно воспользоваться всеми рассмотренными ранее допущениями и выкладками. Тогда, подставляя (11) или (12) в (9), получим:

$$M^*_{\max\,\text{КЭ}}(J^*) = \frac{1}{\left(J^*\right)^{-1} - 1}\sqrt{\frac{4\pi K_2\left(J^*\right)}{\pi - 2\arcsin(J^*)}}. \quad (15)$$

Таким образом, мы получили формулы (7), (9) в универсальном виде (13)…(15), т. е. без включения внутренних параметров исследуемых ПН, что позволяет сделать некоторые обобщенные оценки по статическим потерям на КЭ для любых условий и параметров в пределах условий реализации режима ПНТ.

Для того чтобы сравнить статические потери на КЭ между режимами ПНТ-1 и ПНТ-2, необходимо найти отношение потерь только на КЭ, так как разница между статическими потерями на рекуперативном диоде для этих режимов несущественна. Тогда отношение статических потерь на КЭ для режимов ПНТ-1 и ПНТ-2 при прочих равных условиях с учетом статических потерь на шунтирующем МДП-ключ диоде для режима ПНТ-2 может быть найдено как

$$P_{\text{отн ПНТ}} = \frac{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-1}}(J^*)^{-2}}{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-2}}(J^*)^{-2} + M^*_{\max\,\text{КЭ}}(J^*)^{-1}\times}, \quad (16)$$
$$\times\ U_D / \left(I_\text{a} R_\text{o}\sqrt{\gamma}\right)$$

где $U_D/(I_\text{a}R_\text{o}\gamma^{0,5})$ – коэффициент, который необходим, чтобы числитель каждого члена выражения был одинаковым, здесь U_D – прямое падение напряжения на шунтирующем диоде, $I_\text{a} = I_\text{н}$, γ – коэффициент заполнения для ПН с ШИМ при прочих равных условиях.

Чтобы определить выражение (15) как функцию от J^*, необходимо найти коэффициент заполнения как функцию от J^*.

Если выразить уравнение (11) как $U_\text{вх} = U_\text{min}/J^*$ и подставить его в формулу $\gamma = U_\text{вых}/U_\text{вх}$, то получим $\gamma(J^*) = J^* U_\text{вых}/U_\text{min}$ при фиксированном значении тока нагрузки и условии, что выражение (11) справедливо. А если ввести $A_1 = ((U_\text{вых}/U_\text{min})^{0,5} I_\text{a} R_\text{o})/U_D$, где R_o – сопротивление канала МДП-транзистора в открытом состоянии, то уравнение (16) примет вид

$$P_{\text{отн ПНТ-1}}(J^*) = \frac{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-1}}(J^*)^{-2}}{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-2}}(J^*)^{-2} + \left(M^*_{\max\,\text{КЭ}}(J^*)\cdot A_1\sqrt{J^*}\right)^{-1}}. \quad (17)$$

Функция (17) показывает отношение статических потерь на КЭ в режиме ПНТ-1 к аналогичным потерям в режиме ПНТ-2 с учетом потерь на шунтирующем МДП-ключ диоде.

При фиксированном входном напряжении, когда справедливо равенство (12), функция (17) примет вид

$$P_{\text{отн ПНТ-2}}(J^*) = \frac{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-1}}(J^*)^{-2}}{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-2}}(J^*)^{-2} + \left(M^*_{\max\,\text{КЭ}}(J^*)\cdot A_2\sqrt{J^*}\right)^{-1}}, \quad (18)$$

где $\gamma = \text{const}$; $A_2 = (I_\text{max} R_\text{o}\gamma^2)/U_D$. Выражение для A_2 получено подстановкой $I_\text{н} = I_\text{a} = J^* I_\text{max}$ в $U_D/(I_\text{a}R_\text{o}D^{0,5})$.

При использовании понижающего ПН с режимом ПНТ-1 необходимо учитывать статические потери на диоде, включенном последовательно с МДП-ключом. Тогда уравнения (17) и (18) примут вид

$$P_{\text{отн ПНТ-1}}(J^*) = \frac{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-1}}(J^*)^{-2} + \left(M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-1}}(J^*)\cdot A_1\sqrt{J^*}\right)^{-1}}{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-2}}(J^*)^{-2} + \left(M^*_{\max\,\text{КЭ}}(J^*)\cdot A_1\sqrt{J^*}\right)^{-1}}, \quad (19)$$

$$P_{\text{отн ПНТ-2}}(J^*) = \frac{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-1}}(J^*)^{-2} + \left(M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-1}}(J^*)\cdot A_2\sqrt{J^*}\right)^{-1}}{M_{\max\,\text{КЭ ПНТ-2}}(J^*)^{-2} + \left(M^*_{\max\,\text{КЭ}}(J^*)\cdot A_2\sqrt{J^*}\right)^{-1}}. \quad (20)$$

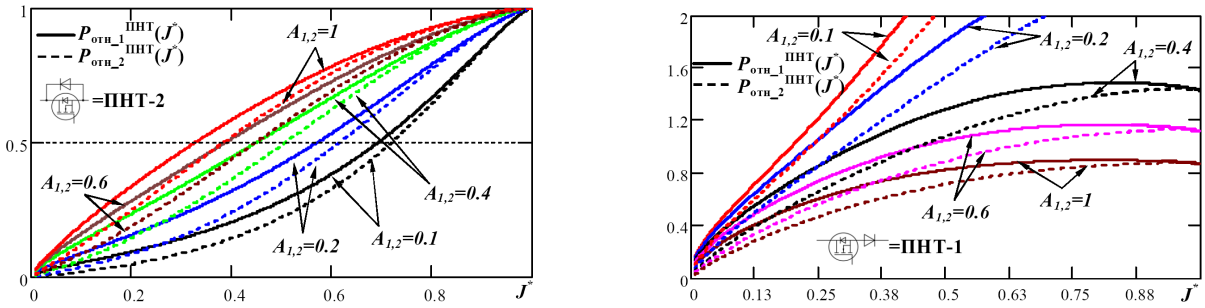
Если шунтирующий диод для режима ПНТ-2 и последовательный диод для режима ПНТ-1 различны, то коэффициент A необходимо пересчитать отдельно для числителя и знаменателя функций (19) и (20).

Совокупность кривых при разных значениях коэффициента A для функций (17), (18) и (19), (20) приведена ниже (рис. 5).

Все представленные выше вычисления приводились при допущении, что $\Delta I_{L_\text{ф}} << 2I_\text{н}$ в установившемся режиме, при этом точность предложенного метода сравнительной оценки будет снижаться с приближением соотношения $0{,}5\cdot\Delta I_{L_\text{ф}}/I_\text{н}$ к единице.

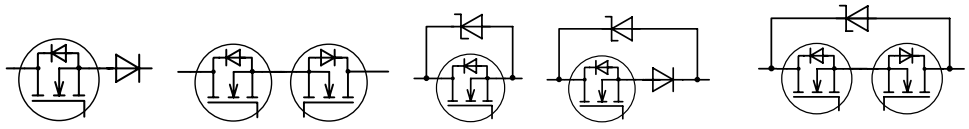
Для сравнения режимов ПНТ-1 и ПНТ-2 по статическим потерям мощности необходимо, чтобы другие виды потерь в двух сравниваемых ПН имели одну и ту же природу при прочих равных условиях. Как показали экспериментальные исследования, в режиме ПНТ-2 следствием протекания отрицательной полуволны тока через встроенный в МДП-ключ диод является процесс его обратного восстановления, что приводит к возникновению дополнительных динамических потерь. Типовым решением для устранения этого процесса является шунтирование МДП-ключа диодом с барьером Шоттки, рассчитанным на такое же блокирующее напряжение, что и МДП-ключ. Эксперимент, в котором были использованы МДП-ключ и диод Шоттки с блокирующим напряжением 150 В, показал, что полностью устранить процесс обратного восстановления встроенного диода не удается.

В ходе эксперимента были получены кривые КПД для разных вариантов КЭ (рис. 6) для обоих режимов ПНТ с параметрами элементов, представленными в табл. 3, при изменении J^* (рис. 7).



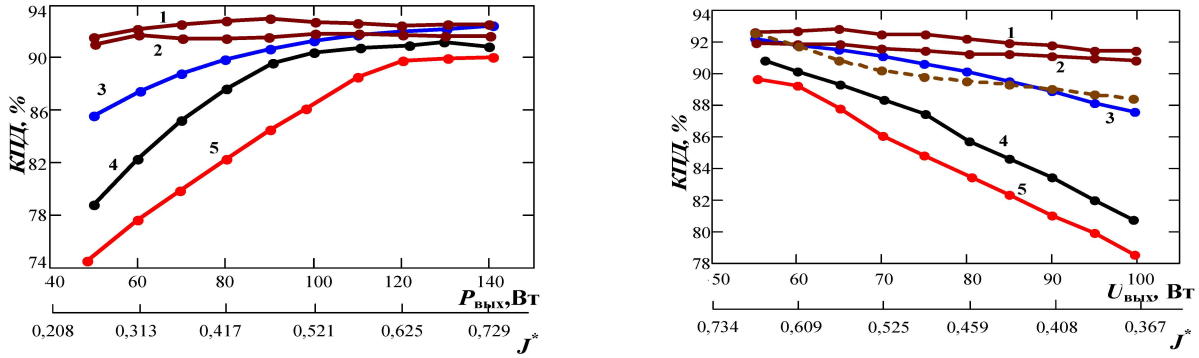
а *б*

Рис. 5. Теоретические кривые отношения статических потерь на КЭ между режимами ПНТ-1 и ПНТ-2:
а – для функций (17) и (18); *б* – для функций (19) и (20)



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 6. Варианты КЭ на основе МДП-транзисторов для режимов
ПНТ-1 (*а*, *б*) и ПНТ-2 (*в*, *г*, *д*)



а *б*

Рис. 7. Кривые КПД ПН с ПНТ с разными вариантами КЭ:
а – при фиксированном входном напряжении $U_{вх}$ = 55 В; *б* – фиксированном выходном токе $I_н$ = 5,34 А
(пунктиром показана кривая КПД снятая для традиционного последовательного ПН с ШИМ с частотой коммутации 470 КГц)

Кривые *1* и *2* построены для режима ПНТ-1 с КЭ, приведенными на рис. 6, *а* и *б* соответственно, кривая *3* – для режима ПНТ-2 с КЭ с шунтирующим диодом Шоттки (рис. 6, *д*), кривые *4* и *5* – для режима ПНТ-2 с КЭ, приведенным на рис. 6, *в*, и КЭ в виде одного МДП-ключа (рис. 6, *г*). Максимальная частота коммутации составила 500 КГц при минимальном входном напряжении и максимальной выходной мощности для обоих режимов ПНТ. В эксперименте использовались диоды Шоттки 10CTQ150 и МДП-транзисторы IRFB61N15D.

Кривые *3*, *4* и *5* показывают, что введение диода Шоттки ослабляет процесс обратного восстановления встроенного диода МДП-ключа, но не исключает его полностью. При возрастании параметра J^* значения кривых КПД становятся близкими друг к другу, особенно кривых *1* и *3*, различие между которыми определяется только статическими потерями КЭ. Ранее было отмечено, что чем ближе J^* к единице, тем меньше разница в статических потерях между режимами ПНТ-1 и ПНТ-2, и эта разница в идеальном случае, т. е. при идентичности всех элементов, будет равна нулю при $J^* = 1$. Таким образом, наиболее привлекательным типом КЭ для режима ПНТ-1 является КЭ на рис. 6, *б*, а для режима ПНТ-2 – КЭ на рис. 6, *д*.

В заключении представим теоретические и экспериментальные кривые, определяемые выражениями (19), (20), которые были построены для фиксированного входного напряжения $U_{вх}$ = 55 В и фиксированного выходного тока $I_н$ = 5,34 А (рис. 8).

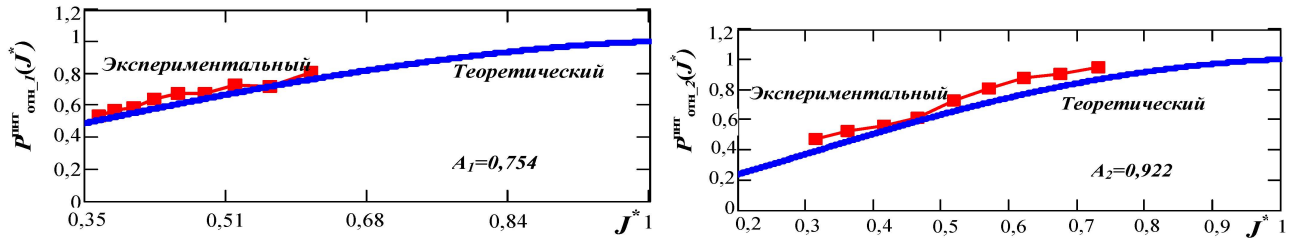


Рис. 8. Теоретические и экспериментальные кривые, полученные по выражениям (19), (20), для фиксированного входного напряжения $U_{вх} = 55$ В и фиксированного выходного тока $I_н = 5{,}34$ А

Экспериментальные кривые были получены для КЭ, изображенных на рис. 6, *б* и *д*, для режимов ПНТ-1 и ПНТ-2 соответственно.

Экспериментальные кривые на рис. 8 близки к теоретическим во всем диапазоне измерений, что подтверждает предложенный в данной статье подход к сравнительной оценке статических потерь, который позволяет оценивать разницу статических потерь на КЭ между режимами ПНТ-1 и ПНТ-2 при различных условиях, определяемых одним показателем *A*. Необходимо также отметить, что КЭ для каждого из исследуемых режимов ПНТ различаются (см. рис. 6), и если исключить процесс обратного восстановления встроенного в МДП-ключ диода в режиме ПНТ-2, то его КПД может быть выше, чем КПД диода в режиме ПНТ-1 для диапазона $m < J^* < 1$, где m – значение J^* при $P_{отн\ ПНТ} = 1$ (см. рис. 5).

В данной статье предложен метод сравнительной оценки статических потерь мощности на КЭ традиционного ПН с ШИМ и последовательного квазирезонансного ПН с переключением при нулевых значениях тока, который показал, что:

– статические потери КЭ в ПН с ПНТ больше, чем в традиционном ПН с ШИМ, а их отношение имеет предел, который не зависит от параметров РК;

– в случае когда входное и выходное напряжения и ток нагрузки проектируемого ПН стабильны или изменяются незначительно, параметры РК должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить параметр J близким к единице, при этом достигается минимум статических потерь на КЭ;

– если диапазон регулирования существенный, т. е. когда параметр J^* изменяется более чем на 10 %, то статические потери на КЭ для режима ПНТ-2 могут быть значительно больше по сравнению с режимом ПНТ-1 при идентичных КЭ. С другой стороны, в режиме ПНТ-1 диапазон изменения частоты определяется как диапазоном токов нагрузки, так и входным напряжением.

Таким образом, квазирезонансный ПН с частотно-импульсной модуляцией, работающий в режимах ПНТ-1 и ПНТ-2, может иметь преимущество по КПД и удельной мощности в широком диапазоне регулирования по сравнению с традиционным ПН с ШИМ при прочих равных условиях, когда динамические потери КЭ при жестком режиме переключения будут больше, чем статические потери в режиме ПНТ при минимальном возможном параметре J^* и минимальной частоте преобразования.

Представленный метод может быть полезен при проектировании импульсного высокочастотного стабилизированного источника питания, когда возникает необходимость в выборе типа преобразователя напряжения между традиционным ПМ с ШИМ и ПН с режимом ПНТ-1 или ПНТ-2.

Библиографические ссылки

1. Abu-Qahouq J., Batarseh I. Unified Steady-State Analysis of Soft-Switching DC-DC Converters // IEEE Trans. Power Electronics. 2002. Vol. 17, № 5. P. 684–691.

2. Mammano R. Resonant Mode Converter Topologies // Unitrode Power Supply Design Seminar. New York, 1988. Topic 1. P. 1–12.

3. Анализ режимов работы квазирезонансного преобразователя напряжения / Н. Н. Горяшин и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2011. Вып. 4. С. 7–13.

4. Erickson R. W. Fundamentals of Power Electronics. 1st ed. New York : Chapman and Hall, 1997.

5. Окснер Э. С. Мощные полевые транзисторы и их применение : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1985.

N. N. Goryashin, A. A. Solomatova

ESTIMATION OF AGGREGATED LOSSES OF POWER IN A QUASI-RESONANT CONVERTER

The authors present a comparative analysis of aggregated losses of power in semiconductive elements of the traditional power converter with pulse-time modulation and quasi-resonant converter with zero-current key switching.

Keywords: quasi-resonant converter, zero-current key switching, aggregated losses of power.

© Горяшин Н. Н., Соломатова А. А., 2011

УДК 621.314

Н. Н. Горяшин, А. Ю. Хорошко

О ПОВЫШЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С РЕЗОНАНСНЫМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ*

Рассмотрены проблемы повышения эффективности преобразователя с широтно-импульсной модуляцией и коммутацией ключевого элемента при нулевых значениях напряжения для автономной системы электроснабжения космического аппарата.

Ключевые слова: преобразователь напряжения с резонансным переключением.

Автономные системы электроснабжения (СЭС) различного назначения, в том числе и СЭС космических аппаратов (КА), как правило, представляют собой сложный комплекс из источников электроэнергии, преобразующих и распределительных устройств, объединенных в систему автоматического регулирования и предназначенных для обеспечения потребителей электроэнергией необходимого качества.

В настоящее время в качестве вторичных источников электропитания СЭС КА используются широко распространенные преобразователи напряжения (ПН) с прямоугольной формой тока и напряжения ключевого элемента (КЭ) и управлением посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Дальнейшее улучшение энергетических характеристик таких преобразователей связано с совершенствованием элементной базы: повышением быстродействия КЭ и уменьшением падения напряжения на КЭ в открытом состоянии. Однако увеличение скорости изменения напряжения на коллекторе (стоке) полупроводникового КЭ приведет к увеличению коммутационных помех, наложенных на выходное напряжение импульсного преобразователя [1]. Разрешить эту проблему можно за счет введения в силовую часть схемы различных демпфирующих цепей, что повлечет за собой дополнительные потери энергии. Таким образом, для уменьшения потерь на переключение и потерь от коммутационного шума КЭ следует переключать в моменты нулевых значений тока или напряжения. Эти режимы возникают при резонансных колебаниях в цепях с КЭ [2–4].

Преобразователи напряжения, в которых используются резонансные колебания, можно разделить на три типа: резонансные, квазирезонансные с частотно-импульсной модуляцией [2] и преобразователи с резонансным переключением и ШИМ [3; 4].

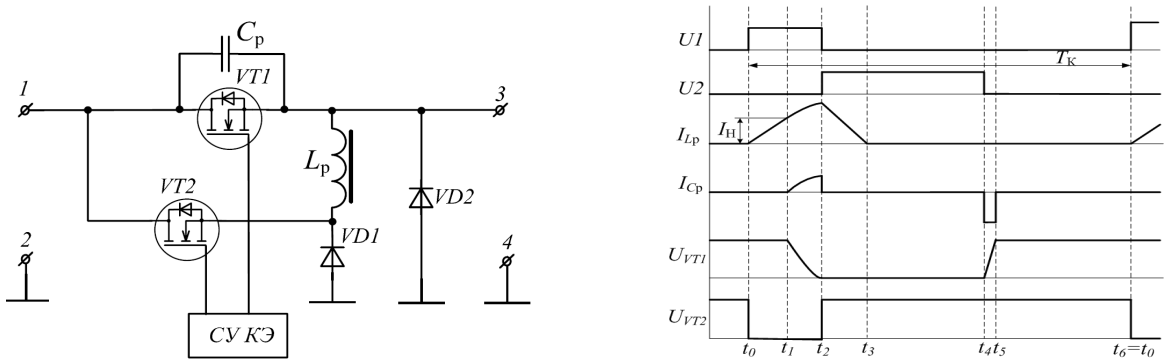
Диапазон изменения значений входного напряжения и выходного тока ПН первых двух типов строго ограничен, поскольку выход за его пределы приводит к срыву резонансного цикла и, как следствие, к значительному увеличению потерь на КЭ. Как правило, указанный диапазон для СЭС КА шире установленных ограничений и именно по этой причине применение преобразователей с недостаточным разрешенным диапазоном входного напряжения и выходного тока в роли источников вторичного электропитания космических аппаратов не всегда возможно.

Этого недостатка лишены ПН с ШИМ и резонансным переключением (рис. 1). В целом их можно рассматривать как классические ШИМ-преобразователи с добавленными резонансным контуром (РК) и вспомогательной цепью коммутации для организации так называемого мягкого переключения, т. е. переключения с минимизированными динамическими потерями. Вспомогательный ключ таких ПН работает только в одном из фронтов переключения основного ключа и служит для минимизации его динамических потерь. Минимизация потерь по второму фронту переключения обеспечивается с помощью одного из элементов РК. За счет того что РК работает относительно небольшую часть периода, функционирование таких ПН возможно в более широком диапазоне входных напряжений и выходных токов по сравнению с резонансными и квазирезонансными преобразователями.

Главным недостатком ПН с ШИМ и резонансным переключением является большее число дополнительных элементов, в частности наличие вспомогательного ключа, приводящего к появлению дополнительных потерь мощности в элементах вспомогательной цепи. По этой причине сложно обеспечить высокий КПД в точке энергетически значимого режима, т. е. режима, при котором ПН работает основную часть времени на номинальную нагрузку, а также сохранить требуемый минимальный КПД во всем рабочем диапазоне регулирования.

Резонансный коммутирующий элемент (РКЭ) одного из таких преобразователей (рис. 1, *а*) работает следующим образом [3; 4]. В момент времени t_0 (рис. 1, *б*) открывается МДП-ключ VT2 и начинается процесс накопления энергии в индуктивности РК $L_р$. В момент времени t_1 ток $L_р$ достигает значения тока дросселя выходного фильтра и происходит заряд конденсатора РК $C_р$. По завершению данного процесса, т. е. в момент времени t_2, на основной ключ VT1 подается отпирающий импульс, при этом вспомогательный ключ VT2 закрывается. Ключ VT1 открывается при нулевом значении напряжения, а ключ VT2 запирается при протекании через него тока, превышающего значение выходного тока. После прохождения импульса управления основного ключа VT1 скорость нарастания напряжения ограничивается за счет емкости РК.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (государственный контракт № 14.740.11.1124).



а *б*

Рис. 1. Схема РКЭ ШИМ-преобразователя с переключением при нулевых значениях напряжения (*а*) и упрощенные временные диаграммы его работы (*б*):
СУ КЭ – система управления ключевым элементом

Если считать пульсации тока дросселя выходного фильтра нулевыми, то временные интервалы, на которые разбивается один цикл работы ШИМ-преобразователя с переключением при нулевых значениях напряжения, могут быть описаны соотношениями [3]:

$$t_0 \le t < t_1,\ \begin{cases} I_{L_\text{р}}(t) = \dfrac{U_\text{вх}}{L_\text{р}} \cdot t, \\ U_{C_\text{р}}(t) = U_\text{вх}, \\ \Delta t_1 = t_1 - t_0 = \dfrac{M}{Q\omega_0}, \end{cases} \quad (1)$$

$$t_1 \le t < t_2,\ \begin{cases} I_{L_\text{р}}(t) = I_\text{Н} + \dfrac{U_\text{вх}}{Z_0}\sin(\omega_0 \cdot (t - t_1)), \\ U_{C_\text{р}}(t) = U_\text{вх} \cdot \cos(\omega_0 \cdot (t - t_1)), \\ \Delta t_2 = t_2 - t_1 = \dfrac{\pi}{2\omega_0}, \end{cases} \quad (2)$$

$$t_2 \le t < t_3,\ \begin{cases} I_{L_\text{р}}(t) = I_\text{н} + \dfrac{U_\text{вх}}{Z_0} - \dfrac{U_\text{вх}}{L_p} \cdot (t - t_2), \\ \Delta t_3 = t_3 - t_2 = \dfrac{1}{\omega_0}\left[1 + \dfrac{M}{Q}\right], \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta t_4 = t_4 - t_3 = \frac{2\pi}{F_\text{к}\omega_0}\gamma_1 - (t_3 - t_2). \quad (4)$$

$$t_4 \le t < t_5,\ \begin{cases} U_{C_\text{р}}(t) = \dfrac{I_\text{н}}{C_\text{р}} \cdot (t - t_4), \\ \Delta t_5 = t_5 - t_4 = \dfrac{Q}{M\omega_0}, \end{cases} \quad (5)$$

где γ_1 – относительный коэффициент заполнения импульса управления основного ключа; $M = U_\text{вых}/U_\text{вх}$; $Q = R_\text{н}/Z_0$, здесь $R_\text{н}$ – сопротивление нагрузки, $Z_0 = (L_\text{р}/C_\text{р})^{0,5}$ – волновое сопротивление РК; $\omega_0 = (L_\text{р}C_\text{р})^{-0,5}$ – собственная частота РК; $U_\text{вх}$ и $U_\text{вых}$ – входное и выходное напряжение ПН соответственно; $F_\text{к} = f_\text{к}/f_0$, здесь $f_\text{к}$ – частота коммутации, $f_0 = \omega_0/2\pi$.

Зависимость выходного напряжения от входного напряжения и тока нагрузки при заданном значении регулирующей переменной γ определяется соотношением

$$U_\text{вых} = \left[\gamma_2 + \gamma_1 + \frac{F_\text{к}}{2\pi}\left(1 + \frac{I_\text{н}Z_0}{U_\text{вх}} - \frac{U_\text{вх}}{2I_\text{н}Z_0}\right)\right]U_\text{вх}, \quad (6)$$

где γ_2 – коэффициент заполнения импульса управления вспомогательного ключа, который должен выбираться для режима минимального входного напряжения и максимального выходного тока, так как именно в этом режиме требуется максимальная длительность вспомогательного импульса (интервал $t_0 < t < t_2$ на рис. 1, *б*) [4]:

$$\gamma_2 = \frac{F_\text{к}}{2\pi}\left(\frac{I_{\text{н max}}Z_0}{U_{\text{вх min}}} + \frac{\pi}{2}\right), \quad (7)$$

где $I_{\text{н max}}$ – максимальный ток нагрузки; $U_{\text{вх min}}$ – минимальное входное напряжение.

Однако дальнейший анализ показал, что соотношения (1)–(7) не учитывают влияния паразитных параметров элементов РКЭ (рис. 2) и, как следствие, экспериментальная кривая тока через индуктивность РК (рис. 2, *а*) отличается от теоретической (рис. 2, *б*) в интервале времени $t_3 < t < t_6$.

Для устранения этого недостатка в экспериментальные диаграммы были введены дополнительные интервалы, как показано на осциллограмме на рис. 2, *а*: $t_3 < t < t_3^*$, $t_3^* < t < t_5$, $t_5 < t < t_5^*$, $t_5^* < t < t_5^{**}$, соответствующие переходным процессам в паразитном РК, который образован индуктивностью РК и эквивалентной паразитной емкостью $C_\text{п}$, включающей в себя емкость стока-истока вспомогательного ключа VT2 и емкость диода VD1 (см. рис. 1, *а*). Процессы изменения тока в цепи РКЭ с учетом паразитного РК можно описать следующими соотношениями:

$$t_3 \le t < t_3^*,\ \begin{cases} I_{L_\text{р}}(t) = \dfrac{-U_\text{вх}}{Z_{0\text{п}}} \cdot \sin(\omega_{0\text{п}} \cdot (t - t_3)), \\ \Delta t_3^* = t_3^* - t_3 = \dfrac{\pi}{2 \cdot \omega_{0\text{п}}}, \end{cases} \quad (8)$$

$$I_{L_\text{р}}(t) = \frac{-U_\text{вх}}{Z_{0\text{п}}} \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{пVD2}}}{L_\text{р}} \cdot (t - t_3^*)\right),\ t_3^* \le t < t_5, \quad (9)$$

$$t_5 \le t < t_5^*,\ \begin{cases} I_{L_\text{р}}(t) = I_{L_\text{р}}(t_5) - (t - t_5)\cdot\dfrac{U_\text{вх}}{L_\text{р}}, \\ \Delta t_5^* = \dfrac{I_{L_\text{р}}(t_5)\cdot L_\text{р}}{U_\text{вх}}, \end{cases} \quad (10)$$

$$t_5^* \le t < t_5^{**},\ \begin{cases} I_{L_\text{р}}(t) = \dfrac{U_\text{вх}}{Z_{0\text{п}}}\cdot\sin(\omega_{0\text{п}}\cdot(t - t_5^*)), \\ \Delta t_5^{**} = t_5^{**} - t_5^* = \dfrac{\pi}{2\cdot\omega_{0\text{п}}}, \end{cases} \quad (11)$$

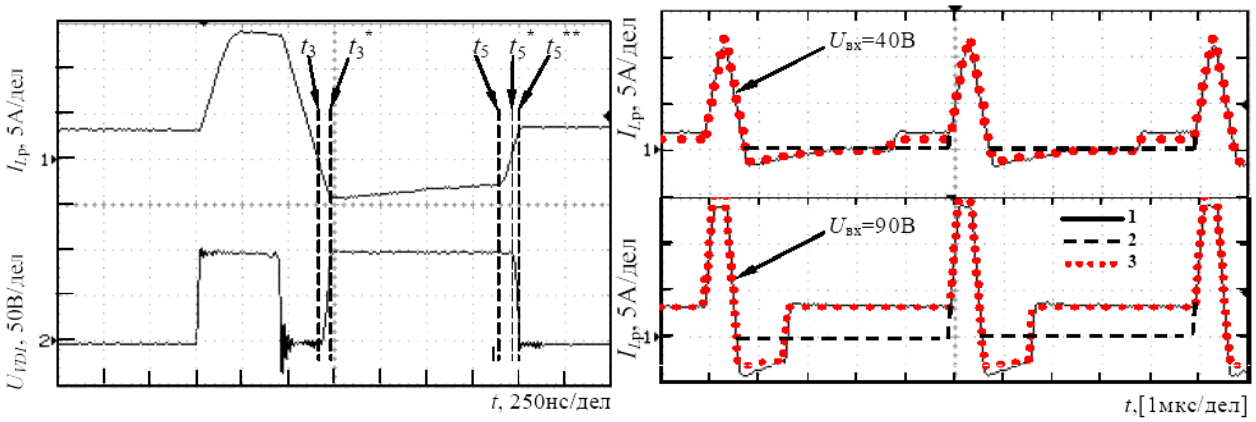
$$I_{L_\text{р}} = \frac{U_\text{вх}}{Z_{0\text{п}}},\ t_5^{**} \le t < t_{0+T_\text{к}}, \quad (12)$$

где $Z_{0\text{п}} = (L_\text{р}/C_\text{п})^{0,5}$; $\omega_{0\text{п}} = (L_\text{р}C_\text{п})^{-0,5}$.

Теоретические временные диаграммы тока индуктивности РК с учетом дополнительных соотношений (8)–(12) (рис. 2, *б*) имеют высокую степень совпадения с экспериментальными, что позволяет судить о справедливости предложенной модели. Из соотношений (8)–(12) также следует, что при физической реализации данного ПН паразитные компоненты полупроводниковых элементов вспомогательной цепи существенно изменяют режимы его работы по сравнению с идеализированными, как показано в [3; 4], что в свою очередь приводит к увеличению статических потерь во вспомогательной цепи РКЭ, образованной VD1, VT2 и $L_\text{р}$.

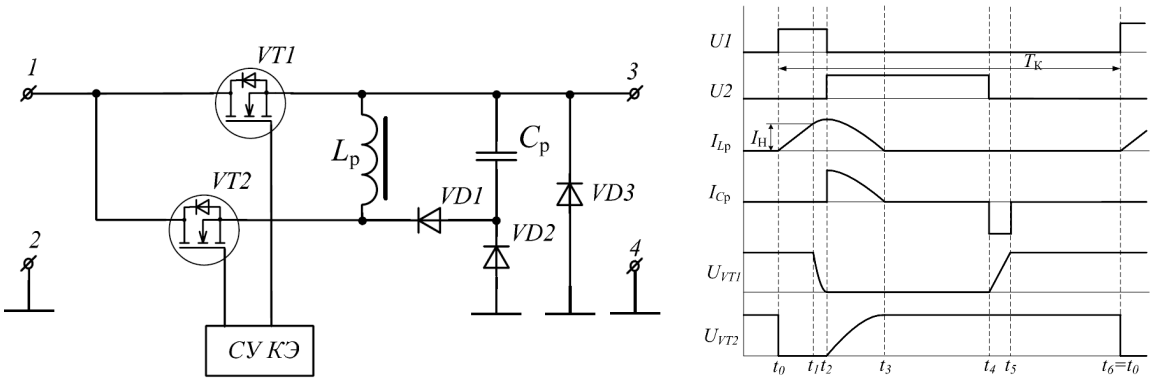
Динамические потери вспомогательного ключа VT2 рассматриваемого ПН превышают динамические потери классического ШИМ-преобразователя, так как вспомогательный ключ VT2 переключается в жестком режиме по обоим фронтам, а ток при его запирании значительно выше выходного тока ПН, что приводит к снижению его КПД. Таким образом, замена динамических потерь ключа исходного ШИМ-преобразователя статическими потерями вспомогательной цепи и динамическими потерями вспомогательного ключа при переходе к резонансному переключению РКЭ не приводит к ожидаемому снижению общих потерь.

Для уменьшения потерь во вспомогательной цепи был разработан модифицированный РКЭ, организующий мягкое переключение вспомогательного ключа во всем диапазоне работы ПН (рис. 3).



а *б*

Рис. 2. Экспериментальные (*а*) и теоретические (*б*) временные диаграммы токов и напряжений в цепи РКЭ:
1 – результат эксперимента; 2 – исходная математическая модель; 3 – уточненная математическая модель



а *б*

Рис. 3. Схема модифицированного РКЭ ШИМ-преобразователя с переключением
при нулевых значениях напряжения (*а*) и упрощенные временные диаграммы его работы (*б*)

Схожий принцип положен в основу ПН повышающего типа с ШИМ, описанного в [5].

В отличие от исходного РКЭ, емкость модифицированного РК ограничивает скорость запирания обоих ключей (рис. 3, *а*). Фаза заряда емкости РК перенесена на интервал времени $t_2 \le t < t_3$, за счет чего значительно снижено амплитудное значение тока через вспомогательный ключ VT2 (рис. 3, *б*). В данном РКЭ ток РК протекает через диоды VD1 и VD2, поэтому потери на диодах несколько выше, чем в исходном РКЭ.

Форма напряжения основного ключа модифицированной топологии ПН полностью совпадает с формой напряжения РКЭ на рис. 1, *а*, при условии, что в соотношения для интервала времени $t_1 \le t < t_2$ будет подставлена емкость РК, равная эквивалентной паразитной емкости $C_п$. По этой причине модифицированный РКЭ сохраняет все преимущества исходного, а для анализа и синтеза статических и динамических характеристик могут применяться одни и те же математические соотношения, описывающие формы токов и напряжений.

Длительность интервала времени $t_1 \le t < t_2$ определяется паразитным РК и для текущих условий его исключение приводит к погрешности определения выходного напряжения менее 1 %. А поскольку данный интервал влияет только на статическую характеристику, где такая точность, как правило, является достаточной, можно пользоваться упрощенным соотношением

$$U_{вых} = \left(\gamma_2 + \gamma_1 - \frac{f_к \cdot I_н}{U_{вх}} L_р + \frac{U_{вх} f_к}{I_н} C_р \right) \cdot U_{вх} . \quad (13)$$

Для сравнительной оценки энергетической эффективности исследуемого ПН был создан экспериментальный образец ПН (табл. 1, 2 и рис. 4) с возможностью реализации двух режимов с резонансным переключением (см. рис. 1 и 3) и режима с классическим ШИМ-преобразователем (рис. 5).

В ходе эксперимента были получены кривые КПД для исследуемых ПН (рис. 6).

Таблица 1

Параметр	C1	C2	C3	C4	L1	$f_к$	$U_{вых}$
Значение	100 мкФ	100 нФ	96 мкФ	5 мкФ	49 мкГн	330 кГц	27 В

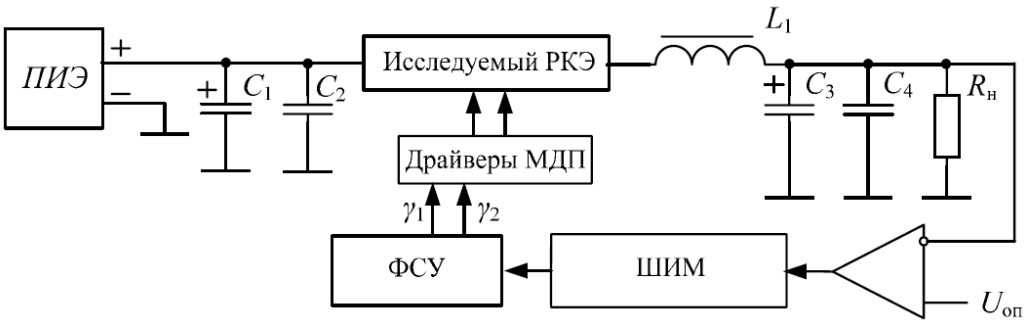


Рис. 4. Общая часть упрощенной электрической схемы эксперимента:
ФСУ – формирователь сигналов управления; ПИЭ – первичный источник электроэнергии;
ШИМ – широтно-импульсный модулятор

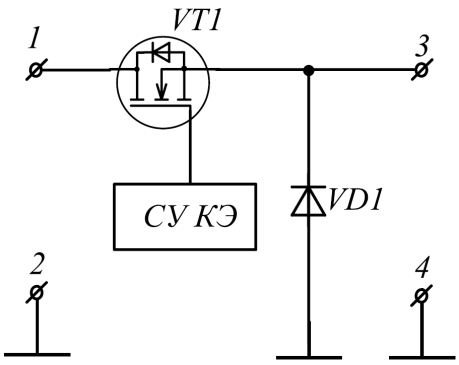
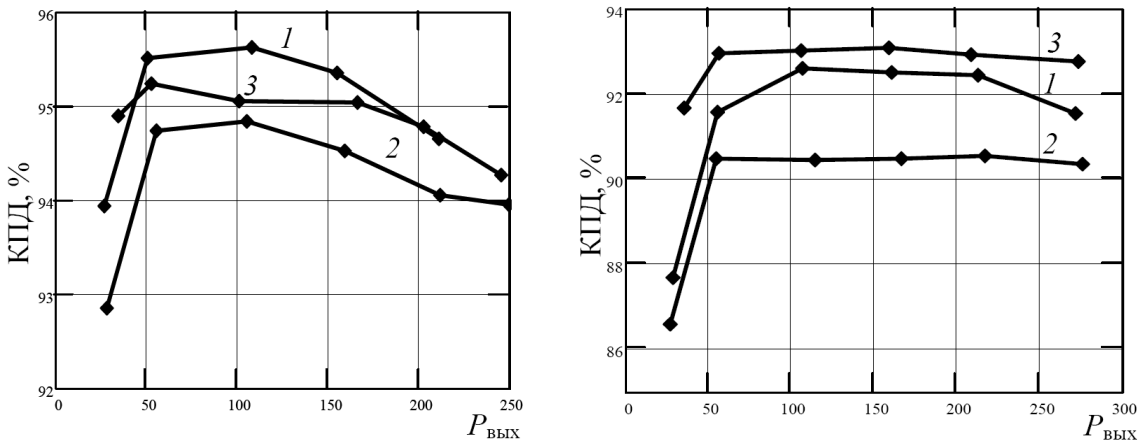


Рис. 5. Коммутирующая ячейка классического ШИМ-преобразователя

Таблица 2

Параметр	$L_р$	$C_р$ (см. рис. 1, *а*)	$C_р$ (см. рис. 3, *а*)	VT1, VT2	VD1–VD3
Значение	1,9 мкГн	1 нФ	4 нФ	IRFB260N	MBR20200CT



а *б*

Рис. 6. КПД преобразователей:
а – при $U_{вх}$ = 40 В; *б* – при $U_{вх}$ = 65 В; кривая *1* – классический ПН с ШИМ; кривая *2* – ПН с РКЭ (см. рис. 1, *а*); кривая *3* – модифицированный ПН с РКЭ (см. рис. 3, *а*)

Анализ этих кривых показал, что модифицированная топология ПН имеет наиболее высокий КПД из всех рассмотренных топологий при входном напряжении 65 В.

При понижении входного напряжения КПД этого ПН падает относительно других ПН, что связано с увеличением вклада потерь на диодах VD1 и VD2 в общие потери преобразователя.

Таким образом, преобразователь напряжения с ШИМ и резонансным переключателем целесообразно использовать совместно с аккумуляторной батареей (АБ) в качестве зарядно-разрядного устройства СЭС КА в таком режиме, при котором минимальное напряжение на АБ выше 40 В, по крайней мере при использовании силовых полупроводниковых компонентов, представленных в данной статье.

Библиографические ссылки

1. Characterization and Comparison of Noise Generation for Quasi-Resonant and Pulsedwidth-Modulated Converters / L. Hsiu, M. Goldman, R. Carlsten, et al. // IEEE Trans. Power Electronics. 1994. Vol. 9, № 4. P. 425–432.

2. Erickson R. W. Fundamentals of Power Electronics. 1st Ed. New York : Chapman and Hall, 1997.

3. Abu-Qahouq J., Batarseh I. Unified Steady-State Analysis of Soft-Switching DC-DC Converters // IEEE Trans. Power Electronics. 2002. Vol. 17, № 5. P. 684–691.

4. Abu-Qahouq J. Generalized Analysis of Soft-Switching DC–DC Converter Families // Tech. Rep. / Univ. Central Florida. Orlando, 2000.

5. Bodur H. A., Bakan F. New ZVT-PWM DC-DC Converter // IEEE Trans. Power Electronics. 2002. Vol. 17, № 1. P. 40–47.

N. N. Goryashin, A. Yu. Khoroshko

UPON EFFICIENCY OF INCREASE OF A POWER-TIME CONVERTER WITH A RESONANCE SWITCHING UNIT

The authors consider problems of increase of efficiency of a converter with pulse-width modulation and zero-voltage key switching for a satellite self-contained power-supply system.

Keywords: converter with a resonance switching unit.

© Горяшин Н. Н., Хорошко А. Ю., 2011

УДК 534.121.1

П. О. Деев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

Представлено решение задачи определения основной частоты колебаний трехслойной пластины, жестко закрепленной в центральной точке. Для решения динамической задачи применен обобщенный метод Галеркина. Получена формула для определения основной частоты колебаний трехслойной пластины, закрепленной в центральной точке.

Ключевые слова: трехслойная пластина, частота колебаний, обобщенный метод Галеркина.

Важным критерием эффективности конструкции трехслойной пластины является основная частота ее колебаний. Ниже будет представлено решение задачи определения основной частоты колебаний для трехслойной пластины, закрепленной в центральной точке.

Рассмотрим прямоугольную трехслойную пластину, в центре которой расположим начало декартовой системы координат xy. Размеры пластины по осям и обозначим $\overline{a}$ и $\overline{b}$ соответственно. В центральной точке отсутствуют прогиб и углы поворота касательных к координатным линиям x и y.

Получим вариационное уравнение изгибных колебаний пластины в предположении, что линии $x=0$ и $y=0$ являются линиями симметрии. В этом случае можно исследовать движение только четверти пластины.

Воспользуемся для получения уравнения колебаний принципом Гамильтона:

$$S=\int_{t_1}^{t_2}(T-U)dt, \tag{1}$$

где S – интеграл действия Гамильтона; t – время; (t_2-t_1) – интервал времени, в течение которого происходит движение четверти пластины; T – кинетическая энергия движения четверти пластины; U – потенциальная энергия изгиба четверти пластины: здесь T и U определяются следующим образом [1]:

$$T=\frac{1}{2}\omega^2 B_\rho\int_0^a\int_0^b w^2dxdy,$$

$$U=\int_0^a\int_0^b\left[D_{11}\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial x}\right)^2+2D_{12}\frac{\partial\theta_x}{\partial x}\frac{\partial\theta_y}{\partial y}+D_{22}\left(\frac{\partial\theta_y}{\partial y}\right)^2+\right.$$
$$\left.+D_{33}\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial y}+\frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right)^2+K_x\left(\theta_x+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+K_y\left(\theta_y+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]dxdy, \tag{2}$$

где $w=w(x,y)$ – прогиб пластины; $\theta_x=\theta_x(x,y)$, $\theta_y=\theta_y(x,y)$ – углы поворота нормали; D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}, D_{33} – изгибные жесткости трехслойной пластины $(D_{12}=D_{21})$; K_x, K_y – сдвиговые жесткости трехслойной пластины; B_ρ – инерциальный параметр. Функции w, θ_x и θ_y определяют форму трехслойной пластины при изгибных колебаниях.

Подставляя (2) в (1), получим

$$\int_0^a\int_0^b\left[\left(D_{11}\frac{\partial\theta_x}{\partial x}+D_{12}\frac{\partial\theta_y}{\partial y}\right)\delta\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial x}\right)+\left(D_{12}\frac{\partial\theta_x}{\partial x}+D_{22}\frac{\partial\theta_y}{\partial y}\right)\delta\left(\frac{\partial\theta_y}{\partial y}\right)+\right.$$
$$+D_{33}\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial y}+\frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right)\delta\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial y}+\frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right)+D_{33}\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial y}+\frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right)\delta\left(\frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right)+$$
$$+K_x\left(\theta_x+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta\theta_x+K_x\left(\theta_x+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)+ \tag{3}$$
$$\left.+K_y\left(\theta_y+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\delta\theta_y+K_y\left(\theta_y+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\delta\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)-\omega^2B_\rho w\delta w\right]dxdy.$$

Варьируя функционал (3), будем иметь

$$\int_0^a\int_0^b L\delta w dxdy-\int_0^b\left[Q_x\delta w\right]_0^a dy-\int_0^a\left[Q_y\delta w\right]_0^b dx=0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_x\delta\theta_x dxdy-\int_0^b\left[M_x\delta\theta_x\right]_0^a dy-\int_0^a\left[M_{xy}\delta\theta_x\right]_0^b dx=0, \tag{4}$$
$$\int_0^a\int_0^b L_y\delta\theta_y dxdy-\int_0^b\left[M_{xy}\delta\theta_y\right]_0^a dy-\int_0^a\left[M_y\delta\theta_y\right]_0^b dx=0,$$

где

$$L=K_x\frac{\partial^2w}{\partial x^2}+K_y\frac{\partial^2w}{\partial y^2}+K_x\frac{\partial\theta_x}{\partial x}+K_y\frac{\partial\theta_y}{\partial y}+B_\rho\omega^2w;$$
$$L_x=-K_x\frac{\partial w}{\partial x}+D_{11}\frac{\partial^2\theta_x}{\partial x^2}+D_{33}\frac{\partial^2\theta_x}{\partial y^2}-$$
$$-K_x\theta_x+(D_{12}+D_{33})\frac{\partial^2\theta_y}{\partial x\partial y}; \tag{5}$$
$$L_y=-K_y\frac{\partial w}{\partial y}+(D_{12}+D_{33})\frac{\partial^2\theta_x}{\partial x\partial y}+$$
$$+D_{33}\frac{\partial^2\theta_y}{\partial x^2}+D_{22}\frac{\partial^2\theta_y}{\partial y^2}-K_y\theta_y;$$
$$Q_x=K_x\left(\theta_x+\frac{\partial w}{\partial x}\right);$$
$$Q_y=K_y\left(\theta_y+\frac{\partial w}{\partial y}\right);$$

$$M_{xy} = D_{33}\left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x}\right);$$

$$M_x = D_{11}\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + D_{12}\frac{\partial \theta_y}{\partial y};$$

$$M_y = D_{12}\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + D_{22}\frac{\partial \theta_y}{\partial y}. \qquad (6)$$

Уравнения (4) являются основными вариационными уравнениями, которым должны удовлетворять собственные функции $w(x,y)$, $\theta_x(x,y)$ и $\theta_y(x,y)$, от которых зависит форма действительных изгибных колебаний трехслойной пластины.

Определение основной частоты колебаний трехслойной пластины, закрепленной в центральной точке, может быть выполнено и с помощью эффективных приближенных методов, одним из которых является обобщенный метод Галеркина. В рамках этого метода прогиб $w(x,y)$ и углы поворота $\theta_x(x,y)$ и $\theta_y(x,y)$ заменяются аналитическими выражениями, аппроксимирующими первую форму колебаний пластины вдоль осей x и y. В качестве выражений, задающих возможную первую форму пластины, закрепленной в центральной точке вдоль осей x и y, можно принять функции, полученные из решения задачи изгиба консольно закрепленной балки под действием постоянного давления.

Представим прогиб и углы поворота в следующем виде:

$$w = AU_x + BU_y + CU_xU_y,$$
$$\theta_x = DV_x + PV_xU_y, \qquad (7)$$
$$\theta_y = FV_y + TU_xV_y,$$

где A, B, C, D, P, F, T – неизвестные числа; $U_x(x)$, $V_x(x)$, $U_y(y)$, $V_y(y)$ – аппроксимирующие функции, которые задаются выражениями

$$U_x(x) = \frac{x}{a}\left[\frac{x^3}{a^3} - 4\frac{x^2}{a^2} + 6\frac{x}{a} - 12\gamma_x\left(\frac{x}{a} - 2\right)\right],$$

$$V_x(x) = \frac{x}{a}\left(\frac{x^2}{3a^2} - \frac{x}{a} + 1\right), \qquad (8)$$

$$U_y(y) = \frac{y}{b}\left[\frac{y^3}{b^3} - 4\frac{y^2}{b^2} + 6\frac{y}{b} - 12\gamma_y\left(\frac{y}{b} - 2\right)\right],$$

$$V_y(y) = \frac{y}{b}\left(\frac{y^2}{3b^2} - \frac{y}{b} + 1\right)$$

здесь

$$\gamma_x = \frac{D_{11}}{K_x a^2}, \quad \gamma_y = \frac{D_{22}}{K_y b^2}. \qquad (9)$$

Вариации функций прогиба и углов поворота будут иметь вид

$$\delta w = U_x\delta A + U_y\delta B + U_xU_y\delta C,$$
$$\delta\theta_x = V_x\delta D + V_xU_y\delta P, \qquad (10)$$
$$\delta\theta_y = V_y\delta F + U_xV_y\delta T.$$

Подставив (10) в (4), после группировки получим

$$\int_0^a\int_0^b LU_x\delta A\,dxdy - \int_0^b\left[Q_xU_x\delta A\right]_0^a dy - \int_0^a\left[Q_yU_x\delta A\right]_0^b dx +$$
$$+\int_0^a\int_0^b LU_y\delta B\,dxdy - \int_0^b\left[Q_xU_y\delta B\right]_0^a dy - \int_0^a\left[Q_yU_y\delta B\right]_0^b dx +$$
$$+\int_0^a\int_0^b LU_xU_y\delta C\,dxdy - \int_0^b\left[Q_xU_xU_y\delta C\right]_0^a dy -$$
$$-\int_0^a\left[Q_yU_xU_y\delta C\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_xV_x\delta D\,dxdy - \int_0^b\left[M_xV_x\delta D\right]_0^a dy -$$
$$-\int_0^a\left[M_{xy}V_x\delta D\right]_0^b dx + \int_0^a\int_0^b L_xV_xU_y\delta P\,dxdy - \qquad (11)$$
$$-\int_0^b\left[M_xV_xU_y\delta P\right]_0^a dy - \int_0^a\left[M_{xy}V_xU_y\delta P\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_yV_y\delta F\,dxdy - \int_0^b\left[M_{xy}V_y\delta F\right]_0^a dy - \int_0^a\left[M_yV_y\delta F\right]_0^b dx +$$
$$+\int_0^a\int_0^b L_yU_xV_y\delta T\,dxdy - \int_0^b\left[M_{xy}U_xV_y\delta T\right]_0^a dy -$$
$$-\int_0^a\left[M_yU_xV_y\delta T\right]_0^b dx = 0.$$

Учитывая произвольность вариаций δA, δB, δC, δD, δP, δF, δT, получим систему из семи разрешающих уравнений обобщенного метода Галеркина с естественными граничными условиями:

$$\int_0^a\int_0^b LU_x\,dxdy - \int_0^b\left[Q_xU_x\right]_0^a dy - \int_0^a\left[Q_yU_x\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b LU_y\,dxdy - \int_0^b\left[Q_xU_y\right]_0^a dy - \int_0^a\left[Q_yU_y\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_xV_x\,dxdy - \int_0^b\left[M_xV_x\right]_0^a dy - \int_0^a\left[M_{xy}V_x\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_yV_y\,dxdy - \int_0^b\left[M_{xy}V_y\right]_0^a dy - \int_0^a\left[M_yV_y\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b LU_xU_y\,dxdy - \int_0^b\left[Q_xU_xU_y\right]_0^a dy - \int_0^a\left[Q_yU_xU_y\right]_0^b dx = 0, \qquad (12)$$
$$\int_0^a\int_0^b L_xV_xU_y\,dxdy - \int_0^b\left[M_xV_xU_y\right]_0^a dy - \int_0^a\left[M_{xy}V_xU_y\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_yU_xV_y\,dxdy - \int_0^b\left[M_{xy}U_xV_y\right]_0^a dy - \int_0^a\left[M_yU_xV_y\right]_0^b dx = 0,$$

где

$$L = K_x\frac{d^2U_x}{dx^2}A + K_x\frac{d^2U_x}{dx^2}U_yC + K_y\frac{d^2U_y}{dy^2}B +$$

$$+K_y\frac{d^2U_y}{dy^2}U_xC+K_x\frac{dV_x}{dx}D+K_x\frac{dV_x}{dx}U_yP+$$
$$+K_y\frac{dV_y}{dy}F+K_y\frac{dV_y}{dy}U_xT+B_\rho\omega^2\left(AU_x+BU_y+CU_xU_y\right);$$
$$L_x=-K_x\frac{dU_x}{dx}A-K_x\frac{dU_x}{dx}U_yC+D_{11}\frac{d^2V_x}{dx^2}D+$$
$$+D_{11}\frac{d^2V_x}{dx^2}U_yP+D_{33}\frac{d^2U_y}{dy^2}V_xP-K_xV_xD-$$
$$-K_xU_yV_xP+\left(D_{12}+D_{33}\right)\frac{dV_y}{dy}\frac{dU_x}{dx}T;$$
$$L_y=-K_y\frac{dU_y}{dy}B-K_y\frac{dU_y}{dy}U_xC+\left(D_{12}+D_{33}\right)\times$$
$$\times\frac{dU_y}{dy}\frac{dV_x}{dx}P+D_{33}\frac{d^2U_x}{dx^2}V_yT+D_{22}\frac{d^2V_y}{dy^2}F+$$
$$+D_{22}\frac{d^2V_y}{dy^2}U_xT-K_yV_yF-K_yV_yU_xT;$$

(13)

$$Q_x=K_x\left(DV_x+PV_xU_y+A\frac{dU_x}{dx}+C\frac{dU_x}{dx}U_y\right);$$
$$Q_y=K_y\left(FV_y+TU_xV_y+B\frac{dU_y}{dy}+C\frac{dU_y}{dy}U_x\right);$$
$$M_{xy}=D_{33}\left(P\frac{dU_y}{dy}V_x+T\frac{dU_x}{dx}V_y\right);$$
$$M_x=D_{11}D\frac{dV_x}{dx}+D_{11}P\frac{dV_x}{dx}U_y+D_{12}F\frac{dV_y}{dy}+D_{12}T\frac{dV_y}{dy}U_x;$$
$$M_y=D_{12}D\frac{dV_x}{dx}+D_{12}P\frac{dV_x}{dx}U_y+D_{22}F\frac{dV_y}{dy}+D_{22}T\frac{dV_y}{dy}U_x.$$

(14)

С учетом (14) разрешающая система уравнений примет вид

$$\int_0^a\int_0^b\Bigg[K_x\frac{d^2U_x}{dx^2}U_xA+K_x\frac{d^2U_x}{dx^2}U_yU_xC+K_y\frac{d^2U_y}{dy^2}U_xB+$$
$$+K_y\frac{d^2U_y}{dy^2}U_x^2C+K_x\frac{dV_x}{dx}U_xD+K_x\frac{dV_x}{dx}U_yU_xP+K_y\frac{dV_y}{dy}U_xF+$$
$$+K_y\frac{dV_y}{dy}U_x^2T+B_\rho\omega^2\left(AU_x^2+BU_xU_y+CU_x^2U_y\right)\Bigg]dxdy-$$
$$-\int_0^b\left[K_xDV_xU_x+K_xPV_xU_yV_x+K_xA\frac{dU_x}{dx}U_x+K_xC\frac{dU_x}{dx}U_xU_y\right]_0^a dy-$$
$$-\int_0^a\left[K_yFV_yU_x+K_yTU_x^2V_y+K_yB\frac{dU_y}{dy}U_x+K_yC\frac{dU_y}{dy}U_x^2\right]_0^b dx=0,$$
$$\int_0^a\int_0^b\Bigg[K_x\frac{d^2U_x}{dx^2}U_yA+K_x\frac{d^2U_x}{dx^2}U_y^2C+K_y\frac{d^2U_y}{dy^2}U_yB+$$
$$+K_y\frac{d^2U_y}{dy^2}U_xU_yC+K_x\frac{dV_x}{dx}U_yD+K_x\frac{dV_x}{dx}U_y^2P+K_y\frac{dV_y}{dy}U_yF+$$
$$+K_y\frac{dV_y}{dy}U_xU_yT+B_\rho\omega^2\left(AU_xU_y+BU_y^2+CU_xU_y^2\right)\Bigg]dxdy-$$
$$-\int_0^b\left[K_xDV_xU_y+K_xPV_xU_y^2+K_xA\frac{dU_x}{dx}U_y+K_xC\frac{dU_x}{dx}U_y^2\right]_0^a dy-$$
$$-\int_0^a\Bigg[K_yFV_yU_y+K_yTU_xV_yU_y+K_yB\frac{dU_y}{dy}U_y+$$
$$+K_yC\frac{dU_y}{dy}U_xU_y\Bigg]_0^b dx=0;$$
$$\int_0^a\int_0^b\Bigg[K_x\frac{d^2U_x}{dx^2}U_yU_xA+K_x\frac{d^2U_x}{dx^2}U_y^2U_xC+K_y\frac{d^2U_y}{dy^2}U_yU_xB+$$
$$+K_y\frac{d^2U_y}{dy^2}U_x^2U_yC+K_x\frac{dV_x}{dx}U_yU_xD+K_x\frac{dV_x}{dx}U_y^2U_xP+$$
$$+K_y\frac{dV_y}{dy}U_yU_xF+K_y\frac{dV_y}{dy}U_x^2U_yT+B_\rho\omega^2\times$$
$$\times\left(AU_x^2U_y+BU_xU_y^2+CU_x^2U_y^2\right)\Bigg]dxdy-$$
$$-\int_0^b\Bigg[K_xDV_xU_xU_y+K_xPV_xU_xU_y^2+K_xA\frac{dU_x}{dx}\times$$
$$\times U_xU_y+K_xC\frac{dU_x}{dx}U_xU_y^2\Bigg]_0^a dy-$$
$$-\int_0^a\Bigg[K_yFV_yU_xU_y+K_yTU_x^2V_yU_y+K_yB\frac{dU_y}{dy}\times$$
$$\times U_xU_y+K_yC\frac{dU_y}{dy}U_x^2U_y\Bigg]_0^b dx=0;$$
$$\int_0^a\int_0^b\Bigg[-K_x\frac{dU_x}{dx}V_xA-K_x\frac{dU_x}{dx}V_xU_yC+D_{11}\frac{d^2V_x}{dx^2}V_xD+$$
$$+D_{11}\frac{d^2V_x}{dx^2}U_yV_xP+D_{33}\frac{d^2U_y}{dy^2}V_x^2P-K_xV_x^2D-$$
$$-K_xU_yV_x^2P+\left(D_{12}+D_{33}\right)\frac{dV_y}{dy}\frac{dU_x}{dx}V_xT\Bigg]dxdy-$$
$$-\int_0^b\left[D_{11}D\frac{dV_x}{dx}V_x+D_{11}P\frac{dV_x}{dx}U_yV_x+D_{12}F\frac{dV_y}{dy}V_x+D_{12}T\frac{dV_y}{dy}U_xV_x\right]_0^a dy-$$
$$-\int_0^a\left[D_{33}P\frac{dU_y}{dy}V_x^2+D_{33}T\frac{dU_x}{dx}V_yV_x\right]_0^b dx=0;$$
$$\int_0^a\int_0^b\Bigg[-K_x\frac{dU_x}{dx}V_xU_yA-K_x\frac{dU_x}{dx}V_xU_y^2C+D_{11}\frac{d^2V_x}{dx^2}V_xU_yD+$$
$$+D_{11}\frac{d^2V_x}{dx^2}U_y^2V_xP+D_{33}\frac{d^2U_y}{dy^2}V_x^2U_yP-K_xV_x^2U_yD-$$

$$
\begin{aligned}
&- K_x U_y^2 V_x^2 P + \left(D_{12} + D_{33}\right)\frac{dV_y}{dy}\frac{dU_x}{dx} V_x U_y T\Bigg] dxdy - \\
&-\int_0^b \Bigg[D_{11} D \frac{dV_x}{dx} V_x U_y + D_{11} P \frac{dV_x}{dx} U_y^2 V_x + \\
&+ D_{12} F \frac{dV_y}{dy} V_x U_y + D_{12} T \frac{dV_y}{dy} U_x V_x U_y \Bigg]_0^a dy - \\
&-\int_0^a \Bigg[D_{33} P \frac{dU_y}{dy} V_x^2 U_y + D_{33} T \frac{dU_x}{dx} V_y V_x U_y \Bigg]_0^b dx = 0; \\
&\int_0^a \int_0^b \Bigg[-K_y \frac{dU_y}{dy} V_y B - K_y \frac{dU_y}{dy} U_x V_y C + \left(D_{12} + D_{33}\right) \times \\
&\times \frac{dU_y}{dy}\frac{dV_x}{dx} V_y P + D_{33} \frac{d^2 U_x}{dx^2} V_y^2 T + D_{22} \frac{d^2 V_y}{dy^2} V_y F + \\
&+ D_{22} \frac{d^2 V_y}{dy^2} U_x V_y T - K_y V_y^2 F - K_y V_y^2 U_x T \Bigg] dxdy - \\
&-\int_0^b \Bigg[D_{33} P \frac{dU_y}{dy} V_x V_y + D_{33} T \frac{dU_x}{dx} V_y^2 \Bigg]_0^a dy - \\
&-\int_0^a \Bigg[D_{12} D \frac{dV_x}{dx} V_y + D_{12} P \frac{dV_x}{dx} U_y V_y + \\
&+ D_{22} F \frac{dV_y}{dy} V_y + D_{22} T \frac{dV_y}{dy} U_x V_y \Bigg]_0^b dx = 0; \\
&\int_0^a \int_0^b \Bigg[-K_y \frac{dU_y}{dy} V_y U_x B - K_y \frac{dU_y}{dy} U_x^2 V_y C + \left(D_{12} + D_{33}\right) \times \\
&\times \frac{dU_y}{dy}\frac{dV_x}{dx} V_y U_x P + D_{33} \frac{d^2 U_x}{dx^2} V_y^2 U_x T + D_{22} \frac{d^2 V_y}{dy^2} V_y U_x F + \\
&+ D_{22} \frac{d^2 V_y}{dy^2} U_x^2 V_y T - K_y V_y^2 U_x F - K_y V_y^2 U_x^2 T \Bigg] dxdy - \\
&-\int_0^b \Bigg[D_{33} P \frac{dU_y}{dy} V_x V_y U_x + D_{33} T \frac{dU_x}{dx} V_y^2 U_x \Bigg]_0^a dy - \\
&-\int_0^a \Bigg[D_{12} D \frac{dV_x}{dx} V_y U_x + D_{12} P \frac{dV_x}{dx} U_y V_y U_x + \\
&+ D_{22} F \frac{dV_y}{dy} V_y U_x + D_{22} T \frac{dV_y}{dy} U_x^2 V_y \Bigg]_0^b dx = 0.
\end{aligned}
\tag{15}
$$

Выполнив в уравнениях (15) интегрирование, после некоторых преобразований получим однородную систему линейных алгебранческих уравнений (СЛАУ), которую приведем в удобный для анализа безразмерный вид, для чего умножим первые три уравнения на величину $315ab/\sqrt{D_{11}D_{22}}$, четвертое и пятое уравнения – на величину $315b/\sqrt{D_{11}D_{22}}$, а шестое и седьмое – на величину $315a/\sqrt{D_{11}D_{22}}$. Тогда однородная СЛАУ в матричном виде запишется как

$$\mathbf{HZ} = \mathbf{O}, \tag{16}$$

где $\mathbf{Z}$ – матрица неизвестных; $\mathbf{H}$ – матрица, элементы которой имеют следующий вид:

$$h_{11} = -\frac{108\alpha}{\gamma_x}\left(\gamma_{2x} + 35\gamma_{px}\right) + 8\eta\gamma_{1x},\ h_{12} = \frac{252}{5}\eta\gamma_{0x}\gamma_{0y},$$

$$h_{16} = 0,\ h_{17} = 0,$$

$$h_{13} = -\frac{\alpha\gamma_{0y}}{\gamma_x}\left(\frac{216}{5}\gamma_{2x} + 1512\gamma_{px}\right) + \frac{16}{5}\eta\gamma_{0y}\gamma_{1x},$$

$$h_{14} = -315\frac{\alpha}{\gamma_x}\bar{\gamma}_{3x},\ h_{15} = -126\frac{\alpha}{\gamma_x}\gamma_{0y}\bar{\gamma}_{3x},$$

$$h_{21} = \frac{252}{5}\eta\gamma_{0x}\gamma_{0y},\ h_{22} = -\frac{108}{\alpha\gamma_y}\left(\gamma_{2y} + 35\gamma_{py}\right) + 8\eta\gamma_{1y},$$

$$h_{24} = 0,\ h_{25} = 0,$$

$$h_{23} = -\frac{\gamma_{0x}}{\alpha\gamma_y}\left(\frac{216}{5}\gamma_{2y} + 1512\gamma_{py}\right) + \frac{16}{5}\eta\gamma_{0x}\gamma_{1y},$$

$$h_{26} = -\frac{315}{\alpha\gamma_y}\bar{\gamma}_{3y},\ h_{27} = -\frac{126}{\alpha\gamma_y}\gamma_{0x}\bar{\gamma}_{3y},$$

$$h_{31} = -\frac{\alpha\gamma_{0y}}{\gamma_x}\left(\frac{216}{5}\gamma_{2x} + 1512\gamma_{px}\right) + \frac{16}{5}\eta\gamma_{0y}\gamma_{1x},$$

$$h_{32} = -\frac{\gamma_{0x}}{\alpha\gamma_y}\left(\frac{216}{5}\gamma_{2y} + 1512\gamma_{py}\right) + \frac{16}{5}\eta\gamma_{0x}\gamma_{1y},$$

$$h_{33} = -96\frac{\alpha\gamma_{1y}}{\gamma_x}\left(\frac{\gamma_{2x}}{35} + \gamma_{px}\right) - 96\frac{\gamma_{1x}}{\alpha\gamma_y}\left(\frac{\gamma_{2y}}{35} + \gamma_{py}\right) + \frac{16}{315}\eta\gamma_{1x}\gamma_{1y},$$

$$h_{34} = -126\frac{\alpha\bar{\gamma}_{3x}}{\gamma_x}\gamma_{0y},\ h_{35} = -8\frac{\alpha\bar{\gamma}_{3x}}{\gamma_x}\gamma_{1y},$$

$$h_{36} = -126\frac{\bar{\gamma}_{3y}}{\alpha\gamma_y}\gamma_{0x},\ h_{37} = -8\frac{\bar{\gamma}_{3y}}{\alpha\gamma_y}\gamma_{1x},$$

$$h_{41} = -315\frac{\alpha\bar{\gamma}_{3x}}{\gamma_x},\ h_{42} = 0,\ h_{43} = -126\frac{\alpha\bar{\gamma}_{3x}}{\gamma_x}\gamma_{0y},$$

$$h_{44} = -15\frac{\alpha}{\gamma_x}\left(7\gamma_x + 3\right),$$

$$h_{45} = -63\frac{\alpha\gamma_{0y}}{\gamma_x}\left(2\gamma_x + \frac{1}{7}\right),\ h_{46} = -35\beta_{12},$$

$$h_{47} = -105\beta_{12}\gamma_{3x},\ h_{51} = -126\frac{\alpha\gamma_{0y}}{\gamma_x}\bar{\gamma}_{3x},\ h_{52} = 0,$$

$$h_{53} = -8\frac{\alpha\gamma_{1y}}{\gamma_x}\bar{\gamma}_{3x},\ h_{54} = -\frac{\alpha\gamma_{0y}}{\gamma_x}\left(\frac{126}{5}\gamma_x + 9\right),$$

$$h_{55} = -\frac{\alpha\gamma_{1y}}{\gamma_x}\left(\frac{8}{5}\gamma_x + \frac{4}{7}\right) - \beta_{33}\left(\frac{54}{7}\gamma_{2y} + 270\gamma_{py}\right),$$

$$h_{56} = -105\beta_{12}\gamma_{3y},$$

$$h_{57} = -315\left(\beta_{12}\gamma_{3x}\gamma_{3y} + \beta_{33}\bar{\gamma}_{3x}\bar{\gamma}_{3y}\right),\ h_{61} = 0,$$

$$h_{62} = -315\frac{\bar{\gamma}_{3y}}{\alpha\gamma_y},\ h_{63} = -126\frac{\bar{\gamma}_{3y}\gamma_{0x}}{\alpha\gamma_y},$$

$$h_{64} = -35\beta_{12},\ h_{65} = -105\beta_{12}\gamma_{3y},$$

$$h_{66} = -\frac{1}{\alpha\gamma_y}\left(63\gamma_y + \frac{315}{14}\right),$$

$$h_{67} = -\frac{\gamma_{0x}}{\alpha\gamma_y}\left(\frac{126}{5}\gamma_y + 9\right),\ h_{71} = 0,\ h_{72} = -126\frac{\gamma_{0x}\bar{\gamma}_{3y}}{\alpha\gamma_y},$$

$$h_{73} = -8\frac{\gamma_{1x}\bar{\gamma}_{3y}}{\alpha\gamma_y}, \qquad (17)$$

$$h_{74} = -105\beta_{12}\gamma_{3x},\ h_{75} = -315\left(\beta_{12}\gamma_{3x}\gamma_{3y} + \beta_{33}\bar{\gamma}_{3x}\bar{\gamma}_{3y}\right),$$

$$h_{76} = -\frac{\gamma_{0x}}{\alpha\gamma_y}\left(\frac{126}{5}\gamma_y + 9\right),$$

$$h_{77} = -\beta_{33}\left(\frac{54}{7}\gamma_{2x} + 270\gamma_{px}\right) - \frac{\gamma_{1x}}{\alpha\gamma_y}\left(\frac{8}{5}\gamma_y + \frac{4}{7}\right).$$

Безразмерные комплексы

$$\gamma_{0x} = 3 + 20\gamma_x,\ \gamma_{0y} = 3 + 20\gamma_y,$$

$$\gamma_{1x} = 91 + 999\gamma_x + 3024\gamma_x^2,\ \gamma_{px} = 3 + 12\gamma_x,$$

$$\gamma_{1y} = 91 + 999\gamma_y + 3024\gamma_y^2,\ \gamma_{2x} = -5 + 28\gamma_x + 560\gamma_x^2,$$

$$\gamma_{2y} = -5 + 28\gamma_y + 560\gamma_y^2,$$

$$\gamma_{3x} = \frac{1}{7} + \frac{8}{5}\gamma_x,\ \gamma_{3y} = \frac{1}{7} + \frac{8}{5}\gamma_y,\ \bar{\gamma}_{3x} = \frac{6}{7} + \frac{12}{5}\gamma_x,$$

$$\bar{\gamma}_{3y} = \frac{6}{7} + \frac{12}{5}\gamma_y,\ \gamma_{py} = 3 + 12\gamma_y, \qquad (18)$$

$$\gamma_x = \frac{D_{11}}{K_x a^2},\ \gamma_y = \frac{D_{22}}{K_y b^2},\ \alpha = \frac{b^2}{a^2}\sqrt{\frac{D_{11}}{D_{22}}},$$

$$\beta_{12} = \frac{D_{12}}{\sqrt{D_{11}D_{22}}},\ \beta_{33} = \frac{D_{33}}{\sqrt{D_{11}D_{22}}}$$

и безразмерный частотный параметр

$$\eta = \frac{B_\rho \omega^2 a^2 b^2}{\sqrt{D_{11}D_{22}}} \qquad (19)$$

определяются только жесткостными и геометрическими характеристиками материалов несущих слоев и заполнителя трехслойной пластины.

Таким образом, задача определения основной частоты изгибных колебаний трехслойной пластины, закрепленной в центре, сведена к нахождению безразмерного частотного параметра η, который вычисляется как наименьший вещественный корень кубического уравнения $\det(\mathbf{X}) = 0$, полученного из условия существования нетривиального решения однородной СЛАУ (16).

Когда частотный параметр η найден, то основная частота колебаний может быть получена из формулы (19) с учетом равенств $a = \bar{a}/2$ и $b = \bar{b}/2$:

$$\omega = \frac{4\sqrt{\eta}}{\bar{a}\bar{b}}\sqrt{\frac{\sqrt{D_{11}D_{22}}}{B_\rho}}. \qquad (20)$$

В качестве примера определим основную частоту колебаний для нескольких трехслойных пластин, закрепленных в центральной точке и отличающихся размерами в плане, толщинами несущих слоев и заполнителя. Несущие слои выполнены из материала со следующими параметрами: $E_x^{(t)}$ = 54,55 ГПа, $E_y^{(t)}$ = = 54,55 ГПа, $G_{xy}^{(t)}$ = 20,67 ГПа, $G_{xz}^{(t)}$ = 3,78 ГПа, $G_{yz}^{(t)}$ = = 3,78 ГПа, $\nu_{xy}^{(t)}$ = 0,32, $\nu_{yx}^{(t)}$ = 0,32, ρ_t = 1 500 кг/м³. Материал заполнителя характеризуется модулями сдвига $G_{xz}^{(h)}$ = 440 МПа, $G_{yz}^{(h)}$ = 220 МПа и плотностью ρ_h = 83 кг/м³. Пластины имеют размеры в плане: b = 1 м, a = 1 и 2 м. Суммарная толщина несущих слоев t равна 0,001 и 0,002 м, а толщина заполнителя δ будет 0,01; 0,05; 0,1 м.

Частоты колебаний трехслойных пластин, вычисленные по формуле (20) для указанных выше размеров, приведены в табл. 1.

Для проверки полученных результатов определим основную частоту колебаний трехслойной пластины, закрепленной в центральной точке, методом конечных элементов (МКЭ). Расчет выполним в пакете COSMOS/M, используя конечный элемент SHELL4L [2]. Значения частот, вычисленных с помощью МКЭ, приведены в табл. 2.

Таблица 1

Частоты колебаний трехслойной пластины, закрепленной в центральной точке, Гц

t, м	a = 1 м, b = 1 м			a = 2 м, b = 1 м		
	δ = 0.01 м	δ = 0,05 м	δ = 0,1 м	δ = 0,01 м	δ = 0,05 м	δ = 0,1 м
0,001	50,186	153,72	230,01	15,052	46,428	70,067
0,002	57,961	193,36	298,73	17,408	58,877	92,508

Таблица 2

Частоты колебаний трехслойной пластины, закрепленной в центральной точке, Гц, полученные МКЭ

t, м	*a* = 1 м, *b* = 1 м			*a* = 2 м, *b* = 1 м		
	δ = 0,01 м	δ = 0,05 м	δ = 0,1 м	δ = 0,01 м	δ = 0,05 м	δ = 0,1 м
0,001	49,221	149,19	223,70	14,592	45,880	68,051
0,002	56,868	189,31	290,56	16,925	57,961	67,123

Сравнивая соответствующие частоты из табл. 1 и 2, можно сделать вывод, что разница не превышает 5 %. Таким образом, определение основной частоты колебаний трехслойной пластины, закрепленной в центральной точке, может быть достоверно выполнено обобщенным методом Галеркина.

Таким образом, с помощью обобщенного метода Галеркина решена задача определения основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины, которая закреплена от прогиба и углов поворота в центральной точке. Данная задача сводится к нахождению безразмерного частотного параметра, который является наименьшим вещественным корнем кубического уравнения.

Сравнение полученной формулы с решением, выполненным методом конечных элементов, показывает, что данная формула обеспечивает высокую точность и минимальные вычислительные затраты при определении основных частот колебаний пластин, закрепленных в центральной точке.

Библиографические ссылки

1. Vasiliev V. V. Mechanics of Composite Structures. London : Taylor & Francis, 1993.

P. O. Deev

DETERMINATION OF FUNDAMENTAL OSCILLATION FREQUENCY OF THE RECTANGULAR SANDWICH PLATE TIGHTENED IN THE CENTRAL POINT

In the article the problem of determination of fundamental frequency of the sandwich plate, tightened in the central point, is solved. Variation equations of plate dynamics were solved by generalized Galerkin method. The formula for fundamental frequency determination is obtained.

Keywords: sandwich plate, fundamental oscillation frequency, generalized Galerkin method.

© Деев П. О., 2011

УДК 621.9.06; 621.822.572.001.04

С. П. Ереско, С. С. Шатохин

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЗАМКНУТОЙ АДАПТИВНОЙ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ОПОРЫ С НЕЗАВИСИМЫМ ПЛАВАЮЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Рассмотрены конструкция и принцип оптимизации конструктивно-режимных параметров незамкнутой адаптивной гидростатической опоры с независимым плавающим регулятором расхода рабочей жидкости в сравнении с традиционными гидростатическими опорами дроссельного регулирования для направляющих узлов тяжелых металлорежущих станков. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований нагрузочных характеристик и конструктивных параметров по критерию податливости.

Ключевые слова: металлорежущий станок, адаптивная гидростатическая опора, плавающий регулятор расхода рабочей жидкости.

В тяжелом и прецизионном станкостроении, а также в других областях техники широкое применение находят адаптивные гидростатические опоры и направляющие с плавающими регуляторами расхода в магистрали нагнетания рабочей жидкости [1; 2]. По сравнению с мембранными плавающие регуляторы позволяют обеспечить опоре более стабильные характеристики и имеют значительно меньшие габаритные размеры, благодаря чему их можно встраивать непосредственно в неподвижное основание направляющей.

В отличие от известных и ранее исследованных незамкнутых опор с плавающими регуляторами [3], опоры с независимыми плавающими регуляторами способны обеспечить необходимую податливость несущего смазочного слоя без дополнительного (точнее – сведенного к минимуму) потока рабочей жидкости, поддерживающего плавающее рабочее состояние подвижного элемента (плунжера) регулятора. Следовательно, они отличаются значительно более высокой экономичностью.

Кроме того, отсутствие дополнительного ограничения перемещения плунжера при возрастании нагружения позволяет существенно улучшить нагрузочную характеристику адаптивной опоры [3].

Незамкнутые адаптивные гидростатические опоры с независимыми плавающими регуляторами для направляющих могут быть выполнены в двух основных вариантах: либо с внутренним, либо с периферийным (внешним) входным дросселированием регулятора (рис. 1).

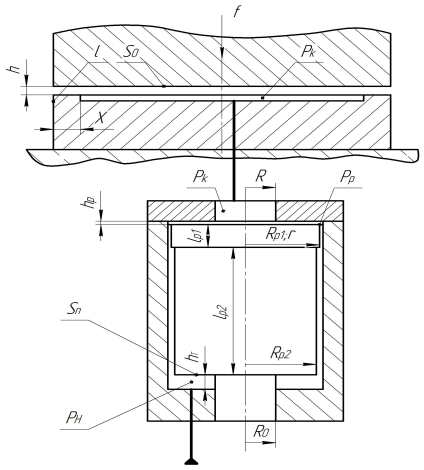


Рис. 1. Расчетная схема незамкнутой адаптивной гидростатической опоры, имеющей независимый плавающий регулятор с периферийным дросселированием [4]

Регуляторы имеют входные дроссели, образованные двумя дросселирующими ступенями шириной $l_1 = l_{p_1}$ и l_{p_2} с радиальными зазорами (на рис. 1 они не обозначены), обеспечивающими радиальное центрирование верхней части регулятора, и управляемую дросселирующую щель с рабочим зазором $h_р$, необходимую для активного регулирования расхода.

Математическая модель стационарного нагружения опоры является системой четырех алгебраических уравнений:

$$h^3 \frac{l}{x} p_к = h_р^3 \frac{2\pi}{(-\ln R)} \left(p_р - p_к \right), \qquad (1)$$

$$h_р^3 \frac{1}{\ln R} \left(p_к - p_р \right) = h_1^3 \frac{r}{2l_1} \left(p_н - p_р \right), \qquad (2)$$

$$p_р + K_р p_к = K \cdot p_н, \qquad (3)$$

$$p_к s_о = f, \qquad (4)$$

где $P_к$ – давление в несущем кармане опоры; $P_р$ – давление на входе в управляемую дросселирующую щель регулятора; $P_н$ – давление нагнетания; $K_р = \frac{s_{вых}}{s_{вх}}$, здесь $s_{вх}$ и $s_{вых}$ – входная и выходная эффективные площади торцевой рабочей поверхности регулятора; $K = \frac{s_н}{s_{вх}}$, здесь $s_н$ – площадь силового замыкания регулятора, т. е. торцевой поверхности, на которую действует давление $p_н$; $s_о$ – несущая эффективная площадь гидростатической опоры; h – рабочий зазор опоры; h_1 и $l_1 = l_{p_1}$ – радиальный зазор и ширина дросселирующей цилиндрической ступени (меньшего зазора) регулятора, определенные из условия равенства сопротивлений центрирующих ступеней; l и x – длина и ширина дросселирующих перемычек опоры, т. е. питаемого несущего кармана направляющей; R – отношение радиуса кармана или выходного отверстия регулятора к его внешнему радиусу r; f – внешняя нагрузка на опору с учетом веса приведенной к опоре подвижной части направляющей.

Уравнения (1) и (2) являются нелинейными и представляют собой уравнения балансов расходов гидростатической опоры ее регулятора, а уравнения (3) и (4) являются линейными и выражают условия силового равновесия регулятора и гидростатической опоры.

Площадь торцевой поверхности регулятора, необходимая для его силового замыкания и уравновешивания, на которую действует давление нагнетания, может быть определена по дополнительному уравнению его равновесия в начальном (расчетном) нагруженном состоянии опоры:

$$p_{р_0} + K_р p_{к_0} = K \cdot p_н,$$

где $p_{к_0}$ и $p_{р_0}$ – начальные (расчетные) значения давления в несущем кармане опоры и на входе в торцевую дросселирующую щель регулятора.

В результате решения краевой задачи применительно к стационарному уравнению Рейнольдса для радиального течения рабочей жидкости в тонком дросселирующем слое и последующих преобразований было получено используемое в уравнении (3) отношение выходной и входной эффективных площадей рабочей торцевой дросселирующей поверхности регулятора:

$$K_р = \frac{s_{вых}}{s_{вх}} = \frac{R^2 - 1}{2\ln R - R^2 + 1}, \qquad (5)$$

которое является справедливым для направления течения рабочей жидкости от периферии торцевой дросселирующей щели к ее центру.

Выполненные на основе математической модели (1)–(5) расчеты показали, что при $K > 1$ и малой внешней нагрузке f система уравнений (1)–(4) не имеет приемлемого с точки зрения реально допустимых значений параметров опоры решения, что указывает на наличие ограничения активного рабочего нагрузочного диапазона опоры нижним предельным значением нагрузки, т. е. ограничения снизу.

Тем не менее математическая модель (1)–(5) вполне доступна для алгебраических преобразований, благодаря чему мы можем провести более подробное исследование.

Из (2) имеем

$$h_p^3 = h_1^3 \frac{r \ln R \cdot \left(p_н - p_р \right)}{2l_1 \left(p_к - p_р \right)}.$$

Подставим это выражение в следуемое из (1) выражение рабочего зазора гидростатической опоры:

$$h^3 = h_p^3 \cdot \frac{2\pi x\left(p_\text{р} - p_\text{к}\right)}{l\left(-\ln R\right)p_\text{к}} =$$

$$= h_\text{l}^3 \frac{r\ln R\left(p_\text{н} - p_\text{р}\right)}{2l_\text{l}\left(p_\text{к} - p_\text{р}\right)} \cdot \frac{2\pi x\left(p_\text{р} - p_\text{к}\right)}{l\left(-\ln R\right)p_\text{к}} = h_\text{l}^3 \frac{r\pi x\left(p_\text{н} - p_\text{р}\right)}{l_\text{l} l \cdot p_\text{к}}.$$

Приняв $p_\text{р} = K \cdot p_\text{н} - K_\text{р} p_\text{к}$, получим

$$h^3 = h_\text{l}^3 \frac{r\pi x\left(p_\text{н} - K \cdot p_\text{н} + K_\text{р} \cdot p_\text{к}\right)}{l_\text{l} l \cdot p_\text{к}} =$$

$$= h_\text{l}^3 \left(\frac{\pi r x}{l_\text{l} l} \left(\cdot \frac{p_\text{н}\left(1-K\right)}{p_\text{к}} + K_\text{р} \right) \right).$$

Используя выражения (5) и (4), окончательно имеем

$$h = h_\text{l} \sqrt[3]{\frac{\pi r x}{l_\text{l} l}\left(\frac{s_\text{о} p_\text{н}\left(1-K\right)}{f} + \frac{R^2 - 1}{2\ln R - R^2 + 1} \right)}. \qquad (6)$$

Эта формула позволяет рассчитать нагрузочную характеристику опоры в активном диапазоне, соответствующем плавающему (подвижному) состоянию плунжера.

Анализ формулы (6) показывает, что при $K = 1$, т. е. при равенстве площади силового замыкания регулятора его входной эффективной площади, первый член подкоренного выражения формулы (6) обращается в нуль и в этом случае рабочий зазор опоры не зависит от внешней нагрузки, т. е. опора будет иметь нулевую податливость. Кроме того, из формулы (6) следует, что при $K = 1$ податливость опоры не зависит от подводимого давления нагнетания $p_\text{н}$ и несущей эффективной площади опоры (направляющей) $s_\text{о}$.

При $K > 1$ увеличение нагрузки уменьшает значение рабочего зазора и, следовательно, опора может иметь отрицательную податливость. При этом с увеличением K (в пределе до 5...10) отрицательная податливость становится значительно более существенной, однако при этом активный диапазон нагружения неуклонно сокращается.

При $K < 1$, напротив, увеличение нагрузки повышает значение рабочего зазора и, следовательно, опора обладает положительной податливостью, возрастающей с уменьшением K. Тем не менее положительная податливость исследуемой опоры в этом диапазоне значений K существенно меньше податливости гидростатической опоры, имеющей входные дроссели постоянного сопротивления, поскольку плавающий элемент регулятора при нагружении опоры остается подвижным и возникает активное регулирование расхода рабочей жидкости.

Проверить справедливость формулы (6) позволяет нагрузочная характеристика исследуемой опоры, показанная на рис. 2, адаптивный диапазон которой рассчитан по безразмерному аналогу математической модели (1)–(5).

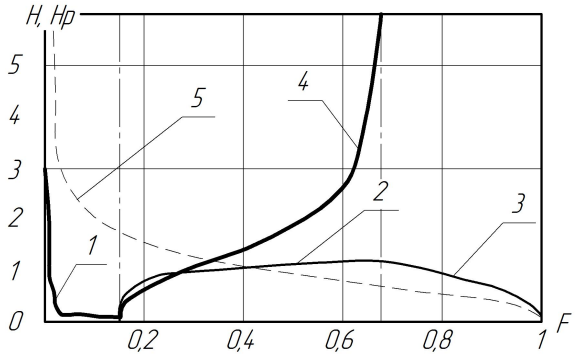


Рис. 2. Нагрузочные характеристики незамкнутой адаптивной опоры (линия *1* – нижний пассивный диапазон; *2* – активный диапазон нагружения; *3* – верхний пассивный диапазон), плавающего регулятора (линия *4*) и пассивной гидростатической опоры с постоянным входным дросселем (линия *5*) при $K = 1{,}38$

Расчет и построение нагрузочной характеристики производились следующим образом.

Сначала определялся адаптивный диапазон нагружения, где в качестве исходной расчетной точки использовалась точка в средней части диапазона, соответствующая пересечению кривых перемещений опоры и регулятора, поскольку начальные настроечные значения безразмерных зазоров опоры $H = h/h_0$ и регулятора $H_\text{р} = h_\text{р}/h_\text{р0}$ принимались равными единице.

Затем с малым шагом варьировалось давление в несущем кармане опоры (нагрузка) с отступлением от исходной точки как в сторону увеличения давления, так и в сторону его уменьшения. При этом было обнаружено, что уменьшение давления на нижней границе диапазона вызывает резкое уменьшение зазора опоры, вплоть до нуля, а увеличение давления при приближении к верхней границе диапазона – резкое возрастание зазора регулятора (теоретически – вплоть до бесконечности). В результате был сделан вывод о том, что оба эти явления способны вызвать неустойчивость и в связи с этим свободные плавающие перемещения подвижного элемента регулятора необходимо ограничить введением в его конструкцию дополнительных элементов – упоров, ограничивающих резкие перемещения.

После определения граничных точек активного диапазона были построены математические модели для пассивных диапазонов нагружения опоры с неподвижным регулятором (дросселем) и рассчитаны нижний и верхний пассивные нагрузочные диапазоны. Граничные точки пересечения диапазонов (точки бифуркации) по аналогии с замкнутыми опорами [2] были названы критическими.

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что при $K \le 1$ нижний нагрузочный пассивный диапазон полностью исчезает, но опора при этом имеет положительную податливость. Этот вывод подтверждают нагрузочные характеристики для активного диапазона, показанные на рис. 3, которые были рассчитаны по безразмерным аналогам математической модели (4), (5) и формулы (6).

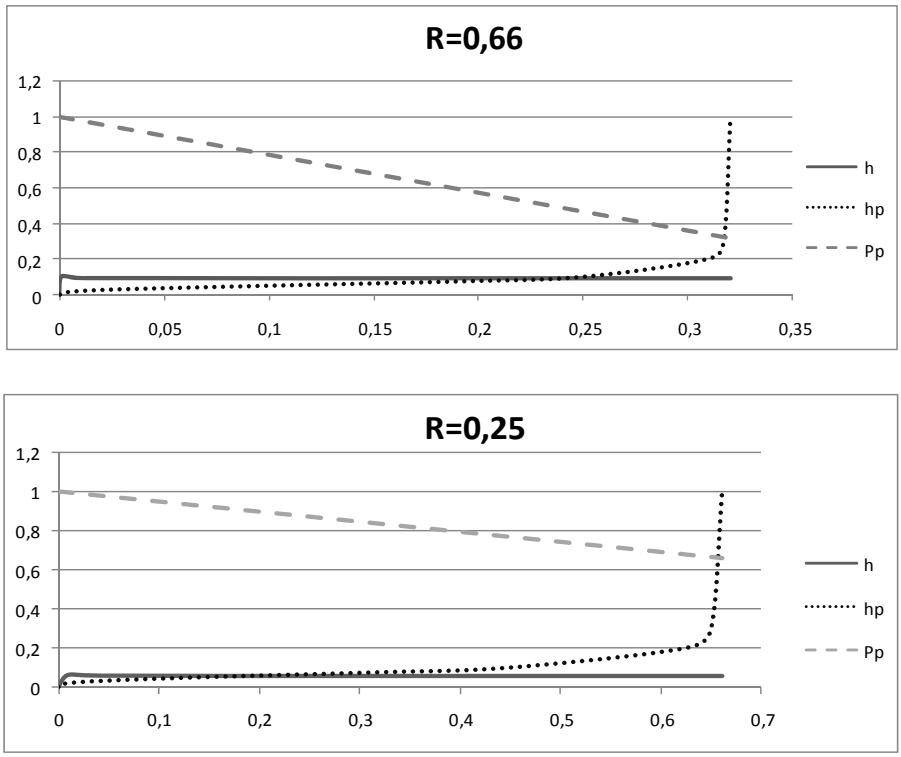


Рис. 3. Активные диапазоны нагружения незамкнутой адаптивной опоры (горизональная линия), плавающего регулятора-стабилизатора (восходящая линия) и значения давления на входе в управляемую активную дросселирующую щель регулятора при $K = 1{,}001$

Кроме того, расчетные нагрузочные характеристики также показывают, что уменьшение R при близких к единице значениях K расширяет активный диапазон нагружения настолько, что регулятор может работать как стабилизатор практически во всем реальном диапазоне внешнего нагружения направляющей.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– создание работоспособных конструкций незамкнутых адаптивных гидростатических опор с плавающими регуляторами, не имеющими дополнительных потоков рабочей жидкости, которые не поступают в несущий карман опоры, является возможным. Обязательным условием работоспособности таких опор в режиме отрицательной податливости является наличие пассивного нагрузочного диапазона в области небольших нагрузок (нижнего пассивного диапазона), обеспечиваемое наличием в конструкции регулятора специального граничного упора;

– отношение площади силового замыкания регулятора к его входной эффективной площади – параметр K – является наиболее важной характеристикой независимых плавающих регуляторов незамкнутых адаптивных гидростатических опор (направляющих), которая главным образом и определяет их активность и вид нагрузочной характеристики;

– при $K \le 0$ регуляторы не обеспечивают опоре отрицательную податливость, но при этом они могут использоваться для стабилизации рабочего зазора опоры (как стабилизаторы) и ограничения расхода рабочей жидкости при противоположно направленной нагрузке. В этом случае нижний граничный упор в конструкции плавающего регулятора (стабилизатора), как правило, не нужен.

Библиографические ссылки

1. Бушуев В. В. Гидростатическая смазка в станках. М. : Машиностроение, 1989.

2. Встроенный двухпоточный плавающий регулятор для адаптивного нагнетания смазки в оппозитные несущие карманы замкнутых гидростатических направляющих / С. П. Ереско, С. Н. Шатохин, Л. В. Шатохина, С. С. Шатохин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 16–19.

3. Демин В. Г. Улучшение характеристик гидростатических направляющих для металлорежущих станков на основе применения плавающих регуляторов активного нагнетания смазки : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2008.

4. Пат. 2406891 Рос. Федерация, МКИ F 16 C 32/06. Гидростатическая опора / С. Н. Шатохин, С. С. Шатохин, А. С. Шатохина, М. Е. Яськов. Заявл. 21.09.2009 ; опубл. 20.12.2010.

S. P. Eresko, S. S. Shatohin

RESEACH OF NON CLOSED ADAPTIVE HYDROSTATIC SUPPORT WITH INDEPENDENT FLOATING REGULATOR

Construction and optimization principle of design-regime parameters of non closed adaptive hydrostatic support with independent floating regulator of work fluid consumption in comparison with traditional hydrostatic supports with throttle control for guide bearing of knots of heavy metal-cutting engineering tools is described. Results of theoretical and experimental researches of load characteristics and construction parameters, by flexibility criteria, are presented.

Keywords: metal-cutting engineering tool, adaptive hydrostatic support, floating regulator of work fluid consumption.

© Ереско С. П., Шатохин С. С., 2011

УДК 519.68

В. Г. Жуков

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭВОЛЮЦИОННЫМИ АЛГОРИТМАМИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ*

Рассмотрен синтез эволюционных алгоритмов решения задачи символьной регрессии и оптимизации. Предложены их модификации в рамках разработки интегрированной процедуры автоматизированного построения и оптимизации математических моделей сложных систем и процессов.

Ключевые слова: эволюционные алгоритмы, символьная регрессия, оптимизация.

При решении задачи символьной регрессии методом генетического программирования [1] в начале работы алгоритма часто возникает ситуация, при которой сгенерированные деревья решений с более простой структурой (обычно это линейные выражения) имеют более высокую пригодность, чем деревья решений со сложными структурами, которые обычно оказываются более перспективными с точки зрения генерации решения с заданной ошибкой аппроксимации. Эта проблема особенно часто возникает при решении практических задач, в которых результирующее дерево решений, как правило, представляет собой выражение со сложной структурой. В результате в популяции начинают преобладать простые деревья решений и скорость поиска замедляется, так как набор констант, определенный во множестве термов, фиксирован и в сгенерированных структурах численные коэффициенты подобраны плохо. Таким образом, дерево решений с очень хорошей структурой может иметь ошибку аппроксимации намного больше, чем простая структура, в которой меньше коэффициентов [2].

Рассмотрим пример, наглядно показывающий, как плохо подобранные коэффициенты влияют на пригодность дерева решений (рис. 1).

Пусть задана функция $f(x) = 3\sin(x)$ на интервале $[-2{,}5;\ 2{,}5]$ и в популяции есть два дерева решений: $p_1(x) = x$ и $p_2(x) = x - x\text{^}3$ (рис. 1, *а*).

Если в качестве ошибки аппроксимации взять, например, евклидово расстояние, то для решений $p_1(x)$ и $p_2(x)$ ошибка составит $d(f(x), p_1(x)) = 7{,}79$ и $d(f(x), p_2(x)) = 47{,}21$ соответственно. Очевидно, что дерево решений $p_1(x)$, несмотря на то что оно плохо аппроксимирует функцию $f(x)$, для алгоритма генетического программирования (АГП) оказывается предпочтительнее дерева $p_2(x)$. Однако если в $p_2(x)$ подобрать численные коэффициенты, то после оптимизации дерево решений, например

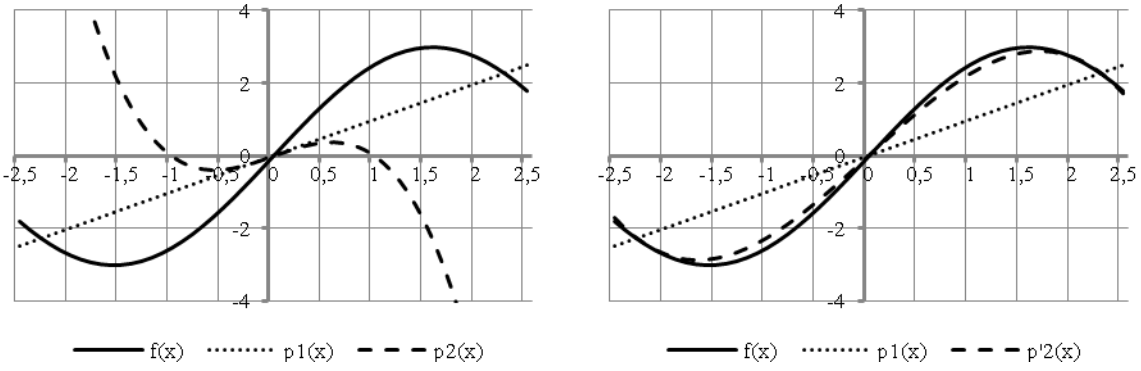
$$p_2(x) = (2{,}56\cdot x + 0{,}01) - (0{,}3\cdot x\text{^}3 + 0{,}01),$$

будет иметь меньшую ошибку аппроксимации: $d(f(x), p'_2(x)) = 1{,}17$, и теперь алгоритм отдаст предпочтение именно этому дереву решений (рис. 1, *б*).

Следует отметить, что описанная выше проблема может возникнуть и в конце работы алгоритма, когда структура дерева решений уже сгенерирована и ее элементы доминируют в популяции, но элементы множества термов (константы), входящие в нее, не позволяют достичь требуемой точности аппроксимации.

Алгоритм генетического программирования способен разрешить данную проблему путем интенсивного применения оператора мутации, однако случайный характер этого оператора может оказать и негативное воздействие (например, могут быть потеряны хорошо подобранные коэффициенты или изменена сгенерированная структура).

*Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы».



а *б*

Рис. 1. Пример решений, сгенерированных алгоритмом генетического программирования до (*а*) и после (*б*) процедуры оптимизации численных коэффициентов

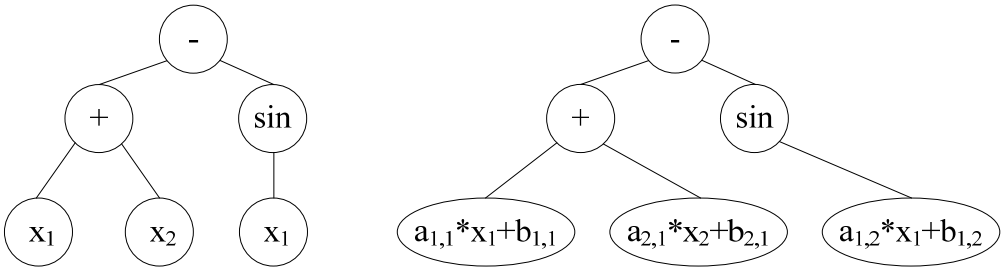


Рис. 2. Пример решения $f(x_1, x_2) = x_1 + x_2 - \sin(x_1)$

Подстройка коэффициентов также возможна за счет появления поддеревьев, содержащих во внешних вершинах только константы. В результате вычисления значения такого поддерева может появиться численный коэффициент, не включенный во множество термов. Тем не менее зачастую алгоритм либо плохо справляется с подбором коэффициентов, либо коэффициенты настраиваются очень долго. Поэтому параметры генерируемых решений необходимо настраивать, что можно сделать только с помощью процедур прямого поиска.

Алгоритм генетического программирования с настройкой значений численных коэффициентов решений, сгенерированных генетическим алгоритмом. Для разрешения проблемы настройки численных коэффициентов в деревьях решений, сгенерированных алгоритмом генетического программирования, может быть предложена следующая модификация: будем представлять вектор независимых входных переменных в виде

$$\overline{X} = (a_{1,i} \cdot x_1 + b_{1,i}, a_{2,i} \cdot x_2 + b_{2,i}, ..., a_{n,i} \cdot x_n + b_{n,i}),$$

где n – количество переменных; i – порядковый номер вхождения переменной в сгенерированное дерево решений (рис. 2).

Полученные таким образом деревья решений будут представлять собой не готовые структуры, а их структурные шаблоны (функциональные формы). При оценивании решений численные коэффициенты структур настраиваются с помощью внешней оптимизационной процедуры.

При такой модификации алгоритм генетического программирования в случае появления в популяции удачных структур после настройки численных коэффициентов отдаст предпочтение именно этим структурам. В результате при аппроксимации сильно нелинейных зависимостей алгоритм гораздо быстрее перейдет от линейных (или слабо нелинейных) функций к более сложным. При этом очевидно, что количество численных коэффициентов для сложных структур будет велико и при настройке параметров заданной структуры, а функция ошибки аппроксимации, т. е. критерий оптимизации, будет нелинейной и многоэкстремальной.

Как известно, генетический алгоритм (ГА) достаточно эффективно решает сложные задачи оптимизации [3]. Более того, он используют тот же механизм, что и алгоритм генетического программирования. Поэтому в данном случае для настройки численных коэффициентов сгенерированных деревьев решений логично использовать именно генетический алгоритм.

Однако следует отметить, что при применении классического генетического алгоритма в качестве внешней оптимизационной процедуры время работы интегрированной процедуры автоматизированного построения и оптимизации математических моделей сложных систем и процессов значительно возрастает, так как для каждого сгенерированного алгоритмом генетического программирования дерева решений на каждом поколении потребуется настройка численных коэффициентов.

Автором было проведено исследование предложенного алгоритма на базе интегрированной процедуры автоматизированного построения и оптимизации математических моделей сложных систем и процессов для оценки его эффективности. В качестве экспериментальных данных использовались значения функции sin(x) на интервале [–3,14; 3,14] со случайным шагом и объемом тестовой выборки, равном 100 точкам. В качестве функционального множества рассматривались только арифметические операции сложения, вычитания, умножение и деления, терминальное множество содержало переменную x и набор констант на интервале [–1;1] со случайным шагом.

Вектор параметров алгоритма генетического программирования имел следующий формат: АГП = (размер популяции; метод роста; селекция; метод скрещивания; мутация; вероятность мутации; начальная глубина деревьев; стратегии формирования нового поколения; число поколений) – и был проинициализирован следующими значениями: АГП = (100; метод полного выращивания; пропорциональная; кратный узел; метод роста; 0,5; 3; элитизм; 2 000) [4].

Вектор параметров генетического алгоритма имел следующий формат: ГА = (размер популяции; селекция; стратегия выбора родительской пары; рекомбинация; вероятность мутации; стратегии формирования нового поколения; число поколений) – и был проинициализирован следующими значениями: ГА = (50; турнирная; инбридинг; одноточечная; 0,05; элитизм; 20) [4].

Для наглядности все эксперименты проводились в однопоточном режиме. Обобщенные результаты исследований разработанного алгоритма генетического программирования с настройкой значений численных коэффициентов решений, сгенерированных генетическим алгоритмом, представлены в табл. 1.

В ходе исследования изменялась частота вызова генетического алгоритма в процессе работы алгоритма генетического программирования K = [1; 8] с шагом в единицу. Для каждого K проводилось 20 запусков алгоритма генетического программирования по 2 000 поколений и вычислялись следующие характеристики:

– G – среднее поколение, на котором было получено решение с $E < 1$ %;

– C_n – среднее количество узлов в лучшем индивиде (учитываются только те прогоны, в которых было получено решение с $E < 1$ %);

– N_1 – количество запусков (%), в которых было получено решение с $E > 5$ %;

– N_2 – количество запусков (%), в которых было получено решение с 1 % < E < 5 %;

– N_3 – количество запусков (%), в которых было получено решение с $E < 1$ %;

– $T_{ср}$ – среднее время работы одного запуска алгоритма генетического программирования с настройкой численных коэффициентов.

На основании данных, приведенных в табл. 1, были построены графики зависимостей $N_3 = f(K)$ (рис. 3) и $T_{ср} = f(K)$ (рис. 4).

Таблица 1

Исследование АГП с настройкой коэффициентов

K	N_1, %	N_2, %	N_3, %	G	C_n	$T_{ср} \cdot 10^3$ мин
1	5	45	50	252	324	4,5
2	5	50	45	347	347	3,6
3	5	50	45	575	321	3,2
4	10	50	40	646	326	2,9
5	5	50	45	837	323	2,7
6	5	55	40	1 265	314	2,4
7	10	50	40	1 655	345	2,1
8	10	55	35	1 823	352	1,8

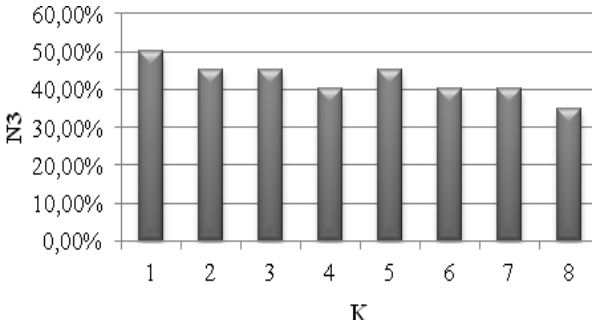


Рис. 3. График зависимости $N_3 = f(K)$

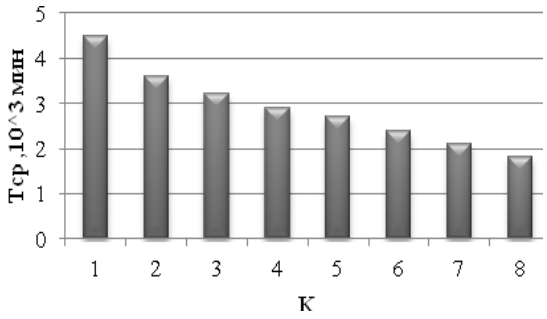


Рис. 4. График зависимости $T_{ср} = f(K)$

Анализ графиков рис. 3 и 4 показывает, что наиболее приемлемым по среднему времени работы алгоритма и количеству запусков, в которых было получено решение с заданной точностью, является значение $K = 5$. Данное значение логически оправданно, так как алгоритму генетического программирования необходим некоторый интервал адаптации для того, чтобы сгенерировать новые структуры, определить их потенциальную пригодность и закрепить их в последующих поколениях.

Еще одной особенностью предложенного интегрированного алгоритма, которая будет оказывать существенное влияние на время и потребляемые ресурсы, является большая размерность решаемой задачи безусловной однокритериальной оптимизации значений численных коэффициентов. Это обусловлено тем, что для сложных структур деревьев решений, особенно в конце работы алгоритма, размерность задачи оптимизации будет, как минимум, не меньше удвоенного количества входных независимых переменных алгоритма генетического программирования. Поэтому с точки зрения потребляемых вычислительных ресурсов проводить оптимизацию численных коэффициентов сгенерированных деревьев решений на каждом поколении алгоритма генетического программирования невыгодно даже в случае применения многопоточных и/или распределенных вычислений.

Однако следует отметить, что разработанный интегрированный алгоритм имеет следующие недостатки:

– при оптимизации численных коэффициентов генетическим алгоритмом не учитывается информация, полученная алгоритмом генетического программирования;

– время работы генетического алгоритма несопоставимо велико по сравнению со временем работы алгоритма генетического программирования даже с учетом введения интервала адаптации.

Таким образом, применение классической реализации генетического алгоритма для оптимизации значений численных коэффициентов с точки зрения потребляемых ресурсов и времени работы является необоснованным и для повышения эффективности требует внесения модификаций.

Алгоритм генетического программирования с настройкой значений численных коэффициентов решений, сгенерированных модифицированным генетическим алгоритмом. Для улучшения эффективности работы генетического алгоритма, применяемого для настройки численных коэффициентов через интервал адаптации, были предложены следующие его модификации [5]:

– переход численных коэффициентов лучших решений алгоритма генетического программирования;

– накопление и использование генетическим алгоритмом статистических данных о пространстве поиска;

– управление ресурсом генетического алгоритма, выделяемого для решения задачи оптимизации.

Рассмотрим предложенные модификации более подробно.

Переход численных коэффициентов лучших решений алгоритма генетического программирования. Если пригодность (под которой будем понимать величину, обратную нормированной ошибке аппроксимации) некоторого i-го дерева решения, сгенерированного алгоритмом генетического программирования, удовлетворяет условию $\text{fitness}_i \geq \text{fitness}_{\text{ср}}$, где $\text{fitness}_{\text{ср}}$ – средняя пригодность популяции на j-м поколении, то при параметрической оптимизации численные коэффициенты данного решения кодируются и включаются в первую популяцию генетического алгоритма. Тем самым учитывается информация, полученная алгоритмом генетического программирования, и оптимизационный алгоритм начинает свою работу, имея в первой популяции вполне конкретные точки с пригодностью выше средней. Конечно, нельзя утверждать, что такая модификация приведет к нахождению оптимальных численных коэффициентов во всех случаях, но оптимизационный алгоритм достаточно быстро улучшит исходные численные коэффициенты и не позволит алгоритму генетического программирования потерять хорошие с точки зрения пригодности, структуры, которые, как правило, являются нелинейными.

Таким образом, применение данной модификации позволяет алгоритму генетического программирования гораздо быстрее перейти от линейных (или слабо нелинейных) структур к более сложным за меньшее количество поколений (рис. 5).

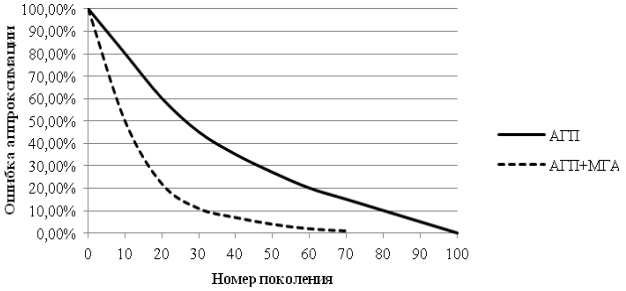


Рис. 5. Пример динамики уменьшения ошибки аппроксимации при применении модифицированного генетического алгоритма

Накопление и использование генетическим алгоритмом статистических данных о пространстве поиска. В ходе параметрической оптимизации генетический алгоритм накапливает и обрабатывает некоторую статистическую информацию о пространстве поиска, однако эта статистика в явном виде отсутствует. Для анализа работы генетического алгоритма предложен следующий способ представления накопленной генетическим алгоритмом статистики.

На каждом поколении генетического алгоритма вычисляется средняя пригодность $\text{fitness}_{\text{ср}}$. Далее подсчитывается количество единиц в j-м гене k-й хромосомы, удовлетворяющей неравенству $\text{fitness}_k \geq \text{fitness}_{\text{ср}}$. На основе статистических данных определяются вероятности появления единицы в j-м гене: $p_i = M_i / k$,

где M_i – количество единиц в j-м гене; k – количество хромосом в популяции с $\text{fitness}_k \geq \text{fitness}_{\text{ср}}$.

Полученные вероятности используютя при формировании хромосомы, значения генов которой инициализируются по следующему правилу (рис. 6):

– $p = 1$, если $p_i \geq \overline{p_{\max}} = \frac{1}{k_{\max}} \cdot \sum_{i=1}^{k_{\max}} p_{i\max}$, где $p_{i\max} \geq 0,5$;

– $p = 0$, если $p_i \leq \overline{p_{\min}} = \frac{1}{k_{\min}} \cdot \sum_{i=1}^{k_{\min}} p_{i\min}$, где $p_{i\min} < 0,5$;

– значение гена инициализируется случайным образом, если $\overline{p_{\min}} < p_i < \overline{p_{\max}}$.

Пусть например, вероятности имеют следующие значения:

№ гена	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P	0,54	0,25	0,19	0,8	0,9	0,32	0,65	0,12	0,93

Тогда

$$\overline{p_{\max}} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^{5} p_i^{\max} =$$

$$= \frac{1}{5} \cdot (0,54 + 0,8 + 0,9 + 0,65 + 0,93) = 0,764,$$

$$\overline{p_{\min}} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^{5} p_i^{\min} =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot (0,25 + 0,19 + 0,32 + 0,12) = 0,22.$$

В результате будет получена хромосома:

№ гена	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P	Rand	Rand	0	1	1	Rand	Rand	0	1

Эта хромосома, созданная на основе статистических данных каждого поколения, искусственно вводится в популяцию следующего поколения. В результате исследований было установлено, что в 85 % случаев пригодность полученной хромосомы выше средней на каждом поколении. Таким образом, данная хромосома задает вектор движения алгоритма и ускоряет его работу за счет распространения значений своих генов на всю популяцию.

Управление ресурсом генетического алгоритма, выделяемого для решения задачи оптимизации. В процессе работы алгоритма генетического программирования целью применения генетического алгоритма с предложенными выше модификациями является увеличение скорости генерирования структуры дерева решения с заданной ошибкой аппроксимации за счет повышения вероятности отбора нелинейных структур путем настройки численных коэффициентов. Но нельзя заранее предугадать, на каком именно поколении будет сгенерирована данная структура, из-за чего применение генетического алгоритма с ресурсом, сопоставимым с ресурсом алгоритма генетического программирования, даже с учетом интервала адаптации является необоснованным. Поэтому было предложено ограничить ресурс генетического алгоритма 20 % от ресурса алгоритма генетического программирования. Однако если генетический алгоритм находит решение с пригодностью, большей чем исходная пригодность этого же решения, найденного с помощью метода генетического программирования до настройки численных коэффициентов, то ресурс генетического алгоритма однократно увеличивается вдвое.

Эффективность модифицированного алгоритма в рамках интегрированной процедуры автоматизированного построения и оптимизации математических моделей сложных систем и процессов проверена на тестовых функциях с усреднением по многим запускам.

Работа гибридного алгоритма с применением предложенных модификаций исследовалась на задаче построения модели функции $\sin(x)$ на интервале [–3,14; 3,14] со случайным шагом и объемом тестовой выборки, равном 100 точкам. В качестве функционального множества использовались арифметические операции сложения, вычитания, умножения и деления, терминальное множество содержало переменную x и набор констант на интервале [–1;1] со случайным шагом.

Полученные результаты представлены в табл. 2, 3 и на рис. 7.

Таким образом, применение модифицированного генетического алгоритма для настройки численных коэффициентов решений, сгенерированных методом генетического программирования, способствовало увеличению эффективности работы метода генетического программирования по показателю N_3 ($E < 1$ %) на 15 % и снижению количества решений с ошибкой аппроксимации больше 5 % до нуля.

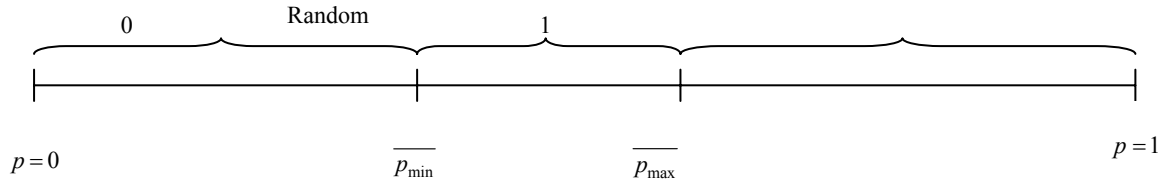


Рис. 6. Правила формирования хромосомы на основе статистических данных

Таблица 2

Обобщенные результаты исследований

Модификации	N_1, %	N_2, %	N_3, %	G	$C_п$
Использование статистических данных ГА	5	50	45	751	361
Управление ресурсом ГА	5	50	45	783	352
Использование статистических данных ГА + управление ресурсом ГА + переход коэффициентов лучших решений АГП	0	45	55	632	314

Таблица 3

Сравнительный анализ эффективности алгоритмов

№ п/п	Алгоритм	N_1, %	N_2, %	N_3, %
1	АГП	20	40	40
2	АГП + ГА	5	45	50
3	АГП + ГА + использование статистических данных ГА	5	50	45
4	АГП + ГА + использование статистических данных ГА + Управление ресурсом ГА	5	50	45
5	АГП+ГА + использование статистических данных ГА + управление ресурсом ГА + + переход коэффициентов лучших решений АГП	0	45	55

Синтез модифицированных эволюционных алгоритмов позволил создать гибридный алгоритм решения задачи символьной регрессии и оптимизации в рамках интегрированной процедуры автоматизированного построения и оптимизации математических моделей сложных систем и процессов на основе экспериментальных данных, превосходящий стандартный алгоритм генетического программирования по быстродействию и надежности.

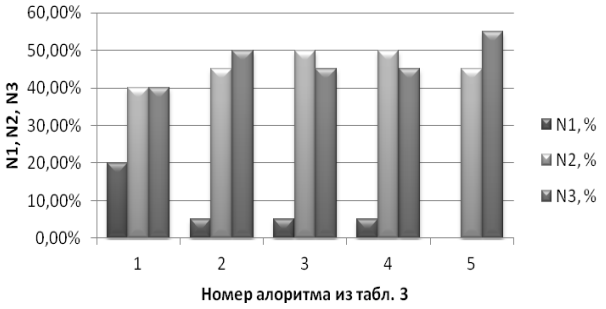


Рис. 7. Сравнительный анализ эффективности стандартных и предложенных алгоритмов

Предложенный алгоритм развивает эволюционную теорию моделирования и оптимизации сложных систем, а также теорию и практику поддержки принятия решений при управлении этими системами.

Библиографические ссылки

1. Koza J. R. Genetic Programming: On Programming Computer by Means of Natural Selection and Genetics. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1992.

2. Сопов Е. А. Эволюционные алгоритмы моделирования и оптимизации сложных систем : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2004.

3. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor : Univ. of Michigan Press, 1975.

4. Жуков В. Г. Моделирование сложных систем коэволюционным алгоритмом генетического программирования : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2006.

5. Жуков В. Г. О решении проблемы настройки численных коэффициентов при решении задачи символьной регрессии методом генетического программирования // Сб. тр. XII Нац. конф. по искусств. интеллекту / Твер. гос. техн. ун-т. Тверь, 2010. С. 311–317.

V. G. Zhukov

AUTOMATION OF CONSTRUCTION AND OPTIMIZATION OF MATHEMATICAL MODELS EVOLUTIONARY ALGORITHMS BASED ON EXPERIMENTAL DATA

The author considers synthesis of evolutionary algorithms for solution of the problem of symbolic regression and optimization, and their proposed modifications, through the development of integrated procedures of automated construction and optimization of mathematical models of complex systems and processes.

Keywords: evolutionary algorithms, symbolic regression, optimization.

© Жуков В. Г., 2011

УДК 658.512.001.56

М. В. Карасева, А. А. Новожилов, Т. А. Рукавицына

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Рассмотрено применение метода DEA и его модификации для оценки эффективности функционирования организационно-технических систем предприятий.

Ключевые слова: метод DEA, многоатрибутивный, организационно-техническая система, критерии оценки.

В последние годы во многих сферах производства и сбыта продукции очень остро встает проблема оценки эффективности функционирования предприятий. При этом часто возникают задачи сравнения между собой и упорядочивания структурных подразделений и предприятий или организаций в целом по некоторому латентному свойству, т. е. свойству, которое не поддается непосредственному измерению и общее представление о степени проявления которого складывается как результат определенного суммирования целого ряда частных характеристик. Главным понятием здесь является понятие эффективности – наиболее общего, определяющего свойства любой целенаправленной деятельности, которое с познавательной точки зрения раскрывается через категорию цели и объективно выражается степенью достижения цели с учетом затрат, ресурсов и времени [1]. Поэтому оценка эффективности функционирования предприятий и организаций является очень важной для принятия верных управленческих решений.

Одним из методов оценки эффективности является метод DEA (Data Envelopment Analysis – анализ вложенности данных), основанный на построении границы эффективности, которая является аналогом производственной функции для случая, когда выпуск является не скалярным, а векторным, т. е. когда выпускается несколько видов продукции. Эта граница имеет форму выпуклой оболочки или выпуклого конуса в пространстве входных и выходных переменных, описывающих каждый объект в исследуемой совокупности, и как бы огибает (обертывает) точки, соответствующие исследуемым объектам в многомерном пространстве. Граница эффективности используется в качестве эталона (точки отсчета) для получения численного значения оценки эффективности каждого из объектов в исследуемой совокупности. Степень эффективности объектов определяется степенью их близости к границе эффективности в многомерном пространстве входов/выходов. Способом построения границы эффективности является многократное решение задачи линейного программирования.

При проецировании неэффективного объекта на границу эффективности для него формируется целевой гипотетический объект, который является эффективным. Этот объект в математическом смысле представляет собой линейную комбинацию реальных эффективных объектов (под реальным объектом в данном случае подразумевается точка в многомерном пространстве). Число объектов, входящих в эту комбинацию, зависит от ряда факторов, в том числе от количества входных и выходных переменных, описывающих объекты, и от значений этих переменных, достижение которых является целью для неэффективного объекта.

Следует отметить, что значение технической эффективности не может превышать единицы. Объекты, для которых значение показателя эффективности оказалось равным единице, находятся на границе эффективности. Для объектов, у которых показатель эффективности оказался меньше единицы, могут быть выданы рекомендации, заключающиеся в выведении таких объектов на границу эффективности за счет пропорционального сокращения объемов затрачиваемых ими ресурсов при сохранении значений выходных переменных на прежнем уровне.

Таким образом, граница эффективности огибает точки, соответствующие эффективным объектам. Можно провести модификацию метода DEA, построив такую же границу, но наоборот, и назвав ее границей отставания. Граница отставания показывает убыточные или отстающие от основной части выборки объекты, т. е. она является эталоном для получения численного значения оценки отставания каждого из объектов [2].

После применения к исследуемой выборке объектов метода DEA и его модификации будут получены два показателя:

– мера эффективности объектов;

– мера их отставания/убыточности.

В рамках комбинированного подхода эти показатели можно их объединить для получения одной оценки, характеризующей каждый из объектов, применяя один из методов многокритериальной (многоатрибутивной [3; 4]) поддержки принятия решений с учетом того, что критерии (атрибуты) в данном случае будут противоречивыми.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» и Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы» (проект № 2011-1.9-519-005).

Рассмотрим реализацию метода DEA и его модификации на примере организационно-технических систем (ОТС) предприятий по сортировке твердых бытовых отходов.

Применение метода DEA для оценки эффективности ОТС возможно благодаря их следующим особенностям:

– входные параметры характеризуют сырье, энергию, вложения труда (персонал);

– выходные параметры характеризуют переработанный полезный продукт, остатки (то, что осталось от создания полезного продукта), их экологическое влияние на внешнюю среду;

– алгоритмизация объектов (в нашем случае – производственного характера) может проводиться на разных уровнях детализации, начиная от системы, взаимодействующей с внешними средой и факторами, и заканчивая локальным технологическим процессом.

Также выделим особенности ОТС предприятий по сортировке твердых бытовых отходов [5]:

– в качестве сырья используется в основном смешанная многокомпонентная масса;

– входами служат трудовые и энергетические затраты;

– в результате сортировки остаются компоненты, которые не удается рассортировать или они не могут быть использованы;

– эффективность предприятий определяется по нескольким критериям и поэтому укладывается в рамки метода DEA и его модификации с границей отставания.

Детализируем входы и выходы, которые применяются для анализа ОТС предприятий по сортировке твердых бытовых отходов на основе метода DEA:

– затраты на содержание рабочих (здесь может использоваться комплексный векторный вход, учитывающий затраты на каждого работника);

– затраты энергии на сортировку (либо общие затраты, либо затраты по отдельным машинам и агрегатам);

– объем сортируемых отходов;

– рассортированные отходы, например полиэтиленовые бутылки, полиэтилен высокого (ПВД) и низкого давления (ПНД), бумага, картон, стеклотара, стеклобой, алюминиевые банки, жестяные банки;

– объем так называемых хвостов – отходов, не отсортированных и неприменимых при имеющихся технологиях и мощностях, т. е. отходов, идущих на полигоны для временного или постоянного хранения (обезвреживания).

При реализации метода DEA и его модификации для анализа организационно-технических систем предприятий по сортировке твердых бытовых отходов ставятся и решаются два типа задач:

– первая задача состоит в определении эффективности, обеспечивающей максимальный выпуск набора полезных продуктов и материалов, т. е. максимальный выход. Эта задача решается с помощью метода DEA;

– вторая задача заключается в определении минимального нежелательного выхода. Для этого используется модификация метода DEA.

Метод DEA реализуется по следующей схеме:

– берется выборка нескольких объектов (в нашем случае – предприятий по сортировке твердых бытовых отходов);

– анализируются наборы их входных и выходных параметров;

– определяются эффективные объекты, для которых составляется граница эффективности. Эта граница служит для остальных объектов эталоном, с помощью которого появляется возможность выдавать неэффективным и слабо эффективным объектам рекомендации по корректировке их параметров.

С помощью границы отставания, которая строится с использованием модификации метода DEA, определяется граница неэффективных объектов. В этом случае анализируется выход, характеризующий остатки, которые идут на полигоны, т. е. не участвуют в дальнейшей хозяйственной деятельности и являются отрицательным фактором, требующим минимизации с целью повышения выпуска полезных продуктов.

Критериями оценки предприятий по сортировке твердых бытовых отходов как организационно-технических систем будут энергоэффективность, оптимальность работы технологической линии, степень автоматизации производства и некоторые другие. На основании этих критериев можно определить следующие направления по повышению эффективности производства:

– производить больший процент рассортированных компонентов, затрачивая один и тот же объем отходов;

– минимизировать затраты энергии на сортировку 1 т отходов;

– сократить и более эффективно использовать труд рабочих путем повышения технологических параметров за счет модернизации производства;

– определить лидеров неэффективности и выявить ее причины.

Таким образом, нами рассмотрено применение метода DEA и его модификации для оценки эффективности функционирования ОТС на примере предприятий по сортировке твердых бытовых отходов. Предложенная схема может быть использована для повышения эффективности работы организационно-технических систем, комплексов, объектов в разных сферах хозяйственной деятельности.

Библиографические ссылки

1. Моргунов Е. П. Многомерная классификация на основе аналитического метода оценки эффективности сложных систем / НИИ систем упр., волновых процессов и технологий. Красноярск, 2003.

2. Рукавицына Т. А. Развитие модели методологии DEA // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (24). С. 74–77.

3. Царев Р. Ю. Модификация многоатрибутивного метода принятия решений в задачах выбора компонентов систем управления // Информ. технологии. 2007. № 7. С. 19–23.

4. Итеративный метод многоатрибутивного формирования оптимального состава информационно-управляющих систем / И. В. Ковалев, А. В. Аниконов, М. Ю. Слободин, Р. Ю. Царев // Системы упр. и информ. технологии. 2006. № 2 (24). С. 90–95.

5. Новожилов А. А. Метод DEA для анализа функционирования предприятий по переработке твердых бытовых отходов // Информатика и системы упр. 2010. № 1. С. 98–103.

M. V. Karaseva, A. A. Novozhilov, T. A. Rukavitsina

TO THE QUESTION OF ESTIMATION OF EFFICIENCY OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS FUNCTIONING

The paper considers application of DEA-method and its modifications used for estimation of efficiency of functioning of organizational and technical systems of enterprises.

Keywords: DEA-method, multiatributive, organizational and technical system, estimation criteria.

© Карасева М. В., Новожилов А. А., Рукавицына Т. А., 2011

УДК 62-83:681.5

В. П. Кочетков, А. В. Коловский

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С РАЗРЫВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассмотрен автоматизированный электропривод экскаватора с разрывным управлением и выбор оптимальной поверхности скольжения. Исследовано влияние весовых коэффициентов критерия оптимальности на динамику электропривода в режимах пуска и стопорения, а также предложен алгоритм выбора весовых коэффициентов.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, система с переменной структурой, скользящий режим.

Разработка и совершенствование методов и алгоритмов синтеза управления сложными динамическими объектами, описываемыми системой дифференциальных уравнений высокого порядка, коэффициенты которых могут меняться в широком диапазоне, является актуальной проблемой современной теории и практики управления [1]. Примерами подобных объектов могут быть различные летательные аппараты, манипуляционные и мобильные роботы, станки, экскаваторы, различные технологические установки и процессы.

Эти объекты представляют собой сложные многомассовые системы, на динамику которых большое влияние оказывают зазоры в передачах и действие упругих элементов, причем жесткость упругой связи и момент инерции исполнительного органа значительно меняются в процессе технологического цикла и зависят от геометрического положения исполнительного органа в пространстве. В данной статье в качестве такого органа рассмотрен электропривод копающего механизма экскаватора.

Одним из перспективных подходов к синтезу систем управления сложными динамическими объектами является применение систем с переменной структурой (СПС), разработанных академиком С. В. Емельяновым и его школой [2]. Наиболее широкое распространение в этом подходе получило направление, изучающее скользящие режимы [3]. В таких режимах движение изображающей точки определяется уравнением поверхности переключения и не зависит от свойств объекта управления, т. е. система, находящаяся в скользящем режиме, инвариантна к параметрическим и внешним возмущениям.

Управление автоматизированными электроприводами, питающимися от силовых управляемых полупроводниковых преобразователей энергии, осуществляется изменением напряжения. Современные силовые приборы работают преимущественно в ключевом режиме с целью обеспечения малых потерь энергии. Следовательно, управляемый электропривод является динамической нелинейной системой, описываемой дифференциальными уравнениями с разрывной правой частью.

Напряжение, подаваемое на обмотку электрической машины и являющееся для нее управлением, в силу ключевого характера работы полупроводниковых элементов преобразователя напряжения, носит разрывной характер. В этом случае разрывной характер управления, являющийся основным признаком систем с переменной структурой, не является навязанным системе извне свойством, а определяется ее физической природой, что и обусловливает перспективность использования скользящих режимов для управления электроприводами.

Математическое описание двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) с силовым полупроводниковым преобразователем при общепринятых допущениях может быть представлено системой линейных дифференциальных уравнений [4]:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathrm{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u\,, \qquad (1)$$

где $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} i_a & \omega_1 & M_y & \omega_2 \end{bmatrix}^T$ – вектор состояния системы, здесь i_a – ток якорной цепи, ω_1 – скорость первой массы, M_y – упругий момент, ω_2 – скорость второй массы; u – управляющее воздействие; $\mathbf{A}$ – 4 × 4-мерная матрица; $\mathbf{B}$ – вектор размера 4 × 1.

Математическое описание системы при исследовании ее динамики дается в относительных единицах, т. е. координаты электропривода рассматриваются относительно их базовых значений. В качестве базовых для напряжения управления и угловых скоростей приняты их номинальные значения, для тока якорной цепи и момента – их максимальные (стопорные) значения.

Сведем задачу управления к задаче стабилизации. Для этого введем вектор желаемого состояния $\mathbf{X}_ж$ для двухмассовой системы:

$$\mathbf{X}_ж = \begin{bmatrix} i^*_{aж} & \omega^*_{1ж} & M^*_{yж} & \omega^*_{2ж} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & g & 0 & g \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{X}_ж = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T g = \mathbf{L}g,$$

где $i^*_{aж}$, $\omega^*_{1ж}$, $M^*_{yж}$, $\omega^*_{2ж}$ – желаемые значения в установившемся режиме для тока якорной цепи, скорости первой массы, упругого момента и скорости второй массы в относительных единицах соответственно; g – задающий сигнал. Необходимо синтезировать такую функцию управления u с использованием информации о векторах состояния объекта $\mathbf{X}$ и вектора желаемых величин $\mathbf{X}_ж$, чтобы вектор рассогласования $\mathbf{E} = \mathbf{X}_ж - \mathbf{X}$ был сведен к нулю.

Запишем уравнение движения относительно вектора рассогласования с учетом того, что $\dot{\mathbf{X}}_ж = 0$:

$$\dot{\mathbf{E}} = \mathrm{A}\mathbf{E} - \mathbf{B}u - \mathbf{K}g, \tag{2}$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{A}\mathbf{L}$.

Таким образом, будем рассматривать $\mathbf{K}g$ как возмущающее воздействие. В работе [1] доказано, что его влияние на динамику системы можно устранить с помощью разрывного управления.

Как известно, уравнение поверхности переключения имеет вид

$$s = \mathbf{C}\mathbf{E} = 0, \tag{3}$$

где $\mathbf{C}$ – вектор коэффициентов поверхности переключения размера 1 × 4.

Для приведения системы (1) к регуляторной форме [3] введем пространство новых переменных, связанных с исходными линейным преобразованием

$$\bar{\mathbf{E}} = \mathbf{M}\mathbf{E},$$

чтобы для рассматриваемой двухмассовой системы четвертого порядка выполнялось условие

$$\mathbf{M}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \tag{4}$$

Для этого первые три строки матрицы $\mathbf{M}$ должны быть составлены из базиса трехмерного подпространства, ортогонального управлению:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1/b & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Поведение системы (2) в пространстве новых переменных $\bar{\mathbf{E}}$ описывается уравнением

$$\frac{d\bar{\mathbf{E}}}{dt} = \mathbf{M}\mathbf{A}\mathbf{M}^{-1}\bar{\mathbf{E}} - \mathbf{M}\mathbf{B}u - \mathbf{M}\mathbf{K}g,$$

или

$$\begin{cases} \dfrac{d\bar{\mathbf{E}}_1}{dt} = \mathbf{A}_{11}\bar{\mathbf{E}}_1 + \mathbf{A}_{12}\bar{e}_4 - \mathbf{K}_1 g, \\ \dfrac{d\bar{e}_4}{dt} = \mathbf{A}_{21}\bar{\mathbf{E}}_1 + a'_{44}\bar{e}_4 - u - k_2 g, \end{cases} \tag{5}$$

где $\bar{\mathbf{E}}_1$ и $\bar{e}_4$ – соответственно четырех- и одномерный векторы состояния, полученные из компонентов вектора $\boldsymbol{e}'$:

$$\bar{\mathbf{E}} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{E}}_1 \\ \bar{e}_4 \end{pmatrix}, \ \bar{\mathbf{E}}_1 = \begin{pmatrix} \bar{e}_1 & \bar{e}_2 & \bar{e}_3 \end{pmatrix}^T,$$

$$\mathbf{M}\mathbf{A}\mathbf{M}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & a'_{44} \end{pmatrix}, \ \mathbf{M}\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_1 \\ k'_4 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{K}_1 = \begin{pmatrix} k'_1 & k'_2 & k'_3 \end{pmatrix}^T.$$

При синтезе поверхности переключения пренебрегаем возмущающим воздействием, влияние которого в дальнейшем скомпенсируем выбором соответствующего разрывного управления.

Уравнение (3) поверхности разрыва $s = 0$ относительно новых переменных имеет вид

$$s = \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\bar{\mathbf{E}} = \mathbf{C}_1\bar{\mathbf{E}}_1 + c'_4\bar{e}_4 = 0, \tag{6}$$

где $\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{C}}_1 & \bar{c}_4 \end{pmatrix}$; $\bar{\mathbf{C}}_1 = \begin{pmatrix} \bar{c}_1 & \bar{c}_2 & \bar{c}_3 \end{pmatrix}$. Для простоты синтеза примем $\bar{c}_4 = 1$.

Для получения уравнения движения в скользящем режиме с учетом (5) необходимо решить уравнение $\dot{s} = 0$ и подставить полученное решение в систему (6):

$$\begin{cases} \dfrac{d\bar{\mathbf{E}}_1}{dt} = \mathbf{A}_{11}\bar{\mathbf{E}}_1 + \mathbf{A}_{12}\bar{e}_4 - \mathbf{K}_1 g, \\ \bar{e}_4 = -\mathbf{C}_1\bar{\mathbf{E}}_1. \end{cases} \tag{7}$$

Систему (7) можно рассматривать как разомкнутую систему с вектором состояния $\bar{\mathbf{E}}_1$, управлением $\bar{e}_4$ и возмущением g. Таким образом, нахождение поверхности скольжения сводится к задаче оптимального управления первым уравнением системы (7).

Для оптимизации движения системы (7) в скользящем режиме классический критерий оптимальности вида

$$J = \int_0^\infty \left(\mathbf{E}^T \mathbf{Q}\mathbf{E} + ru^2 \right) dt$$

не годится, так как движение в скользящем режиме не зависит от управления и определяется положением поверхностей разрыва. Поэтому в качестве критерия нужно рассматривать функционал

$$J = \int_0^\infty \left(\mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E}\right) dt, \qquad (8)$$

где $\mathbf{Q}$ – весовая диагональная матрица.

Оптимизируемый функционал (8) относительно новых переменных приобретет вид

$$J = \int_0^\infty \left(\bar{\mathbf{E}}_1^{\,T} \mathbf{Q}_{11} \bar{\mathbf{E}}_1 + 2\bar{\mathbf{E}}_1^{\,T} \mathbf{Q}_{12} \bar{e}_4 + q'_{44} \left(\bar{e}_4\right)^2\right) dt\,, \qquad (9)$$

где $(\mathbf{M}^{-1})^T \mathbf{Q} \mathbf{M}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{11} & \mathbf{Q}_{12} \\ \mathbf{Q}_{21} & q'_{44} \end{pmatrix}$; $\mathbf{Q}_{21}^T = \mathbf{Q}_{12}$.

Для рассматриваемой электромеханической системы

$$\mathbf{Q}_{11} = \begin{bmatrix} q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & q_{22} \end{bmatrix}, \; \mathbf{Q}_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \; q'_{44} = \begin{bmatrix} q_{11} b^2 \end{bmatrix},$$

т. е. векторы $\mathbf{Q}_{12}$ и $\mathbf{Q}_{21}$ являются нулевыми. Тогда

$$J = \int_0^\infty \left(\bar{\mathbf{E}}_1^{\,T} \mathbf{Q}_{11} \bar{\mathbf{E}}_1 + q'_{44} \bar{e}_4^2\right) dt\,. \qquad (10)$$

Выбирая $\bar{\mathbf{E}}_1$ в качестве вектора состояния, а $\bar{e}_4$ – в качестве управления для движения в скользящем режиме, получим классическую постановку задачи оптимального управления с квадратичным критерием [5]. Иными словами, оптимальное управление системой (7) при критерии (10) определяется следующим образом:

$$\bar{e}_4 = -q'^{\,-1}_{44} \mathbf{A}_{12}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{E}}_1\,,$$

где $\mathbf{P}$ – решение матричного уравнения Риккати:

$$\mathbf{P}\mathbf{A}_{11} + \mathbf{A}_{11}^{\,T} \mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{A}_{12} q'^{-1}_{44} \mathbf{A}_{12}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q}_{11} = 0\,.$$

Таким образом, оптимальное управления $\bar{e}_4$ из (7) имеет вид

$$\bar{e}_4 = -\mathbf{C}_1 \bar{\mathbf{E}}_1 = -q'^{-1}_{44} \mathbf{A}_{12}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{E}}_1\,.$$

Из последнего выражения имеем $\mathbf{C}_1 = q'^{-1}_{44} \mathbf{A}_{12}^T \mathbf{P}$, подставив которое в (6), получим уравнение поверхности переключения (в исходных координатах), на которой должен быть организован скользящий режим:

$$s = \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1} \bar{\mathbf{E}} = \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1} \mathbf{M}\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \bar{c}_4 \end{bmatrix} \mathbf{M}\mathbf{e} =$$

$$= \begin{bmatrix} q'^{\,-1}_{44} \mathbf{A}_{12}^T \mathbf{P} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{M}\mathbf{E} = 0.$$

При организации управляющего воздействия в виде кусочно-линейной функции вектора желаемого состояния системы и вектора рассогласования

$$u = \left(\alpha \sum_{i=1}^{n} \left|e_i\right| - q\left|g\right|\right) \mathrm{sign}(s) \qquad (11)$$

в системе возникнет устойчивый скользящий режим на выбранной поверхности переключения.

Из теории систем с переменной структурой известно, что для обеспечения устойчивого скользящего режима на поверхности s необходимым и достаточным условием является выполнение неравенства

$$s\dot{s} < 0\,. \qquad (12)$$

Производную поверхности переключения можно записать в виде

$$\dot{s} = \mathbf{H}\mathbf{E} - du - pg = 0\,, \qquad (13)$$

где $\mathbf{H} = \mathbf{C}\mathbf{A}$; $d = \mathbf{C}\mathbf{B}$; $p = \mathbf{C}\mathbf{K}$. Подставим значение $\dot{s}$ из (13) с учетом управления (11) в условие (12):

$$s\left(\mathbf{H}\mathbf{E} - d\left(\alpha \sum_{i=1}^{n} \left|e_i\right| - q\left|g\right|\right) \mathrm{sign}(s) - pg\right) < 0\,.$$

Условие устойчивости выполняется, если выполняется следующая система неравенств:

$$\begin{cases} s\left(\mathbf{H}\mathbf{E} - d\alpha \sum_{i=1}^{n} \left|e_i\right| \mathrm{sign}(s)\right) < 0, \\ s\left(-pg + dq\left|g\right| \mathrm{sign}(s)\right) < 0. \end{cases}$$

Таким образом, скользящий режим устойчив при соблюдении условия

$$\begin{cases} d\alpha > \max\left(\left|h_i\right|\right), \\ dq < -\left|p\right|. \end{cases} \qquad (14)$$

При выполнении этих неравенств в законе управления (11) на поверхности $s = 0$ всегда возникает скользящий режим.

В рассмотренном выше алгоритме все компоненты управления (11) пропорциональны норме вектора желаемого состояния и вектора рассогласования с одними и теми же коэффициентами α и q, которые должны удовлетворять условию (14).

Графически работа системы управления с переменной структурой может быть представлена следующим образом (рис. 1).

В результате исследования влияния весовых коэффициентов критерия оптимальности на динамику электромеханической системы были определены следующие рекомендации по выбору этих коэффициентов.

Необходимо, чтобы все коэффициенты весовой диагональной матрицы были больше нуля, и при расчете в относительных единицах эти коэффициенты удобно вначале поставить равными единице.

Весовые коэффициенты нужно подбирать одинаковыми для пар координат: первая пара – рассогласования скоростей первой и второй массы; вторая пара – рассогласования тока якорной цепи и упругого мо-

мента. Коэффициенты в каждой группе координат нужно принимать равными по значению и в процессе настройки требуемого качества регулирования изменять одновременно на одну величину. Это заметно упрощает процедуру выбора весовой матрицы. При этом расчет в относительных единицах позволяет использовать тот факт, что равные по значению весовые коэффициенты при координатах означают равный вкладываемый вес или равную важность минимизации этих координат между собой.

Коэффициенты при рассогласованиях скоростей следует выбирать больше единицы, так как в этом случае увеличивается быстродействие системы и ток рекуперации при стопорении, что позволяет снизить амплитуду упругого момента. Однако чрезмерное их увеличение ведет к повышению колебательности системы и может вызвать незатухающие автоколебания скорости и тока.

Влияние весовых коэффициентов критерия оптимальности на показатели динамики ЭМС показано на представленных ниже графиках (рис. 2–5).

Снижение коэффициентов при рассогласованиях тока якорной цепи и упругого момента усиливает эффект от повышения коэффициентов при рассогласовании скоростей. Поэтому большое значение имеет отношение коэффициентов при скоростях и моментах.

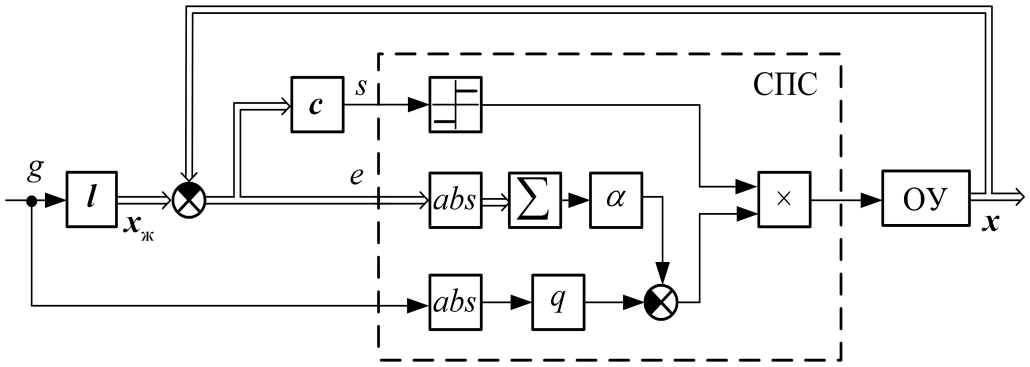


Рис. 1. Алгоритмическая схема системы с переменной структурой

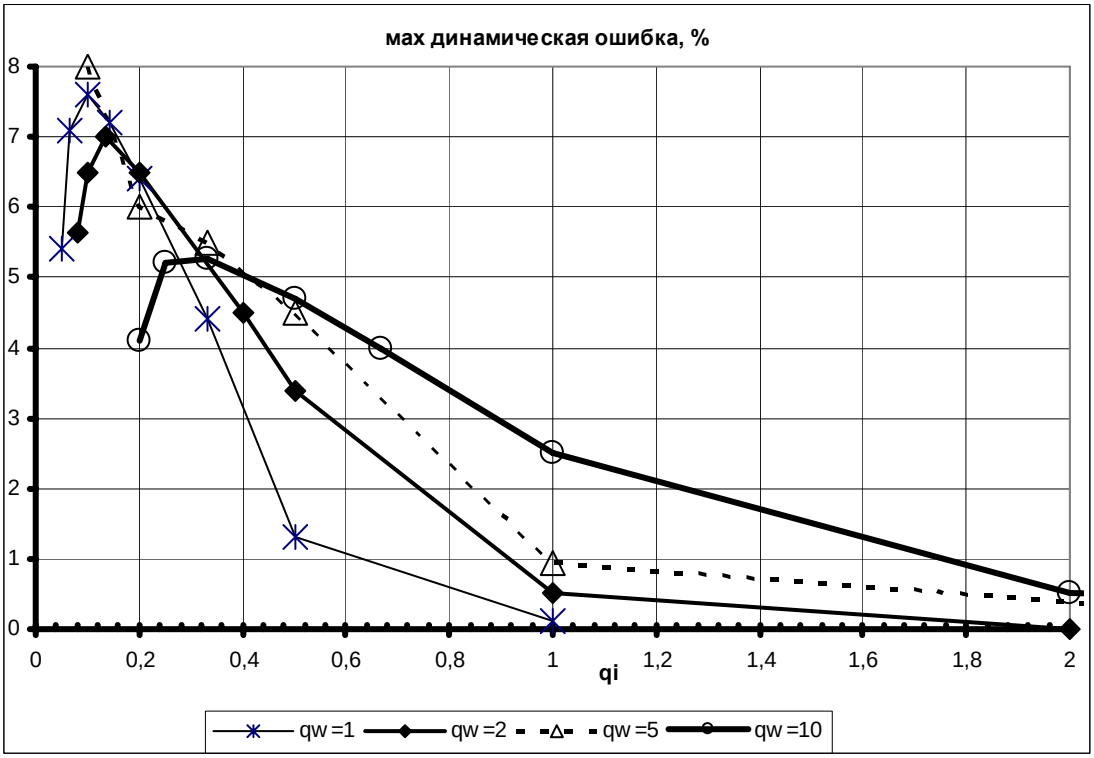


Рис. 2. Зависимость максимального перерегулирования скорости второй массы от весовых коэффициентов при i_a и M_y и различных весовых коэффициентов при ω

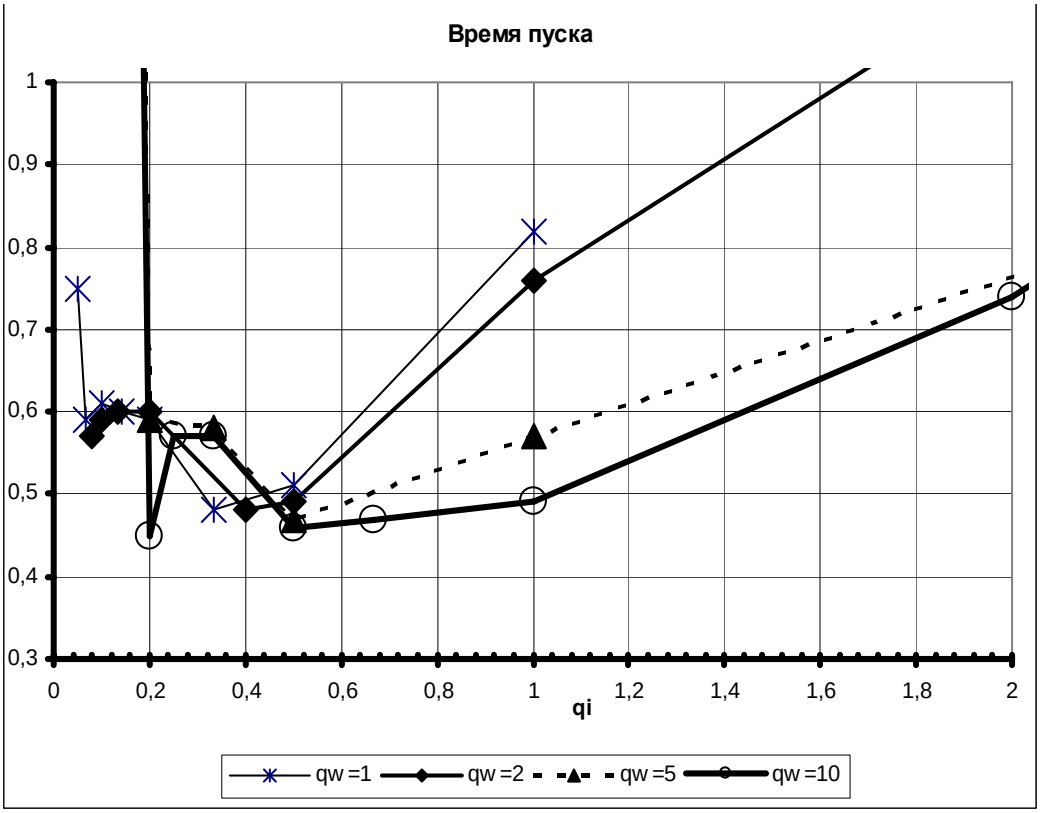


Рис. 3. Зависимость времени переходного процесса скорости второй массы от весовых коэффициентов при i_a и M_y и различных весовых коэффициентов при ω

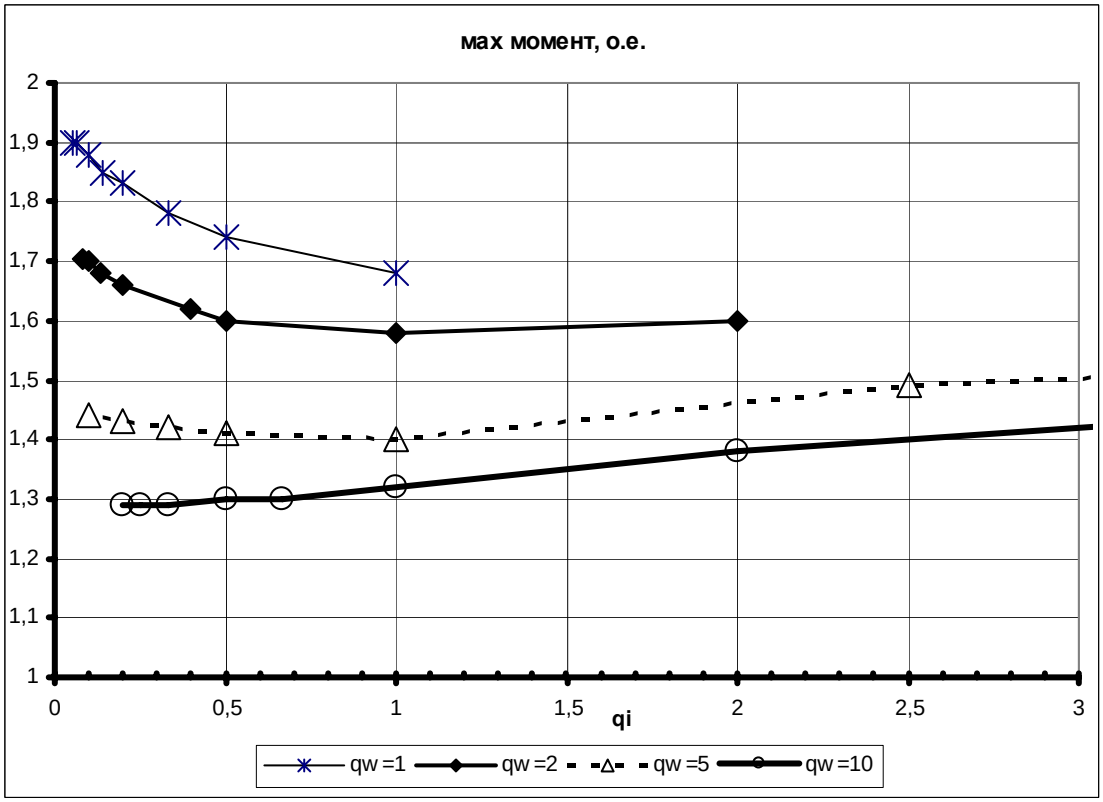


Рис. 4. Зависимость максимального упругого момента от весовых коэффициентов при i_a и M_y и различных весовых коэффициентов при ω

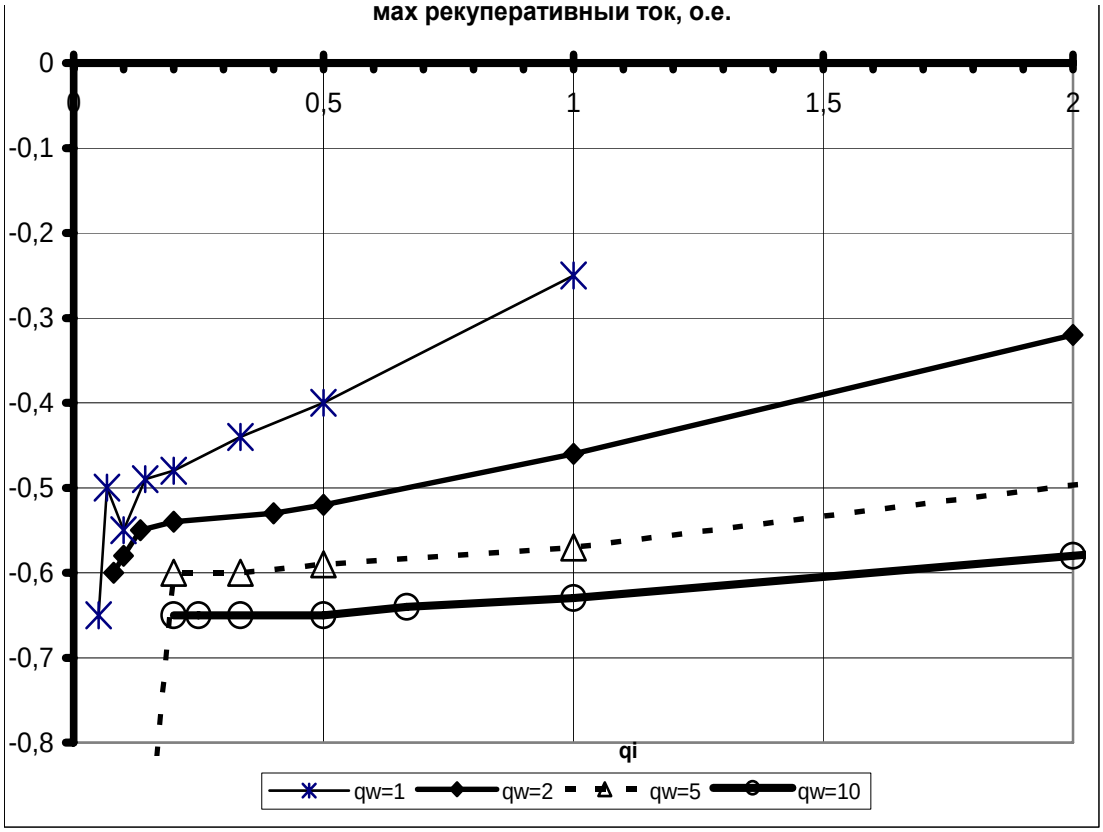


Рис. 5. Зависимость максимального рекуперативного тока при стопорении от весовых коэффициентов при i_a и M_y и различных весовых коэффициентов при ω

Таким образом, весовые коэффициенты при рассогласовании i_a и M_y следует выбирать меньше 1, а весовые коэффициенты при рассогласовании скоростей – больше в 20–25 раз коэффициентов при рассогласовании i_a и M_y.

Итак, авторами решена задача динамической оптимизации ЭМС при помощи скользящих режимов. Результаты моделирования показали работоспособность и устойчивость синтезированной системы управления к внешним возмущающим воздействиям.

Библиографические ссылки

1. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 5 т. Т. 5 : Методы современной теории автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2004.

2. Теория систем с переменной структурой / под ред. С. В. Емельянова. М. : Наука, 1970.

3. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах управления и автоматизации. М. : Наука, 1981.

4. Кочетков В. П. Основы теории управления : учеб. пособие / Хакас. гос. ун-т. 2-е изд., испр. Абакан, 2007.

5. Кочетков В. П., Подборский П. Э., Коловский А. В. Оптимизация динамики электромеханической системы с помощью систем с переменной структурой // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 10 (103). С. 42–47.

V. P. Kochetkov, A. V. Kolovskiy

OPTIMIZATION OF DYNAMICS OF THE AUTOMATED ELECTRIC DRIVE WITH EXPLOSIVE CONTROL

In the paper the authors consider an excavating machine automated electric drive with explosive control and a choice of the optimum slide surface. The influence of weight coefficients of an optimization criterion on dynamics of such electric drive in triggering and stopping modes are investigated, and the algorithm of weight coefficients selection is offered.

Keywords: automated electric drive, system with unstable structure, sliding regime.

© Кочетков В. П., Коловский А. В., 2011

УДК 519.24

А. В. Лапко, В. А. Лапко

СРАВНЕНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗ О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН*

С позиций принципов коллективного оценивания развивается методика проверки гипотезы о тождественности законов распределениях случайных величин, основанная на непараметрических алгоритмах распознавания образов. Проведено ее сравнение с критериями Смирнова и Пирсона.

Ключевые слова: непараметрическая статистика, распознавание образов, проверка статистических гипотез, распределение случайных величин, критерий Смирнова, критерий Пирсона.

Для проверки гипотез о распределениях случайных величин широко используется критерий согласия Пирсона, который не зависит от распределений случайных величин и их размерности [1]. Однако методика формирования критерия Пирсона содержит трудно формализуемый этап разбиения области возможных значений случайной величины на многомерные интервалы. Данный этап отсутствует в критерии Смирнова [2] и методике, основанной на использовании непараметрических алгоритмов распознавания образов [3; 4].

Проведем сравнение эффективности указанных критериев при проверке гипотезы о тождественности законов распределения одномерных случайных величин по данным вычислительных экспериментов.

Традиционные непараметрические критерии. Пусть X_1 и X_2 – две генеральные совокупности с произвольными законами распределения.

Необходимо по независимым выборкам $V_1 = \left(x^i,\ i = \overline{1, n_1}\right)$ и $V_2 = \left(x^i,\ i = \overline{1, n_2}\right)$, извлеченным из данных генеральных совокупностей, проверить либо опровергнуть гипотезу

$$H_\circ :\ P\left(X_1\right) \equiv P\left(X_2\right)$$

о тождественности законов распределения.

Методика проверки статистической гипотезы $H_\circ$ на основе *критерия Смирнова* сводится к выполнению следующих шагов.

Шаг 1. По независимым выборкам V_1, V_2 построить оценки функций распределения

$$\bar{P}_j\left(x\right) = \frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n_j} 1\left(x - x^i\right),\quad j = 1, 2,$$

где

$$1\left(x - x^i\right) = \begin{cases} 0, & \text{если } x - x^i < 0, \\ 1, & \text{если } x - x^i \ge 0. \end{cases}$$

Шаг 2. Найти максимальное расхождение между эмпирическими функциями распределения

$$\bar{D}_{12} = \max_x \left|\bar{P}_1\left(x\right) - \bar{P}_2\left(x\right)\right|.$$

Шаг 3. В соответствии с критерием Смирнова [5] сравнить полученное максимальное расхождение $\bar{D}_{12}$ с пороговым:

$$D_\alpha = \sqrt{-\ln\frac{\alpha}{2}\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)/2}\ ,$$

где α – принятый уровень доверия, т. е. риск отвергнуть гипотезу $H_\circ$.

Если выполняется условие $\bar{D}_{12} < D_\alpha$, то гипотеза $H_\circ$ справедлива, иначе эмпирические законы распределения различаются.

Критерий Пирсона предполагает выполнение следующих шагов.

Шаг 1. Разбить область изменения исследуемых случайных величин на *N* непересекающихся интервалов. Их количество может быть определено по эвристическим формулам Старджесса

$$N = \log_2 n + 1,$$

Брукса и Каррузера

$$N = 5\ \lg n$$

или Гаеде

$$N = \sqrt{n},$$

где $n = n_1 + n_2$.

Шаг 2. Вычислить частоты $\bar{P}_1^j$, $\bar{P}_2^j$, $\bar{P}_{12}^j$ попадания элементов последовательностей V_1, V_2 и $V_1 \bigcup V_2$ в каждый *j*-й интервал, $j = \overline{1, N}$. Если для некоторого *j*-го интервала значение $\bar{P}_{12}^j = 0$, то количество интервалов уменьшается на единицу и производится перерасчет размера интервалов и соответствующих им частот. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будет определено количество интервалов $\tilde{N} \le N$, для которых выполняются условия $\bar{P}_{12}^j \ne 0$, $j = \overline{1, \tilde{N}}$.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (государственный контракт № 02.740.11.0621).

Шаг 3. Рассчитать значение случайной величины по формуле [1, с. 330]

$$Z = \sum_{t=1}^{2} n_t \sum_{j=1}^{\tilde{N}} \frac{\left(\overline{P}_t^j - \overline{P}_{12}^j\right)^2}{\overline{P}_{12}^j},$$

которое имеет χ^2-распределение с $k = \tilde{N} - 1$ степенями свободы.

Шаг 4. По таблице χ^2-распределения определить порог $\chi^2(k, \alpha)$ одностороннего критерия Пирсона при заданных значениях k и уровне значимости α.

Гипотеза $H_\circ$ справедлива, если $Z < \chi^2(k, \alpha)$, иначе она отвергается.

Методика 1 проверки гипотезы о распределениях. Будем полагать, что элементы последовательностей случайных величин V_1 и V_2 принадлежат соответственно классам Ω_1 и Ω_2. Сформируем обучающую выборку $V = \left(x^i,\ \sigma(i), i = \overline{1, n}\right)$ для решения задачи распознавания образов, где $n = n_1 + n_2$; $\sigma(i)$ – указание о принадлежности значения x^i к тому либо иному классу. На этой основе построим непараметрический алгоритм распознавания образов, соответствующий критерию максимального правдоподобия [6]:

$$\overline{\overline{m}}(x): \begin{cases} x \in \Omega_1, \text{ если } \overline{f}_{12}(x) \le 0, \\ x \in \Omega_2, \text{ если } \overline{f}_{12}(x) > 0. \end{cases} \quad (1)$$

При формировании оценки уравнения разделяющей поверхности

$$\overline{f}_{12}(x) = \overline{p}_2(x) - \overline{p}_1(x) \quad (2)$$

можно использовать непараметрические оценки $\overline{p}_1(x), \overline{p}_2(x)$ плотностей вероятности распределения x в классах Ω_1, Ω_2 типа Розенблатта–Парзена [7]. Тогда статистика (2) будет представлена выражением

$$\tilde{f}_{12}(x) = (n\,c)^{-1} \sum_{i=1}^{n} \sigma_1(i)\ \ \Phi\left(\frac{x - x^i}{c}\right), \quad (3)$$

где

$$\sigma_1(i) = \begin{cases} -\overline{P}_1^{-1} \ \forall\ \ x^i \in \Omega_1, \\ \ \ \overline{P}_2^{-1} \ \forall\ \ x^i \in \Omega_2; \end{cases}$$

$\overline{P}_j = \dfrac{n_j}{n}$ – оценка априорной вероятности принадлежности ситуаций обучающей выборки к классу Ω_j, $j = 1, 2$. Ядерные функции в статистике (3) удовлетворяют условиям $\Phi(u) = \Phi(-u)$, $0 \le \Phi(u) < \infty$, $\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(u)du = 1$, а значения их коэффициентов размытости c убывают с ростом количества элементов множеств V_j, $j = 1, 2$.

Выбор оптимального значения $\overline{c}$ коэффициента размытости непараметрического решающего правила $\overline{m}(x)$ осуществляется по условию минимума оценки вероятности ошибки распознавания образов

$$\overline{\rho}(c) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} 1\left(\sigma(t), \overline{\sigma}(t)\right),$$

где индикаторная функция

$$1\left(\sigma(t), \overline{\sigma}(t)\right) = \begin{cases} 0 & \forall \quad \sigma(t) = \overline{\sigma}(t) \\ 1 & \forall \quad \sigma(t) \ne \overline{\sigma}(t); \end{cases}$$

$\overline{\sigma}(t)$ – решение о принадлежности значений x^t к классу Ω_1 либо Ω_2, полученное в соответствии с алгоритмом распознавания образов (1).

При вычислении $\overline{\rho}(c)$ решение $\overline{\sigma}(t)$ алгоритма (1) определим в соответствии со знаком статистики

$$\tilde{f}_{12}\left(x^t\right) = (n\,c)^{-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \ne t}}^{n} \sigma_1(i)\ \ \Phi\left(\frac{x^t - x^i}{c}\right),$$

т. е. ситуация x^t, которая подается на контроль, исключается из процесса обучения.

Известно, что если при решении двуальтернативной задачи распознавания образов вероятность ошибки классификации равна 0,5, то законы распределения случайных величин в области определения классов совпадают. Поэтому появляется возможность перехода от задачи сравнения законов распределения случайных величин к проверке гипотезы $\overline{H}_\circ$ о равенстве статистической оценки вероятности ошибки распознавания образов значению 0,5.

Проверим гипотезу $\overline{H}_\circ$: $\overline{\rho}(\overline{c}) = 0{,}5$ в соответствии с критерием Колмогорова. Для этого сравним его пороговое значение

$$\tilde{D}_\alpha = \sqrt{-\ln\frac{\alpha}{2}\left(\frac{1}{n_1 + n_2}\right)/2}$$

с отклонением $\overline{D}_{12} = \left|0{,}5 - \overline{\rho}(\overline{c})\right|$ при вероятности α отвергнуть правильную гипотезу $\overline{H}_\circ$.

Гипотеза $\overline{H}_\circ$ справедлива при выполнении условия $\overline{D}_{12} < \tilde{D}_\alpha$, иначе она отвергается.

Существуют условия, когда использование предлагаемой методики и критерия Смирнова приводит к сопоставимым результатам. К таким условиям относятся задачи проверки гипотез при разных законах распределения случайных величин и одинаковых законах распределения, когда объемы сравниваемых последовательностей V_1, V_2 отличаются незначительно [3].

Для различных объемах случайных последовательностей, например при $n_1 = 2n_2$, установлено снижение эффективности методики 1 по сравнению

с критерием Смирнова. Данный факт согласуется с результатами работы [8], где показано значительное снижение аппроксимационных свойств непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности при увеличении степени неравномерности распределения элементов обучающей выборки между классами.

Методика 2 проверки гипотезы о распределениях. Пусть количество элементов исследуемых последовательностей случайных величин отличается значительно, например $n_1 > n_2$. Сформируем набор сравниваемых последовательностей $\left(V_1(j) = \left(x^i,\ i \in I_j\right), V_2 = \left(x^i,\ i = \overline{1, n_2}\right)\right),\ \ j = \overline{1, T}$, где I_j – множество номеров элементов последовательности V_1, составляющих сравниваемую последовательность $V_1(j)$. Элементы выборки $V_1(j)$ объемом n_2 формируются случайным образом из последовательности V_1.

В соответствии с методикой 1 проверим гипотезы $\overline{H}_\circ(j)$: $\overline{\rho}_j(\overline{c}) = 0{,}5$ и по полученным данным рассчитаем оценки вероятностей $\overline{P}_\circ = S/T$, $\overline{P} = \overline{S}/T$ справедливости гипотезы $\overline{H}_\circ$ и ее отклонения соответственно. Здесь S – количество решений о справедливости, а $\overline{S}$ – об отклонении гипотез $\overline{H}_\circ(j)$, $j = \overline{1, T}$.

Проверим достоверность отличия $\overline{P}^1$ и $\overline{P}$ с использованием критерия Смирнова. Для этого вычислим его пороговое значение

$$\overline{\overline{D}}_\alpha = \sqrt{-\ln \frac{\alpha}{2} / T},$$

которое сравним с разностью $\overline{\overline{D}} = \left|\overline{P}_\circ - \overline{P}\right|$.

Исходная гипотеза $H_\circ$ подтверждается, если $\overline{\overline{D}} > \overline{\overline{D}}_\alpha$ и $\overline{P}_\circ > \overline{P}$, в противном случае, т. е. при $\overline{P}_\circ < \overline{P}$, она отвергается.

Анализ результатов вычислительных экспериментов. Сравним эффективность приведенных выше методик проверки гипотезы о распределениях случайных величин по данным вычислительных экспериментов.

Последовательности случайных наблюдений $V_1 = \left(x^i,\ i = \overline{1, n_1}\right)$ и $V_2 = \left(x^i,\ i = \overline{1, n_2}\right)$ формировались на основе датчиков случайных величин с равномерным $x^i = \varepsilon^i$ и нормальным $x^i = 0{,}5 + 0{,}15\left(\sum_{j=1}^{12} \varepsilon^j - 6\right),\ \ i = \overline{1, n}$, законами распределения. Случайные величины ε с равномерным законом распределения определены на интервале $[0, 1]$. При их формировании использовался стандартный датчик псевдослучайных величин среды визуального программирования Delphi.

Вычислительные эксперименты при фиксированных условиях исследования проводились 100 раз. По полученным результатам оценивалась вероятность $\overline{F}_\circ$ выполнения гипотезы $H_\circ$ о тождественности законов распределения случайных величин на основе исследуемых методик. Риск α отвергнуть гипотезу $H_\circ$ принимался равным 0,05.

Синтез непараметрического классификатора осуществлялся на основе параболических ядерных функции В. А. Епанечникова [9]. При формировании методики 2 значение $T = 10$. В критерии Пирсона использовалась формула Старджесса для разбиения области изменения исследуемых случайных величин на N интервалов.

Были получены следующие зависимости оценок вероятностей $\overline{F}_\circ$ выполнения гипотезы $H_\circ$ от объема экспериментальных данных при априори тождественных (табл. 1, 2) и разных (табл. 3) законах распределения случайных величин. В таблицах использованы следующие обозначения: КС – критерий Смирнова; М1, М2 – методики 1 и 2 соответственно; КП – критерий Пирсона.

Таблица 1

Зависимости оценок вероятностей $\overline{F}_0$ справедливости гипотезы H_0 от объема экспериментальных данных $n = n_1 + n_2$ при $n_1 = 1{,}2n_2$ в условиях сравнения двух априори тождественных законов распределения случайных величин

n	Равномерные законы распределения				Нормальные законы распределения			
	КС	М1	М2	КП	КС	М1	М2	КП
22	0,97	0,98	0,99	0,98	1,00	0,98	0,98	0,98
66	0,96	0,95	0,96	0,94	0,98	0,96	0,98	0,98
110	0,98	0,95	0,96	0,99	0,99	0,99	1,00	0,97
154	0,96	0,92	0,97	0,96	0,96	0,93	0,97	0,97
198	0,98	0,93	0,96	0,92	0,99	0,97	1,00	0,96
242	0,97	0,96	0,97	0,95	0,96	0,96	0,96	0,91
286	0,96	0,92	0,94	0,98	0,96	0,94	0,95	0,96
330	0,96	0,94	0,95	0,97	0,97	0,94	0,98	0,97
374	1,00	0,93	0,97	0,99	0,96	0,93	0,95	0,95
418	0,97	0,93	0,95	0,98	0,97	0,93	0,96	0,96
462	0,96	0,91	0,94	0,94	0,96	0,9	0,94	0,95

Таблица 2

Зависимости оценок вероятностей $\bar{F}_0$ справедливости гипотезы H_0 от объёма экспериментальных данных $n = n_1 + n_2$ при $n_1 = 2n_2$ в условиях сравнения двух априори тождественных законов распределения случайных величин

n	Равномерные законы распределения				Нормальные законы распределения			
	КС	М1	М2	КП	КС	М1	М2	КП
30	0,99	0,98	1,00	0,98	0,99	0,98	1,00	0,94
90	0,98	0,93	0,99	0,99	0,98	0,92	0,99	0,95
150	0,96	0,86	0,97	0,95	0,97	0,87	0,99	0,98
210	0,98	0,82	0,96	0,96	0,97	0,73	0,99	0,94
270	1,00	0,77	0,99	0,99	0,96	0,69	1,00	0,97
330	0,93	0,70	0,97	0,91	0,98	0,65	0,99	0,97
390	0,94	0,74	0,96	0,96	0,97	0,63	0,97	0,94
450	0,96	0,67	0,97	0,97	0,94	0,61	0,98	0,95

Таблица 3

Зависимости оценок вероятностей $\bar{F}_0$ справедливости гипотезы H_0 от n в условиях сравнения нормального и равномерного законов распределения случайных величин

$n = n_1 + n_2$ при $n_1 = 1,2n_2$					$n = n_1 + n_2$ при $n_1 = 2n_2$				
n	КС	М1	М2	КП	n	КС	М1	М2	КП
22	0,84	0,76	0,93	0,65	30	0,9	0,45	0,89	0,53
66	0,58	0,21	0,27	0,22	90	0,53	0	0,10	0,02
110	0,23	0,01	0,03	0,01	150	0,17	0	0,02	0
154	0,14	0	0	0,01	210	0,03	0	0	0
198	0	0	0	0	270	0	0	0	0

Анализ данных табл. 1 показывает, что если сравниваемые законы распределения случайных величин априори тождественны, то эффективность критериев Смирнова и Пирсона и методики 2 достоверно не отличается. Показатели методики 1 сопоставимы с ними при малых объемах обучающей выборки ($n < 100$). Однако эффективность это методики существенно снижается с ростом отношения $\frac{n_1}{n_2}$ ($n_1 > n_2$) и значений n.

При анализе последовательностей случайных величин с равномерным и нормальным законами распределения в условиях $n > 200$ сравниваемые критерии безошибочно отклоняют гипотезу $H_\circ$ (см. табл. 2). При $n < 30$ результаты их использования неудовлетворительны. В интервале $30 < n < 180$ применение критерия Смирнова нецелесообразно, так как ему свойственна большая вероятность подтверждения гипотезы $H_\circ$ в условиях априори разных законов распределения случайных величин. При этом эффективность критерия Пирсона, методик 1 и 2 сопоставима и повышается с ростом отношения $\frac{n_1}{n_2}$.

Таким образом, применение принципов коллективного оценивания позволяет повысить эффективность методики 1 проверки гипотезы о распределениях случайных величин, основанной на непараметрическом алгоритме распознавания образов. Показатели методики 2 и критерия Пирсона сопоставимы. Их применение по сравнению с критерием Смирнова является более предпочтительным в условиях малого объема анализируемых случайных последовательностей. Преимущество методики 2 состоит в обходе проблемы декомпозиции области значений случайных величин на интервалы, свойственной критерию Пирсона. Перспективность этой методики заключается в возможности ее обобщения на решение задач проверки гипотез о распределения многомерных случайных величин.

Библиографические ссылки

1. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Наука, 1979.

2. Смирнов Н. В. Оценка расхождения между кривыми распределения в двух независимых выборках // Бюл. Моск. ун-та. 1930. Т. 2, № 2. С. 3–14.

3. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки статистической гипотезы о тождественности двух законов распределения случайных величин // Автометрия. 2010. № 6. С. 47–53.

4. Лапко А. В., Лапко В. А. Применение непараметрического алгоритма распознавания образов в задаче проверки гипотезы о распределениях случайных величин // Системы упр. и информ. технологии. 2010. № 3 (41). С. 8–11.

5. Шаракшанэ А. С., Железнов И. Г., Ивницкий В. А. Сложные системы. М. : Высш. шк., 1977.

6. Непараметрические системы классификации / А. В. Лапко, В. А. Лапко, М. И. Соколов, С. В. Чен-

цов. Новосибирск : Сиб. изд. фирма СО РАН «Наука», 2000.

7. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode // Ann. Math. Statistic. 1962. Vol. 33, № 3. P. 1065–1076.

8. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ асимптотических свойств непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности в двуальтернативной задаче распознавания образов // Автометрия. 2010. Т. 46, № 3. С. 48–53.

9. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применения. 1969. Т. 14. Вып. 1. С. 156–161.

A. V. Lapko, V. A. Lapko

COMPARISON OF NONPARAMETRIC TESTING CRITERIA OF HYPOTHESIS OF DISTRIBUTION OF RANDOM VARIABLES

From a perspective of collective estimation principles, the authors worked out the technique of testing, for a hypothesis of identity of laws of distributions of random variables, based on nonparametric algorithms of pattern recognition. Results of its comparison with Smirnov and Pearson criterion are presented.

Keywords: nonparametric statistics, pattern recognition, statistical hypothesis testing, random variables distribution, Smirnov criterion, Pearson criterion.

© Лапко А. В., Лапко В. А., 2011

УДК 62.501

А. В. Медведев

ТЕОРИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. АКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ – I

Исследуется проблема моделирования организационных процессов и управления ими. Существенную роль при этом играет априорная информация. Обсуждаются вопросы принципиального отличия управления техническими и активными системами. Основной особенностью здесь является необходимость введения контуров управления в систему контроля некоторых выходных переменных, а также систему управления процессом реализации найденного управляющего воздействия.

Ключевые слова: активные системы, идентификация, априорная информация, измерение, гипотезы, непараметрические модели, дискретно-непрерывные процессы, К-модели.

Теория – в виду практики.

Девиз конгрессов IFAC

Ограничиваясь одними рассуждениями, мы уподобились бы некоторым древним философам, пытавшимся добывать законы природы из собственной головы. При этом неизбежно возникает опасность, что построенный таким образом мир при всех своих достоинствах окажется весьма мало похожим на действительный…

Л. Д. Ландау

В последние десятилетия внимание исследователей все больше привлекают процессы организационного характера. К ним относятся процессы, протекающие с участием человека или коллективов людей, в частности объектов промышленности, коммерческих структур, региональных образований и др. Характерными особенностями последних являются неполнота априорных данных, неопределенность, взаимосвязанность, трудность формирования согласованных целей и способов их достижения и др. Неполнота априорных сведений приводит к необходимости формулировать те или иные задачи локального характера в различных, принципиально отличающихся постановках, а их объединение в единую систему представляет серьезные теоретические трудности. В частности, задача управления организацией, коллективами во многом остается в большей степени искусством, чем наукой. Обусловлено это тем, что присутствие человека (коллектива) в исследуемом процессе требует учета ряда факторов, а именно: морального, психологического, престижного, и других черт, свойственных человеку, наиболее важной из которых является искажение информации о своих возможностях, целях, способах и средствах их достижения.

Подобные процессы и соответствующие им системы стали называть активными [1]. Различные уровни априорной информации, характеристики процессов, проблемы их моделирования более подробно были рассмотрены ранее [2; 3; 4]. Предметом данного исследования будут активные системы.

Активные системы. Рассмотрим схему локальной организационной системы (рис. 1). Пусть A – неизвестный оператор объекта; $x(t)$ – векторная выходная переменная процесса; $u(t)$ – векторное управляющее воздействие; $\mu(t)$ – векторная входная переменная процесса; $\xi(t)$ – векторное случайное воздействие; (t) – непрерывное время; H^{μ}, H^{u}, H^{x}, H^{θ}, H^{ω}, H^{q}, H^{z} – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных; μ_t, u_t, x_t, θ_t, q_t, z_t, ω_t означают измерение $\mu(t), u(t), x(t)$, $\theta(t)$, $q(t)$, $z(t)$, $\omega(t)$ в дискретное время t. Контроль переменных $(x, u, \mu, \theta, q, z)$ осуществляется через некоторый интервал времени, т. е. $x_i, u_i, \mu_i, \theta_i, q_i, z_i, \omega_i, i = \overline{1,s}$ – выборка измерений переменных процесса

$$(x_1, u_1, \mu_1, \theta_1, q_1, z_1, \omega_1), (x_2, u_2, \mu_2, \theta_2, q_2, z_2, \omega_2), ...,$$
$$(x_s, u_s, \mu_s, \theta_s, q_s, z_s, \omega_s), ...;$$

s – объем выборки, $h^{\mu}(t)$, $h^{x}(t)$, $h^{u}(t)$, $h^{\omega}(t)$, $h^{\theta}(t)$, $h^{q}(t)$, $h^{z}(t)$ – со значком вверху – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса.

Отметим существенное отличие выходных переменных $z(t)$, $q(t)$ и $x(t)$ (см. рис. 1). Выходная переменная $x(t)$ контролируется через интервалы времени Δt, как и входные переменные, а $q(t)$ контролируются через существенно большие интервалы времени – ΔT, z – через T ($T >> \Delta T >> \Delta t$). С практической точки зрения для исследуемого процесса наиболее важным часто является контроль переменных $z(t)$. Этим и обусловлено существенное отличие дискретности контроля выходных переменных $q(t)$ и $z(t)$. Особенностью здесь является то, что измеренное значение выхода объекта станет известным только через определенные промежутки времени, этим объясняется запаздывание в измерениях выходных переменных объекта $x(t)$, $q(t)$ и $z(t)$. Интервалы Δt, ΔT и T определяют дискретность, с которой происходят измерения. Стрелки, помещенные внутри объекта (см. рис. 1), символизируют наличие в нем человека (коллектива людей). Контроль переменных $q(t)$ и $z(t)$ осуществляется аналогично контролю $x(t)$ (на рисунке не показано, чтобы не загромождать его). Переменная $\theta(t)$ представляет собой воздействие на объект внешней среды. Для организационных систем это могут быть какие-либо распоряжения, постановления, приказы, а также законодательные акты, которые с течением времени претерпевают те или иные изменения.

В этом случае $x(t)$ определяется следующим образом:

$$x(t) = A(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \omega(t-\tau), \lambda(t-\tau), \theta(t-\tau), \xi(t), t).$$

Не следует путать запаздывание τ, присущее процессу, и запаздывание (задержку) при измерении тех или иных переменных процесса.

Модель исследуемого процесса $\hat{x}(t)$ может быть представлена следующим образом:

$$\hat{x}(t) = \hat{A}_x(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \omega(t-\tau), \theta(t-\tau), t).$$

При прогнозировании $\hat{q}(t)$ и $\hat{z}(t)$ целесообразно использовать следующие зависимости:

$$\hat{q}(t) = \hat{A}_q(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \omega(t-\tau), \theta(t-\tau), \hat{x}(t), t),$$

$$\hat{z}(t) = \hat{A}_z(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \omega(t-\tau), \theta(t-\tau), \hat{x}(t), \hat{q}(t), t),$$

где τ – запаздывания, различные по соответствующим каналам связи.

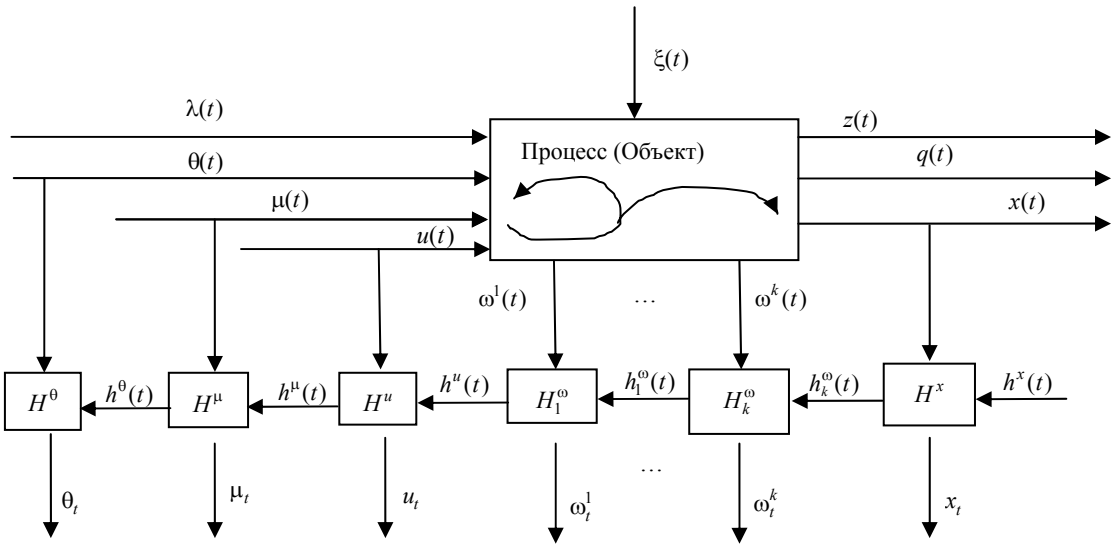


Рис. 1. Общая схема многомерного активного процесса

В дальнейшем, из соображений простоты, все входные переменные, поддающиеся контролю, объединим в один совокупный вектор $v(t)$, а выходные – в совокупный вектор $y(t)$; векторы промежуточных переменных обозначим $\omega(t)$. Тогда схема, представленная на рис. 1, примет упрощенный вид (рис. 2).

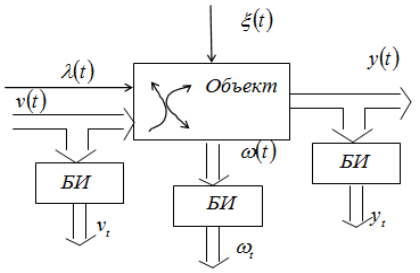


Рис. 2. Упрощенная схема активной системы

Поясним содержание термина «совокупный вектор» – это вектор, составленный из некоторых компонент соответствующих векторов. Например, компоненты вектора входных переменных (см. рис. 2) $v(t)$ могут быть такими: $v_t^1 = \left(u_t^1, \mu_t^3, \theta_t^1, u_t^2\right)$, $v_t^2 = \left(u_t^2, u_t^4, \theta_t^3, \mu_t^1, \mu_t^3\right)$ и т. п. Соответственно компоненты векторов $\omega(t)$ и $y(t)$ могут быть составлены так: $\omega_t^1 = \left(\omega_{1t}, \omega_{3t}, \omega_{4t}\right)$, $\omega_t^2 = \left(\omega_{2t}, \omega_{3t}\right)$; $y_t^1 = \left(x_t^1, x_t^2, z_t^2, q_t^1\right)$, $y_t^2 = \left(x_t^3, z_t^2, q_t^1, q_t^2, x_t^4\right)$ и т. п. Состав компонент составных векторов находится в прямой зависимости от конкретного исследуемого процесса, наличия априорной информации о нем, его характеристиках, свойствах и т. д.

Принципиальным отличием моделирования организационных систем от других является наличие обратных связей, контуров управления, «встроенных» в исследуемый процесс извне. Это коренным образом меняет взгляд на проблему идентификации, которая усугубляется еще и тем, что необходимо изучать ее в «широком» смысле. Тем не менее в условиях непараметрической неопределенности возможно использование статистик $y_s(t) = S\left(v(t), \omega(t), \vec{y}_s, \vec{v}_s, \vec{\omega}_s\right)$, где S – статистика; $\vec{y}_s = \left(y_1, ..., y_s\right)$, $\vec{v}_s = \left(v_1, ..., v_s\right)$, $\vec{\omega}_s = \left(\omega_1, ..., \omega_s\right)$ – временные векторы; s – объем выборки наблюдений «входных-выходных» переменных объекта.

В основе последующих непараметрических моделей активных систем будут лежать непараметрические оценки функции регрессии по наблюдениям $\vec{y}_s$, $\vec{v}_s$, $\vec{\omega}_s$ вида [5]

$$y_s(v,\omega) = \frac{\sum\limits_{i=1}^{s} y_i \prod\limits_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{v^j - v_i^j}{c_s^j}\right) \prod\limits_{j=1}^{n} \Phi\left(\frac{\omega^j - \omega_i^j}{c_s^j}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{s} \prod\limits_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{v^j - v_i^j}{c_s^j}\right) \prod\limits_{j=1}^{n} \Phi\left(\frac{\omega^j - \omega_i^j}{c_s^j}\right)}, \quad (1)$$

где колоколообразные функции $\Phi\left(\frac{\omega^j - \omega_i^j}{c_s^j}\right)$ и параметр размытости c_s удовлетворяют некоторым асимптотическим условиям сходимости [5]. Выбор компонент вектора параметров отыскивается из условия минимума критерия $R(c_s) = R\left(c_s^1, c_s^2, ..., c_s^{(n+k)}\right) = s^{-1}\sum\limits_{j=1}^{s}\left(y_j - y_s\left(v_j, \omega_j\right)\right)^2$ по всем компонентам вектора $c_s = \left(c_s^1, c_s^2, ..., c_s^{(n+k)}\right)$. При этом имеет место следующее правило выделения существенных переменных.

Пусть R^* таково, что

$$R^*\left(c_s^*\right) = \min_{c_s^1, c_s^2, ..., c_s^{(n+k)}} R(c_s),$$

тогда из всех компонент вектора c_s^* можно выстроить цепочку неравенств. Компонента вектора v или ω, для которой параметр размытости окажется максимальным, оказывает наименьшее влияние на значение $y_s(v,\omega)$, т. е. ее «вклад» в $y_s(v,\omega)$ минимальный.

Например, если цепочка компонент вектора c_s^* будет выглядеть следующим образом:

$$c_s^{5*} > c_s^{3*} > ... > c_s^{(n+k)*} > c_s > c_s^{(n+k-3)*},$$

то «кандидатом» на отбрасывание является пятая компонента векторов v или ω из имеющегося набора $(n+k)$ компонент вектора (v,ω). Заметим, что прежде чем решать задачу, необходимо все элементы выборки $\left\{\vec{v}_s, \vec{\omega}_s\right\}$ привести к одному интервалу, используя, например, операции нормирования и центрирования.

В качестве непараметрических моделей активных систем могут быть приняты следующие статистики:

$$y_s\left(v(t), \omega(t)\right) = \frac{\sum\limits_{i=1}^{s} y_i W\left(\eta_s\left(v(t) - v_i\right)\right) W\left(\eta_s\left(\omega(t) - \omega_i\right)\right)}{\sum\limits_{i=1}^{s} W\left(\eta_s\left(v(t) - v_i\right)\right) W\left(\eta_s\left(\omega(t) - \omega_i\right)\right)}, \quad (2)$$

где $W(\cdot)$ – некоторые колоколообразные (ядерные) функции; весовые коэффициенты η_s – обратные коэффициенты параметрам размытости, входящим в непараметрические оценки и алгоритмы [5], с той лишь разницей, что $\eta_s \to 0$, а играют роль весовых коэффициентов при соответствующих компонентах векторов $v(t)$ и $\omega(t)$, поэтому в дальнейшем индекс s при η мы будем опускать. Принципиальным отличием статистик (2) от общепринятых [5; 6] непараметрических оценок является несостоятельность

предположения о наличии генеральной совокупности, стремлении s к бесконечности и, как следствие этого, отсутствие каких-либо асимптотических свойств оценок из класса (1), предполагающих $s \to \infty$.

Оценка из класса (1) в частном случае примет вид

$$y_s\left(v(t),\omega(t)\right) = \frac{\sum_{i=1}^{s} y_i \prod_{j=1}^{k} W\left(\eta_t^j\left(v^j(t)-v_i^j\right)\right)\prod_{j=1}^{n} W\left(\eta_t^j\left(\omega^j(t)-\omega_i^j\right)\right)}{\sum_{i=1}^{s}\prod_{j=1}^{k} W\left(\eta_t^j\left(v^j(t)-v_i^j\right)\right)\prod_{j=1}^{n} W\left(\eta_t^j\left(\omega^j(t)-\omega_i^j\right)\right)}, \quad (3)$$

либо

$$y_s\left(v(t),\omega(t)\right) = \sum_{i=1}^{s} \mu_i\left(v(t),\omega(t)\right) y_i\,, \quad (4)$$

где

$$\mu_i\left(v(t),\omega(t)\right) = \frac{\prod_{j=1}^{k} W\left(\eta_t^j\left(v^j(t)-v_i^j\right)\right)\prod_{j=1}^{n} W\left(\eta_t^j\left(\omega^j(t)-\omega_i^j\right)\right)}{\sum_{i=1}^{s}\prod_{j=1}^{k} W\left(\eta_t^j\left(v^j(t)-v_i^j\right)\right)\prod_{j=1}^{n} W\left(\eta_t^j\left(\omega^j(t)-\omega_i^j\right)\right)},$$

а $\sum_{i=1}^{s} \mu_i\left(v(t),\omega(t)\right) = 1$, коэффициенты η_t являются весовыми коэффициентами.

Заметим, что алгоритмы (2)–(4) уже перестают быть непараметрическими оценками в общепринятом смысле. Мы сохраним термин «непараметрический», имея в виду отсутствие параметрической модели, но наличие некоторых сведений о свойствах качественного характера исследуемого процесса.

Активную систему можно представить в виде более общей схемы (рис. 3), где из соображений простоты мы не вводим специального обозначения «входных-выходных» переменных (см. рис. 1), а ограничиваемся лишь связями между отдельными локальными процессами.

Контроль переменных, измерения, оценка. Здесь мы подчеркнем важность проблемы измерения «входных-выходных» переменных исследуемого объекта, процесса. Ранее [2; 3] уже отмечалось, что различные средства контроля даже для одних и тех же процессов приводят к различным формулировкам задач идентификации. Главное, что следует выделить в этой проблеме: нередко динамический объект мы вынуждены рассматривать как статический с запаздыванием из-за длительной процедуры контроля (измерения, анализа) некоторых переменных, существенно превышающей постоянную времени объекта.

Безусловно, при моделировании дискретно-непрерывных процессов и управлении ими целесообразно использовать все поддающиеся измерению переменные, но это требует тщательного анализа не только самого конкретного объекта, но и средств и технологии контроля всех доступных переменных, а также априорной информации, которая поступает одновременно по различным каналам измерения переменных многомерной системы объекта. Неучет тех или иных переменных, параметров, характера измерения и контроля, априорной информации, а также некоторая «вольность» при принятии тех или иных допущений, неизбежных при математической постановке задачи, может привести в конечном счете к негативным последствиям. Вся эта сумма вопросов часто не принимается во внимание при исследовании проблемы моделирования с теоретической точки зрения [4]. При решении же прикладных задач, построении моделей конкретных процессов это просто невозможно, ибо «истина ничуть не страдает от того, если кто-либо ее не признает» (И. Ф. Шиллер). Представляется уместным еще раз акцентировать внимание исследователя на формулировке проблемы идентификации реального процесса на самой начальной стадии.

Следует еще заметить, что измерения переменных исследуемого организационного процесса могут отличаться по своей природе. При построении соответствующих моделей активных процессов и алгоритмов управления ими, конечно же, это нужно учитывать. К наиболее употребительным шкалам измерения обычно относят следующие [7]: вещественную шкалу, шкалу отношений, шкалу интервалов, шкалу порядка, шкалу наименований.

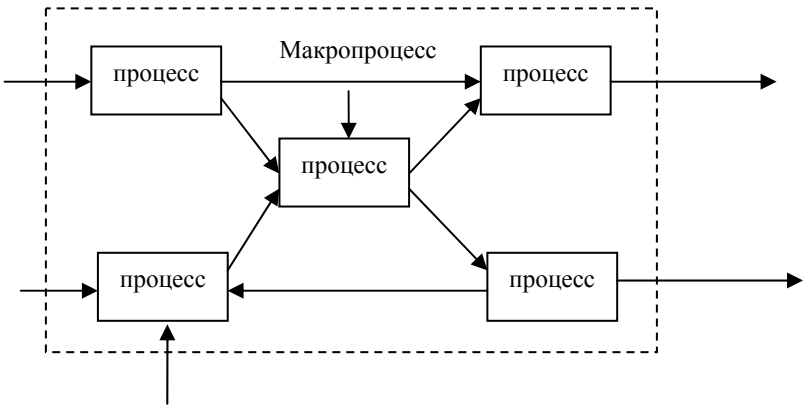


Рис. 3. Фрагмент организационного процесса

Принципиальное отличие организационных систем от технических состоит в существенно отличающихся средствах контроля и измерения соответствующих переменных. И главное здесь обусловлено тем, что элементом средств измерения некоторых «входных-выходных» переменных, характеризующих состояние процесса, является человек, эксперт, группа экспертов. Мы оставляем в стороне технологию проведения такого измерения, оценки, экспертизы. Важнейшим здесь является то, что измерения, оценка некоторых переменных невозможны без участия человека, а значит, обязательного «присутствия» в них субъективных факторов: психологических, эмоциональных и т. п.

Математические постановки задач моделирования и управления. Ранее [8] мы уже обращали внимание на необходимость использования всей имеющейся информации о процессе и построении К-моделей. Эта информация базируется на триаде: фундаментальные законы, априорная информация о параметрической структуре отдельных связей (каналов) процесса и сведения качественного характера о процессе. Естественно, формирование матрицы наблюдений, включающей разнотипные переменные, принадлежащие различным шкалам – предмет специального рассмотрения в каждом конкретном случае.

Известно, что отыскание управляющих воздействий при соответствующих условиях осуществляется в диалоге «компьютерная (обучающая, интеллектуальная) система – ЛПР. Но компьютерная система управления с ЛПР организационными процессами требует также систему управления процессами реализации принятых управленческих решений. Это также существенно отличает процесс управления активными системами от технических систем.

Из вышесказанного следует, что система управления организационными процессами является принципиально иерархической, многоконтурной системой, включающей в себя человека как необходимый и важнейший элемент. Переход на новый режим подобного процесса, его перестройка является существенно нелинейной задачей, сложной и с точки зрения теории, и с точки зрения практики. Как справедливо замечено в [9], «не требуется, однако, специальной математической теории, чтобы понять, что пренебрежение законами природы и общества (будь то закон тяготения, закон стоимости или необходимость обратной связи), падение компетентности специалистов и отсутствие личной ответственности за принимаемые решения приводят рано или поздно к катастрофе. Математическая теория перестроек была создана задолго до нынешней перестройки. Трудность проблемы перестройки связана с ее нелинейностью. Привычные методы управления, при которых результаты пропорциональны усилиям, тут не действуют, и нужно вырабатывать специфически нелинейную интуицию, основанную порой на парадоксальных выводах нелинейной теории».

Совершенно очевидным является факт наличия существенно различной априорной информации об исследуемом процессе [2]. Как следствие этого – различные математические постановки задач, с точки зрения математической строгости. Одним из основных «камней преткновения» на этом пути является несоответствие наших предположений об исследуемом объекте самому объекту. После традиционно произносимого «Пусть процесс…» следуют такие предположения, гипотезы, которые, к сожалению, часто имеют отдаленное отношение к реальности. Трудно представить себе процесс, объект, характеристики которого были бы неизменными или менялись бы по известному закону с течением времени. Мы имеем в виду процессы, описанные в [1], средства и технологии измерения переменных объектов, которые представляют интерес в существующей теории автоматического управления. Основные их черты – это недостаток априорной информации, воздействие случайных факторов, характеристики которых нам не известны, недостаток и несовершенство средств контроля переменных, непредставительность отбора проб для измерений и многое другое. Наше незнание, приходится, к сожалению, заменять, говоря «Пусть…». Ясно, что если наши допущения достаточно близки к реальности, то в итоге можно рассчитывать на успех при решении той или иной задачи, если же – нет, то неудача неизбежна. Действительно, многие процессы и объекты в основе функционирования которых лежат фундаментальные законы физических, химических, электрических, механических и других явлений, могут быть описаны с высокой степенью точности. Соответственно для них могут создаваться и модели, и системы управления достаточно высокого качества, что во многих случаях имеет место.

Если же допущения слишком «грубые», то, видимо, есть два пути. Первый – восполнение нашего «незнания» о процессе, когда можно будет сделать аккуратную, с математической точки зрения, постановку задачи. Второй путь состоит в развитии математического подхода, адекватного тому уровню априорной информации, которым мы реально располагаем.

Нам предстоит в будущем моделировать и управлять реальными процессами, описанными в [2], включая организационные, потому что этого требует реальность, практика. В частности, многие экономические процессы могут быть отнесены к организационным. Еще в середине прошлого столетия по поводу применения математики в экономике Дж. фон Нейман и О. Моргенштерн писали: «Прежде всего отдадим себе отчет в том, что в настоящее время в экономической теории не существует универсальной системы и что если она и будет создана, то едва ли это произойдет в ближайшее время. Причина этого кроется в том, что экономика является слишком сложной наукой…». И далее: «Часто аргументация против применения математики состоит из ссылок на субъективные элементы, психологические факторы и т. п. <…> Важно осознать, что экономисты не могут надеяться на более легкую судьбу, чем та, которая постигла ученых других специальностей.

<…>

Важность социальных явлений, обилие и многообразие их проявлений, а также сложность их структуры по меньшей мере такие же, как и в физике. Поэтому следует ожидать (или опасаться), что для достижения в этой области решающих успехов потребуются математические открытия, сопоставимые с открытием инфинитезимальных исчислений. Тем более маловероятно, что простое повторение тех математических приемов, которые нам помогали в физике, поможет нам и в экономике. Вероятность этого покажется еще меньше, когда мы увидим, что в наших рассуждениях появляются математические задачи, совершенно отличные от задач, встречающихся в физике.

Эти соображения следует иметь в виду в связи с имеющим место в наши дни злоупотреблением в использовании дифференциального и интегрального исчислений, дифференциальных уравнений и т. д. как основного метода в математической экономике.

<…>

Несомненно, представляется разумным вскрыть, что именно привело к прогрессу в других науках, и исследовать, почему применение этих принципов не может привести к прогрессу в экономике. Если же действительно возникает необходимость приложения к экономике каких-то иных принципов, то это может обнаружиться только в процессе фактического развития экономической теории. Это само по себе будет переворотом в науке» [10].

Прошло более полувека, но математики для экономической науки, а также для моделирования и управления организационными процессами не появилось, хотя некоторые продвижения в этом направлении есть: разработаны основы теории активных систем, теория размытых множеств, теория принятия решений, системный анализ и теория систем и др.

Таким образом, основной отличительной чертой процесса управления организационными и техническими системами является необходимость наличия не только системы управления в общепринятом смысле, но и системы управления реализацией полученных управленческих решений и системы оценивания выходных переменных активного процесса, которые сами по себе носят организационный характер.

Приведено правило выделения существенных переменных, характеризующих состояние исследуемого процесса, а также обучающие модели и алгоритмы принятия решений для организационных систем из класса непараметрических алгоритмов адаптации.

Библиографические ссылки

1. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М. : Наука, 1977.

2. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29). С. 3–9.

3. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4(30). С. 4–9.

4. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968.

5. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбилис. ун-та, 1983.

6. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983.

7. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск : Изд-во ИМ СО РАН, 1999.

8. Medvedev A. V. Nonparametric approximation in adaptive systems theory // Works of Applied Methods of Statistical Analysis. Simulation and Statistical Inference. Novosibirsk : STU, 2011.

9. Арнольд В. И. Теория катастроф. М. : Наука, 1990.

10. Нейман Дж. фон, Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. М. : Наука, 1970.

A. V. Medvedev

THEORY OF NON-PARAMETRIC SYSTEMS. ACTIVE PROCESSES – I

The problem of modeling and control of organizational systems, which contain, as a system element, a man or a group of people, are investigated. A priori information obtained is considered to be essential. The problems of conceptual difference in modeling and control of technical and active systems are discussed. The main peculiarity is the necessity to introduce control loop into the control system of some output variables as well as into control system of process of realization of the received controlling effect.

Keywords: active systems, identification, a priori information, measurement, hypotheses, non-parametric models, discrete and continuous processes, K-models.

© Медведев А. В., 2011

УДК 517.518.8

Д. А. Никитин, К. В. Сафонов

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРПОЛЯНТА С НАИМЕНЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ ПАРАМЕТРОВ*

Описывается метод, позволяющий для исходного набора точек на равномерной сетке автоматически определять интерполянт с наименьшим количеством параметров из следующего множества функций: полиномов, показательных функций, синусоидов, любых линейных комбинаций вышеуказанных функций.

Ключевые слова: интерполяция, идентификация, рекурсивные цифровые фильтры.

Существует ряд классических методов построения функций, график которых точно проходит через заданный набор точек. Это различные интерполяционные формулы, а также различные дискретные преобразования. Полученную функцию (интерполянт) можно использовать для вычисления значений функции между исходными точками (интерполяция), за их пределами (экстраполяция), а также компактной записи или дальнейшего анализа данных. Для интерполяции и экстраполяции также могут использоваться разностные схемы, хотя они и не дают точной записи интерполянта.

В качестве интерполянтов чаще всего используются алгебраические многочлены, суммы экспонент, Фурье-суммы, сплайны. Количество слагаемых в указанных функциях определяется количеством исходных точек. Вид интерполянта в конкретной задаче обычно выбирается на основании дополнительной информации о зависимости между исходными значениями. Иными словами, упомянутые методы не предназначены для поиска наиболее подходящей модели данных – каждый из них уже предполагает конкретную модель. Если же необходимо искать интерполянт в виде суммы функций из разных классов (например, суммы многочлена и синусоид), то применение классических методов интерполяции становится маловероятным.

Таким образом, классические методы построения функций, график которых точно проходит через заданный набор точек, удобно использовать, когда вид интерполянта заранее выбран и остается только определить его параметры (коэффициенты). В случае если вид интерполянта не известен заранее либо в заданном множестве функций необходимо определить интерполирующую функцию с наименьшим количеством параметров, использование данных методов становится затруднительным, так как для каждого отдельного вида функции приходится выполнять отдельную процедуру построения интерполянта.

Предлагается метод, позволяющий для заданного на равномерной сетке набора точек автоматически определять интерполирующую функцию из заданного множества с наименьшим количеством параметров.

Суть данного метода заключается в следующем. Исходный набор значений принимается за начало импульсной характеристики рекурсивного цифрового фильтра неизвестного порядка с одинаковым количеством коэффициентов a_k и b_k. Этот фильтр рассчитывается таким образом, чтобы минимизировать его порядок. Затем по полученным коэффициентам можно определить вид функциональной зависимости, которой подчиняются члены исходной последовательности. А после этого, опять же только по коэффициентам, можно полностью выписать эту функцию. Выявленная таким способом функция будет иметь не известный заранее вид, а будет наиболее простой из некоторого множества функций и при этом с минимально возможным количеством параметров.

Для синтеза цифрового фильтра (ЦФ) в данной постановке задачи воспользуемся уравнением цифровой фильтрации:

$$y(n)=\sum_{k=0}^{N} b_k x(n-k)-\sum_{k=1}^{M} a_k y(n-k). \qquad (1)$$

Согласно постановке задачи, $M = N + 1$. Так как последовательность $Y = \{y_k\}$ является импульсной характеристикой и в нашей постановке задачи известна заранее, подставим в (1) вместо x_i – единичный импульс, а вместо y_i – элементы исходной последовательности. Получим систему линейных уравнений

$$\begin{pmatrix} 1 & & & & & & & & \\ & 1 & & -y_0 & & & & & \\ & & 1 & -y_1 & -y_0 & & & & \\ & & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & & & \\ & & & 1 & -y_{N-1} & -y_{N-2} & \cdots & -y_0 & \\ & & & & -y_N & -y_{N-1} & \cdots & -y_1 & -y_0 \\ & & & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ & & & & -y_{N+M-1} & -y_{N+M-2} & \cdots & -y_{M-2} & -y_{M-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \\ a_1 \\ \vdots \\ a_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \\ y_{N+1} \\ \vdots \\ y_{N+M} \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

*Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные кадры и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (контракт П1032 от 27.05.2010).

Неизвестными в системе (2) являются коэффициенты a_k и b_k, а также минимально возможные M и N, при которых система имеет единственное решение.

Для идентификации цифрового рекурсивного фильтра по его импульсной характеристике в теории цифровой обработки сигналов уже имеются алгоритмы (например, метод Прони [1]), которые, однако, не полностью соответствуют поставленной задаче (не выполняется поиск фильтра минимального порядка).

В рамках данной работы был разработан алгоритм расчета рекурсивных цифровых фильтров. Более подробное его описание приводится в [2–3]. Сначала определяется необходимый порядок фильтра, а затем решается система (2).

Доказано [2; 4], что данный алгоритм синтеза будет иметь решение как раз в случае, когда значения элементов последовательности Y являются значениями функции, взятыми на равномерной сетке. Такое доказательство проведено для нескольких видов функций (любых полиномиальных функций, любых экспоненциальных и любых синусоид), отдельно для каждого вида. Эти три вида функций составляют множество функций, среди которых будет отыскиваться интерполянт с наименьшим количеством параметров. Приведенные ниже теоремы также дают и порядок, соответствующий функции конкретного вида. А значит, устанавливается однозначное соответствие между функцией и количеством коэффициентов соответствующего фильтра.

Таким образом, алгоритм расчета фильтра является первым шагом предлагаемого метода автоматической интерполяции. Фильтр, найденный таким образом, предлагается называть фильтром, соответствующим последовательности Y.

Следующий шаг метода – определение вида интерполирующей функции. Это выполняется с использованием только коэффициентов обратной связи полученного фильтра. Если интерполянтом является многочлен, то это можно сразу идентифицировать по значениям коэффициентов обратной связи (ОС) a_k. Для двух других видов интерполирующей функции – экспоненциальной и синусоидальной – правила идентификации немного усложняются, так как коэффициенты a_k зависят не только от вида интерполирующей функции, но и от ее параметров.

Значения коэффициентов ОС, соответствующих полиномам, легко определяются из значений биномиальных коэффициентов. Значения для полиномов младших порядков приводятся в табл. 1.

Для показательной и синусоидальной функций правила идентификации следующие.

Для показательной функции:

$$M = 2,\ N = 1,\ a_1 + a_2 = -1,\ a_2 > 0,\ a_2 \neq 1. \qquad (3)$$

Для синусоидальной функции:

$$M = 3,\ N = 2,\ a_1 = -a_2,\ -1 < a_2 < 3,\ a_3 = -1. \qquad (4)$$

После идентификации вида интерполянта необходимо определить все его параметры (коэффициенты в записи функции). Для полинома каждой степени зависимость коэффициентов прямой связи (b_k) соответствующего фильтра от значений параметров полинома однозначна и определяется в ходе решения системы (2). Данная зависимость линейна, таким образом, для определения обратной зависимости необходимо всего лишь решить систему линейных уравнений. Решить такую систему для полинома степени n необходимо всего один раз – полученные формулы могут быть использованы для всех полиномов такой же степени. Несколько примеров для полиномов младших степеней приведено в табл. 2. Для остальных видов функций – показательной и синусоидальной – формулы также вычислены, хотя зависимость уже и не является линейной.

Для показательной функции $y(x) = k \cdot a^{b \cdot x} + c$:

$$\begin{cases} k = b_1 + b_0 a_1, \\ a^b = -a_1 - 1, \\ c = (b_0 + b_1)/(1 - a_1). \end{cases} \qquad (5)$$

Для синусоидальной функции $y(x) = a \cdot \sin(b \cdot x + c) + d$:

$$\begin{cases} a = \dfrac{b_2(2 - a_2) - b_0 - b_1}{(3 - a_2)\sin\left(\operatorname{arctg}\left[\dfrac{b_2(2 - a_2) - b_0 - b_1}{b_0 - b_1 - a_2 b_2}\sqrt{\dfrac{a_2 + 1}{3 - a_2}}\right]\right)}, \\ b = \arccos\dfrac{a_2 - 1}{2}, \\ c = \operatorname{arctg}\left[\dfrac{b_2(2 - a_2) - b_0 - b_1}{b_0 - b_1 - a_2 b_2}\sqrt{\dfrac{a_2 + 1}{3 - a_2}}\right], \\ d = \dfrac{b_0 + b_1 + b_2}{3 - a_2}. \end{cases} \qquad (6)$$

Значение аргумента арккосинуса в (6) принимает только допустимые значения $\left|\dfrac{a_2 - 1}{2}\right| \le 1$ в соответствии с условиями (4) для синусоидальной функции (так как $-1 < a_2 < 3$).

Таблица 1

Коэффициенты ОС фильтров, соответствующих полиномам

Интерполирующая функция	Формула	Порядок соответствующего фильтра	Коэффициенты a_k
Линейная	$y = kx + b$	2	(–2 1)
Квадратичная	$y = ax^2 + bx + c$	3	(–3 3 –1)
Кубическая	$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$	4	(–4 6 –4 1)
Полином 4-й степени	$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$	5	(–5 10 –10 5 –1)

Таблица 2

Зависимость параметров полиномов от коэффициентов b_k соответствующего рекурсивного цифрового фильтра

Интерполирующая функция	Формула	Выражения для вычисления параметров
Линейная	$y_i = s_0 \cdot i + s_1$	$s_0 = b_0 + b_1,\ s_1 = -b_1$
Квадратичная	$y_i = s_0 \cdot i^2 + s_1 \cdot i + s_2$	$s_0 = \frac{b_0 + b_1 + b_2}{2},\ s_1 = \frac{b_0 - b_1 - 3b_2}{2},\ s_2 = -b_2$
Кубическая	$y_i = \sum_{k=0}^{3} s_k \cdot i^k$	$s_0 = \frac{b_0 + b_1 + b_2 + b_3}{6},\ s_1 = \frac{b_0 - b_2 - 2b_3}{2}$ $s_2 = \frac{2b_0 - b_1 + 2b_2 + 11b_3}{6},\ s_3 = -b_3$
Полином 4-й степени	$y_i = \sum_{k=0}^{4} s_k \cdot i^k$	$s_0 = \frac{b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4}{24}$ $s_1 = \frac{3b_0 + b_1 - b_2 - 3b_3 - 5b_4}{12}$ $s_2 = \frac{11b_0 - b_1 - b_2 + 11b_3 + 35b_4}{24}$ $s_3 = \frac{3b_0 - b_1 + b_2 - 3b_3 - 25b_4}{12},\ s_4 = -b_4$

Дополнительным преимуществом предложенного метода, наряду с возможностью автоматического определения простейшего интерполянта из трех указанных классов функций, является возможность включать в это множество функций любую функцию, являющуюся линейной комбинацией уже известных методу функций. Тем не менее, несмотря на то что среди известного множества функций поиск наилучшего интерполянта выполняется автоматически, также автоматически распространить правила идентификации по коэффициентам фильтра на все возможные линейные комбинации является сложной задачей. Для этого необходимо сначала определить необходимый порядок системы (2) для произвольной конечной суммы одночленов, синусоид и показательных функций (это несложно).

Затем нужно построить такую систему уравнений, доказать ее совместность и решить ее. В связи с трудоемкостью последних шагов (из-за операций с матрицами больших размерностей, элементами которых являются функции) данные действия в рамках данной работы выполнялись только для нескольких классов функций, являющихся линейными комбинациями известных методу функций.

Далее кратко изложим доказанные теоремы.

Теорема 1. Для последовательности Y длины $L \geq 2(n + 1)$, члены которой являются равноотстоящими отсчетами полиномиальной функции одного переменного $y_i = p_n(i) = \alpha_0 \cdot i^n + \alpha_1 \cdot i^{n-1} + ... + \alpha_n$, $\alpha_0 \neq 0$, и заданы любые $(n + 1)$ подряд идущих члена $y_m, y_{m+1}, \ldots, y_{m+n}$, существует единственный рекурсивный цифровой фильтр порядка $n + 1$ ($M = n + 1$, $N = n$), импульсная характеристика которого совпадает с Y.

Доказательство. Часть 1. Пусть $m = 0$, а отсчеты функции берутся с шагом, равным единице. Используя выражение (1), построим начальную систему уравнений для $M + N + 1$ первых элементов последовательности Y, приняв ее за импульсную характеристику искомого ЦФ. Матрица системы:

$$P = \left(\begin{array}{ccccc|ccccc} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & -p_n(0) & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & -p_n(1) & -p_n(0) & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -p_n(n-1) & -p_n(n-2) & \cdots & -p_n(0) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -p_n(n) & -p_n(n-1) & \cdots & -p_n(1) & -p_n(0) \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -p_n(n+1) & -p_n(n) & \cdots & -p_n(2) & -p_n(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -p_n(2n-1) & -p_n(2n-2) & \cdots & -p_n(n) & -p_n(n-1) \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -p_n(2n) & -p_n(2n-1) & \cdots & -p_n(n+1) & -p_n(n) \end{array}\right).$$

Элементарными преобразованиями приведем матрицу к верхнетреугольному виду. Если построить эту систему для большего числа уравнений, то она аналогичными преобразованиями будет приводиться к такому же треугольному виду – все строки, начиная с $(n + 1)$-й, будут нулевыми.

Теперь рассмотрим расширенную матрицу этой системы. При выполнении аналогичных преобразований матрица приводится к аналогичному треугольному виду – дополнительный столбец оказывается нулевым.

Кроме того, все элементы на главной диагонали этих треугольных матриц оказываются равными $z_n(\alpha_k) = -n!\ \alpha_0$. Таким образом, система совместна (так как ранги матриц системы равны) и имеет единственное решение (так как система обладает полным рангом при $\alpha_0 \neq 0$, что соответствует условию теоремы).

Пока что доказана справедливость теоремы только для случая, когда Y является последовательностью отсчетов полинома степени n, взятых с шагом, равным единице. Докажем, что она справедлива и в случае любого постоянного шага:

$$y_i = \sum_j \alpha_j \cdot (i \cdot \text{step})^{n-j} = \sum_j (\alpha_j \cdot \text{step}^{n-j}) \cdot (i)^{n-j} = \\ = \sum_j \alpha'_j \cdot i^{n-j}, \quad i = \overline{0, L-1}, \quad j = \overline{0, n}.$$

Таким образом, любая последовательность равноотстоящих отсчетов некоторого полинома является последовательностью отсчетов с шагом 1 полинома такой же степени с другими коэффициентами.

Часть 2. Пусть $m > 0$. Для любых $n + 1$ фиксированных точек существует единственный полином, проходящий через них. Следовательно, зная y_i, $i = \overline{m, m+n}$, можно построить систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_j \alpha_j \cdot m^{n-j} = y_m, \\ \sum_j \alpha_j \cdot (m+1)^{n-j} = y_{m+1}, \\ \dots \\ \sum_j \alpha_j \cdot (m+n)^{n-j} = y_{m+n}. \end{cases}$$

Данная система имеет единственное решение относительно α_j для фиксированного $m > 0$. Значит, если фиксированы y_i, $i = \overline{m, m+n}$, то фиксированы коэффициенты полинома α_j. А если фиксированы коэффициенты полинома, то фиксированы y_i, $i = \overline{0, n}$, так как они однозначно выражаются через коэффициенты полинома. Следовательно, при $m > 0$ справедливо доказательство из части 1 данной теоремы.

Теорема 2. Для последовательности $Y = y(i)$ длины $L \geq 4$, члены которой являются равноотстоящими отсчетами показательной функции $y_i = f(i) = k \cdot a^{bi} + c$, $a \neq 0$, $a \neq 1$, $b \neq 0$, $k \neq 0$, и заданы первые четыре члена y_0, y_1, y_2, y_3, существует единственный рекурсивный цифровой фильтр второго порядка ($M = 2$, $N = 1$), импульсная характеристика которого совпадает с Y.

Доказательство. Рассмотрим сначала случай, когда Y является отсчетами показательной функции, взятой с шагом, равным единице – $i = 0, 1, \dots, L - 1$. Используя выражение (1), построим начальную систему уравнений для первых четырех элементов последовательности Y, приняв ее за импульсную характеристику искомого ЦФ (т. е. $x(n) = \{1, 0, 0, 0, ...\}$). Элементарными преобразованиями матрица системы приводится к треугольному виду:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & k+c & 0 \\ 0 & 0 & k \cdot a^b + c & k+c \\ 0 & 0 & k \cdot a^{2b} + c & k \cdot a^b + c \end{pmatrix} \sim \\ \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & k+c & 0 \\ 0 & 0 & k \cdot (a^b - 1) & k+c \\ 0 & 0 & 0 & c \cdot (1 - a^b) \end{pmatrix}.$$

Аналогично для расширенной матрицы системы:

$$\overline{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & k+c \\ 0 & 1 & k+c & 0 & k \cdot a^b + c \\ 0 & 0 & k \cdot a^b + c & k+c & k \cdot a^{2b} + c \\ 0 & 0 & k \cdot a^{2b} + c & k \cdot a^b + c & k \cdot a^{3b} + c \end{pmatrix} \sim \\ \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (k+c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k \cdot (a^b - 1) & k+c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c \cdot (1 - a^b) & 0 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, ранги матриц P и $\overline{P}$ равны при любых параметрах k, a, b и c, $a \neq 0$, $a \neq 1$, $b \neq 0$, $k \neq 0$. Значит, система определена и совместна, т. е. имеет единственное решение.

Построим теперь те же матрицы, но с L строками, $L > M + N + 1$. После аналогичных элементарных преобразований матрицы приводятся к следующему треугольному виду:

$$P \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & k+c & 0 \\ 0 & 0 & k \cdot (a^b - 1) & k+c \\ 0 & 0 & 0 & c \cdot (1 - a^b) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ \overline{P} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & k+c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k \cdot (a^b - 1) & k+c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c \cdot (1 - a^b) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Следовательно, rang(P) = rang($\overline{P}$) = 4, и добавленные $L - M - N - 1$ уравнений линейно зависимы от уравнений начальной системы. Поэтому решение, найденное для начальной системы, состоящей из четырех уравнений, будет удовлетворять последовательности отсчетов показательной функции, любой длины большей либо равной четырем. Это решение представляет собой четыре коэффициента рекурсивного цифрового фильтра: b_0, b_1, a_1, a_2.

Пока что доказана справедливость теоремы только для случая, когда Y является последовательностью отсчетов показательной функции с шагом, равным единице. Докажем, что она справедлива и в случае любого постоянного шага:

$$y_i = k \cdot a^{b(i\cdot \mathrm{step})} + c = k \cdot a^{(b\cdot \mathrm{step})\cdot i} + c = k \cdot a^{b'\cdot i} + c,$$
$$i = 0, \ldots, L-1.$$

Таким образом, любая последовательность равноотстоящих отсчетов некоторой показательной функции, является последовательностью отсчетов с шагом, равным единице, показательной функции с другим коэффициентом в показателе степени. Следовательно, доказательство справедливо при любом постоянном шаге.

Теорема 3. Для последовательности $Y = y(i)$ длины $L \geq 6$, члены которой являются равноотстоящими отсчетами синусоидальной функции $y_i = f(i) = a\cdot\sin(b\cdot i + c) + d$, $a \neq 0$, $b \neq \pi k$, $k \in \mathrm{Z}$, $d \neq 0$, и заданы первые шесть членов y, y_1, …, y_5, существует единственный рекурсивный цифровой фильтр третьего порядка ($M = 3$, $N = 2$), импульсная характеристика которого совпадает с Y.

Доказательство. Рассмотрим сначала случай, когда Y является отсчетами синусоидальной функции, взятой с шагом, равным единице – $i = 0, 1, \ldots, L-1$. Используя выражение (1), построим начальную систему уравнений для первых шести элементов последовательности Y, приняв ее за импульсную характеристику искомого ЦФ (т. е. $x(n) = \{1, 0, 0, 0, ...\}$). Элементарными преобразованиями матрица системы приводится к следующему треугольному виду:

$$\overline{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a\sin c + d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a\sin(b+c)+d & a\sin c + d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a\sin(2b+c)+d & a\sin(b+c)+d & a\sin c + d \\ 0 & 0 & 0 & a\sin(3b+c)+d & a\sin(2b+c)+d & a\sin(b+c)+d \\ 0 & 0 & 0 & a\sin(4b+c)+d & a\sin(3b+c)+d & a\sin(2b+c)+d \end{pmatrix} \sim$$

$$\sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a\sin c + d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a(\sin(b+c)+d & a\sin c + d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2d(1-\cos b) & a\sin b\cos c + d(1-\cos b) & a\sin c + d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a\sin b(\cos(b+c)-\cos c) & a(\sin(b+c)-\sin c) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{4a\sin b\sin^2\dfrac{b}{2}}{\cos(b+c)-\cos c} \end{pmatrix},$$

т. е. rang(P) = 6 при любых $a \neq 0$, $b \neq \pi k$, $k \in \mathrm{Z}$, $d \neq 0$.

Проведя аналогичные преобразования для расширенной матрицы системы $\overline{P}$, определяем, что ее ранг также равен шести при аналогичных условиях и дополнительный столбец линейно зависим от остальных, т. е. ранги матриц P и $\overline{P}$ равны при любых параметрах a, b и c, $a \neq 0$, $b \neq \pi k$, $k \in \mathrm{Z}$. Следовательно, система определена и совместна, т. е. имеет единственное решение.

Построив те же матрицы, но с L строками, $L > M + N + 1$, убеждаемся, что rang(P) = rang($\overline{P}$) = 6, и добавленные $L - M - N - 1$ уравнений линейно зависимы от уравнений начальной системы. Поэтому решение, найденное для начальной системы, состоящей из шести уравнений, будет удовлетворять последовательности отсчетов синусоидальной функции, любой длины большей либо равной шести. Это решение представляет собой шесть коэффициентов рекурсивного цифрового фильтра: b_0, b_1, b_2, a_1, a_2, b_3.

Пока что доказана справедливость теоремы только для случая, когда Y является последовательностью отсчетов показательной функции с шагом, равным единице. Докажем, что она справедлива и в случае любого другого ненулевого постоянного шага:

$$y_i = a\cdot\sin(b\cdot(i\cdot\mathrm{step}) + c) + d =$$
$$= a\cdot\sin((b\cdot\mathrm{step})\cdot i + c) + d = a\cdot\sin(b'\cdot i + c) + d,$$
$$I = 0,\ldots, L-1.$$

Таким образом, любая последовательность равноотстоящих отсчетов некоторой синусоидальной функции является последовательностью отсчетов с шагом, равным 1, синусоидальной функции с другим коэффициентом перед i. Следовательно, доказательство справедливо при любом постоянном шаге.

Предложенный метод в отличие от существующих методов интерполяции позволяет осуществлять автоматическое определение наиболее простого вида интерполянта (с наименьшим количеством параметров). В основе метода лежит алгоритм синтеза рекурсивного цифрового фильтра по значениям отсчетов его импульсной характеристики, описываемым функциями некоторых классов. Приведены доказательства корректности данного алгоритма для нескольких классов функций.

Библиографические ссылки

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М. : Мир, 1990.

2. Никитин Д. А., Ханов В. Х. Синтез рекурсивных цифровых фильтров по импульсной характеристике, определяемой элементарной математической функцией // Цифровая обработка сигналов. 2008. № 3. С. 10–14.

3. Ханов В. Х., Никитин Д. А. Алгоритм анализа числовых последовательностей // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 6(13). С. 11–15.

4. Никитин Д. А. Теоремы о существовании и порядках цифровых рекурсивных фильтров с импульсными характеристиками определенной формы // Информ. технологии и мат. моделирование (ИТММ-2009) : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (13–14 нояб. 2009 г.). Ч. 2. Томск, 2009. С. 144–146.

D. A. Nikitin, K. V. Safonov

AUTOMATIC DETECTION OF INTERPOLANT WITH THE FEWEST PARAMETERS

A method that allows, for the initial set of points on a uniform grid, to determine automatically an interpolant with the fewest parameters in the following set of functions: polynomials, exponential functions, sine, any linear combination of the above functions.

Keywords: interpolation, identification, digital recursive filters.

© Никитин Д. А., Сафонов К. В., 2011

УДК 004.932.2

Н. Ю. Петухов

РАСПОЗНАВАНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ И ФРАКТАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ

Рассматривается алгоритм распознавания текстурных изображений с помощью трехслойной нейронной сети прямого распространения. Рассмотрен расчет фрактальной размерности методом покрытия поверхности эталонами и методом покрытия двумерной поверхностью. Представлен алгоритм расчета статистических характеристик и результаты проведенных экспериментов.

Ключевые слова: текстура, фрактальная размерность, статистические характеристики, нейронная сеть.

В последнее время все большую актуальность приобретают междисциплинарные исследования, в частности, в современных науках о Земле исследования все чаще проводятся на стыке различных научных направлений [1]. Для комплексной оценки современного состояния различных природных структур необходимо проводить исследования с использованием не только классических научных методов, разработанных и апробированных в системе наук о Земле, но и новейших физических, математических, компьютерных знаний и технологий, которые позволяют моделировать и прогнозировать возможные тенденции в изменении структуры и свойств природных объектов. Одним из таких инструментов, позволяющих анализировать современное состояние природных объектов, является фрактальный анализ. Данный метод позволяет оценить характер самоподобия природного объекта, раскрыть его фрактальные свойства. Подобный подход может быть применен к природным объектам (в частности, для описания ландшафтных изображений), демонстрирующим свойства самоподобия в относительно широком диапазоне характерных масштабов. Фрактальные методы являются принципиально новыми методами обработки сигналов и изображений. Они используют дробную топологическую размерность пространства сигналов и изображений, а также свойства самоподобия или скейлинга.

Предлагается новый метод распознавания текстурных изображений по комплексным фрактальным и статистическим показателям с применением нейронных сетей прямого распространения.

Алгоритмическая реализация фрактальных методов оценки текстур. На практике для измерения фрактальной размерности обычно используют три алгоритма: метод покрытия поверхности эталонами; дисперсионное масштабирование, основанное на

оценке закона функции распределения средних квадратов по формуле (1); оценка фрактальной размерности D по степени аппроксимирующего полинома для спектра мощности процесса.

Наибольшее распространение получил метод покрытий. Сущность его заключается в покрытии фрактального изображения квадратной сеткой размером $\varepsilon \to 0$, но при этом значение ε не должно быть слишком малым [2]. Входным изображением является одиночное текстурное изображение, например, изображение дерева, листвы, воды, облаков и т. д. На этапе инициализации задается минимальное и максимальное значение ε. Также устанавливается размер шага уменьшения значения ε. На этапе обработки осуществляется вычисление фрактальной размерности и вывод результатов. Приведем описание алгоритма по шагам.

1. Начало алгоритма расчета фрактальной размерности методом покрытия эталонами.

2. Задаем максимальный (ε_{max}) и минимальный (ε_{min}) размеры клетки, по которой высчитывается размерность.

3. Подсчитываем количество клеток, в которые попадает фрактал.

4. Вычисляем значение $\lim\limits_{\varepsilon\to 0}\left(\lg N(\varepsilon)/\lg(\varepsilon)\right)$.

5. Если размер клетки $\varepsilon > \varepsilon_{min}$, то возвращаемся к шагу 2, иначе шаг 6.

6. Конец работы алгоритма.

Другой метод покрытия фрактального образования двумерной поверхностью состоит в том, что квантованные значения интенсивности двумерного сигнала должны располагаться между двумя функциями, называемыми верхней и нижней поверхностями [3]. Верхняя поверхность $U(x, y, \varepsilon)$ содержит множество точек, значения интенсивностей которых всегда по крайней мере на один квантованный уровень превышают интенсивность входного сигнала. Нижняя поверхность $W(x, y, \varepsilon)$ имеет значения точек, значения интенсивностей которых всегда по крайней мере на один квантованный уровень меньше интенсивности входного изображения $f(x, y)$. В общем случае

$$\begin{aligned} U(i,j,\varepsilon+1) &= \max\left\{U(i,j,\varepsilon)+1, \max\limits_{k,m\in\eta}\left[U(k,m,\varepsilon)\right]\right\}, \\ W(i,j,\varepsilon+1) &= \min\left\{W(i,j,\varepsilon)-1, \min\limits_{k,m\in\eta}\left[L(k,m,\varepsilon)\right]\right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где η – локальная область сконструированной «поверхности» размерами $k \times m$ точек.

Две функции из выражения (1) формируют покрытие толщиной 2ε. Для двумерного сигнала площадь «поверхности» есть объем, занятый покрытием и деленный на величину 2ε. Площадь «поверхности» интенсивности $A(\varepsilon)$ в пределах скользящего окна R рассчитывается вычитанием точки за точкой нижней «поверхности» из верхней «поверхности» с дальнейшим суммированием по всему окну R:

$$A(\varepsilon) = \sum_{i,j\in R}\left(U(i,j,\varepsilon)-W(i,j,\varepsilon)\right)/2\varepsilon = V(\varepsilon)/2\varepsilon. \quad (2)$$

Фрактальная размерность рассчитывается по наклону зависимости $\log A(\varepsilon)$ как функция $\log \varepsilon$. Значение D, полученное из выражения (2), находится в ожидаемом диапазоне от 2 до 3, при котором $D = 2$ соответствует плоской поверхности. Приведем алгоритм расчета фрактальной размерности.

1. Начало алгоритма расчета фрактальной размерности методом покрытия двумерной поверхностью.

2. Задаем значение ε – толщину покрытия.

3. Строим поверхность по формуле (1).

4. Вычисляем площадь поверхности $A(\varepsilon)$ по формуле (2).

5. Строим график $\log A(\varepsilon)$.

6. Определяем фрактальную размерность по наклону $\log \varepsilon$.

7. Конец алгоритма.

Алгоритмическая реализация расчета статистических показателей текстуры. Так как различные фрактальные образования с одинаковой размерностью могут иметь резко различающуюся текстуру, вычисляются статистические характеристики и лакунарность. Статистические характеристики определяются по гистограмме яркости всего изображения или его локальной области. Вычисление статистических характеристик позволяет охарактеризовать текстуру области как гладкую, грубую, зернистую. Пусть z – случайная величина, соответствующая яркости элементов изображения, а $p(z_i)$, $i = 0, 1, 2, \ldots, Q-1$ – ее гистограмма, где Q – число уровней яркости. Центральный момент порядка n случайной величины z определяется по формуле

$$\mu_n(z) = \sum_{i=0}^{Q-1}\left(z_i - \sum_{i=0}^{Q-1} z_i p(z_i)\right)^n p(z_i).$$

Для описания текстуры особенно важен второй момент, т. е. дисперсия $\sigma^2(z) = \mu_2(z)$. Она является мерой яркостного контраста и может быть использована для построения дескрипторов относительной гладкости. Так, величина

$$R = 1 - 1/\left(1+\sigma^2(z)\right)$$

равна 0 для областей постоянной яркости и приближается к 1 для больших значений $\sigma^2(z)$. Поскольку для полутоновых изображений с уровнями яркости от 0 до 255 значения дисперсии оказываются большими, дисперсию целесообразно нормировать до интервала изменения [0, 1]. Для этого необходимо разделить дисперсию $\sigma^2(z)$ на величину $(Q-1)^2$. Эмпирическим путем выяснено, что статистики второго порядка и выше являются более важными показателями. Имеются дополнительные характеристики текстуры. Так, «однородность» текстуры находится по формуле

$$S = \sum_{i=0}^{Q-1} p^2(z_i),$$

а средняя энтропия определяется как

$$E = \sum_{i=0}^{Q-1} p(z_i)\log_2 p(z_i).$$

Поскольку все значения $p(z_i)$ находятся в интервале [0,1] и их сумма равна 1, то величина S достигает максимума для изображения, все элементы которого имеют одинаковую яркость (максимально однородное изображение), и уменьшается по мере роста яркостных различий. Энтропия характеризует изменчивость яркости изображения: она, наоборот, равна 0 для области постоянной яркости и максимальна в случае равновероятных значений.

Однако текстурные характеристики, которые вычисляются только на основании гистограммы, имеют определенную ограниченность, поскольку не несут никакой информации о взаимном расположении элементов изображения. Один из способов учесть подобную информацию при анализе текстуры состоит в том, чтобы рассматривать не только распределение яркостей, но и местоположение пикселей с равными или близкими значениями яркости.

Приведем алгоритм расчета статистических характеристик, считая входное изображение текстурой одного вида.

1. Начало алгоритма вычисления статистических показателей текстуры.

2. Строим гистограмму яркости изображения.

3. Вычисляем статистические характеристики: среднюю яркость; дисперсию; параметр относительной гладкости R; третий момент, определяющий степень симметрии гистограммы и показывающий, наблюдается ли на ней перекос влево (при отрицательном значении момента) или вправо (при положительном значении); однородность, характеризующую равномерность распределения яркости; энтропию, показывающую изменчивость яркости изображения.

4. Выводим и сохраняем полученные статистические характеристики.

5. Строим матрицу смежности пикселей с равными или близкими значениями яркости. Выводим матрицу смежности.

6. Конец алгоритма.

Кроме статистических характеристик для отличия текстур Б. Мандельброт [4] ввел специальный термин «заполнение», или «лакунарность» (*lacunarity*) для описания характеристик фракталов, имеющих одинаковые фрактальные размерности, но различный внешний вид или текстурные показатели. Было предложено несколько альтернативных способов определения заполнения, самый известный из которых имеет вид

$$\Lambda = \left\langle \left(M / \langle M \rangle - 1 \right)^2 \right\rangle,$$

где M – масса фрактального образования; $\langle M \rangle$ – ожидаемая масса. Заполнение, показывающее разницу между фрактальной массой и ожидаемой массой, относится к статистическим характеристикам второго порядка и изменяется следующим образом: заполнение мало для плотной текстуры и велико для крупнозернистой текстуры.

Распознавание текстур. Распознавание образов (в частности, текстур изображений лесных массивов), выполняемое нейронной сетью, является по своей природе статистическим. При этом образы представляются отдельными точками в многомерном пространстве решений. Все пространство решений разделяется на отдельные области, каждая из которых ассоциируется с определенным классом текстуры. В процессе обучения на тестовых выборках формируются границы таких областей. Системы распознавания образов, созданные на основе нейронных сетей, можно разделить на два типа:

– двухуровневые системы, состоящие из сети извлечения признаков (без учителя) и сети классификации (с учителем). Такая архитектура соответствует традиционному статистическому подходу распознавания образов. В этом случае образ является вектором из m наблюдений, каждое из которых можно рассматривать как точку x в m-мерном пространстве наблюдений. Извлечение признаков осуществляется с помощью преобразования, переводящего точку x в промежуточную точку y в q-мерном пространстве признаков, где $q < m$. Такое преобразование можно рассматривать как операцию снижения размерности признаков, упрощающую задачу классификации. При этом сеть классификации выполняет преобразование, отображающее промежуточную точку y в один из классов r-мерного пространства решений, где r – количество классов;

– система, проектирующаяся как единая многослойная сеть прямого распространения, использующая один из алгоритмов обучения с учителем. При этом узлы скрытого слоя сети решают задачу извлечения признаков (в упрощенном варианте) и классификации.

Однако наиболее перспективным методом проектирования нейронных сетей является разработка искусственных нейронных сетей, инвариантных к некоторым допустимым преобразованиям. Существуют три способа обеспечения инвариантности нейронной сети: первый – когда синаптические связи между отдельными нейронами сети строятся таким образом, чтобы допустимые преобразования входных сигналов вызывали бы один и тот же выходной сигнал (структурная инвариантность); второй – когда, например, изображения одного и того же объекта, снятого под разными ракурсами, подаются на входы нейронной сети, а учитель правильно классифицирует их, относя к одному образу (инвариантность к обучающей выборке); третий – использование инвариантных признаков, процесс извлечения которых может быть реализован самой сетью или выполнен с помощью дополнительных системных преобразований до подачи на нейронную сеть. Последний способ представляется нам наиболее целесообразным при дешифрировании аэрофотоснимков, поскольку мы можем влиять на процесс извлечения инвариантных признаков, строя инвариантные текстурные фильтры.

Рассмотрим процесс обучения нейронной сети прямого распространения, использованной в наших экспериментах. Пусть нейрон k работает под управлением вектора сигнала от одного или нескольких скрытых слоев $x(n)$, где n – номер шага итеративного процесса настройки синаптических весов нейрона k. Обо-

значим выходной сигнал нейрона k как $y_k(n)$, примем, что этот сигнал является единственным выходом нейронной сети. Сравним полученный выходной сигнал $y_k(n)$ с эталонным сигналом $d_k(n)$, в результате чего получим сигнал ошибки $e_k(n)$:

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n).$$

Далее сигнал ошибки инициирует последовательность корректировок синаптических весов нейрона k. Такие изменения преследуют цель пошагового приближения выходного сигнала $y_k(n)$ к эталонному сигналу $d_k(n)$. Цель достигается за счет минимизации функции стоимости $E(n)$, определяемой как

$$E(n) = e_k^2(n)/2,$$

где $E(n)$ – текущее значение энергии ошибки. Пошаговая корректировка синаптических весов нейрона k продолжается до тех пор, пока нейронная сеть не достигнет устойчивого состояния. Рассмотренный процесс является обучением, основанном на коррекции ошибок. Минимизация функции стоимости $E(n)$ выполняется по так называемому дельта-правилу, или правилу Видроу–Хоффа. Обозначим переменной $w_{kj}(n)$ текущее значение синаптического веса w_{kj} нейрона k, соответствующего элементу $x_j(n)$ вектора $x(n)$ на шаге приближения n. В соответствии с дельта-правилом изменение $\Delta w_{kj}(n)$, применяемое к синаптическому весу w_{kj}, задается выражением

$$\Delta w_{kj}(n) = \eta e_k(n) x_j(n),$$

где η – параметр скорости обучения (некоторая положительная константа).

Вычислив величину изменения синаптического веса $\Delta w_{kj}(n)$, можно определить его значение для следующего шага приближения

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \Delta w_{kj}(n). \quad (3)$$

Перепишем выражение (3) как

$$w_{kj}(n) = z^{-1}[w_{kj}(n+1)],$$

где z^{-1} – оператор единичной задержки элемента памяти нейронной сети.

Рассмотрим нейронную сеть для распознавания текстур ландшафтных изображений (рис. 1). Сеть состоит из двух скрытых слоев по 10 нейронов в каждом, входного и выходного слоев. На вход подается фрактальная размерность и шесть статистических характеристик, а на выходе получаем тип текстуры. Информация о входах и выходах нейронной сети представлена в табл. 1.

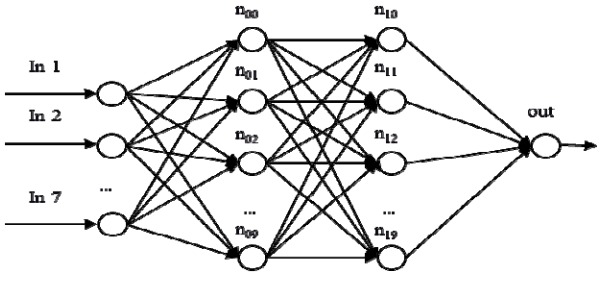


Рис. 1. Нейронная сеть прямого распространения

Таблица 1

Входы и выходы нейронной сети

Входы/Выходы	Название
Вход 1	Фрактальная размерность (D)
Вход 2	Средняя яркость
Вход 3	Дисперсия
Вход 4	Гладкость
Вход 5	Третий момент
Вход 6	Однородность
Вход 7	Энтропия
Выход	Тип текстуры, выход

Реализация алгоритмов и результаты экспериментальных исследований. Разработка программного комплекса TextureFeatures v.1.0 проводилась в среде программирования Code Gear C++ Builder 2007. Программный комплекс включает четыре модуля: главный модуль Main.cpp; модуль расчета статистических характеристик Stat.cpp; модуль расчета фрактальных показателей Fract.cpp; модуль вспомогательных функций ImageCol.hpp.

В главном модуле Main.cpp реализован графический интерфейс и структура меню программы. Модуль расчета статистических характеристик Stat.cpp содержит функцию расчета статистических показателей для описания изображения. Модуль Stat.cpp использует гистограмму яркости изображения, которая рассчитывается вспомогательным модулем и передается в функцию Get_Stat(int *gist). Функция возвращает шесть значений характеристик с плавающей запятой. Модуль расчета фрактальных показателей Fract.cpp выполняет четыре основных функции: покрытие изображения эталонами, покрытие изображения поверхностями, вычисление фрактальной размерности и вычисление показателя лакунарности. Модуль вспомогательных функций выполняет перевод изображения в бинарное и полутоновое, а также рассчитывает гистограммы изображения по яркости. Все модули непосредственно связаны с главным модулем и функционируют по командам из главного меню.

Тестирование проводилось на персональном компьютере, имеющем следующую конфигурацию: процессор Intel Corel 2 DUO 2.26 GHz; ОЗУ 2024 Mb; видеокарта Ati Radeon HD 3470 512 Mb. Для тестирования использовались две базы с естественными текстурами: Textures Library Forrest (400 изображений) и Brodatz (110 изображений). Также был реализован *m*-файл в программном обеспечении MatLab 2008b, вычисляющий фрактальную размерность методом покрытий квадратной сеткой и файл для расчета статистических характеристик. Данные по расчетам фрактальных показателей с помощью программного продукта TextureFeatures v. 1.0 и с использованием среды MatLab 2008b представлены в табл. 2.

По результатам тестирования видно, что текстуры с разными фрактальными образованиями имеют в основном разную фрактальную размерность. Фрак-

талы текстур «трава» имеют ФР, равную 2,6256, «облака» – 2,6421, «вода» – 2,6001, «кора дерева» – 2,7198, «дерево» – 2,69584, «куст» – 2,65438. В ходе экспериментов было обнаружено, что некоторые фрактальные образования имеют почти одинаковую размерность, для чего рассчитывались показатели лакунарности (см. табл. 2) и статистические характеристики. Статистические характеристики позволяют определить характер текстуры (гладкая, грубая, периодическая). К грубой текстуре относятся изображения «дерево» и «куст», к периодической текстуре – изображения «кора дерева» и «трава», к гладкой текстуре – изображение «вода».

Экспериментальные исследования, проведенные с помощью разработанного программного комплекса *TextureFeatures v.* 1.0 и полученные с применением пакета MatLab 2008b, показали, что расхождения при расчете фрактальных показателей составляют около 2…4 %, что существенно не влияет на полученные результаты.

Нейронная сеть была построена и обучена с помощью программы Neural Network Wizard 1.7. В тестовой выборке было подано на входы нейронной сети по 50 эталонов каждого вида текстуры. Пример рассчитанных весовых коэффициентов синапсов на основе тестовой выборки представлен в табл. 3.

Таблица 2

Результаты расчета фрактальных показателей текстурных изображений с помощью программного продукта TextureFeatures v. 1.0 и среды MatLab 2008b

Текстура	Фрактальная размерность TextureFeatures v.1.0	Фрактальная размерность MatLab 2008b	Показатель лакунарности TextureFeatures v.1.0
«Трава»	2,627 1	2,625 6	0,910 34
«Облако»	2,643 9	2,642 1	0,756 73
«Вода»	2,603 681	2,600 1	0,934 82
«Кора дерева»	2,721 743	2,719 8	0,891 21
«Дерево»	2,697 814	2,695 84	0,873 49
«Куст»	2,658 424	2,654 38	0,859 32

Таблица 3

Пример весовых коэффициентов синапсов

	n_{00}	n_{01}	n_{02}	n_{03}	n_{04}	n_{05}	n_{06}	n_{07}	n_{08}	n_{09}
Int 1	0,774 5	–0,195 3	–1,300 0	–1,301 7	–0,262 7	2,606 1	–0,039 3	–0,134 3	2,871 4	–0,457 7
Int 2	0,352 1	0,558 4	1,132 6	0,688 8	–0,077 8	0,046 0	0,656 5	0,525 2	–0,261 3	0,662 8
Int 3	0,086 0	0,518 1	0,128 0	0,007 7	0,344 0	0,469 0	0,692 5	0,688 7	1,103 1	0,612 2
Int 4	0,926 2	0,549 8	1,332 3	1,974 9	1,468 7	–0,780 2	1,207 0	0,944 7	–1,291 3	1,034 8
Int 5	0,826 0	0,622 8	0,547 8	0,602 9	0,105 9	1,527 0	0,490 1	0,006 7	1,432 5	0,676 9
Int 6	0,193 5	0,442 5	0,239 8	1,100 0	0,062 0	0,362 7	0,090 9	0,689 1	0,620 1	0,956 2
Int 7	0,918 8	0,515 9	0,852 0	0,773 3	1,194 3	0,425 6	0,377 9	0,501 0	0,703 8	0,923 4
const	0,592 9	0,602 4	0,093 1	0,190 1	0,335 2	0,746 5	0,480 3	–0,072 9	0,469 5	0,377 0
	n_{10}	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{14}	n_{15}	n_{16}	n_{17}	n_{18}	n_{19}
n_{00}	0,733 2	0,588 3	0,109 4	0,520 9	0,510 9	0,902 0	0,917 1	–0,341 7	0,219 7	0,286 4
n_{01}	0,040 2	1,005 3	0,976 2	0,156 6	0,504 5	0,668 1	0,317 1	0,334 7	–0,322 0	0,588 2
n_{02}	–0,064 9	0,629 4	0,623 3	0,365 6	0,823 3	0,594 1	0,763 2	1,760 7	0,477 5	0,185 0
n_{03}	–0,226 3	0,965 6	0,521 1	0,719 2	0,751 1	0,678 1	0,364 9	1,936 6	0,925 1	0,486 0
n_{04}	0,091 4	0,062 1	0,340 9	0,577 7	0,621 8	0,457 8	0,626 6	0,874 2	0,793 5	0,730 7
n_{05}	0,519 6	0,438 4	0,762 8	0,066 6	0,717 9	0,932 5	0,720 0	–3,119 1	–1,246 8	–0,294 8
n_{06}	0,078 0	0,785 5	0,995 9	0,072 6	0,768 5	0,488 2	0,604 6	0,379 9	0,143 8	0,486 9
n_{07}	0,041 4	0,893 1	0,197 1	0,050 6	0,921 0	0,361 0	1,005 1	0,432 4	0,218 4	0,014 7
n_{08}	1,069 8	0,190 3	0,680 6	0,656 8	0,458 1	0,542 2	0,813 0	–3,655 4	–2,118 5	–0,089 4
n_{09}	0,567 6	0,597 0	0,742 2	0,912 0	0,581 7	0,378 0	0,802 6	0,379 5	0,512 8	0,354 5
const	0,939 4	0,579 6	0,954 6	–0,011 4	0,407 4	0,881 5	0,800 4	–0,644 1	–0,223 0	0–341 2
out	0,764 3	0,218 0	0,565 1	–0,538 0	–0,122 4	0,418 7	0,591 6	–8,333 8	–3,312 8	–0,839 9
	out									
const	0,315 9									

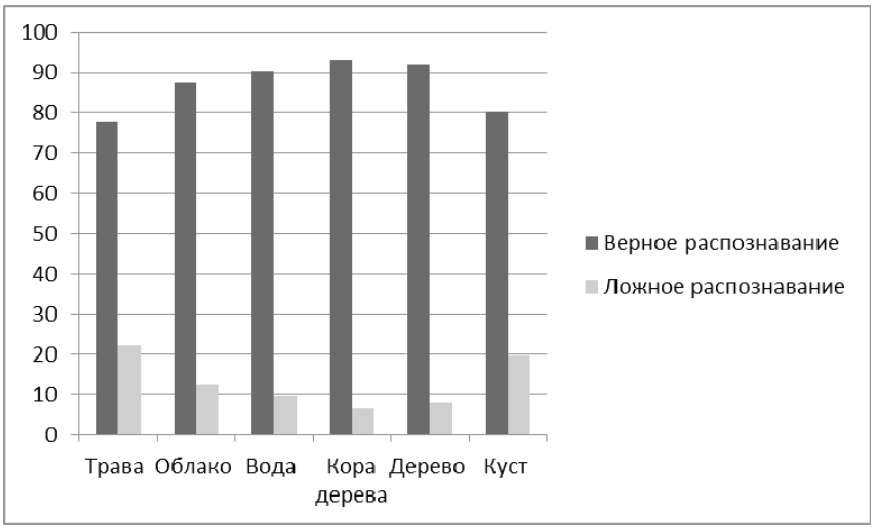


Рис. 2. Диаграмма верного и ложного распознавания

По диаграмме точности распознавания различных классов текстур с помощью трехслойной нейронной сети прямого распространения на основе обучающей выборки видно, что процент верно распознанных текстур составил 79…93 %, а ложного – 7 и 21 % (рис. 2).

Таким образом, разработанный программный комплекс Texture Recognition v.1.0 позволяет оценивать основные фрактальные и статистические показатели текстур ландшафтных изображений. Для повышения точности распознавания необходимо произвести обучение нейронной сети с большим количеством образцов.

Библиографические ссылки

1. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital image processing. New Jersey : Prentice-Hall, 2002.

4. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. N. Y. : Freeman, 1982.

2. Петухов Н. Ю. Реализация метода покрытий для расчета фрактальной размерности ландшафтных изображений // Тез. докл. 11 междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Ч. 2. М., 2009. С. 393–396.

3. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: топология выборки. М. : Унив. кн., 2005.

N. Yu. Petukhov

ANALYSIS AND RECOGNITION OF TEXTURAL IMAGES ON THE BASIS OF STATISTICAL AND FRACTAL FEATURES

An algorithm of recognition of textural images by means of a neural network of direct distribution is considered. Fractal dimensions calculation methods, by the method of coating a surface with master plates and method of coating a fractal structure with two-dimensional surface, are considered. Algorithm of calculation of statistical descriptors is presented, along with the results of the experiments carried out.

Keywords: texture, fractal dimension, statistical characteristics, a neural network.

© Петухов Н. Ю., 2011

УДК 004.932.2

Д. И. Пьянков

АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КОРРЕКЦИИ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ СТЕРЕОВИДЕНИЯ

Приведен метод пространственно-временной коррекции видеопоследовательностей в задачах стереовидения. Рассмотрен алгоритм оценки движения и получения интерполяционных кадров в видеопоследовательностях. Приведен алгоритм совмещения видеопоследовательностей для построения стереовидеопоследовательности. Представлены результаты тестирования методов интерполяции и совмещения видеопоследовательностей.

Ключевые слова: видеопоследовательность, изображение, стереовидение, интерполяция.

На сегодняшний день стереосъемка становится все более популярной. Однако по сравнению со съемками в профессиональных студиях, в которых используется специализированное дорогостоящее оборудование, стереосъемка в домашних условиях затруднительна. Это обусловлено тем, что необходимо обеспечивать синхронную запись на несколько видеокамер одновременно. Бюджетный вариант видеокамер не позволяет достичь синхронной записи при частоте 24…30 кадров в секунду ввиду различных факторов: различного времени доступа к устройству хранения, несинхронного старта и т. д. Это обусловливает необходимость длительной обработки и коррекции двух видеопоследовательностей в видеоредакторах. Разработка алгоритмов пространственно-временной коррекции видеопоследовательностей позволяет решить эти проблемы.

Основой стереосъемки является подготовка двух подобных, но не идентичных видеопоследовательностей, полученных с двух точек съемки относительно объекта. В идеальном случае оси видеокамеры и объективов в этих двух положениях должны быть параллельны. При нормальной стереосъемке базис видеосъемки должен быть приблизительно равен расстоянию между центрами зрачков человеческого глаза (примерно 65 мм) [1]. При совмещении двух видеопоследовательностей, снятых с левой и правой видеокамер, получается стереовидеопоследовательность, которую можно преобразовать под метод просмотра: анаглиф, линейную поляризацию, метод затворных ЖК-панелей.

Рассмотрим общую схему метода пространственно-временной коррекции (рис. 1).

1. Осуществляется преображение каждой из видеопоследовательностей в YUV-пространство. Преобразование связано с получением компоненты яркости *Y*. Значения яркости пикселей используются для нахождения векторов движения.

2. Выбирается произвольным образом одна из видеопоследовательностей и осуществляется преобразование частоты кадров в ней на основе интерполяции (генерируется несколько кадров между двумя соседними кадрами этой последовательности).

3. Осуществляется совмещение текущего кадра базовой видеопоследовательности (которая не подвергалась процедуре преобразования частоты) с соответствующими полученными дополнительными кадрами преобразованной видеопоследовательности (интерполированные кадры).

4. Генерируется новая видеопоследовательность, полученная из текущего совмещенного кадра, полученного интерполяцией, путем добавления его в выходной поток.

5. Повторяется шаг 2 до тех пор, пока все кадры базовой видеопоследовательности не будут совмещены.

Это обеспечивает коррекцию одной видеопоследовательности в пространственной и временной области относительно другой (базовой) видеопоследовательности.

Получение интерполированных кадров. Пусть дана видеопоследовательность $L_{\text{in}}(t)$, $t \in \{0, 1, 2, 3, \ldots\}$. Необходимо вставить между каждыми двумя кадрами определенное число кадров, заданное параметром n. Тогда видеопоследовательность $L_{\text{out}}(z)$ после преобразования частоты кадров будет представлена выражением

$$L_{\text{out}}(z)=\begin{cases} L_{\text{in}}(t), & z = n \cdot t, \quad t \in \{0, 1, 2, 3, \ldots\}, \\ L_{\text{in}}(t), & z = n \cdot t + l, \quad l \in \{1, 2, 3, \ldots, n-1\}, \end{cases} \quad (1)$$
$$z \in \{0, 1, 2, 3, \ldots\}, \quad n \in \{2, 3, 4 \ldots\},$$

где n – параметр, определяющий, во сколько раз нужно увеличить частоту кадров; z – общее число кадров.

Получение интерполированных кадров производится по следующей общей схеме.

1. Рассматривается текущий кадр $L(t)$ и следующий кадр $L(t + 1)$ видеопоследовательности $L_{\text{in}}(t)$, $t \in \{0, 1, 2, 3, \ldots\}$.

2. Производится оценка движения согласно выбранному алгоритму.

3. Вычисляется поле векторов движения.

4. Производится интерполяция между текущим кадром $L(t)$ и следующим кадром $L(t + 1)$.

5. Строятся интерполированные кадры.

Алгоритм оценки движения. Получение интерполированных кадров базируется на оценке движения в соседнем кадре относительно текущего кадра. Для оценки движения был выбран метод сопоставления блоков. Данный метод основан на поиске соответствия между блоками и позволяет с высокой вычислительной эффективностью получать поле векторов для блоков кадров.

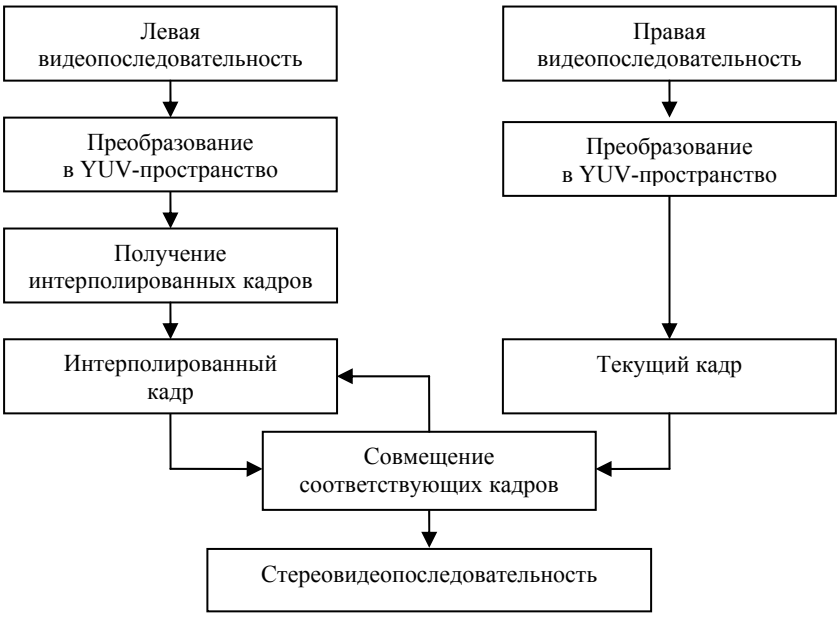


Рис. 1. Общая схема метода пространственно-временной коррекции видеопоследовательностей

Для его реализации под задачу получения стереовидеопоследовательности потребовалась модификация существующих методов. В традиционных методах поиска движения много времени уходит на вычисление смещений между кадрами. Предлагаемый метод основан на модификации метода полного перебора и метода поиска по шаблону.

Оценка движения производится по следующей общей схеме (рис. 2).

1. Рассматривается текущий кадр $L(t)$ и следующий кадр $L(t + 1)$.

2. Кадры $L(t)$ и $L(t + 1)$ разбиваются на равные блоки $B(x, y)$, размер которых кратен двум и задается параметром s_block.

3. На кадре $L(t + 1)$ находится сумма s значений яркости каждого пикселя данного блока $B(x, y)$, определяемая выражением

$$s = \sum_{x=0}^{\text{s_block}} \sum_{y=0}^{\text{s_block}} B(Y(x, y)), \qquad (2)$$

где $Y(x, y)$ – значение яркости пикселя (x, y).

4. Определяется, возможно ли движение между кадрами $L(t)$ и $L(t + 1)$ для данного блока $B(x, y)$. Для этого вводится пороговое значение err, которое определяется следующим выражением:

$$\text{err} = (255^2 - Y_{\text{lim}}{}^2) \cdot \text{s_block}^2, \qquad (3)$$

где $Y_{\text{lim}} \in [0; 255]$ – параметр, обозначающий предельное значение яркости пикселя (x, y) блока $B(x, y)$ размером s_block × s_block. Чем больше Y_{lim}, тем меньше пороговое значение err. Если $Y_{\text{lim}} = 255$, то err = 0. Затем сумма s значений яркости пикселей данного блока $B(x,y)$ сравнивается с порогом. Если $s >$ err, то движение в блоке ищется (переход к следующему шагу). Если $s <$ err, движение в блоке не ищется, возврат к шагу 3 (выбрав следующий блок).

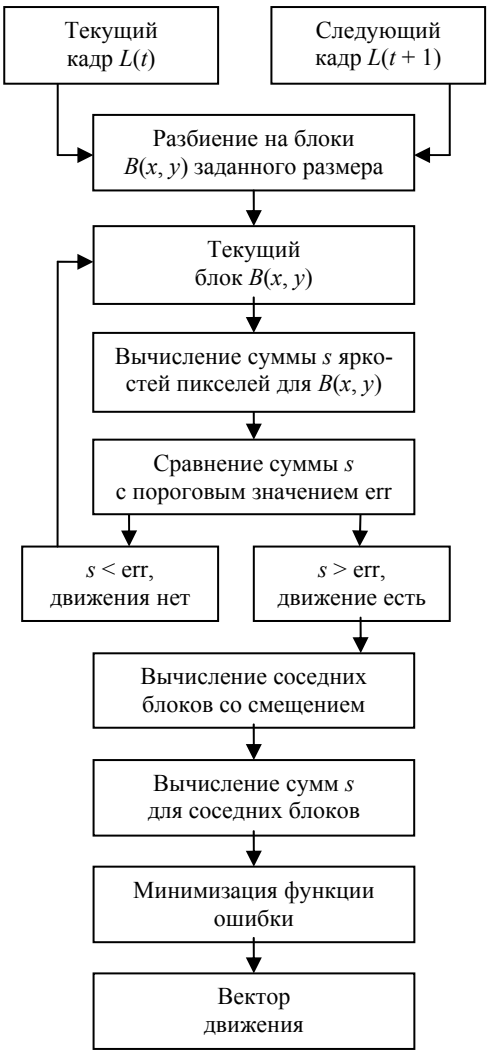


Рис. 2. Общая схема оценки движения

5. Задается параметр, определяющий область поиска движения, называемый смещением shift. Данный параметр принимает значения shift(x), где x – число пикселей, на величину которых необходимо смещение.

6. На кадре $L(t + 1)$ определяются соседние блоки по диагонали, вертикали и горизонтали относительно рассматриваемого блока $B(x, y)$ с кадра $L(t)$, смещенные от этого блока на величину shift.

7. На кадре $L(t + 1)$ аналогично находятся суммы значений пикселей соседних блоков по диагонали, вертикали и горизонтали. Используя выражение (2), получают значения сумм блоков s_n, $n \in \{0, 1, 2, 3, \ldots, 8\}$.

8. Для принятия решения о направлении вектора движения необходимо минимизировать функцию ошибки. Суммы значений пикселей блоков s_n, $n \in \{0, 1, 2, 3, \ldots, 8\}$ сравниваются поочередно с суммой s блока $B(x, y)$ с помощью функции суммы квадратов разностей:

$$\text{move} = \min\left(\sum_{n=0}^{8} (s - s_n)^2\right). \quad (4)$$

Находится соседний блок, содержащий минимальное значение ошибки. Данный блок указывает направление вектора движения для блока $B(x, y)$ на кадре $L(t + 1)$. Направление вектора движения для блока $B(x, y)$ найдено.

9. На кадрах $L(t)$ и $L(t + 1)$ берется следующий блок. Повторяются шаги 4…7 до тех пор, пока все блоки не будут найдены. Таким образом будет получено поле движения векторов.

Данный алгоритм может быть модифицирован. Например, для уменьшения времени выполнения данного алгоритма можно не рассматривать диагональные соседние блоки, а рассматривать только четыре соседних пикселя, но тогда точность нахождения поля векторов движения изменится.

Алгоритм интерполяции кадров. После того как были найдены векторы движения, производится линейная интерполяция кадров поблочно по следующей схеме.

1. Рассматривается текущий кадр $L(t)$ и следующий кадр $L(t + 1)$ видеопоследовательности $L_{in}(t)$, $t \in \{0, 1, 2, 3, \ldots\}$ с найденным вектором движения move для блока $B(x, y)$.

2. Пусть n – количество интерполированных кадров, которые необходимо вставить между кадрами $L(t)$ и $L(t + 1)$. Рассматривается каждый пиксель C_1 блока $B(x, y)$ на текущем кадре $L(t)$ и каждый пиксель C_2 блока $B(x, y)$ на следующем кадре $L(t + 1)$.

Согласно направлению вектора движения на каждом интерполированном кадре, данный пиксель плавно изменяет свое значение каждой цветовой компоненты (Y, U, V) C_n. Для получения плавных интерполированных кадров используется выражение, представляющее собой линейную интерполяцию значений пикселей:

$$C_n = C_1 + (C_2 - C_1) \cdot t \ , \ t \in [0; 1], \quad (5)$$

где C_1 – значение цветовой компоненты Y пикселя (x, y) блока $B(x, y)$ на текущем кадре $L(t)$; C_2 – значение цветовой компоненты Y пикселя (x, y) блока $B(x, y)$ на следующем кадре $L(t + 1)$; C_n – значение цветовой компоненты Y пикселя (x, y) блока $B(x, y)$ на интерполированном кадре n; t – параметр, задающий линейное смещение пикселей на каждом интерполированном кадре. Параметр t вычисляется по формуле

$$t = \frac{m}{n-1}, \ m \in \{1, 2, 3, ..., n\}, \quad (6)$$

где n – количество интерполированных кадров. Параметр $t \in [0; 1]$, что дает плавное смещение цветовых компонент для каждого интерполированного кадра.

3. Шаг 2 повторяется для цветовых компонент U, V.

4. На кадрах $L(t)$ и $L(t + 1)$ берется следующий блок. Повторяются шаги 2…3 до тех пор, пока все блоки не будут интерполированы. Таким образом, будет получено n интерполированных кадров.

Алгоритм совмещения кадров. Заключается в сравнении кадра $L(t)$, интерполированных кадров, полученных между кадрами $L(t)$ и $L(t + 1)$ левой видеопоследовательности, с кадром $R(t)$ правой видеопоследовательности. Находится интерполированный кадр, полученный между кадрами $L(t)$ и $L(t + 1)$ левой видеопоследовательности, наиболее соответствующий кадру $R(t)$ правой видеопоследовательности.

Совмещение кадров производится по следующей общей схеме.

1. Рассматривается левая видеопоследовательность L с полученными n-интерполированными кадрами $L(z)$, $z \in \{2, 3, \ldots, n\}$ между кадрами $L(t)$ и $L(t + 1)$, кадр $L(t)$ и правая видеопоследовательность с кадром $R(t)$;

2. Находится попиксельная межкадровая разность. Для этого кадр $L(t)$ и каждый интерполированный кадр $L(z)$, $z \in \{2, 3, \ldots, n\}$ сравнивается с кадром $R(t)$ с помощью функции, которая определяет пиковое отношение сигнала к шуму [2]. PSNR включает в себя среднеквадратическое отклонение и определяется следующим выражением:

$$\text{PSNR}(z) = 20 \log_{10} \frac{\text{MAX}}{\sqrt{\text{MSE}}}, \quad (7)$$

где PSNR(z), $z \in \{2, 3, \ldots, n\}$ – значение схожести между интерполированным кадром $L(z)$ левой видеопоследовательности и кадром $R(t)$ правой видеопоследовательности; MAX $\in [0; 255]$ – максимальное значение, принимаемое пикселем изображения; MSE – среднеквадратическое отклонение для каждой цветовой компоненты пикселя, вычисляемое по формуле

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{x=0}^{h-1} \sum_{y=0}^{w-1} ((Y_2(x,y) - Y_1(x,y))^2)}{3hw} + \frac{\sum_{x=0}^{h-1} \sum_{y=0}^{w-1} ((U_2(x,y) - U_1(x,y))^2 + (V_2(x,y) - V_1(x,y))^2)}{3hw}, \quad (8)$$

где h – высота кадра; w – ширина кадра; Y_2, U_2, V_2 – значения цветовых компонент пикселя (x, y) на кадре $R(t)$ правой видеопоследовательности; Y_1, U_1, V_1 – значения цветовых компонент пикселя (x, y) на интерполированном кадре $L(z)$ левой видеопоследовательности.

3. Аналогично вычисляются значения MSE и PSNR($L(t)$) для текущего кадра $L(t)$ левой видеопоследовательности L.

4. Среди вычисленных значений PSNR между интерполированным кадром $L(z)$ (или текущим кадром $L(t)$) левой видеопоследовательности и кадром $R(t)$ правой видеопоследовательности находится максимальное значение like по формуле

$$\text{like} = \max(\text{PSNR}(z), \text{PSNR}(L(t))), \quad z \in \{2, 3, ..., n\}. \quad (9)$$

Интерполированный кадр $L(z)$ либо текущий кадр $L(t)$, межкадровая разность с кадром $R(t)$ правой видеопоследовательности которого является максимальной, и принимается за наилучший кадр.

5. Выбирается следующая пара кадров с левой видеопоследовательности и следующий кадр с правой видеопоследовательности и повторяются шаги 2–3 до окончательного сравнения всех кадров.

После сравнения кадров полученные стереокадры соединяются. Получается стереовидеопоследовательность, содержащая синхронизированную пару видеопоследовательностей.

Экспериментальные исследования. Для тестирования предложенного метода использовались две видеопоследовательности: foreman, где происходит быстрое движение; container, где происходит медленное движение. Исследования производились по следующим параметрам: среднее PSNR интерполированных кадров каждой видеопоследовательности, время выполнения метода. Размер смещения для поиска соседних блоков был установлен в один пиксель. Результаты исследований представлены на рис. 3–5.

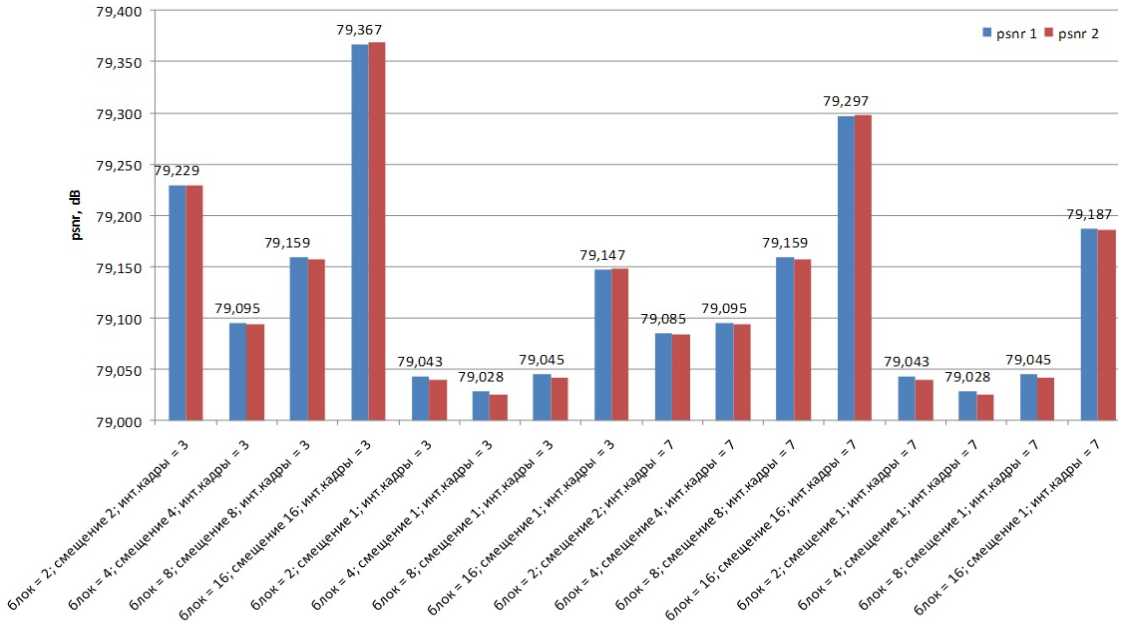


Рис. 3. График PSNR для быстрой видеопоследовательности foreman

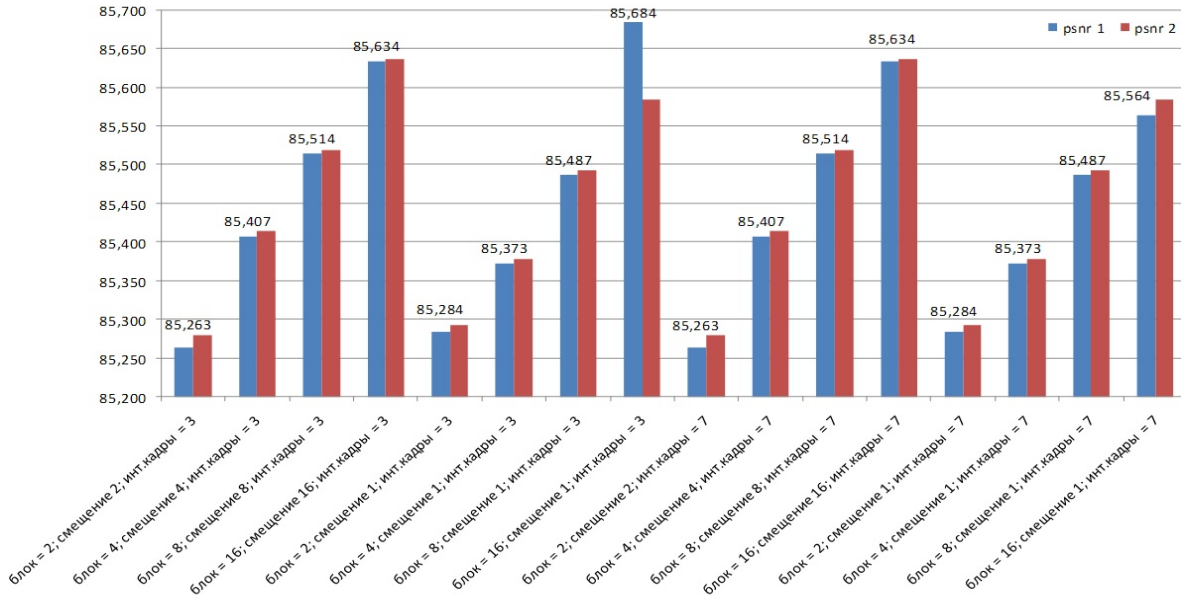


Рис. 4. График PSNR для медленной видеопоследовательности container

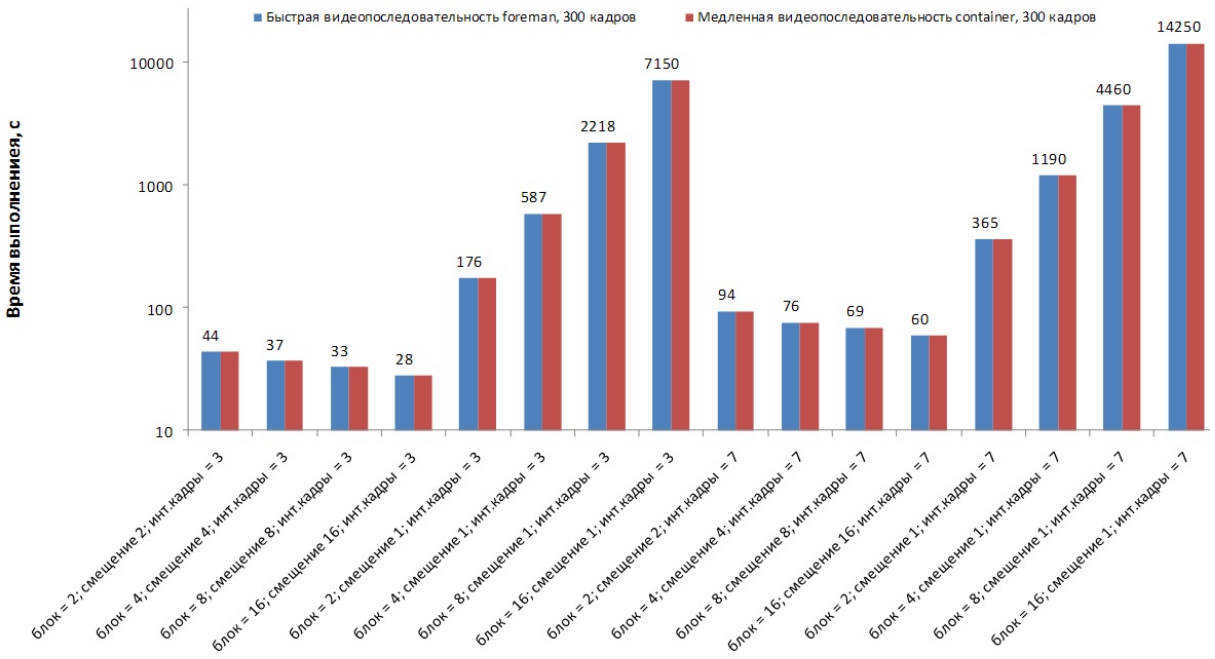


Рис. 5. График времени выполнения алгоритма интерполяции

Параметр PSNR показывает, насколько интерполированные кадры отличаются от текущего, и вычисляется в децибелах по логарифмической шкале. Максимальное значение – 120 децибел, когда кадры полностью одинаковы.

PSNR1 – среднее PSNR интерполированных кадров видеопоследовательности от текущего кадра к следующему. PSNR2 – среднее PSNR интерполированных кадров видеопоследовательности от следующего кадра к текущему. Графики PSNR представлены в логарифмической шкале. Для быстрой видеопоследовательности foreman параметр PSNR меньше, чем для медленной видеопоследовательности container. Это объясняется тем, что в быстрой видеопоследовательности за счет резкой смены кадров больше шума, чем в медленной видеопоследовательности.

Результаты тестирования быстрой видеопоследовательности показали, что при смещении между блоками в ширину блока на блоке 2 × 2 получается фактически пиксельный блок, и ошибки там почти нет (практически не находятся вектора движения). При размерах блока 4 × 4 уже начинает сказываться блочность метода, поэтому и получается самый худший результат. Лучшая точность достигается при большом блоке 16 × 16, который уже попадает в области движения и интерполирует корректно. Для медленной видеопоследовательности при увеличении блока интерполированные кадры получаются наиболее точными, так как в такой видеопоследовательности вектора движения имеют большое значение по абсолютной величине [3].

Для обеих видеопоследовательностей время выполнения алгоритма интерполяции одинаково, так как их размеры одинаковы. При смещении между блоками в ширину блока время выполнения алгоритма уменьшается при увеличении размера блока. При смещении между блоками в один пиксель время выполнения алгоритма увеличивается при увеличении размера блока, так как количество операций возрастает в разы. Уменьшить время работы алгоритма можно, используя адаптивный порог, учитывающий попиксельную межкадровую разность, чтобы интерполировать только те блоки, в которых эта разность отличается.

Предложенный метод позволяет строить интерполированные кадры в видеопоследовательностях, совмещать две видеопоследовательности для построения стереовидеопоследовательности. Это обеспечивает пространственно-временную коррекцию. Разработанные алгоритмы можно улучшить, используя различную область поиска движения с помощью моментов Зернике, что является предметом дальнейших исследований.

Библиографические ссылки

1. Вазенмиллер Е. А. Как снимать стереопары [Электронный ресурс] // СтереоАРТ. 2001. URL: http://stereoart.ru/pg.php?page=paperIp0006.html (дата обращения: 01.11.2010).

2. Ватолин Д. MSU Quality Measurement Tool: Информация о метриках [Электронный ресурс] // Сайт о сжатии. URL: http://www.compression.ru/video/quality_measure/info.html (дата обращения: 01.11.2010).

3. Пьянков Д. И., Горошкин А. Н. Оценка движения для интерполяции кадров в задачах стереовидения // Материалы 16 Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2010. С. 151–152.

D. I. Piankov

ALGORITMS OF SPATIO-TEMPORAL CORRECTION OF VIDEO SEQUENCES IN TASKS OF STEREO VISION

A method of spatio-temporal correction of video sequences, in tasks of stereo vision, is presented. The algorithm of motion estimation and creation of interpolation frames in video sequences is investigated. The algorithm of image registration for creation of stereo video sequences is presented. Results of interpolation methods testing and video sequences registration are introduced.

Keywords: video sequence, image, stereo vision, interpolation.

© Пьянков Д. И., 2011

УДК 51-74:621

О. В. Репецкий, Буй Мань Кыонг

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ И ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Представлены результаты исследований математических моделей для задач динамики лопаток турбомашин с учетом изменения жесткости конструкции лопаток, обусловленной температурой и центробежными силами. Также представлены результаты расчета усталостной прочности лопаток турбомашин на основе разработанных математических моделей. Предложен комплекс рекомендаций по повышению усталостной прочности лопаток турбомашин с учетом вращения и неравномерного нагрева.

Ключевые слова: турбомашины, виброусталость, анализ усталостной прочности, математическое моделирование, численные методы, метод конечных элементов.

Известно, что лопатки турбомашин работают в тяжелых условиях, подвергаясь действию не только переменных аэродинамических нагрузок, но и высокой температуры и большой скорости вращения. Под влиянием этих факторов свойства материала и жесткость конструкции лопаток изменяются. Это приводит к изменениям начальных характеристик работы лопаток. Кроме этого, под действием переменных термомеханических нагрузок лопатки турбомашин часто разрушаются по усталостным причинам. В связи с этим разработка математических моделей для решения задач динамики и оценки долговечности лопаток турбомашин с учетом изменения жесткости конструкции лопаток от температуры и скорости вращения в соответствии с реальными условиями работы, а также обеспечение надежности работы лопаток турбомашин является актуальной проблемой.

В разработанной математической модели влияние температуры и скорости вращения на характеристики работы лопаток турбомашин учтено изменением параметров упругости материала в соответствии с температурой и изменением жесткости конструкции. Для учета изменения жесткости конструкции вследствие температуры и скорости вращения считается, что напряжения от температуры играют роль начальных напряжений конструкции и поэтому в общей матрице жесткости добавлена матрица геометрической жесткости $[K_G]$, обусловленная этими начальными напряжениями. При этом уравнение колебания лопаток турбомашин с учетом геометрической нелинейности имеет вид

$$[M]\{\ddot{\delta}\}+[C]\{\dot{\delta}\}+([K]+[K_G])\{\delta\}=\{F(t)\}, \qquad (1)$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ – матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно; $\{F\}$ – вектор внешней узловой нагрузки; $\{\delta\}$, $\{\dot{\delta}\}$ и $\{\ddot{\delta}\}$ – векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений ансамбля конечных элементов.

Матрица геометрической жесткости выражается как [1; 2]

$$[K_G]=\int_V [G^T][S][G]dV, \qquad (2)$$

где матрицы $[S]$, $[G]$ определяются следующими уравнениями для трехмерных и двухмерных элементов соответственно:

$$[S]=\begin{bmatrix} \sigma^0_{xx}[I_3] & \sigma^0_{yx}[I_3] & \sigma^0_{zx}[I_3] \\ \sigma^0_{xy}[I_3] & \sigma^0_{yy}[I_3] & \sigma^0_{zy}[I_3] \\ \sigma^0_{xz}[I_3] & \sigma^0_{yz}[I_3] & \sigma^0_{zz}[I_3] \end{bmatrix};$$

$$[G]=\begin{bmatrix} [I_3]\dfrac{\partial}{\partial x} \\ [I_3]\dfrac{\partial}{\partial y} \\ [I_3]\dfrac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}[N];\ [I_3]=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

а

$$[S]=\begin{bmatrix}\sigma^0_{xx} & \sigma^0_{yx}\\ \sigma^0_{xy} & \sigma^0_{yy}\end{bmatrix};\ [G_Z]=\begin{bmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\\ \frac{\partial}{\partial y}\end{bmatrix}[N_b], \qquad (4)$$

где $\sigma^0_{xx},\sigma^0_{yy},\sigma^0_{zz},\sigma^0_{xy},\sigma^0_{yz},\sigma^0_{zx}$ – напряжения от температуры и вращения. Они определены с помощью статического уравнения

$$[\sigma^0]=[D]([B]\{\delta\}-\{\varepsilon_0\}) \qquad (5)$$

и известного уравнения напряжения

$$[\mathrm{K}]\{\delta\}=\{F_T\}+\{F_\Omega\}, \qquad (6)$$

где $\{F_T\},\{F_\Omega\}$ – векторы температурных и центробежных нагрузок. Векторы и матрицы $\{F_T\},\{F_\Omega\}$, $\{\varepsilon_0\},[N],[N_b],[D],[B]$ подробно описаны в работах [1; 2].

В качестве объекта изучения рассмотрена реальная рабочая лопатка газовой турбины [1] (рис. 1). Конечно-элементная модель (КЭМ) на основе треугольных оболочечных элементов STIO18 с шестью степенями свободы в узле [1] представлена на рис. 2.

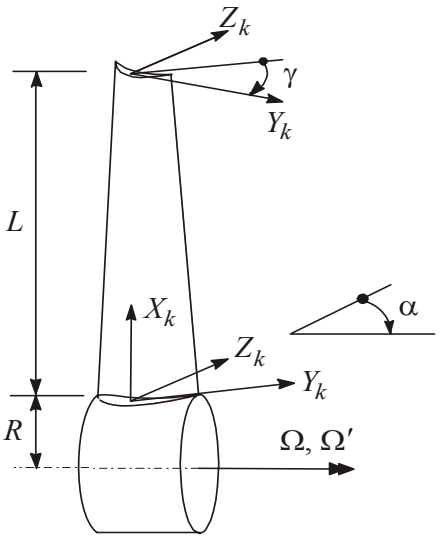


Рис. 1. Общий вид лопатки

Проведен расчет модели лопатки со следующими характеристиками: длина – 0,328 м; хорда – 0,028 м. Лопатка изготовлена из стали 15Х12ВНМФ, которая имеет модуль Юнга – 2.16 10^5 Мпа; коэффициент Пуассона – 0,3; плотность – 7,85 10^3 кг/м^3. Величины коэффициентов демпфирования для первых трех изгибных форм и двух вариантов демпфирования LOW и HIGH показаны в табл. 1 [1]. Изменения температуры по хорде и высоте лопатки приближены к таковым в реальных условиях [3]: вдоль хорды профиля изменения температуры подчиняются квадратичному закону, по высоте лопатки температура постоянная (рис. 3).

Таблица 1

Коэффициенты демпфирования

Режимы	Коэффициенты демпфирования ζ		
	Форма 1	Форма 2	Форма 3
LOW	0,000 75	0,000 94	0,001 1
HIGH	0,001 50	0,001 90	0,002 3

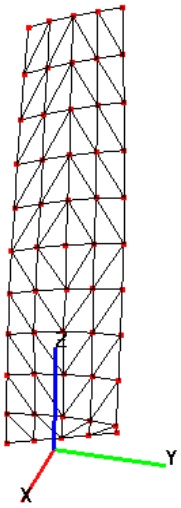


Рис. 2. Конечно-элементная модель лопатки

Были исследованы собственные и вынужденные колебания указанной лопатки. Рассчитаны формы колебаний лопатки (рис. 4). Изменения напряжений по времени в опасной точке показаны на рис. 5. Из этих данных видно, что результаты расчета (рис. 5, *а*) и эксперимента (рис. 5, *б* [4]) практически совпадают. Это подтверждает достоверность разработанных алгоритмов и программ.

На основе результатов расчета изменения напряжений по времени с помощью техники схематизации случайных процессов нагружения (метод «дождя») и кривой усталости по гипотезе Corten–Dolan [1; 5] определена усталостная прочность лопатки. Результаты расчета долговечности лопатки турбомашины в двух случаях демпфирования (HIGH и LOW) без учета температуры показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета долговечности лопатки турбомашины в двух случаях демпфировании HIGH и LOW без влияния температуры

Режимы	Долговечность (число циклов)
Демпфирование LOW	0,992 7*E* + 08
Демпфирование HIGH	0,854 1*E* + 09

Видно, что число циклов до разрушения лопатки при демпфировании HIGH (0,854 1*E* + 09) больше в сравнении с числом циклов при демпфировании LOW (0,992 7*E* + 08).

Было исследовано влияние температуры и центробежных нагрузок на динамические характеристики и долговечность лопатки (табл. 3–5).

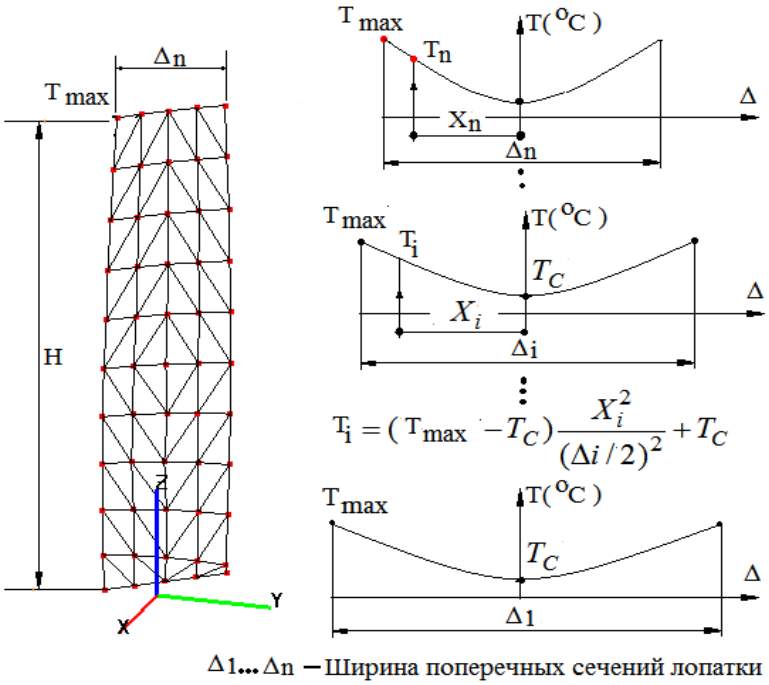


Рис. 3. Закон изменения температуры вдоль хорды профиля лопатки

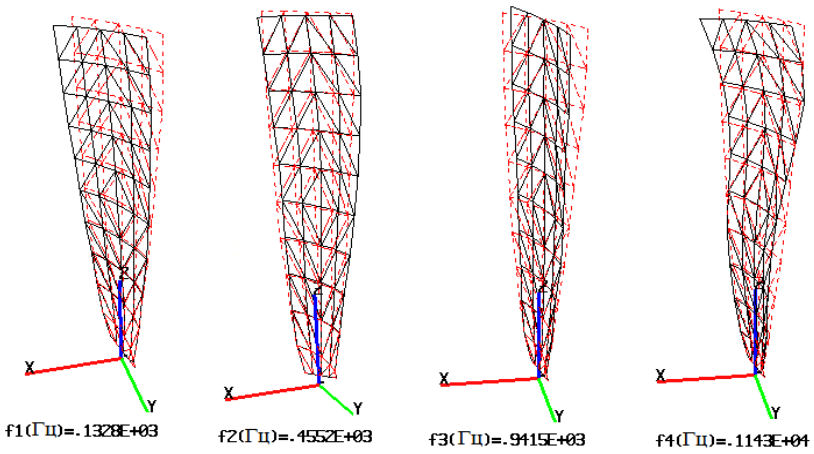
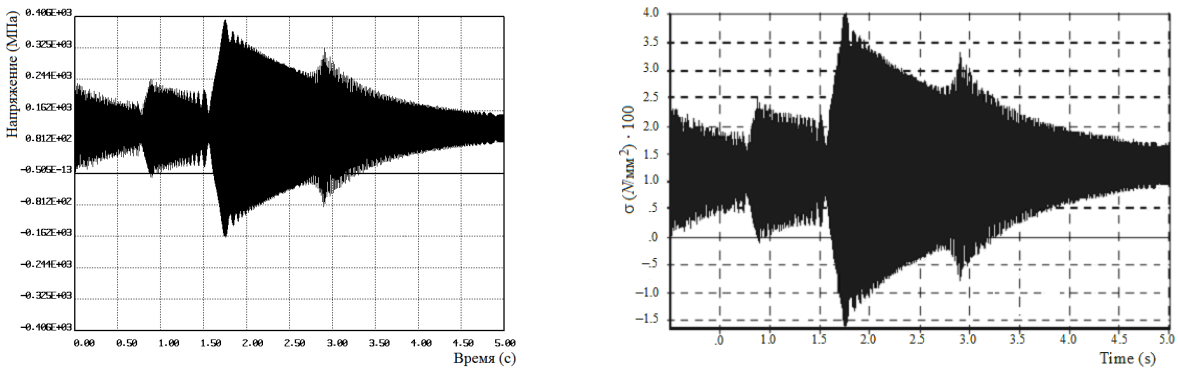


Рис. 4. Формы колебаний лопатки без влияния температуры



а *б*

Рис. 5. Изменение напряжений по времени:
а – при расчете; *б* – при эксперименте

Таблица 3

Собственные частоты колебаний и долговечность лопатки с различными величинами температуры при числе оборотов ротора Ω = 0 1/с

Форма колебаний		Собственные частоты (Гц) в зависимости от температуры						
		0 °С	100 °С	Δ*f*, %	200 °С	Δ*f*, %	300 °С	Δ*f*, %
f1 (1 И)		132,79	128,77	–3,03	120,47	–9,28	100,56	–24,27
f2 (2 И)		455,15	441,44	–3,01	433,94	–4,66	377,63	–17,03
f3 (1 К)		941,53	907,75	–3,59	890,96	–5,37	792,02	–15,88
f4 (3 И)		1142,6	1104,73	–3,31	1084,16	–5,11	1047,78	–8,30
Долговечность лопатки (число циклов)	Демпфирование LOW	0,992 7*E* + 08	0,102 58*E* + 08		0,862 30*E* + 07		0,904 7*E* + 06	
	Демпфирование HIGH	0,854 1*E* + 09	0,141 0*E* + 09		0,987 1*E* + 08		0,861 3*E* + 07	

Таблица 4

Собственные частоты колебаний и долговечность лопатки с различными величинами температуры при числе оборотов ротора Ω = 50 1/с

Форма колебаний		Собственные частоты (Гц) в зависимости от температуры						
		0 °С	100 °С	Δ*f*, %	200 °С	Δ*f*, %	300 °С	Δ*f*, %
f1 (1 И)		161,19	155,85	–3,31	150,11	–6,87	148,68	–7,76
f2 (2 И)		479,86	466,77	–2,73	459,58	–4,23	458,71	–4,41
f3 (1 К)		946,54	912,69	–3,58	895,92	–5,35	897,47	–5,18
f4 (3 И)		1164,56	1126,98	–3,23	1106,68	–4,97	1104,92	–5,12
Долговечность лопатки (число циклов)	Демпфирование LOW	0,692 7*E* + 08	0,902 582 *E* + 07		0,162 30*E* + 07		0,194 7*E* + 06	
	Демпфирование HIGH	0,354 1*E* + 09	0,851 0*E* + 08		0,127 1*E* + 08		0,101 3*E* + 07	

Таблица 5

Собственные частоты колебаний и долговечность лопатки с различными величинами температуры при числе оборотов ротора Ω = 100 1/с

Форма колебаний		Собственные частоты (Гц) в зависимости от температуры						
		0 °С	100 °С	Δ*f*, %	200 °С	Δ*f*, %	300 °С	Δ*f*, %
f1 (1 И)		224,39	211,9803	–5,53	210,787	–6,06	209,358	–6,70
f2 (2 И)		544,16	532,088	–2,22	525,593	–3,41	524,919	–3,54
f3 (1 К)		960,61	926,5323	–3,55	909,746	–5,30	911,528	–5,11
f4 (3 И)		1224,43	1187,194	–3,04	1167,31	–4,67	1166,21	–4,75
Долговечность лопатки (число циклов)	Демпфирование LOW	0,572 7*E* + 08	0,802 58*E* + 07		0,112 30*E* + 07		0,174 7*E* + 06	
	Демпфирование HIGH	0,314 1*E* + 09	0,755 0*E* + 08		0,107 1*E* + 08		0,991 3*E* + 06	

Данные таблиц показывают, что во всех случаях число циклов до разрушения лопатки уменьшается более чем в 6 раз при увеличении температуры на 100 °С (см. величины долговечности в табл. 3–5).

Следующим этапом расчета исследована замена стали 15Х12ВНМФ лопатки сплавами ЭИ-598 и ЭИ-437, которые имеют предел выносливости соответственно 250 и 305 МПа; число циклов до разрушения 10^8 [6]. Результаты расчета числа циклов до разрушения лопатки турбомашины для стали 15Х12ВНМФ и сплавов ЭИ-598 и ЭИ-437 без учета температуры представлены в табл. 6.

Видно, что чем выше предел выносливости материала, тем больше число циклов до разрушения лопатки.

Таким образом, установлено, что температура оказывает значительное влияние на динамические характеристики и число циклов до разрушения лопаток турбомашин. Собственные частоты колебаний уменьшаются от влияния температуры от 6 % – при максимальных оборотах вращения (100 1/с) до 24 % – при нулевом вращении. При увеличении температуры на 100 °С число циклов до разрушения лопатки уменьшается более чем в 6 раз для всех случаев.

Таблица 6

Результаты расчета долговечности лопатки турбомашины при использовании различных сплавов

Материал	Долговечность (число циклов)
15Х12ВНМФ	0,992 7*E* + 08
ЭИ-598	0,450 41*E* + 9
ЭИ-437	3,240 03*E* + 9

Результаты расчета показывают, что изменение жесткости конструкции лопаток турбомашин, обусловленное температурой и центробежными силами, оказывает значительное влияние на их динамические характеристики и усталостную прочность лопаток. Поэтому при проектировании лопаток турбомашин для обеспечения их надежности необходимо учитывать изменение жесткости конструкции лопаток от температуры и центробежных сил.

Расчет на усталостную прочность лопатки с разными вариантами коэффициентов демпфирования показывает, что число циклов до разрушения лопаток может быть увеличено более чем в 9 раз путем увеличения демпфирования колебаний лопатки.

Результаты расчета на усталостную прочность лопаток турбомашин с учетом изменения жесткости конструкции лопаток от температуры и центробежных сил позволяют уточнить подходы к повышению их ресурса. Для повышения ресурса лопаток турбомашин необходимо применять демпфирование колебаний лопатки, снижать тепловой поток в материале лопатки, охлаждать лопатки.

К методам демпфирования колебаний лопаток относятся такие методы, как использование материалов, которые имеют свойства высокого демпфирования, например, стеклопластиков; методы механического демпфирования в замке и стыке лопатки (демпфирование трения); методы аэродинамического демпфирования.

К методам снижения теплового потока в материале лопаток относятся такие методы, как использование теплозащитных покрытий из керамических материалов с низкой теплопроводностью; использование покрытий для повышения жаростойкости материала (например, из окиси алюминия); использование металлических многокомпонентных покрытий для повышения жаростойкости материала (например, покрытия из четырех компонентов: никель–хром–алюминий–итрий).

К методам охлаждения лопатки относятся такие методы, как конвективный (путем съема тепла потоком воздуха с внутренних поверхностей охлаждающих каналов в лопатках и других деталях с последующим выпуском воздуха в проточную часть), пленочный (завесный, заградительный) и проникающий.

Библиографические ссылки

1. Репецкий О. В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 1999.

2. Zienkiewic O. C. The Finite Element Method in engineering science. London : Mc.Graw-Hill, 1971.

3. Repetskiy O. V., Bui Manh Cuong. Fatigue life prediction of modern gas turbomachine blades // Proc. of the 21st ACMSM-21. 7–10 Dec. Melbourne, 2010. P. 275–281.

4. Мехатроника: компоненты, методы, примеры / Б. Хайманн, В. Герт, К. Попп, О. В. Репецкий. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2010.

5. Буй Мань Кыонг. Проблемы компьютерного анализа усталостной прочности деталей машин с учетом влияния температуры // Вестник ИрГТУ. 2009. № 4. С. 59–98.

6. Серенсен С. В. Усталость материалов и элементов конструкций. Киев : Наукова думка, 1985.

O. V. Repetskiy, Bui Manh Cuong

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF DYNAMICS AND ESTIMATION OF FATIGUE LIFE OF TURBOMACHINES BLADES WITH ACCOUNT OF GEOMETRIC NONLINEARITY

The article presents the results of study of mathematical models of dynamics of turbomachine blades with account of geometric nonlinearity due to temperature and centrifugal forces. Also the authors give the results of calculation of fatigue life of turbomachine blades on the basis of the developed mathematical models. In addition, the authors offer a set of recommendations to improve the fatigue life of turbomachine blades with the account of rotation and uneven heating.

Keywords: turbomachine, vibration fatigue, fatigue life analysis, mathematical modeling, numerical methods, finite element method.

© Репецкий О. В., Буй Мань Кыонг, 2011

УДК 51-74:621

О. В. Репецкий, Фан Ван Туан

О ПРОБЛЕМЕ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ФРИКЦИОННЫХ ДЕМПФЕРОВ НА ПРИМЕРЕ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрена задача оптимизации фрикционных демпферов (ФД) для лопаток газотурбинных двигателей. На основе результатов данного исследования и результатов, полученных другими авторами, создана эффективная математическая модель, которая позволит проектировать ФД с оптимальными параметрами.

Ключевые слова: математическая модель, трение, колебания, демпферы, оптимизация.

Известно, что фрикционные демпферы используются как эффективный метод для снижения колебаний лопаток газотурбинных двигателей. Один из принципов действия ФД заключается в том, что под действием центробежной силы $F_Д$ демпферы ФД давят на полки, создавая силы трения, и приводят к снижению колебаний лопаток (рис. 1). Одной из важных проблем при проектировании ФД является оптимизация их параметров.

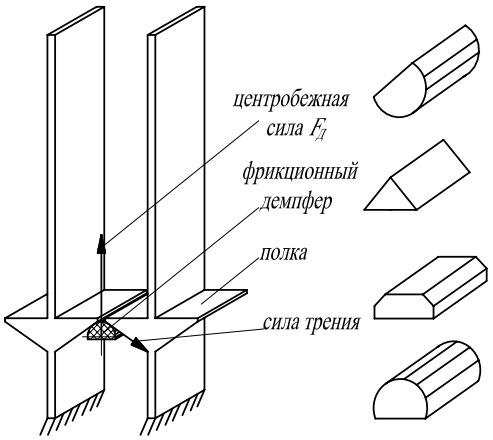


Рис. 1. Структура лопаток с фрикционными демпферами и виды демпферов

Для решения этой задачи прежде всего необходимо построить математическую модель, которая описывает динамические характеристики системы «лопатка–ФД». Эта модель должна отвечать следующим требованиям:

– точно отображать динамические характеристики системы «лопатка–ФД».

– обеспечивать простоту решения динамических уравнений системы.

Построение полной математической модели состоит из следующих этапов.

Этап 1. Построение математической модели, которая отображает динамические характеристики лопаток без ФД.

Этап 2. Построение математической модели, которая отображает контакт между лопатками и ФД.

Этап 3. Построение системы математических уравнений, отображающих динамические характеристики системы «лопатка–ФД».

Этап 4. Построение алгоритмов для оптимизации параметров ФД.

Этап 5. Решение полученной системы математических уравнений.

Проблема этапа 1 состоит в необходимости исследования динамических характеристик лопаток. Имеется достаточно много работ по построению подобных математических моделей. Из них можно выделить модель пружинного маятника [1], балочную модель, пластинчато-оболочечную модель и др. В последние годы с развитием вычислительной техники широко используется модель конечных элементов. Согласно методу конечных элементов (МКЭ), в зависимости от формы лопатки можно применять двухмерные и трехмерные конечные элементы. Применение МКЭ для исследования колебаний лопаток газотурбинных двигателей показано в работе [2].

Особенность этапа 2 состоит в необходимости рассмотрения контактной задачи деформированных тел. Исследованию этой задачи посвящены работы [3; 4]. Самое обобщенное решение может быть получено при рассмотрении системы «лопатка–ФД» как единой механической системы. При этом необходимо решить два класса задач: статическую контактную задачу в зоне контакта между лопаткой и ФД и динамическую задачу системы. Результаты решения контактной задачи являются входными данными для решения динамической задачи. Однако эта модель требует очень большого количества вычислений, причем возникает проблема сходимости численных решений, поэтому в большинстве случаев такая модель будет неэффективна. Более эффективным может быть построение модели данной задачи в упрощенном виде на основе стандартных фрикционных демпферных элементов (ФДЭ) [5]. Работа [5] также показывает построение ФДЭ и моделирование режимов контакта по плоскостям или линиям через контактные дискретные точки. ФДЭ могут быть трехмерные или одномерные. Трехмерные ФДЭ используются, как правило, в трехмерных задачах. Однако в отдельных случаях использование таких моделей ФД нецелесообразно. Иногда более целесообразно использовать одномерные модели, чтобы уменьшить затраты компьютерного времени.

Такая модель (рис. 2) характеризуется следующими параметрами: жесткостью $K_Д$ и максимальной силой трения $F_Д = \mu N$. Данная модель соответствует

движению вида «макроскольжение» (рис. 3, *а*). Для модели с микроскольжением используются соотношения, показанные на рис. 3, *б*, *в*, *г*, *д* [6–8].

Для исследования колебания лопатки с ФД можно предположить, что скольжение является макроскольжением.

Для этапа 3, в соответствии с МКЭ, математическая система уравнений, отображающая динамические характеристики системы «лопатка–ФД» с N степенями свободы и $N_Д$ ФДЭ, имеет вид

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}+\{f_{тр}\}=\{P(t)\}, \qquad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ – обобщенные матрицы масс, вязкого демпфирования и жесткости; $\{\ddot{x}\},\{\dot{x}\},\{x\}$ – обобщенные векторы узловых ускорений, скоростей и перемещений; $\{P(t)\}$ – обобщенный вектор внешней динамической нагрузки; t – время; $\{f_{тр}\}$ – обобщенный вектор силы трения (см. рис. 2);

$$\{f_{тр}\}=\begin{Bmatrix} F_{тр}^1 \\ F_{тр}^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ F_{тр}^N \end{Bmatrix},$$

$$F_{тр}^j = K_Д^j . z^j(t) =$$

$$= K_Д^j \begin{cases} x^j(t) - X_{max}^j + Z_Д^j & \text{при } 0 \le \omega t < \alpha; \\ -Z_Д^j & \text{при } \alpha \le \omega t < \pi; \\ x^j(t) + X_{max}^j - Z_Д^j & \text{при } \pi \le \omega t < \pi + \alpha; \\ Z_Д^j & \text{при } \pi + \alpha \le \omega t \le 2\pi, \end{cases} \qquad (2)$$

где $Z_Д^j = \dfrac{F_Д^j}{K_Д^j}$, $K_Д^j$ – жесткость j-го ФДЭ, $F_Д^j$ – максимальная сила трения j-го ФДЭ. Для степеней свободы нет ФДЭ, $F_{ТР}^j = 0$.

Система (1) состоит из N уравнений. Из них $N_Д$ уравнений являются нелинейными (в уравнениях присутствует трение) и (N – $N_Д$) уравнений являются линейными (в уравнениях отсутствует трение). Решение системы (1) дает динамические характеристики системы.

На этапе 4 важной проблемой при проектировании ФД является выбор параметров ФД, к которым относятся форма, размеры, материал, масса и местоположение ФД на лопатке. Согласно одномерной модели ФДЭ (см. рис. 2), двумя важными параметрами ФД являются жесткость ФДЭ ($K_Д$) и максимальная сила трения ФДЭ ($F_Д$).

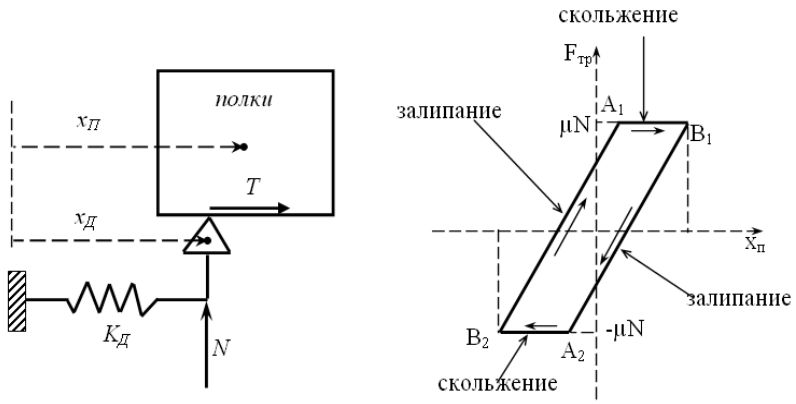


Рис. 2. Одномерная модель ФДЭ

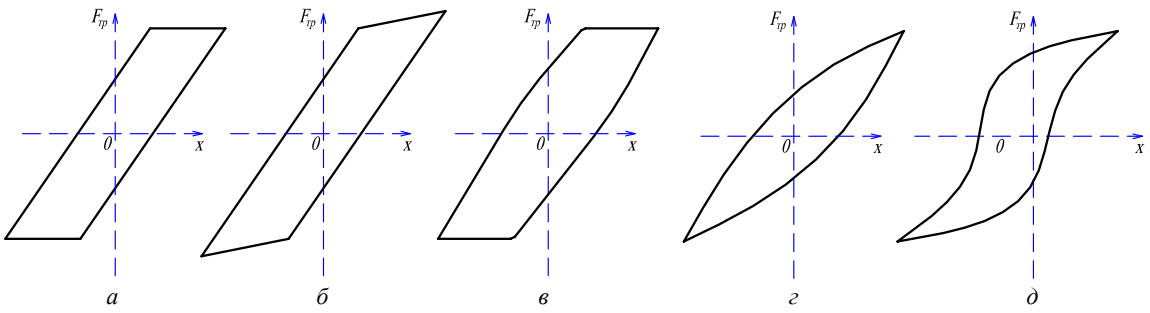


Рис. 3. Соотношения между силой трения и перемещением с макроскольжением (*а*) и с микроскольжением (*б*, *в*, *г*, *д*)

Выбор $K_Д$ в общем зависит от характеристик материалов ФД, конструкции ФД, качеств поверхности ФД и полки лопаток в месте контакта, месте ФДЭ на конструкции и других факторов. Точное определение их значений является затруднительным. Для определения значения $K_Д$ необходимо рассмотреть статическую контактную задачу. Согласно работам [4; 9], значение контактной перпендикулярной жесткости должно быть подобрано так, чтобы обеспечить достаточную точность и сходимость результатов. Величина касательной жесткости имеет вид $K_\tau \in [0{,}01K_N; K_N]$, где K_N – перпендикулярная жесткость ФДЭ. Для большинства контактных задач величина K_N принимается на три порядка большей, чем максимальное значение жесткости соседних узлов. Много большее значение K_N может отрицательно сказаться на сходимости процесса или даже привести к его дивергенции, а много меньшее значение K_N может служить причиной некорректного результата. Увеличение значения $K_Д$ более чем на два порядка ($K_Д > K\cdot 10^2$) не приводит к дальнейшему изменению амплитудно-частотной характеристики системы (рис. 4).

В работах [9; 10] представлен алгоритм для считывания значения K_N на каждом шаге вычисления, и в нашей задаче мы можем считать $K_Д = K_\tau$. В работе [8] представлена модель для вычисления значения контактной жесткости по качеству поверхности ФД и полки лопаток. По мнению авторов этой статьи, при определении значения контактной жесткости можно выделить два случая: микроскольжение и макроскольжение. При микроскольжении значение контактной жесткости значительно зависит от качества поверхности ФД, а при макроскольжении – от жесткости конструкции. Они могут быть получены по соотношению между перемещением и нагрузкой. Схема определения значения K_τ при макроскольжении показана на рис. 5, а при микроскольжении величина K_τ детально описана в работе [8].

Выражение для определения $K_Д$ в любой точке А имеет вид

$$K_Д = \frac{\delta F}{\delta S}, \qquad (3)$$

где δF – сила, действующая в точке А; δS – перемещение ФД в точке А по направлению силы δF.

В программном комплексе ANSYS выполнен расчет δS при δF = 1 Н (см. рис. 5). Для расчета приняты следующие характеристики материала ФД: модуль Юнга $E = 2{,}0\cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$; плотность $\rho = 7\,700$ кг/м^3.

С учетом выражение (3) имеем:

– для трапециевидного демпфера:

$$K_Д = \frac{\delta F}{\delta S} = \frac{1}{0{,}174\cdot 10^{-7}} = 5{,}75\cdot 10^7 \text{ Н/м};$$

– для круглого демпфера:

$$K_Д = \frac{\delta F}{\delta S} = \frac{1}{0{,}231\cdot 10^{-7}} = 4{,}329\cdot 10^7 \text{ Н/м}.$$

Когда значение $K_Д$ определено, проблема оптимизации ФД рассматривается как оптимизация значения максимальной силы трения ФДЭ – $F_Д$ или массы ФД. Очевидно, что значение $F_Д$ должно быть принято таким, чтобы амплитуды колебания лопатки были минимальные. Для систем с одной степенью свободы можно легко определить оптимальное значение $F_Д$ по аналитическим выражениям [1]. Однако для модели лопатки по МКЭ (с большим числом степеней свободы) не может быть аналитического решения. Согласно работам [6–8; 11–13], задача оптимизации значения $F_Д$ решается определением амплитуд колебаний лопатки, при этом выбор значения $F_Д$ должен быть таким, чтобы значение амплитуд колебаний было минимальным. Рассмотрим результаты определения амплитуд колебаний на примере одной модели лопатки (рис. 6) с одним определенным условием нагрузки при различных значениях $F_Д$ ($F_Д$ = 26, 30, 34, 38, 80, 150 Н). Для каждого значения $F_Д$ получим одну кривую частотно-амплитудной характеристики колебания верха лопатки. По этим результатам видно, что минимальные значения амплитуды колебаний получены при $F_Д$ = 38 Н. Можно сделать предположение, что для этой модели лопатки и условий нагружения оптимальное значение $F_Д$ равно 38 Н.

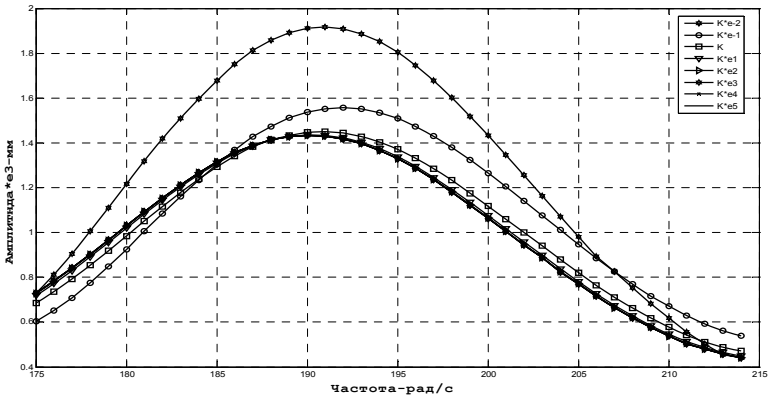


Рис. 4. Влияние значения $K_Д$ на амплитуды колебания

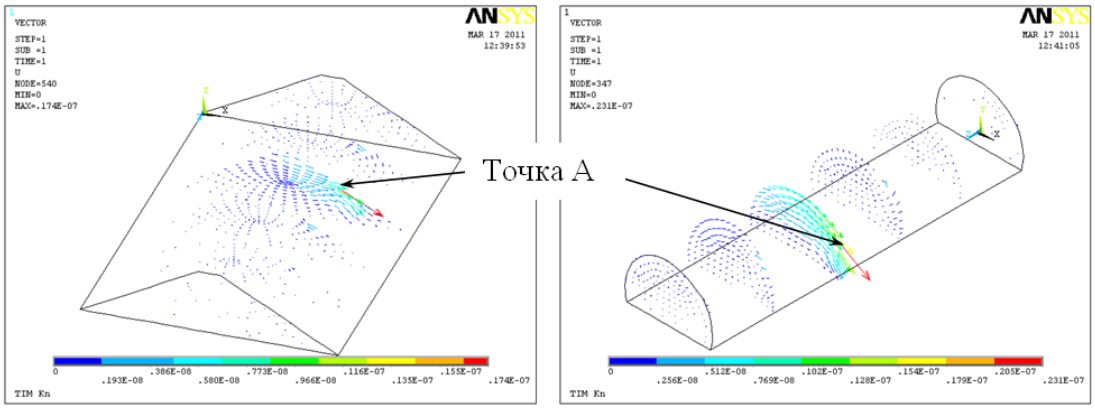


Рис. 5. Результаты определения δS при δF =1 Н

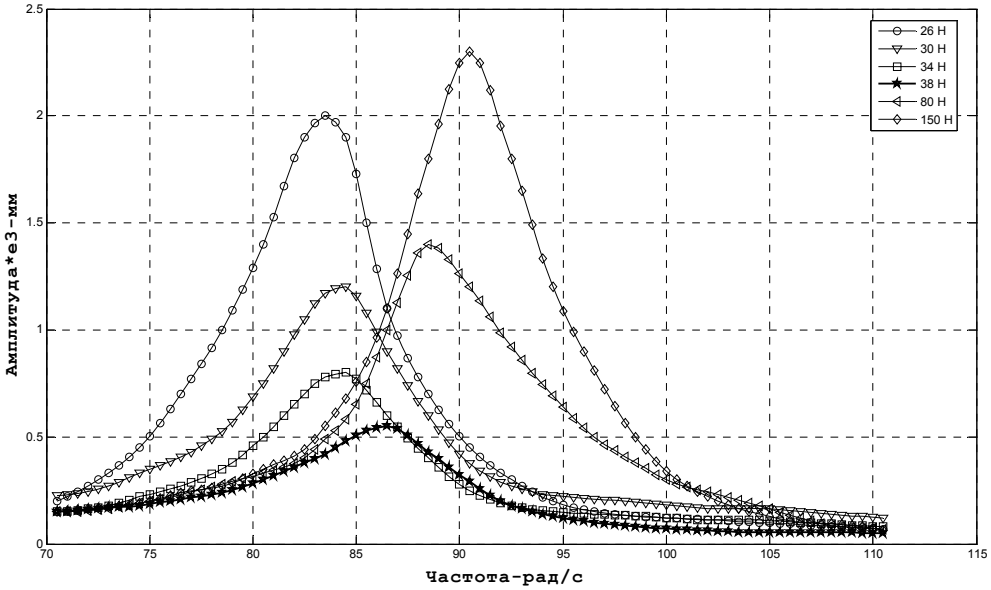


Рис. 6. Влияние значения $F_д$ на амплитуды колебаний

На этапе 5 необходимо решить систему уравнений (1). Для этого можно применить метод прямого численного интегрирования (ПЧИ) [14; 15], что требует больших затрат компьютерного времени. В отдельных случаях как эффективный метод для уменьшения затрат времени расчета использовался метод гармонического баланса (ГБ) [2; 14; 15]. Но для этой модели использование данного метода проблематично, так как функция силы трения задана не в явном виде.

Авторы этой статьи предложили метод гармонического баланса во временной области (ГБВО). Данный метод эффективен для уменьшения затрат времени расчета при решении системы уравнений (1) и может с успехом применяться при расчете реальных конструкций. При расчете конструкций со многими степенями свободы затраты времени расчета значительно уменьшаются.

Для определения оптимальных параметров фрикционных демпферов лопаток газотурбинных двигателей предлагается использовать схему (рис. 7), согласно которой необходимо корректно выбрать материал, форму ФД, вид соотношения между силой трения и перемещением и интервал изменения $F_Д$.

Материал ФД выбирается с учетом прочности ФД при тяжелых режимах работы двигателей и технологичности его изготовления. Форма ФД выбирается исходя из формы полки и диска (см. рис. 1). Вид соотношения между силой трения и перемещением принимается исходя из выбранного материала ФД, видов и значения перемещения ФД (см. рис. 3). Интервал изменения $F_Д$ выбирается на основе значения вынужденной силы.

Значение выбранной максимальной силы трения $F_Д$ определяется массой m ФД, коэффициентом трения μ, угловой скоростью ротора двигателя Ω и формой ФД в месте контакта. Когда значение μ, Ω и форма ФД выбраны, очевидно, что значение $F_Д$ зависит только от m и оптимизация $F_Д$ является также оптимизацией m.

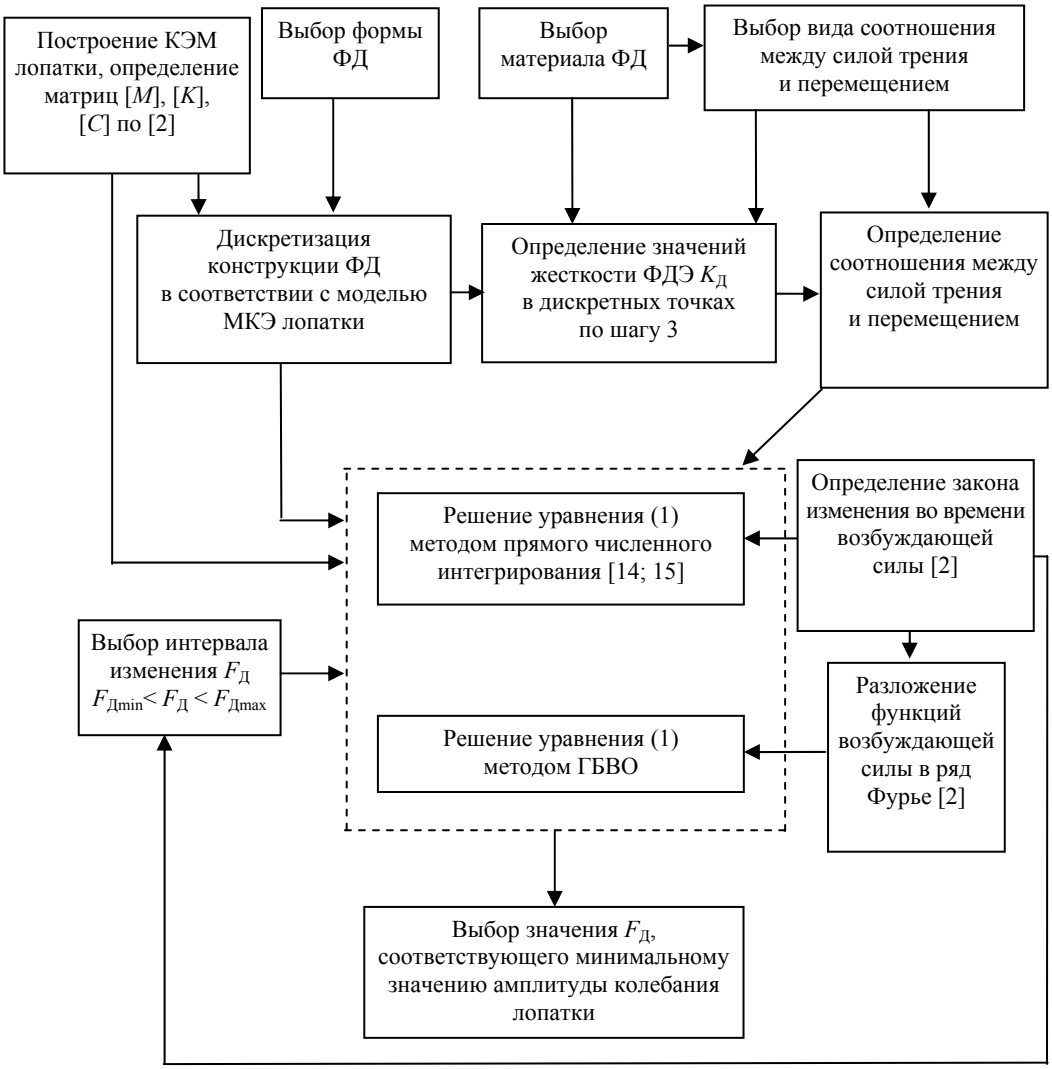


Рис. 7. Схема выбора значения $F_Д$

Известно, что задачи проектирования ФД могут быть решены другими приближениями и имеют много решений. Однако проведенные исследования показывают, что задача оптимизации ФД сводится к задаче оптимизации значения максимальной силы трения $F_Д$ или массы ФД. По мнению авторов, это самое экономное приближение, потому что значение массы ФД легко изменяется и значительно влияет на работу ФД.

Использование этой схемы с моделированием режима контакта по плоскостям или линиям через контактные дискретные точки и стандартные фрикционные демпферные элементы и использованием метода ГБВО приводит к значительному уменьшению затрат времени расчета при проектировании ФД. Величина уменьшения затрат времени расчета зависит от количества степеней свободы системы: часто она в 10 раз меньше, чем при использовании метода прямого численного интегрирования и в 100 раз меньше, чем при совместном решении статической и динамической контактной задач. Точность методов почти совпадает. Поэтому, по мнению авторов, данная схема является эффективной и может быть использована для задачи проектирования ФД.

Библиографические ссылки

1. Griffin J. H., Sinha A. The interaction between mistuning and friction in the forced response of bladed disk assemblies // ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power. 1985. Vol. 107. P. 205–210.

2. Репецкий О. В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 1999.

3. Яйзикович С. М. Механика контактных взаимодействий. М. : Физматлит, 2001.

4. Пыхалов А. А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006.

5. Репецкий О. В., Фан Ван Туан. Построение математической модели для анализа влияния фрикционных демпферов на колебания лопаток газотурбинных двигателей // Изв. ИГЭА. 2011. № 1. С 200–205.

6. Berthillier M., Dupont C., Mondal R. Blades Forced Response Analysis With Friction Dampers // J. of Vibration and Acoustics. 1998. Vol. 120. P. 468–474.

7. Guillen J., Pierre C. Analysis of the Forced Response of Dry-Friction Damped Structural Systems

Using an Effecient Hybrid Frequency-Time Method // Proc. of the Intern. Mechanical Engineering Cong. and Exposition. Vol. DE-91. Atlanta, 1996. P. 41–50.

8. Panning L. Auslegung von Reiblementen zur Schwingungsdaempfung von Turbinenschaeufeln : Diss. Institut fuer Dynamik und Schwingungen. Universitaet Hannover, 2005.

9. NX/NASTRAN. Handbook for Nonlinear Analysis (SOL 106), v67/MSC. Software Corporation, 2008.

10. Басов К. А. ANSYS. Справочник пользователя. М. : ДМК Пресс, 2005.

11. Panning L., Sextro W., Popp K. Spatial Dynamics of Tuned and Mistuned Bladed Disk with Cylindrical and Wedge-Shaped Friction Dampers // Proc. of ISROMAC-9, The 9-th Intern. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Paper DD-028. Honolulu, 2002. P. 1–10.

12. Dinar V. Physics Based Reduced Order Models for Frictional Contacts : Diss. Cincinnati, 2005.

13. Ender C. Nonlinear vibration analysis of bladed disks with dry friction dampers // J. of Sound and Vibration. 2006. Vol. 295. Iss. 3–5. P. 1028–1043.

14. Лапчик М. П. Численные методы. М. : Академия, 2005.

15. Nayfeh A. H., Mook D. T. Nonlinear Oscillations. N. Y. : Wiley, 1995.

O. V. Repetskiy, Phan Van Tuan

THE PROBLEM OF CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS FOR OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF FRICTION DAMPERS ON THE EXAMPLE OF BLADES OF GAS TURBINE ENGINES

The article considers a problem of optimization of friction damper for blades of gas turbine engines. Based on this study and the results obtained by the other authors, the authors constructed an effective mathematical model, which makes it possible to design a friction damper with optimal parameters.

Keywords: mathematical model, friction, vibration, damper, optimization.

© Репецкий О. В., Фан Ван Туан, 2011

УДК 004.82

Е. А. Сопов, С. А. Сопов

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЯВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПРОБЛЕМ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ*

Предложен новый подход к выявлению и диагностике проблемной ситуации, основанный на многокритериальном извлечении знаний об исследуемой системе. Рассмотрены основные модели и методы представления знаний, предложены критерии оценки качества полученных знаний.

Ключевые слова: проблема, системный анализ, интеллектуальные информационные технологии.

Понятие «проблемы» в системном анализе. Системный анализ с практической точки зрения представляет собой универсальную методику решения сложных проблем произвольной природы. Ключевым понятием в данном случае является понятие «проблема», которое можно определить как «субъективное отрицательное отношение субъекта к реальности». Соответственно этап выявления и диагностики проблемы в сложных системах является наиболее важным, так как определяет цели и задачи проведения системного анализа, а также методы и алгоритмы, которые будут применяться в дальнейшем при поддержке принятия решений. В то же время этот этап является наиболее сложным и наименее формализованным.

Анализ русскоязычных трудов по системному анализу позволяет выделить два наиболее крупных направления в данной области, которые можно условно назвать рациональным и объективно-субъективным подходами.

Первое направление системного анализа (рациональный подход) рассматривает системный анализ как набор методов, и в том числе методов, основанных на использовании ЭВМ, ориентированных на исследование сложных систем [1; 2]. При таком подходе наибольшее внимание уделяется формальным методам построения моделей систем и математическим методам исследования системы. Понятия «субъект» и «проблема» как таковые не рассматриваются, а вот понятие «типовых» систем и проблем как раз встречается часто (система управления – проблема управления, финансовая система – финансовая проблема и др.).

*Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (2011-1.2.2-215-021, 2011-1.9-519-005, 2011-1.4-514-009).

При таком подходе «проблема» определяется как несоответствие действительного желаемому, т. е. несоответствие между реально наблюдаемой системой и «идеальной» моделью системы. Важно отметить, что в данном случае система определяется исключительно как та часть объективной реальности, которую необходимо сравнить с эталонной моделью.

Если опираться на понятие «проблема», то можно сделать заключение, что при рациональном подходе проблема возникает только у системного аналитика, который имеет некую формальную (часто общепринятую) модель системы и обнаруживает несоответствие модели и реальной системы, что и вызывает его «отрицательное отношение к реальности».

Однако навязывание аналитиком субъекту общепринятых (даже если и рациональных) моделей может привести к возникновению «отрицательного отношения» у субъекта, а значит, к появлению новых проблем, что в корне противоречит самой сути системного анализа, который предполагает улучшающее воздействие – когда хотя бы одному участнику проблемы станет лучше и никому не станет хуже.

Очень часто постановку задачи системного анализа в рациональном подходе выражают в терминах задачи оптимизации, т. е. идеализируют проблемную ситуацию до уровня, позволяющего использовать математические модели и количественные критерии для определения наилучшего варианта разрешения проблемы. Как известно, для системной проблемы не существует какой-либо модели, исчерпывающе устанавливающей причинно-следственные связи между ее компонентами, потому оптимизационный подход кажется не вполне конструктивным: «…теория системного анализа исходит из отсутствия оптимального, абсолютно лучшего варианта разрешения проблем любой природы… предлагается итеративный поиск реально достижимого (компромиссного) варианта разрешения проблемы, когда желаемым можно поступиться в угоду возможному, а границы возможного могут быть существенно расширены за счет стремления достичь желаемого. Тем самым предполагается использование ситуативных критериев предпочтительности, т. е. критериев, которые не являются исходными установками, а вырабатываются в ходе проведения исследования…» [3].

Второе направление системного анализа (объективно-субъективный подход), основанное на работах Акоффа [3–6], ставит понятие субъекта и проблемы во главу системного анализа. По сути, в данном подходе мы включаем субъекта в определение существующей и идеальной системы, т. е., с одной стороны, системный анализ исходит из интересов людей – вносит субъективную составляющую проблемы, с другой стороны – исследует объективно наблюдаемые факты и закономерности (отсюда и название подхода).

Вернемся к определению понятия проблемы. Из него, в частности, следует, что когда мы наблюдаем нерациональное (в общепринятом смысле) поведение субъекта и субъект не имеет отрицательного отношения к происходящему, то нет и проблемы, которую нужно было бы решать. Данный факт хотя и не противоречит понятию «проблема», но в определенных ситуациях исключать возможность существования объективной составляющей проблемы нельзя.

Системный анализ имеет в своем арсенале следующие возможности решить проблему субъекта: вмешаться в объективную реальность и, устранив объективную часть проблемы, изменить субъективное отрицательное отношение субъекта; изменить субъективное отношение субъекта, не вмешиваясь в реальность; одновременно вмешаться в объективную реальность и изменить субъективное отношение субъекта.

Очевидно, что второй способ не решает проблему, а всего лишь устраняет ее влияние на субъекта, а значит, объективная составляющая проблемы остается. Справедлива и обратная ситуация, когда объективная составляющая проблемы уже проявилась, но субъективное отношение еще не сформировано, либо по ряду причин оно пока не стало отрицательным.

Вот несколько причин, почему у субъекта может отсутствовать «отрицательное отношение к реальности»: он имеет неполную информацию о системе или использует ее не полностью; меняет оценку взаимоотношений с окружающей средой на психическом уровне; прерывает взаимоотношения с окружающей средой, которая вызывала «отрицательное отношение»; не верит информации о существовании проблем и их сущности, так как полагает, что сообщающие ее люди очерняют его деятельность или преследуют свои корыстные интересы, а может быть и потому, что просто лично не любит этих людей.

Следует помнить о том, что при отсутствии отрицательного отношения субъекта объективная составляющая проблемы остается и в той или иной степени продолжает влиять на субъекта, либо проблема может существенно обостриться в будущем.

Интеллектуальные технологии извлечения знаний в задачах выявления и анализа проблемной ситуации. Выявление проблемы требует анализа субъективного отношения, и этот этап относится к неформализуемым этапам системного анализа. Каких-либо эффективных алгоритмов или приемов на настоящий момент не предложено, чаще всего авторы работ по системному анализу полагаются на опыт и интуицию аналитика и предлагают ему полную свободу действий.

Системный аналитик должен обладать достаточным набором инструментов для описания и анализа той части объективной реальности, с которой взаимодействует или может взаимодействовать субъект. Инструменты могут включать методы экспериментального исследования систем и их моделирования. С повсеместным внедрением современных информационных технологий в организациях (коммерческих, научных, медицинских и др.) почти каждый аспект их деятельности регистрируется и сохраняется в базах данных, которые уже сегодня имеют очень большие объемы. Информация в подобных базах данных содержит детальное описание как самих систем, так и истории

их (систем) развития и функционирования. Можно сказать, что сегодня при анализе большинства искусственных систем аналитик вероятнее столкнется с недостатком эффективных методов исследования систем, нежели с недостатком информации о системе.

Однако субъективное отношение должен сформулировать именно субъект, а он может не обладать специальными знаниями и потому не способен адекватно интерпретировать результаты исследования, проведенного аналитиком. Поэтому знания о системе и прогнозные модели, которые в итоге получит аналитик, должны быть представлены в явном, доступном к интерпретации виде (возможно, на естественном языке). Такое представление можно назвать знаниями об исследуемой системе.

К сожалению, эффективных методов получения знаний о системе на текущий момент не предложено. Наибольший интерес представляют модели и алгоритмы Data Mining (интеллектуальный анализ данных), которые в частных приложениях используются для извлечения знаний из «сырых» данных. Стоит отметить, что Data Mining является эволюцией теории управления базами данных и оперативного анализа данных (OLAP), основанной на использовании идеи многомерного концептуального представления [7–9]. Но в последние годы в связи с нарастающей проблемой «перегрузки информацией» все больше исследователей используют и совершенствуют методы Data Mining для решения задач извлечения знаний.

Широкое применение методов извлечения знаний весьма затруднено, что, с одной стороны, связано с недостаточной эффективностью большинства известных подходов, а с другой – с трудностью использования эффективных методов интеллектуальных технологий, которые не имеют достаточного формального описания и требуют привлечения дорогих специалистов. Данные проблемы можно преодолеть с помощью перспективного подхода к построению эффективной системы извлечения знаний о системе, основанного на автоматизированном генерировании и настройке интеллектуальных информационных технологий. Такой подход, во-первых, позволит за счет применения передовых интеллектуальных технологий существенно повысить эффективность решения задачи извлечения знаний, которые будут предъявляться субъекту на этапе выявления проблемы при системном анализе; во-вторых, даст возможность исключить потребность в специалисте по настройке и использованию интеллектуальных технологий, так как последние будут генерироваться и настраиваться в автоматическом режиме [10].

Определим, что такое «знание». Следует отметить, что термин «знание» является интуитивно определяемым. Ниже представлены энциклопедические определения.

Знание – результат познавательной деятельности, система приобретенных с ее помощью понятий о действительности [11].

Знание – проверенный практикой результат познания действительности, верное ее отражение в сознании человека. Знание противоположно незнанию, т. е. отсутствию проверенной информации о чем-либо [12].

Знание – селективная, упорядоченная, определенным способом (методом) полученная, в соответствии с какими-либо критериями (нормами) оформленная информация, имеющая социальное значение и признаваемая в качестве именно знания определенными социальными субъектами и обществом в целом [13].

Общими в этих определениях и полезными для нас с практической точки зрения являются следующие моменты. Во-первых, знание отражает результат исследования системы (познания объективной реальности). Во-вторых, знание выражено определенным понятным человеку образом (использует общепринятые символы, понятия, естественный язык).

Поскольку знания о системе будут предъявляться субъекту для выявления проблемной ситуации, авторы считают необходимым добавить еще одно важное требование.

Как известно, для эффективного восприятия и понимания действительности человек разбивает сложное на более простое (что составляет суть аналитического мышления). Например, для выражения физических законов человек использует очень простые, лаконичные формы, хотя последние и не являются точным описанием действительности; при невозможности одновременно оперировать большим количеством сложных правил, логических выводов или критериев человек использует более простые свертки-упрощения (одна из наиболее известных гипотез утверждает, что мозг человека работает только с 7 ± 2 единицами информации [14]). Очевидно, если знание будет достаточно большим или сложным в описании, то для субъекта в большинстве случаев оно будет достаточно трудным для восприятия – будет представлять собой модель «черного ящика».

Следовательно, в-третьих, знание должно быть компактным (по форме, описанию), что делает его доступным для понимания, интерпретации и дальнейшего использования.

Далее необходимо определить, какие модели представления знаний следует использовать при выявлении проблемных ситуаций. Традиционно в теории анализа данных выделяют описательные модели, которые необходимы для лучшего понимания исследуемой системы, известных фактов и наблюдений, и предсказательные модели, необходимые для понимания новых фактов о системе. Эти модели включают в себя регрессионные модели (в том числе модели исключений, модели ассоциаций, модели последовательностей и др.); модели классификации и кластеризации.

По форме представления наиболее распространенными и наиболее естественными для восприятия и понимания человеком являются логические продукционные правила, выраженные средствами естественного языка в форме ЕСЛИ-ТО; символьные выражения (например, математические функции, алгоритмы).

Наконец, необходимо определить методы и алгоритмы, используемые для извлечения знаний из дан-

ных. Очевидно, что наилучший инструмент добычи, усвоения и использования знаний – это непосредственно интеллект человека. Поэтому самым перспективным кажется использование методов интеллектуальных информационных технологий, которые наиболее эффективно воспроизводят такие важные особенности интеллекта, как способность к обобщению, прогнозированию, распознаванию и др.

Обозначенные задачи извлечения знаний достаточно эффективно решаются следующими методами интеллектуальных информационных технологий: методами, основанными на нечеткой логике, методами генетического программирования [15–17].

Методы, основанные на нечеткой логике, способны выявлять знания в явном виде, так как для описания информации используются лингвистические переменные («большая скорость», «дорогая машина», «слабый сигнал» и т. д.), а совокупность выявленных знаний представляется в виде логических правил в форме ЕСЛИ-ТО. Обычно для построения базы знаний требуется предметный эксперт, который определяет как лингвистические переменные, так и сами правила принятия решения. Базу правил можно построить и без эксперта, сгенерировав ее с помощью методов случайного поиска, например, с помощью генетического алгоритма. Однако такая база в зависимости от задачи будет содержать огромное число правил, что нарушает принцип компактности описания знаний.

Аналогичные результаты могут быть получены при использовании метода генетического программирования, который представляет результат исследования системы в виде символьных выражений, сгенерированных из элементов заданного множества элементарных функций, предметных переменных и констант. Например, символьным выражением может быть математическое выражение (формула), описывающая исследуемые зависимости. Принцип компактности описания знаний в генетическом программировании также нарушается, поскольку классический подход направлен в большей мере на точность описания, нежели на интерпретацию результата.

В данной работе, для обеспечения выполнения всех требований, предъявленных к извлекаемым знаниям, впервые предложен многокритериальный подход к построению интеллектуальных технологий. В общем виде множество критериев содержит следующие:

– первый критерий (К1), определяющий качество исследования системы. Обычно это численная оценка соответствия результата извлечения знаний и исходных исследуемых данных, например квадратичная ошибка аппроксимации;

– второй критерий (К2), определяющий компактность полученных знаний о системе. Вид и содержание данного критерия зависит от представления знаний. В случае базы правил на нечеткой логике критерий определяется размером базы (числом правил), в случае генетического программирования – размером и сложностью дерева решения;

– третий критерий (К3), определяющий интерпретируемость знания. В случае базы правил на нечеткой логике критерий определяется средней длиной правил в базе (более простые правила должны быть более понятны субъекту), в случае генетического программирования – разнообразием использованных функций, возможно, с учетом предпочтений субъекта.

Таким образом, задача автоматизированного построения интеллектуальной технологии извлечения знаний о системе сводится к задаче многокритериальной оптимизации $(K1, K2, K3) \to \text{extr}$, которая может быть решена самонастраивающимися генетическими алгоритмами.

Важным преимуществом предложенного многокритериального подхода является то, что субъекту будет предъявлено не единственное решение, а множество несравнимых по эффективности решений (множество Парето). Это, во-первых, увеличит интерпретируемость полученных знаний, так как одна и та же система будет описана «разными словами», во-вторых, разные представления знаний могут раскрыть «разные стороны» системы (отражать разные аспекты зависимостей), а значит, такое описание будет более объективным.

Для более представительной аппроксимации множества (или фронта) Парето целесообразно использовать генетический алгоритм SPEA и SPEA2, которые являются одними из наиболее эффективных подходов к решению сложных многокритериальных задач и обеспечивает поддержание разнообразия парето-эффективных решений [18].

Результаты применения подхода в задачах извлечения знаний. Для демонстрации подхода решены тестовые задачи из базы UC Irvine Machine Learning Repository (URL: http://kdd.ics.uci.edu/), которая содержит множество известных прикладных задач, наиболее часто используемых при апробации различных интеллектуальных информационных технологий. Ниже представлено краткое описание постановки и даны решения задач.

Задача 1. Задача распознавания пользователя по произношению (Japanese vowels. URL: http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Japanese+Vowels). Задача состоит в распознавании девяти мужчин по произношению дифтонга из двух японских гласных (/ae/). Иными словами, имеем задачу классификации с девятью классами. Исходная база данных (обучающая выборка) состоит из записи 30 произнесений каждого из девяти участников. Для каждого произнесения с помощью алгоритма LPC вычислены 12 кепстр-коэффициентов.

На первом этапе были преобразованы входные данные. На втором этапе был сформирован нечеткий классификатор, где решение о принадлежности к классу определяется по базе правили вида «ЕСЛИ параметр 1 И параметр 2 И ... И параметр 12, ТО класс». При фазификации используется пять термов, равномерно распределенных по области изменения каждого из входных параметров и терм игнорирования (который позволяет создавать правила с непол-

ным набором входных параметров). Вид термов – триангулярные нечеткие числа. На третьем этапе с помощью многокритериального генетического алгоритма SPEA была сформирована эффективная база правил. Использованы три критерия: F1 – эффективность решения исходной задачи (соответствие полученной базы правилам исходной выборки данных), F2 – размер базы правил (число правил в базе), F3 – средняя длина правил в базе.

Многократный запуск алгоритма дал ряд существенно отличающихся наборов правил. При этом во всех наборах наблюдалась общая закономерность: использовались все или почти все входные параметры (терм игнорирования появлялся редко) и в среднем 20…30 эффективных правил. Можно сделать вывод, что все входные параметры являются информативными для решения задачи. При этом эффективный размер базы правил (20…30) существенно меньше размера «полной базы», в которой содержится ($5^{13} = 1{,}2 \cdot 10^9$) различных правил. Например, одно из полученных решений позволяет получить эффективность классификации 82 % (число угаданных примеров из тестовой выборки), используя всего 24 правила при средней длине правил равной 11,83. Для определения каждого из классов по отдельности используется всего 2…3 индивидуальных правила, что весьма полезно для понимания природы объектов класса.

Задача 2. Задача распознавания изображений, получаемых со спутника (LandSat Satellite. URL: http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+(Landsat+Satellite)). Спутник дистанционного зондирования Земли сканирует земную поверхность в четырех спектральных диапазонах – зеленом, красном и двух диапазонах в инфракрасной области. Данные представляют собой изображения в виде квадрата 3×3 пикселя. Необходимо отнести данный участок к одному из шести классов (типу почвы). Исходные данные представляют собой сгруппированные по девяти пикселям данные, полученные с небольшого участка изображения, переданного американским спутником LandSat. Объем обучающей выборки составляет 4 435 элементов.

На первом этапе был проведен факторный анализ методом главных компонент. Были получены четыре новых информативных признака (главных компонент), которые содержат в себе около 90 % информации, содержащейся в исходной базе данных. На втором этапе был сформирован нечеткий классификатор. При фазификации используется пять термов, равномерно распределенных по области изменения каждого из входных параметров и терм игнорирования (который позволяет создавать правила с неполным набором входных параметров). Вид термов – триангулярные нечеткие числа. Для задачи с четырьмя информативными признаками общее число всех возможных правил равно 1 296. На третьем этапе была получена эффективная база с минимальным набором. Оптимизация осуществлялась с помощью генетического алгоритма, использующего Питсбургский подход (индивид – база правил).

В результате была построена база нечетких правил, состоящая из 211 правила и дающая надежность классификации 0,817 6. Из конечной базы правил выделены 39 наиболее общих правил, которые доступны для интерпретации. Класс 1 определяется 13 правилами, класс 2 – шестью правилами, класс 3 – семью правилами, класс 4 – одним правилом, класс 5 – семью правилами, класс 6 – пятью правилами. В среднем правила содержат три признака. Очевидные выводы, которые можно сделать по выявленным знаниям – это, например, легкость определения класса 4, отсутствие полезной информации для некоторых классов в определенном спектре.

Задача 3. Задача прогнозирования расхода топлива автомобиля в городском цикле эксплуатации (Auto MPG Data Set. URL: http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Auto+MPG). Объем выборки – 398.

На первом этапе были восполнены пробелы в данных в разделе мощность – заполнены средним. На втором этапе с помощью метода генетического программирования были получены решения задачи восстановления символьной регрессии для набора данных. В качестве целевых критериев выбраны точность описания (ошибка аппроксимации) и сложность решения (число узлов в дереве). Пригодность решений оценивалась по аддитивной свертке критериев. Для поиска различных решений из множества Парето использован мультистарт. На третьем этапе полученные решения были упрощены и подвергнуты содержательному анализу. Были сделаны следующие выводы:

– решения с низкой ошибкой содержат большое количество элементов – представляют собой нелинейные зависимости, а потому сложны для анализа;

– среди простых решений с большей ошибкой часто встречаются решения с одной переменной – «динамика», что означает, что более динамичные авто потребляют большее количество топлива;

– переменная «мощность» часто встречается с отрицательным коэффициентом, что означает снижение расхода при большей мощности. Данный вывод логичен для легковых авто и городского цикла (условие задачи), где более мощные авто в режиме разгон-остановка способны работать на более низких оборотах.

Задача 4. Задача из области криминалистики – классификация стекла (Glass Identification) на основе данных измерений оптических и химических характеристик образцов (URL: http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Glass+Identification). Всего используется семь параметров, полученных в ходе анализа физических и химических свойств стекла. Данные группируются в три класса: оконное стекло, автомобильное стекло и стеклянная тара (бутылки, банки и т. д.).

На первом этапе был сформирован нечеткий классификатор. При фазификации используется пять термов, равномерно распределенных по области изменения каждого из входных параметров и терм игнорирования (который позволяет создавать правила с неполным набором входных параметров). Вид термов – триангулярные нечеткие числа. На втором этапе была сгенерирована эффективная база правил. В качестве

критериев выступили два: надежность классификации (максимизация) и число правил в базе (минимизация). Оптимизация проводилась классическим генетическим алгоритмом по аддитивной свертке критериев.

Получена база правил, содержащая всего пять правил со средней длиной правила, равной четырем (параметрам). Точность классификации составила 90 %. При этом из базы правил можно сделать выводы, например, что параметр 2 (содержание оксида натрия) не является информативным для принятия решений, а значит, данный тип измерений можно исключить.

Предложенный способ выявления знаний с помощью многокритериального подхода к построению интеллектуальных информационных технологий позволяет сделать процесс исследования систем более прозрачным для субъекта, который формулирует проблему и принимает решения относительно вмешательства в проблемную ситуацию.

Возможность получить не одно-единственное, а множество эффективных и различных по форме представления информации решений, позволяет рассмотреть систему с разных «точек зрения», что повышает надежность интерпретации результатов: какой-то аспект описания системы более понятен субъекту, какой-то – менее понятен.

Численные исследования показывают, что в результате реализации подхода можно, во-первых, существенно упростить решения при допустимой точности описания системы, во-вторых, получить решения, доступные для интерпретации при возможной потере точности. При этом тестовые примеры показали, что потеря точности описания не так критична, поскольку решения позволяют сделать наиболее общие и практические полезные выводы об исследуемой системе. А в случае когда точность необходима, критерий точности можно использовать с большим весовым коэффициентом или оставить единственным.

Библиографические ссылки

1. Оптнер С. Л. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. М. : Сов. радио, 1969.

2. Антонов А. В. Системный анализ. М. : Высш. шк., 2004.

3. Теоретические основы системного анализа / В. К. Голиков, Б. Е. Демин, В. И. Новосельцев, Б. В. Тарасов. М. : Майор, 2006.

4. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах. М. : Сов. радио, 1974.

5. Акофф Р. Искусство решения проблем. М. : Мир, 1982.

6. Тарасенко Ф. П. Прикладной системный анализ. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2004.

7. Дюк В., Самойленко А. Data Mining : учеб. курс. СПб. : Питер, 2001.

8. Барсегян А. А. Технологии анализа данных. СПб. : БХВ-Петербург, 2007.

9. Интеллектуальные системы / В. М. Курейчик [и др.]. М. : Физматлит, 2005.

10. Сопов Е. А. Интеллектуальные информационные технологии извлечения знаний // Системный анализ в проектировании и управлении : тр. X междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 289–296.

11. Толковый словарь русского языка : в 4 т. / под ред. Д. Н. Ушакова. М. : Сов. энцикл. : ОГИЗ, 1935–1940.

12. Большая советская энциклопедия : 3-е изд. [Электронный ресурс] // Book Archive.RU. URL: http://www.bookarchive.ru/jenciklopedii/ (дата обращения: 19.10.2011).

13. Новейший философский словарь. 3-е изд., исправл. Минск : Книжный Дом, 2003.

14. Miller G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two // The Psychological Review. 1956. Vol. 63. P. 81–97.

15. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. М. : Мир, 1992.

16. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети : учеб. пособие / В. В. Круглов [и др.]. М. : Физматлит, 2002.

17. Семенкин Е. С. Эволюционные алгоритмы поддержки принятия решений при управлении сложными системами // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 7. С. 83–85.

18. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach // IEEE Trans. on Evolutionary Computation. 1999. Vol. 3. № 4. P. 257–271.

E. A. Sopov, S. A. Sopov

INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGIES OF DIAGNOSIS AND DIAGNOSTICS IN COMPLEX SYSTEM ANALYSIS

An original approach to a problem of diagnosis and diagnostics of a problem situation, based on multicriteria knowledge extraction, is proposed. The basic knowledge representation models and methods, along with knowledge quality estimation criteria, are considered.

Keywords: problem, system analysis, intelligent information technologies.

© Сопов Е. А., Сопов С. А., 2011

УДК 89.53.41

А. И. Сухинин, М. В. Воробьева, Е. А. Охоткина

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СНЕГОВОГО ПОКРОВА СИБИРИ ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРА MODIS*

Представлен анализ динамики снегового покрова Сибирского федерального округа (СФО). Изложены теоретические основы расчета индекса снегового покрова, основанного на изучении спектрально-отражательных и поглощательных характеристик снега.

Ключевые слова: отражательная способность, определение метеорологических параметров, наземные станции, снеговой индекс, относительная влажность, определение площади заснеженности.

При изучении атмосферных процессов, а также состояния земной и водной поверхности Земли, в синоптической метеорологии важно не только получение или свободный доступ к первичной спутниковой информации, но и грамотное использование данных дистанционного зондирования для анализа состояния окружающей среды, изучения климата и прогноза погоды. Столь глобальное применение и постоянный интерес к развитию спутниковых методов мониторинга различных метеорологических элементов указывают на актуальность подобного рода исследований.

Важной задачей наблюдения за снеговым покровом является определение площади заснеженности, что необходимо для прогнозов стоков рек со снеговым питанием, типичным для Сибири [1]. Для того чтобы провести количественный и качественный анализ снегового покрова, на основе совокупного использования спутниковой информации и данных наземных станций изучается метеорологическая обстановка территории, путем исследования спутниковых снимков определяется площадь заснеженности бассейнов рек.

Состояние атмосферы в определенный момент времени характеризуется рядом физических величин, которые и называются метеорологическими элементами или параметрами.

Ряд таких параметров можно получить из спутниковой и наземной информации. Эти параметры определенным образом связаны друг с другом: например, зная высоту верхней границы облачности (ВГО), влажность и количество осадков, можно судить о типе облачности; или, например, зная облачность, можно определить характер осадков. Визуализация этих зависимостей, различные графики, карты погоды и прочее, сравнение всех полученных данных с данными прошлых лет – все это дает комплексный синоптический анализ метеорологической обстановки. Благодаря этому можно рассуждать об аномальной синоптической обстановке или об опасных погодных явлениях. Относительно зимне-весеннего периода года таковыми могут быть сход снежных лавин, весеннее снеготаяние и половодье.

Основным источником информации для выделения снежного покрова является альбедо поверхности в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Чистый, свежевыпавший снег в видимом диапазоне имеет альбедо, близкое к 1,0. Альбедо тающего, грязного (запыленного) снега может снизиться до 0,4.

Отражательная способность свежего снега очень велика в видимой части электромагнитного спектра, но она становится меньше ближе к инфракрасной части спектра, особенно если размер снежных зерен увеличивается. Вдобавок к этому промышленное загрязнение способствует появлению сажи на снегу, а наличие сажи уменьшает отражательную способность снега и ускоряет процесс его таяния.

Индекс NDSI – это единица измерения относительной величины, показывающая различие между отражательными способностями снега в видимом и инфракрасном излучениях. Для данных, полученных со спектрорадиометра MODIS, индекс NDSI вычисляется следующим образом:

$$\mathrm{NDSI} = (f_4 - f_6)/(f_4 + f_6),$$

где f_4 – альбедо снега в четвертом канале (λ = 0,545…0,565 мкм), f_6 – альбедо снега в шестом канале (λ = 1,628…1,652 мкм).

Для решения поставленной задачи была разработана методика, которая состояла из представленных ниже этапов.

1. Обработка метеорологических данных с наземных станций. Из архива данных космических снимков были выбраны изображения с ноября 2010 г. по март 2011 г. Чтобы сделать выборку по метеостанциям, были установлены границы территории исследования, которая представляет собой прямоугольник с координатами 90°…100° в. д., 50°…65° с. ш. В результате была выбрана 21 метеостанция. Метеопараметры с каждой станции, за каждый день, были занесены в таблицы, рассчитаны средние значения исследуемых параметров и построены графики зависимости от даты, а также проведен синоптический анализ полученных результатов.

2. Определение метеорологических параметров с помощью спутниковых снимков. Используя зимние архивные космические снимки метеорологического характера со спутников Terra и Aqua за 2010 и 2011 г. и программу APT View, была проведена обработка данных дистанционного зондирования с выявлением таких метеорологических параметров, как высота верхней границы облачности, температура ВГО и количество осадков.

* Работа выполнена при поддержке гранта Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

3. Исследование спутниковых снимков для определения площади заснеженности территории. Для того чтобы провести классификацию спутниковых изображений, с помощью программного пакета ERDAS IMAGINE 9.1 были рассчитаны значения нормализованного дифференциального вегетационного индекса (NDVI) и снегового индекса (NDSI). После классификации были рассчитаны величины площадей заснеженности, занимаемых определенными классами снега на снимке, и определена общая заснеженность каждого бассейна.

Ниже представлены результаты экспериментов, полученные в ходе НИР.

Изучение метеорологических параметров с наземных станций. Основные метеорологические параметры для изучения снеговой обстановки на территории исследования, полученные с наземных метеостанций, для наглядности представим в виде графиков зависимости за ту или иную дату (рис. 1, 2, 3).

Изучение графика относительной влажности воздуха (рис. 1) показывает, что в исследуемый период ее значения колебались приблизительно от 51 до 84 %. Самая высокая влажность (83,71 %) была зафиксирована на исследуемой территории 15 января, а самая низкая – 26 марта 51,13 %.

Сравнив графики температуры (рис. 2) и точки росы (рис. 3), можно заметить, что по значениям кривые точки росы несколько смещены вниз относительно кривых температуры. И, взяв во внимание высокие значения влажности воздуха, следует отметить, что в насыщенном воздухе точка росы всегда ниже температуры воздуха.

Для комплексного синоптического анализа полученных данных рассчитаны также средние значения скорости ветра. Скорость ветра, как видно из графика (рис. 4), не достигала больших значений и колебалась в диапазоне от 0 до 4,4 м/с, что приводит к медленному движению воздушных масс, и, следовательно, к ежедневным выпадениям осадков.

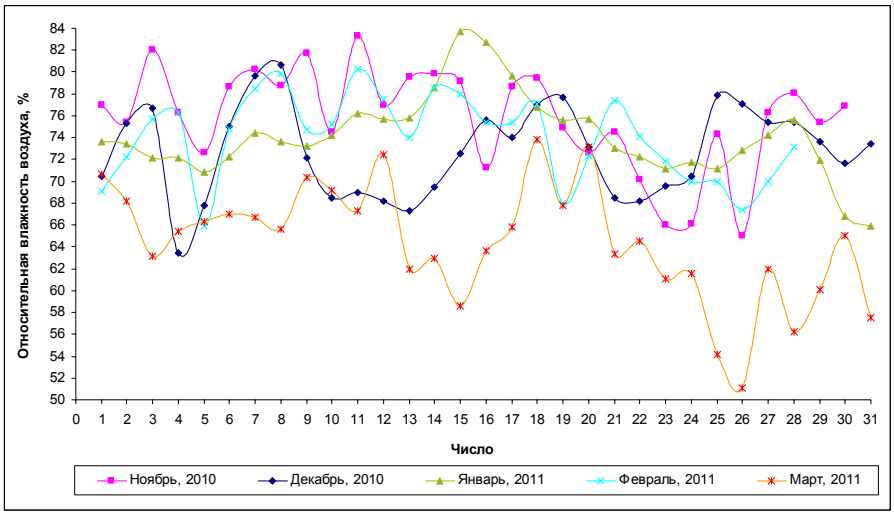


Рис. 1. Средние значения относительной влажности воздуха

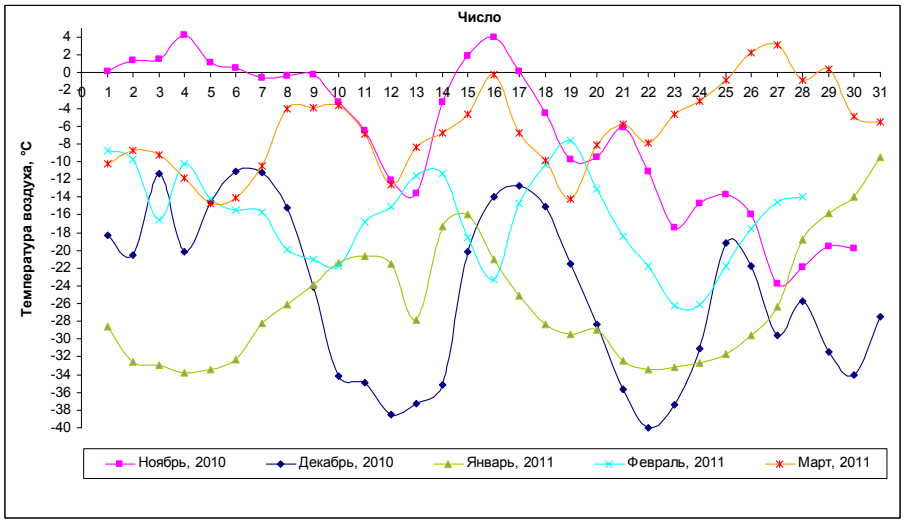


Рис. 2. Средние значения температуры воздуха

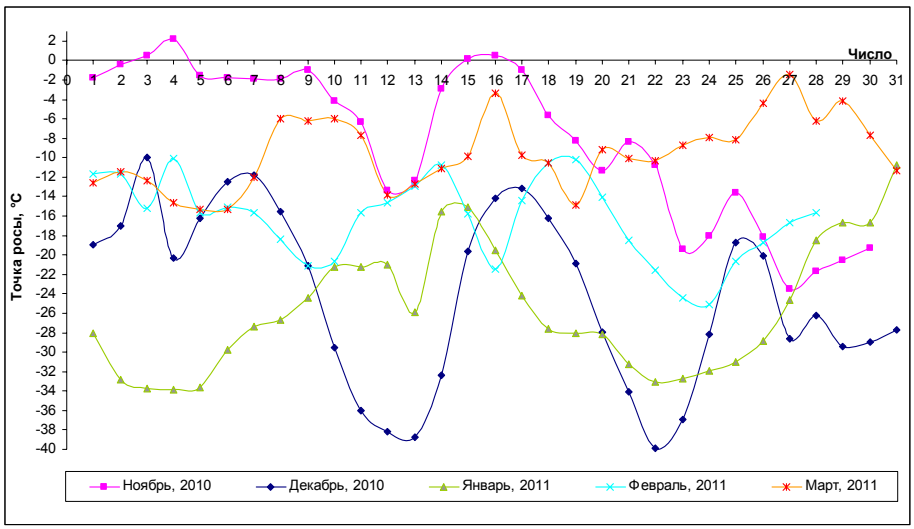


Рис. 3. Средние значения температуры точки росы

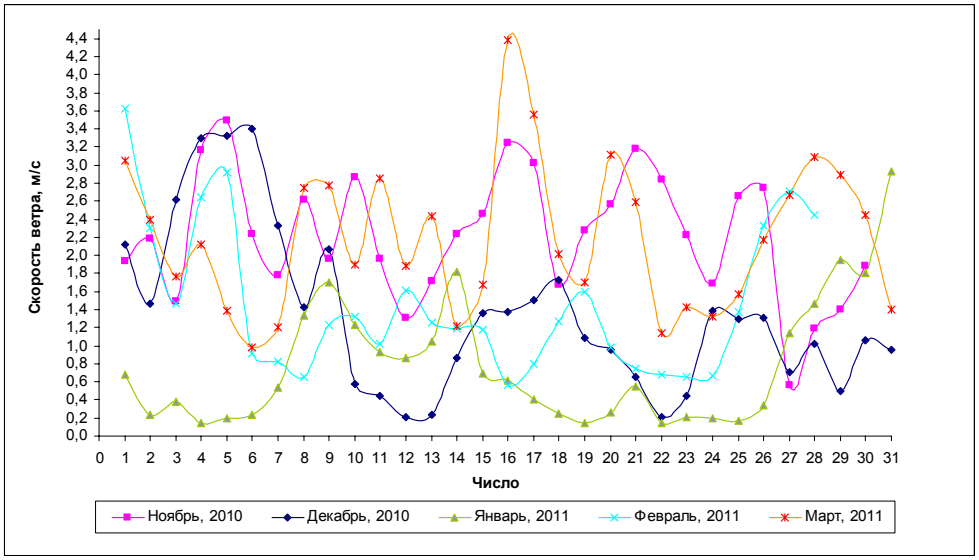


Рис. 4. Средние значения скорости ветра

Изучение метеорологических параметров со спутниковых снимков. В результате обработки космических снимков с изображением облачного покрова получен ряд синоптических параметров. Данные брались в тех точках на снимках, где географически располагаются пять метеостанций Красноярского края. Средние значения метеопоказателей занесены в таблицы, а также построены графики зависимости, отражающие состояние атмосферы в зимний период (рис. 5, 6, 7).

Уже на начальном этапе определения метеорологических параметров по данным, полученным с космических снимков, было обнаружено, что самые низкие значения температуры ВГО соответствуют самым высоким показателям высоты ВГО и осадков. Иными словами, достаточно найти на исследуемой территории снимка точку с интенсивными осадками, чтобы определить максимальное значение высоты ВГО и минимальное значение температуры ВГО.

Данный факт подтверждают результаты экспериментов, представленные на рис. 5, 6 и 7, где наблюдается, что обильным осадкам действительно соответствуют большие значения ВГО и минимальные значения температуры ВГО. Данные об изменении температуры ВГО целесообразно использовать для оценки эволюции облачного массива.

Осадки у Земли начинаются при температуре ВГО примерно –32°. Графики (см. рис. 5 и 6) указывают на подобную зависимость: при значениях температуры ВГО, близких к –32° и ниже, наблюдаются осадки в 4 и 5 мм.

Исследования показали, что период с ноября 2010 г. по март 2011 г. был снежным и холодным, но не аномальным.

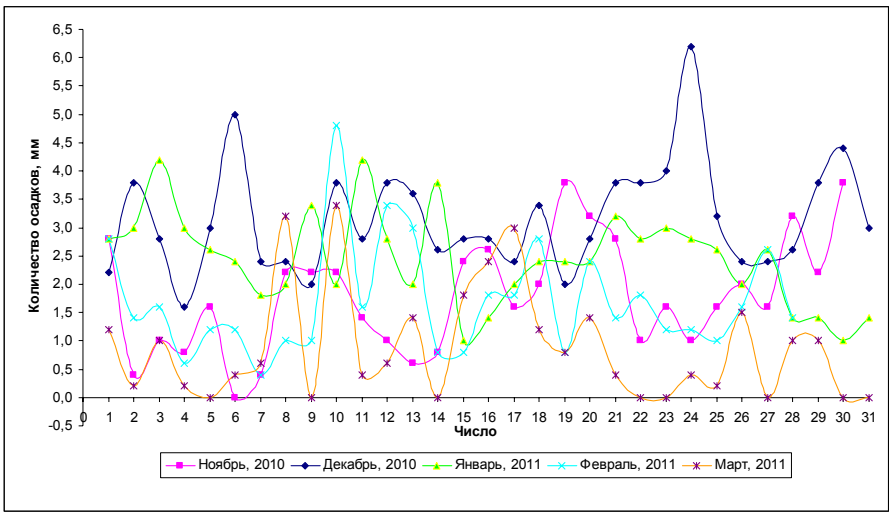


Рис. 5. Средние значения количества осадков

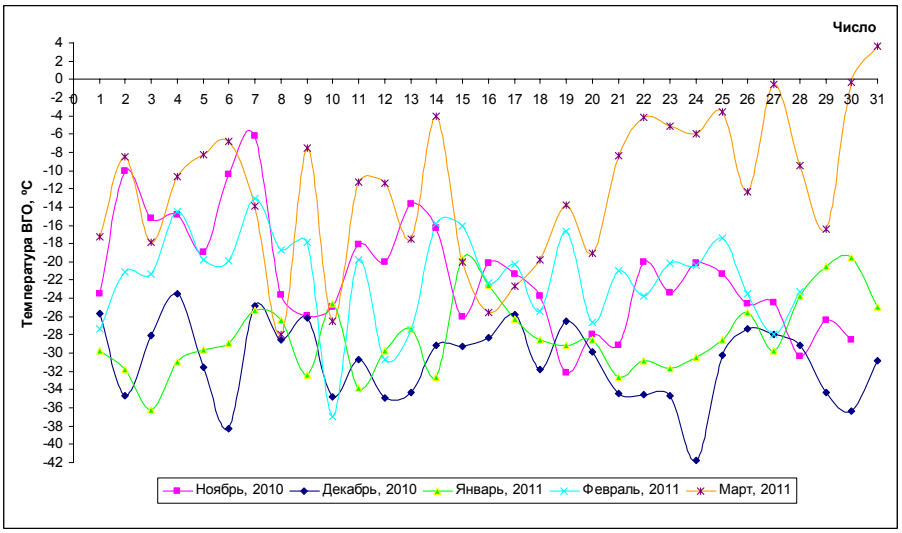


Рис. 6. Средние значения температуры верхней границы облачности

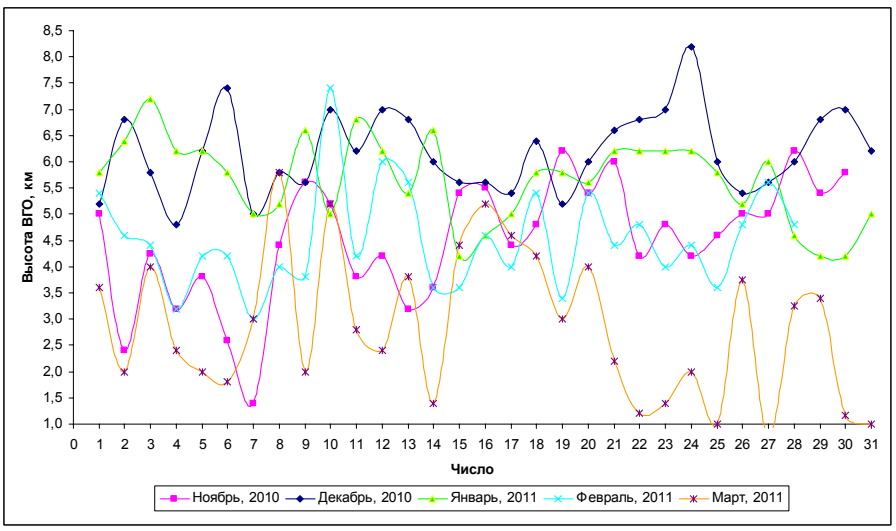


Рис. 7. Средние значения высоты верхней границы облачности

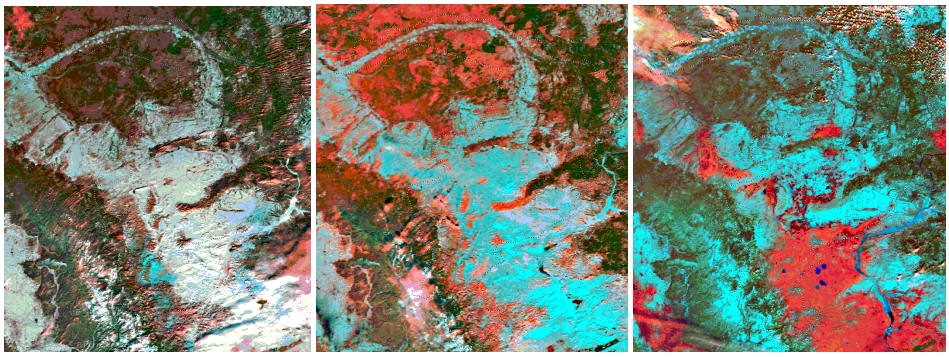
Сильный мороз – это низкая минимальная температура воздуха в течение продолжительного времени и $t_{max} \leq -35°$ в течение пяти суток. Столь низкие значения температуры воздуха на территории Сибирского федерального округа наблюдались в декабре (с 12-го по 14-е, 21-го и 22-го), но в течение непродолжительного срока (2…3 дней). Все это не характеризует исследуемый период как аномальный в отличие от периода с ноября 2009 г. по март 2010 г.

Определение площади заснеженности территории. Исследовались бассейны трех рек, протекающих на территории Сибирского федерального округа: Томи, Чулыма и Кана. Для обработки и анализа были выбраны снимки радиометра MODIS за период с февраля по апрель 2011 г. с пространственным разрешением в 250 м для первого и второго спектральных каналов и 500 м для четвертого и шестого каналов и созданы многоканальные изображения. Изображения бассейна р. Чулым, полученные с радиометра MODIS, представлены на рис. 8.

После расчета значений индексов NDVI и NDSI была проведена классификация изображений с использованием спектральных сигнатур для каждого класса в качестве обучающей выборки (рис. 9). Пиксели, соответствующие снеговому покрову, воде и льду, представлены во всевозможных оттенках синего цвета; пиксели грязного или же талого снега – в сером или грязно-голубом цвете; пиксели растительности – в оттенках зеленого; пиксели почвы – в желтом; а пиксели изредка встречавшихся облаков – в белом цвете.

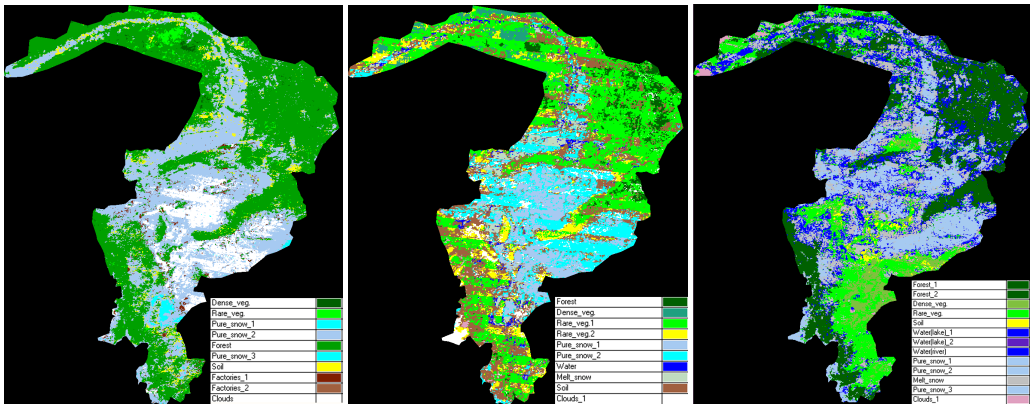
Полученные в ходе эксперимента значения нормализованного снегового индекса для выделенных классов снега представлены в таблице. В колонке «Характеристика» помещены названия классов, созданные в ходе классификации спутниковых снимков.

Следует заметить, по данным классификации, что грязный на самом деле снег, который имеет значения NDSI ~0,6…0,7 и выше, классифицировался как чистый и наоборот. Талый же снег на всех снимках был классифицирован верно. На снимке территории бассейна р. Томь за 16 апреля 2011 г. были обнаружены отрицательные значения NDSI, классифицированные как грязный снег. Скорее всего, это промышленные районы населенных пунктов (заводы, фабрики и т. д.), где снега уже не было или он очень грязный. Также стоит отметить, что среднее квадратическое отклонение уменьшается с ростом количества измерений и имеет высокие значения там, где классификация была проведена неточно. Из этого следует, что необходимо создавать больше классов при классификации спутниковых снимков и более точно отслеживать значения снегового индекса.



22 февраля 2011 г. 5 марта 2011 г. 11 апреля 2011 г.

Рис. 8. Исходные спутниковые снимки бассейна р. Чулым (MODIS)



22 февраля 2011 г. 5 марта 2011 г. 11 апреля 2011 г.

Рис. 9. Результат классификации изображений бассейна р. Чулым (MODIS)

Экспериментальные значения NDSI для выделенных классов снега

Бассейн реки	Дата снимка	Номер класса снега	Характеристика	Значения NDSI	Среднее квадратическое отклонение	S_S, км^2	x, %
Томь	08.02.2011	1	Чистый 1	0,69	0,05	18 819,14	30,34
		2	Чистый 2	0,67			
		3	Горный 1	0,63			
		4	Горный 2	0,63			
		5	Грязный 1	0,43			
		6	Грязный 2	0,39			
	13.03.2011	1	Чистый 1	0,73	0,04	39 247,75	63,27
		2	Чистый 2	0,69			
		3	Горный	0,69			
		4	Горный	0,66			
		5	Чистый 3	0,72			
		6	Грязный	0,52			
		7	Грязный	0,48			
	16.04.2011	1	Чистый	0,77	0,21	20 405,27	32,90
		2	Грязный 1	0,24			
		3	Грязный 2	–0,05			
		4	Горный	0,84			
		5	Грязный 3	–0,16			
Чулым	22.02.2011	1	Чистый 1	0,71	0,08	29 920,98	22,33
		2	Чистый 2	0,47			
		3	Чистый 3	0,46			
	05.03.2011	1	Чистый 1	0,73	0,03	23 189,68	17,31
		2	Чистый 2	0,60			
		3	Талый	0,60			
		4	Чистый 3	0,55			
		5	Чистый 4	0,58			
	11.04.2011	1	Талый 1	0,54	0,08	27 539,99	20,55
		2	Чистый 1	0,89			
		3	Чистый 2	0,76			
		4	Талый 2	0,51			
		5	Чистый 3	0,90			
Кан	15.02.2011	1	Чистый 1	0,74	0,04	13 424,14	36,38
		2	Чистый 2	0,65			
		3	Грязный	0,55			
		4	Чистый 3	0,57			
	07.03.2011	1	Чистый	0,73	0,06	21 475,51	58,20
		2	Горный	0,61			
		3	Грязный	0,53			
	15.04.2011	1	Чистый 1	0,81	0,17	5 701,064	15,45
		2	Чистый 2	0,47			

Рассчитаны величины площадей заснеженности, занимаемые определенными классами снега на снимке, определена общая заснеженность каждого бассейна по формуле

$$x = \frac{S_S}{S_B} \cdot 100\ \%,$$

где S_S – площадь бассейна, занимаемая снегом, км^2; S_B – площадь речного бассейна, км^2. Результаты всех вычислений также занесены в таблицу.

По данным таблицы видно, что бассейны р. Томь и Кан больше всего были заснежены в марте (63 и 58 % соответственно) и самая высокая заснеженность наблюдается у бассейна Томи. Это объясняется тем, что за весь зимний период снег накапливается на земной и водной поверхности, площадь, которую он покрывает, растет и к марту становится максимальной, но уже к апрелю в связи с повышением температуры воздуха снег начинает постепенно стаивать.

Таким образом, получены следующие результаты.

1. Определены метеорологические параметры, полученные с наземных станций. Сравнительный анализ графиков температуры воздуха и точки росы, а также невысокие значения относительной влажности от 51 до 84 % свидетельствуют о том, что период с ноября 2010 г. по март 2011 г. был снежным и холодным, но не аномальным в отличие от соответствующего периода прошлого года.

2. По данным дистанционного зондирования определены метеорологические элементы и установлено, что большие значения высоты ВГО и минимальные значения температуры ВГО соответствуют интенсивным осадкам за этот же период. Средние значения количества осадков составили в ноябре (53,8 ± 4,2) мм; в декабре (97,6 ± 3,3) мм; в январе (75,8 ± 3,3) мм; в феврале (47,4 ± 3,2) мм; в марте (27,2 ± 5,3) мм.

3. Исследована метеорологическая обстановка на территории СФО и установлено, что данные с наземных метеостанций и данные со спутниковых снимков хорошо согласуются и дополняют друг друга, что позволяет использовать совокупную оценку этих параметров для дополнения при исследовании динамики снегового покрова по данным MODIS [2].

4. Вычислены значения NDSI и NDVI, а также в результате классификации спутниковых изображений со спектрорадиометра MODIS рассчитаны величины площадей заснеженности, занимаемые определенными классами снега на каждом снимке и общая площадь заснеженности каждого бассейна.

5. В итоге разработана комплексная методика оценки динамики снегового покрова по спектрально-отражательным характеристикам снега.

На основе полученных результатов в следующем году планируется исследование спутниковых снимков загрязнения снегового покрова вокруг крупных городов СФО, а также изучение других параметров снега и создание модели прогноза талого стока сибирских рек с помощью полученной методики.

Библиографические ссылки

1. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие. М. : Логос, 2001.

2. Методика определения заснеженности речного бассейна по спутниковым данным для оперативных прогнозов стока / Д. А. Бураков, В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин и др. // Метеорология и гидрология. 1996. № 8. С. 100–109.

A. I. Sukhinin, M. V. Vorobiova, E. A. Okhotkina

REMOTE SENSING OF SNOW COVER IN SIBERIA ON DATA OF RADIOMETER MODIS

The authors present analysis of dynamics of snow cover of Siberian Federal District (SFD). Additionally, they present the theoretical basis of calculation of the index of snow cover based on the study of spectral reflectance and absorption characteristics of the snow. Therefore, the main objective of this research is to analyze the dynamics of snow cover of SFD in order to create a forecast model of snowmelt runoff of the Siberian rivers.

Keywords: Reflectance, meteorological parameters, ground stations, snow index, relative humidity, determining the area of snow cover.

© Сухинин А. И., Воробьева М. В., Охоткина Е. А., 2011

УДК 550.34.01

Т. А. Тушко

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ГОДОГРАФА ДЛЯ СРЕДЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ СЛОЙ С ЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ СКОРОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ

Рассматривается алгоритм расчета годографа рефрагированной и головной волн в заданной модели среды. Дано подробное обоснование используемых аналитических решений, вытекающих из общей постановки прямой кинематической задачи сейсмики в лучевом приближении. Предполагается использование алгоритма в задачах гипоцентрии.

Ключевые слова: годограф, лучевое приближение, лучевой параметр, рефрагированная волна, головная волна, гипоцентр.

Во многих случаях трехмерное скоростное строение земной коры удобно аппроксимировать конечным набором одномерных моделей, поставленных в соответствие различным участкам исследуемой среды. Модель подобного типа была построена для описания неоднородностей земной коры на территории Тывы и юга Красноярского края [1], характеризующихся высокой сейсмоактивностью, с целью решения задач, связанных с обработкой наблюдений за местными землетрясениями. Анализ сейсмической изученности рассматриваемой части Алтае-Саянской складчатой области позволил выделить участки (блоки) земной коры с примерно однородным строением среды, и каждому блоку поставить в соответствие несложную скоростную модель, предполагающую линейный закон возрастания скорости распространения упругих волн с глубиной в пределах всей земной коры или значительной ее части. Скорость в верхах мантии предполагается постоянной, а граница Мохо между корой и мантией – горизонтальной. Параметры такой модели являются результатом осреднения скоростных разрезов, полученных различными методами исследований.

Применение математической модели среды к задачам гипоцентрии предполагает наличие соответствующего алгоритма решения прямой кинематической задачи. Данная работа посвящена обоснованию алгоритма расчета годографа рефрагированных и головных сейсмических волн в условиях заданной модели.

Рассматриваемый алгоритм строится на основе аналитических решений, описывающих волновой процесс в лучевом приближении для плоской Земли. В работах [2; 3] дано уравнение годографа для среды с линейным возрастанием скорости с глубиной, при условии, что источник расположен на дневной поверхности. Расчетные формулы, применимые к сейсмическому лучу от источника, расположенного на глубине, не приводятся. Однако именно этот случай представляет интерес для нахождения координат гипоцентра землетрясения, особенно его глубины. В работе подробно рассмотрены вопросы расчета лучевого параметра и времени движения рефрагированной волны от заглубленного источника до заданной точки полупространства. Особое внимание уделено вопросу идентификации лучевой траектории в зависимости от эпицентрального расстояния и скоростных характеристик среды. Описанный алгоритм решения прямой задачи принципиально отличается от численных аналогов, основанных на варьировании угла выхода луча из источника либо на идее динамического программирования.

Расчет времени движения рефрагированной волны между двумя точками среды. Пусть задана декартова система координат. Плоскость (x, y) совпадает с дневной поверхностью, ось $(0, z)$ направлена вглубь Земли. Задано положение источника $M_0(x_0, y_0, z_0)$ и принимающей волну станции $M(x, y, z)$, расположенной на поверхности Земли $(z = 0)$ на эпицентральном расстоянии $\Delta = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ от источника.

Скорость распространения упругих волн в среде зависит только от глубины z и описывается следующей функцией:

$$v(z) = v_0 + \alpha \cdot z, \qquad (1)$$

где v_0 и α – параметры модели.

Требуется найти время распространения упругой волны из точки M_0 в точку M. В геометрическом (лучевом) приближении оно рассчитывается как время движения волны вдоль некоторой траектории – луча, соединяющего точки среды M_0 и M. В каждой своей точке луч перпендикулярен к фронту волны и согласно принципу Ферма является траекторией, обеспечивающей наименьшее время пробега. Если скорость в среде не зависит от x и y, то луч лежит в вертикальной плоскости, проходящей через точки M_0 и M.

Время движения волны в среде и скоростная функция в ней связаны интегрально [2; 3]:

$$T = \int_{M_0}^{M} \frac{ds}{v(z)}, \qquad (2)$$

где ds – элемент дуги луча.

Из геометрических соображений ясно, что $ds = dz / \cos e(z)$, где $e(z)$ – угол между касательной к лучу и вертикалью в точке луча на глубине z. Кроме того, отношение $\sin e(z) / v(z) = p$ называется луче-

вым параметром p и согласно закону Снеллиуса является константой вдоль всей лучевой траектории. Выразив отсюда $\cos e(z) = \sqrt{1 - p^2 \cdot v^2(z)}$ и подставив в выражение (2) получим

$$T = \int_{z_0}^{z} \frac{dz}{v(z)\sqrt{1 - p^2 \cdot v^2(z)}}. \qquad (3)$$

С целью вычислить интеграл воспользуемся (1) и перейдем к интегрированию по параметру $dv = \alpha \cdot dz$. Далее введем еще одну замену. Учитывая, что $p \cdot v = \sin e,$ и обозначив $p \cdot v = \xi,$ можно записать $dv = d\xi / p$, что позволит перейти к интегрированию по угловому параметру. Выражение (3) в этом случае приобретает вид

$$T = \frac{1}{\alpha} \int_{pv_0}^{pv} \frac{d\xi}{\xi\sqrt{1 - \xi^2}}. \qquad (4)$$

Полученный интеграл является табличным [4]. Воспользовавшись таблицей и вернувшись к исходным параметрам интегрирования, получим

$$T = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z)^2}}{p \cdot (v_0 + \alpha \cdot z)} \right) \Bigg|_{z_0}^{z}, \qquad (5)$$

где z_0 и z – пределы интегрирования по глубине.

Прежде чем вычислить интеграл (5), рассмотрим с помощью рис. 1 возможные траектории луча с тем, чтобы правильно задать пределы интегрирования.

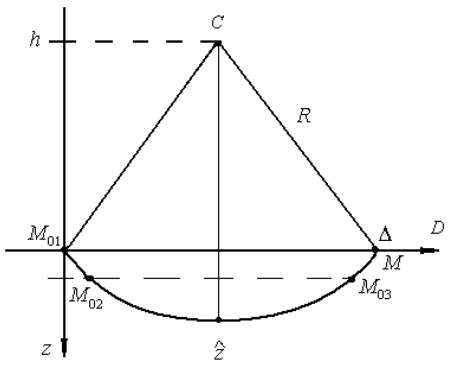


Рис. 1. Лучевые траектории (M_{01}, M_{02}, M_{03}) – возможные положения источника; M – приемник; $\hat{z}$ – точка наибольшего погружения луча

Известно, что в одномерной среде с линейным законом возрастания скорости с глубиной лучи являются дугами окружности. Поэтому луч, соединяющий точки поверхности (на рис. 1 это M_{01} и M), будет симметричен относительно точки своего наибольшего погружения в среду $\hat{z}$. Время движения по такому лучу, согласно формуле Герглотца–Вихерта [3], равно удвоенному времени движения от поверхности до точки $\hat{z}$. Применим это к (5):

$$T_{(M_{01},M)} = -\frac{2}{\alpha} \ln\left(\frac{1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v^2(z)}}{p \cdot v(z)} \right) \Bigg|_{z_0=0}^{z=\hat{z}} =$$

$$= \frac{2}{\alpha} \ln\left(\frac{1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}}{p \cdot v_0} \cdot \frac{p \cdot v(\hat{z})}{1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v^2(\hat{z})}} \right).$$

Учитывая, что в точке наибольшего погружения $\hat{z}$ угол между лучом и нормалью составляет 90^o, выразим скорость как $v(\hat{z}) = 1/p$ и, подставив, получим

$$T_{(M_{01},M)} = \frac{2}{\alpha} \ln\left(\frac{1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}}{p \cdot v_0} \right). \qquad (6)$$

Легко показать, что полученное выражение совпадает с известным уравнением годографа рефрагированной волны, приведенным в [2]:

$$T(\Delta) = \frac{2}{\alpha} \operatorname{Arsh}\left(\frac{\Delta \cdot \alpha}{2 \cdot v_0} \right),$$

где Δ – эпицентральное расстояние между точками M_{01} и M.

Перейдем к рассмотрению другой траектории луча – (M_{03}, M). Этот луч содержит лишь восходящую часть дуги, на которой лежат точки M_{03} и M. Время движения волны по этой траектории также рассчитываем исходя из выражения (5):

$$T_{(M_{03},M)} = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v^2}}{p \cdot v} \right) \Bigg|_{z_0}^{z=0} =$$

$$= \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\left(1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}\right)(v_0 + \alpha \cdot z_0)}{v_0 \cdot \left(1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)^2}\right)}. \qquad (7)$$

Исходя из соображений симметрии, время движения по дуге (M_{02}, M) найдем как разность $T_{(M_{01},M)} - T_{(M_{03},M)}$:

$$T_{(M_{02},M)} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\left(1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}\right) \times \left(1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)^2}\right)}{p^2 \cdot v_0 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)}. \qquad (8)$$

На основе выражений (6)–(8) можно строить алгоритм решения прямой задачи. Однако для этого прежде всего требуется найти значение лучевого параметра p.

Значение лучевого параметра в источнике. Напомним, что в принятой модели среды луч, соединяющий точки M_0 (источник) и M (приемник), является дугой окружности радиуса R с центром в некоторой точке C, расположенной на высоте $h = v_0/\alpha$ над дневной поверхностью.

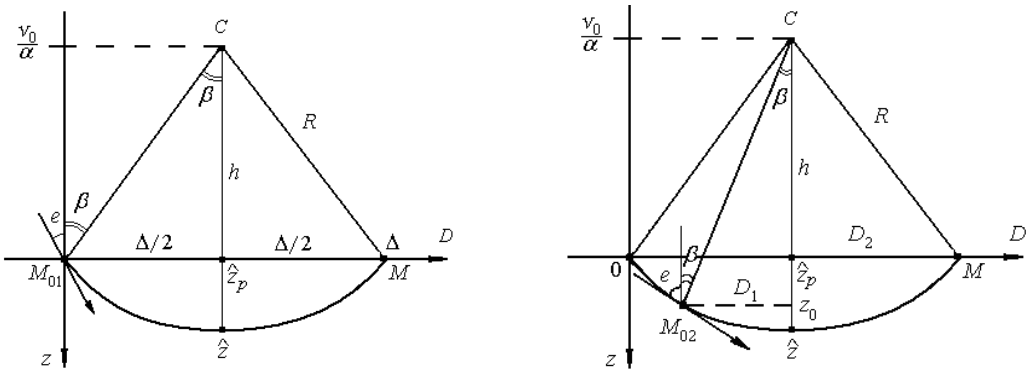


Рис. 2. К оценке лучевого параметра

Значение лучевого параметра $p = \sin e(z)/v(z)$ определяется углом выхода луча из источника, обеспечивающего его попадание в точку *M*. Воспользуемся геометрическими построениями в плоскости луча.

Рассмотрим два возможных варианта положения источника (рис. 2): источник M_{01} расположен на поверхности и совпадает с началом координат (0,0) (*слева*); источник M_{02} имеет глубину $z_0 > 0$ (*справа*). Ось $(0,z)$ направлена вглубь, ось $(0,D)$ проходит через эпицентр (проекция источника на дневную поверхность) и точку *M*, в которой находится приемник. Эпицентральное расстояние Δ считается известным. Точка $\hat{z}_p$ есть проекция точки наибольшего погружения луча $\hat{z}$ на ось $(0,D)$.

Пусть глубина источника $z_0 = 0$. Угол e выхода луча из точки M_{01} связан соотношением

$$\sin e = \sin(90° - \beta) = \cos\beta = h/R,$$

где $h = v_0/\alpha$, $R = \sqrt{(\Delta/2)^2 + (v_0/\alpha)^2}$. Вычислим значение лучевого параметра в точке M_{01}:

$$p = \frac{v_0}{\alpha \cdot R} \cdot \frac{1}{v_0} = \frac{1}{\alpha \cdot \sqrt{(\Delta/2)^2 + (v_0/\alpha)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\alpha^2 \cdot \Delta^2 + 4v_0^2}}. \quad (9)$$

Если глубина источника $z_0 > 0$, то угол выхода луча из точки M_{02} (рис. 2, *справа*) можно задать выражением $\sin e = \sin(90° - \beta) = \cos\beta = (h + z_0)/R$.

Чтобы найти радиус дуги R, воспользуемся тем, что эпицентральное расстояние Δ нам известно. Представим его в виде суммы: $\Delta = D_1 + D_2$, где D_1 – расстояние, пройденное лучом по горизонтали до точки максимального погружения, D_2 – после нее. Радиус можно выразить двояко – как расстояние от точки C до точки M_{02} и от точки C до точки *M*:

$$R = \sqrt{h^2 + D_2^2} \quad \text{и} \quad R = \sqrt{(h + z_0)^2 + D_1^2}.$$

Выразив D_1 как $(\Delta - D_2)$ и приравняв выражения для *R* найдем D_2, а затем и радиус дуги:

$$R = \sqrt{h^2 + \frac{(z_0^2 + \Delta^2 + 2h \cdot z_0)^2}{4\Delta^2}}.$$

Учитывая, что $h = v_0/\alpha$, найдем *p*:

$$p = \frac{\cos\beta}{v(z_0)} = \frac{h + z_0}{R \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)} = \frac{2}{\sqrt{4v_0^2 + (\Delta \cdot \alpha + z_0 \cdot \Delta^{-1} \cdot (2v_0 + \alpha \cdot z_0))^2}}. \quad (10)$$

Случай, когда источник находится ближе к приемнику, чем точка наибольшего погружения дуги луча (траектория (M_{03}, M) на рис.1), является симметричным по отношению к рассмотренному. Поэтому формула (10) будет справедлива и для этого случая.

Лучевая траектория и глубина погружения луча. Зная координаты источника и приемника, можно определить форму лучевой траектории, соединяющей их, что позволит правильно применить формулы (6)–(10) при построении алгоритма решения прямой задачи. Форма (или тип) траектории определяется положением точки максимального погружения относительно отрезка дуги, соединяющего источник с приемником. Если глубина источника $z_0 > 0$, точка может как принадлежать отрезку, так и находиться вне этого отрезка. На рис. 1 это траектории (M_{02}, M) и (M_{03}, M). Используем критерий распознавания типа траектории, основанный на сравнении заданной глубины источника с некоторым расчетным ее значением, являющимся функцией известных нам данных $(z_0, \Delta, v_0, \alpha)$. Проиллюстрируем этот подход (рис. 3).

Три источника расположены на оси $(0,z)$ на разной глубине (z_0, z_1 и z_2). Все они находятся на эпицентральном расстоянии Δ от приемника, расположенного в точке M. Источникам соответствуют лучи (дуги) с индексами 0, 1, 2 соответственно.

Дуга 1 пересекает ось $(0,z)$ в точке $z=z_1$ под прямым углом, так как является частью окружности радиуса $R=\sqrt{\Delta^2+h^2}$ с центром C_1, расположенным на оси $(0,z)$. Точка максимального погружения дуги здесь совпадает с положением источника $\hat{z}=z_1$. Поэтому луч, вышедший строго горизонтально из источника, попадет в точку *M*.

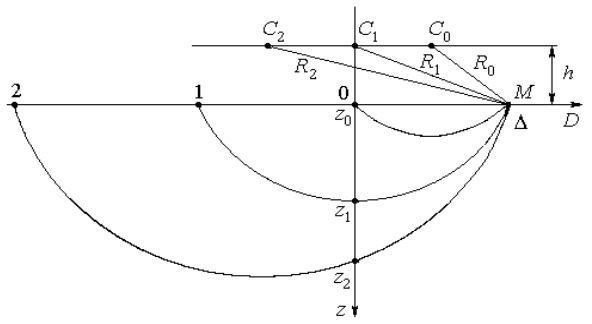


Рис. 3. Лучевые траектории, проведенные из точки *M*

Если источник поместить выше точки z_1, например в точку z_0, то лучевая траектория, соединяющая источник и приемник, будет содержать точку наибольшего погружения дуги 0. Если же источник расположить на оси $(0,z)$ ниже точки z_1 (в точке z_2), то лучевая траектория не будет содержать точку наибольшего погружения дуги 2. Наша задача: определить тип траектории для заданных источника и приемника.

Если рассматривать величину z_1 как некоторое переключательное значение глубины источника, то можно построить критерий идентификации типа лучевой траектории. Для заданных параметров среды и эпицентрального расстояния вычислим значение z_1:

$$z_1 = R - h = \frac{\sqrt{v_0^2 + (\alpha\cdot\Delta)^2} - v_0}{\alpha}. \qquad (11)$$

Введем параметр $zz = z_1 - z_0$, где z_0 – глубина рассматриваемого источника.

Тогда случаям $zz \le 0$, $zz > 0$, $zz = z_1$ будут соответствовать свои типы траекторий, соединяющих источник с приемником, и, следовательно, свои наборы аналитических решений для расчета лучевого параметра и времени пробега луча из числа полученных выше.

Рассмотрим одно важное замечание. При расчете времени движения волны, рефрагированной в слое с линейной зависимостью скорости от глубины, предполагалось, что луч не погружается ниже границы слоя. Это касается лучевых траекторий, для которых параметр $zz > 0$. Глубину наибольшего погружения луча $\hat{z}$ можно найти из условия, что луч в этой точке направлен под прямым углом к вертикали:

$$p = \frac{\sin e(\hat{z})}{v(\hat{z})} = \frac{1}{v(\hat{z})} = \frac{1}{v_0 + \alpha\cdot\hat{z}}.$$

Подставив значение лучевого параметра, найденное по формуле (9), если глубина источника $z_0 = 0$, и по формуле (10), если $z_0 > 0$, получим соответственно

$$\hat{z}_1 = \frac{\sqrt{(\alpha\cdot\Delta)^2 + 4v_0^2} - 2v_0}{2\alpha},$$

$$\hat{z}_2 = \frac{\sqrt{4v_0^2 + (\Delta\cdot\alpha + z_0\cdot\Delta^{-1}\cdot(2v_0 + \alpha\cdot z_0))^2} - 2v_0}{2\alpha}.$$

Сравнение рассчитанной величины $\hat{z}$ с глубиной подошвы линейного слоя позволит внести необходимые ограничения или поправки в алгоритм решения прямой задачи.

Расчет головной волны от границы Мохо. Головными называют волны, часть траектории которых состоит из скольжения вдоль границы раздела двух сред. Это возникает, когда синус угла падения волны на границу равен отношению скоростей в средах. Лучевой параметр для траектории такого типа равен $p = 1/v_2$, где v_2 – скорость распространения волн под границей Мохо.

Представим лучевую траекторию головной волны как сумму трех отрезков (рис. 4), время движения вдоль которых рассчитывается отдельно. Введем обозначения: T_1 – время погружения луча из источника M_0 до границы Мохо; T_2 – время восхождения луча от границы до приемника, расположенного в точке *M*; T_3 – время скольжения луча вдоль границы.

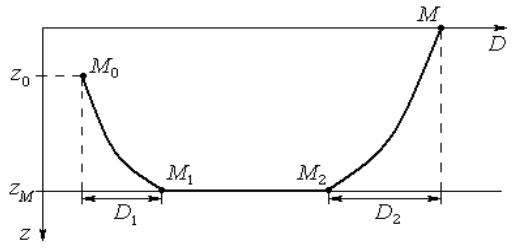


Рис. 4. Головная волна

Граница предполагается горизонтальной и залегает на глубине z_M.

T_1 находим на основе решения (5):

$$T_1 = \frac{1}{\alpha}\cdot\ln\frac{\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot(v_0+\alpha\cdot z_0)^2}\right)\cdot(v_0+\alpha\cdot z_M)}{(v_0+\alpha\cdot z_0)\cdot\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot(v_0+\alpha\cdot z_M)^2}\right)}; \qquad (12)$$

T_2 – в соответствии с (7):

$$T_2 = \frac{1}{\alpha}\cdot\ln\frac{\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot v_0^2}\right)\cdot(v_0+\alpha\cdot z_M)}{v_0\cdot\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot(v_0+\alpha\cdot z_M)^2}\right)}. \qquad (13)$$

Чтобы найти T_3, необходимо знать, какое расстояние L прошел луч вдоль границы. Из рис. 4 видно, что $L = \Delta - D_1 - D_2$, где Δ – эпицентральное расстояние. Пусть dx – расстояние, пройденное падаю-

щим на границу лучом по горизонтали и соответствующее элементу дуги луча ds. Из геометрических соображений ясно, что $dx = ds \cdot \sin e$, где e – угол луча с вертикалью. В то же время $dx = dz/\cos e$, где dz – отрезок пути по глубине. Выразим путь луча по горизонтали:

$$x_{(M_0,M_1)} = \int_{Z_0}^{Z_M} \frac{dz}{\cos e(z)} \cdot \sin e = \int_{Z_0}^{Z_M} \frac{dz \cdot p \cdot v(z)}{\sqrt{1 - p^2 \cdot v^2(z)}}. \quad (14)$$

Введя подстановки, аналогичные тем, что при вычислении интеграла (3), получим

$$x_{(M_0,M_1)} = \frac{1}{\alpha \cdot p} \int_{z_0}^{z_M} \frac{\xi d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{1}{p \cdot \alpha} \cdot \left(-\sqrt{1-\xi^2}\right) \Bigg|_{z_0}^{z_M},$$

где $\xi = p \cdot v(z)$.

Подставляя в качестве пределов интегрирования глубину залегания границы $z = z_M$ и глубину источника $z = z_0$, получим путь по горизонтали для нисходящей части луча:

$$D_1 = \frac{v_2}{\alpha} \cdot \left(\sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)^2} - \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_M)^2} \right). \quad (15)$$

Интегрируя (14) от $z = z_M$ до $z = 0$, найдем путь для восходящей части луча:

$$D_2 = \frac{v_2}{\alpha} \cdot \left(\sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2} - \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_M)^2} \right). \quad (16)$$

Общее время пробега луча T найдем исходя из решений (12)–(16) как сумму

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = T_1 + T_2 + (\Delta - D_1 - D_2)/v_2,$$

при условии, что $(\Delta - D_1 - D_2) > 0$.

Таким образом, исходя из общей постановки прямой кинематической задачи сейсмики в лучевом приближении, дано обоснование необходимых аналитических решений для разработки и программной реализации алгоритма расчета годографа в принятой модели среды. Особое внимание уделено случаю, когда источник сейсмических волн расположен на глубине.

Предложен критерий, позволяющий однозначно идентифицировать форму лучевой траектории, соединяющей источник с приемником, при расчете годографа рефрагированной волны от заглубленного источника.

Рассмотрен подход к расчету годографа головной волны от подошвы линейного слоя.

Представленный в работе алгоритм может быть также использован для нахождения численного решения обратных задач, требующих многократного решения прямой задачи. Алгоритм основан на аналитических решениях, обладающих устойчивостью и не дающих большой погрешности в вычислениях.

Библиографические ссылки

1. Тушко Т. А., Осеев В. Г., Пилимонкин Н. С. Построение скоростной модели среды для решения задач гипоцентрии // Соврем. методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : материалы V Междунар. сейсмологич. школы. Обнинск, 2010. С. 209–214.

2. Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М. : Гос. изд-во тех.-теор. литературы, 1955.

3. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы : в 2 т. М. : Мир, 1983.

4. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М. : Наука, 1978.

T. A. Tushko

ALGORITHM OF CALCULATION OF THE HODOGRAPH CONTAINING A LAYER WITH A LINEAR DEPENDENCE OF VELOCITY ON DEPTH

An algorithm of calculation of hodograph of refracted and head waves in an assumed environment model is considered. A detailed argumentation of the applied analytical solutions, derived from the universal arrangement of the direct amplitude time problem in ray approximation, is presented. The algorithm is offered to be used in hypocenter location problems.

Keywords: hodograph, ray approximation, ray parameter, refracted wave, head wave, hypocenter.

© Тушко Т. А., 2011

УДК 681.34

Р. Ю. Царев, Д. В. Капулин, О. И. Завьялова, А. В. Демиш

МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ АСУ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Представлен комплекс моделей, предназначенных для планирования развития структуры АСУ космических систем. Особое внимание уделено повышению надежности АСУ космических систем за счет кластерной организации их архитектуры.

Ключевые слова: космическая система, кластерная архитектура, автоматизированная система управления.

Современный уровень развития автоматизированных систем управления космическими системами (АСУ КС) характеризуется усложнением структуры различных подсистем, что в первую очередь обусловлено ростом размеров и сложности процессов обработки и передачи информации, а также процессов управления как самими подсистемами, так и объектами управления. Это выдвигает ряд проблем, связанных с научно обоснованным построением структуры АСУ КС, эффективным формированием состава подсистем передачи и обработки информации [1].

Жизнеспособность АСУ КС в равной мере определяется как аппаратно-программными компонентами системы (надежностью их функционирования, сетевым и ресурсным обеспечением), так и информационными потоками и их возможностями. Коммуникационные и информационные технологии проектируемого пространства должны обеспечивать полноценный информационный обмен между структурными компонентами, такими как региональные станции, абонентские терминалы различных модификаций, центральная станция и т. п. Существенно, что ресурсы на создание компонентов структуры АСУ КС могут выделяться отдельно, в разные периоды времени, поэтапно. Иными словами, допустимо поэтапное финансирование и поэтапная реализация системы без противоречия ее главным характеристикам полезности [2].

Таким образом, при проектировании и создании информационной среды поддержки управления АСУ КС все большее значение и актуальность приобретает решение проблемы синтеза и планирования развития ее структуры.

Постановка задачи. Процесс развития информационно-технологической структуры представляется в виде набора путей на многодольном альтернативном графе, множество вершин которого отображает набор возможных категорий каждого центра управления (ЦУ) АСУ в заданные периоды, а множество дуг – возможные переходы из одной категории в другую. Задача планирования развития структуры информационно-коммуникационных технологий АСУ КС состоит в поиске оптимального плана развития информационного пространства системы управления, который определит моменты ввода ЦУ, структуру сети в каждый период планирования и потоки мощностей между ЦУ 1-го и 2-го уровней иерархии с учетом динамики изменения потребностей абонентов каждого структурного подразделения в информационно-технологических работах и капитальных затратах на ее развитие.

Рассматривая динамическую модель планирования развития структуры информационных технологий АСУ КС, однокритериальную задачу можно представить как линейную задачу математического программирования с непрерывными и булевыми переменными. Для случая многоатрибутивной модели принятия решений необходима разработка комбинированных процедур, объединяющих стандартные методы принятия решений и специализированные алгоритмы [3].

Метод решения. Для формализации поставленной задачи введем следующие переменные величины: $x_{ikt} = 1$, если i-й ЦУ имеет k-ю категорию в t-й период планирования, $x_{ikt} = 0$ – в противном случае; y_{it} – величина потока мощности к i-му ЦУ 2-го уровня от соответствующего ЦУ 1-го уровня иерархии в t-й период планирования.

Обозначим через $q_{ikt} = Q_{it} - Q_k$ разность между мощностью, необходимой для удовлетворения потребностей в информационно-технологических работах абонентов i-го ЦУ в t-й период, и мощностью ЦУ k-й категории.

Пусть $\overline{q}_{ikt} = |q_{ikt}|$, тогда выражение, характеризующее степень удовлетворения центральной/региональной станцией (ЦУ заданного уровня) потребностей в информационно-технологических работах своих абонентов, имеет вид

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{I_R} \sum_{k=1}^{K} \left(\overline{q}_{jkt} x_{jkt} + \sum_{i \in I_j} \left(\overline{q}_{ikt} x_{ikt} - y_{it} \right) \right), \qquad (1)$$

где I_R – количество ЦУ 1-го уровня; I_J – множество ЦУ 2-го уровня, имеющих каналы связи с j-м ЦУ 1-го уровня. Условия выбора для каждого ЦУ одной категории из допустимого множества формализуется в виде

$$\sum_{k=1}^{K} x_{ikt} = 1, \qquad i = \overline{1, I}, \qquad t = \overline{1, T}, \qquad (2)$$

где I – общее количество ЦУ.

*Исследования выполнены в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Ограничения на потоки мощности между ЦУ 1-го и 2-го уровня имеют вид

$$0 \le \sum_{i \in I_j} y_{it} \le \sum_{k=1}^{K} \tilde{q}_{jkt} x_{jkt}, \quad j = \overline{1, I_R}, \quad t = \overline{1, T}. \qquad (3)$$

Это ограничение показывает, что суммарный поток мощности от ЦУ 1-го уровня к соответствующим ЦУ 2-го уровня не должен превышать избытка мощности *j*-го ЦУ 1-го уровня.

Условие того, что приток мощности к *i*-му ЦУ 2-го уровня не превышает дефицита мощности *i*-го ЦУ, имеет вид

$$0 \le y_{it} \le \sum_{k=1}^{K} q_{ikt} x_{ikt}, \quad i = \overline{1, T}, \quad t = \overline{1, T}. \qquad (4)$$

Обозначим через c_{it} пропускную способность коммуникационного канала *i*-го ЦУ в *t*-й период, тогда ограничение на поток данных по этому каналу имеет вид

$$c_{it} \ge d_{it}, \quad i = \overline{1, T}, \quad t = \overline{1, T},$$

где d_{it} – коэффициент, равный среднему объему передаваемой информации на единицу потока мощности.

Величина d_{it} может быть рассчитана, исходя из структуры распределенного информационного пространства АСУ КС и конкретных информационно-технологических задач, решаемых ЦУ в *t*-й период. В случае отсутствия такой информации экспертно определяются коэффициенты d_{it}.

Условие, ограничивающее набор возможных категорий *i*-го ЦУ в каждый *t*-й период, запишется в виде

$$\sum_{k=1}^{K} k x_{ikt} \le K_{it}^{*}, \quad i = \overline{1, I}, \quad t = \overline{1, T},$$

где K^{*}_{it} – минимальная категория *i*-го ЦУ, полностью удовлетворяющая потребность *i*-го ЦУ в ИТР в *t*-й период.

Условие на минимально необходимое количество ЦУ в информационном пространстве системы в *t*-й период задается в виде

$$\sum_{i=1}^{I} x_{ikt} \le M_t, \quad t = \overline{1, T},$$

где M_t – максимально допустимое количество ЦУ, не вводимых в эксплуатацию в *t*-й период.

Обозначим R_k – капитальные затраты на создание ЦУ *k*-й категории; R_i – доля участия *i*-го ЦУ в капитальных затратах на создание каналов связи; μ_i – коэффициент, учитывающий увеличение капитальных затрат на строительство ЦУ в особых районах страны (северных, сейсмичных и т. д.). Тогда капитальные затраты на создание комплекса средств информационных технологий АСУ КС формализуются в виде

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{I_R} \left(\mu_j \sum_{k=1}^{K} R_k x_{jkt} - R_k x_{jk(t-1)} \right) + \sum_{i \in I_j} \mu_i \left(\sum_{k=1}^{K} R_k x_{ikt} - R_k x_{ik(t-1)} \right). \qquad (5)$$

В зависимости от конкретных особенностей постановок однокритериальных задач в качестве критерия оптимальности плана развития комплекса средств информационных технологий АСУ КС используются выражения (1) или (5). При использовании в качестве критерия выражения (1) целесообразно ввести коэффициенты, учитывающие важность информационно-коммуникационных и вычислительных работ, выполняемых *i*-м ЦУ. Она зависит от приоритетности структурных подразделений системы, обслуживаемых им. При этом накладываются ограничения на затраты по созданию комплекса средств информационных технологий (информационного пространства), задаваемые выражением (5).

Рассматриваемая модель позволяет проводить оптимизацию и анализ вариантов развития комплекса средств информационных технологий АСУ космических систем. Возможность применения стандартного математического обеспечения, как уже указывалось выше, ограничена большими размерностями задачи, поэтому целесообразно использовать специализированные алгоритмы. Это становится еще более актуальным, если рассматривать многоатрибутивную постановку задачи принятия решения при оценке вариантов развития информационных технологий АСУ КС.

Для решения задачи в упрощенной постановке может быть применен алгоритм, использующий графовую формализацию развития информационного пространства АСУ КС и основанный на процедуре просмотра вариантов решения, которая использует схему метода ветвей и границ.

В ряде случаев, с учетом возможного задания ряда ограничений задач как аналитически, так и алгоритмически, предлагается комбинированная процедура, объединяющая многоатрибутивные методы принятия решений и эвристические алгоритмы, построенные на основе схем направленного случайного поиска и регулярных процедур, используемых при решении однокритериальных задач оптимизации.

Предлагаемые модели, использующие графовую интерпретацию, могут быть использованы для оптимизации плана развития структуры информационного пространства АСУ КС в конкретной ситуации, например, на период 10–15 лет с разбивкой по 3–5 лет (устанавливается экспертно).

Проиллюстрируем применение предложенных подходов на примере. Исходя из конкретных требований развития АСУ КС, предполагалось в течение первого и второго периодов планирования развивать всю информационную сеть, в третий период – только ЦУ 1-го уровня, причем удовлетворение потребности в информационно-технологических работах абонентов ЦУ 2-го уровня проводится за счет включения коммуникационных каналов между ЦУ 2-го уровня и соответствующими ЦУ 1-го уровня. Для иллюстративного примера R_i приняты равными 0. Всего к концу планового периода должно быть создано шесть ЦУ 1-го уровня, 35 ЦУ 2-го уровня, ЦУ должны иметь сеть пунктов управления (ПУ). При этом ПУ может находиться в одной из шести категорий. Относительно сети ПУ вводятся следующие предположения:

– затраты на создание локальной сети с ПУ 4–6 категории включаются целиком в затраты соответствующего ЦУ в момент ввода его в строй;

– затраты на ввод в строй ПУ 1-й и 2-й категории включаются в затраты соответствующего ЦУ пропорционально удовлетворению потребности данного ЦУ и проводимым информационно-технологическим работам.

Задача планирования развития структуры комплекса информационных технологий АСУ КС при данных условиях имеет вид

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{I_R}\left(\delta_j\sum_{k=1}^{K}\overline{q}_{jkt}x_{jkt}+\sum_{i\in I_j}\delta_i\overline{q}_{ikt}x_{ikt}\right),$$

где $q_{ikt}=Q_{it}-Q_k-L_{ikt}$, а $q_{ikt}=q_{ikt}$, если $q_{ikt}>0$ и $\overline{q}_{ikt}=0$ – в противном случае; $L_{ikt}=Q_k\,Q_i/(\alpha\,Q_{it})$ – дополнительные мощности i-го ЦУ k-й категории в t-й период времени за счет вычислительных средств ПУ 1-й категории; Q_i – производительность всех ПУ 1-й категории i-го ЦУ; α – коэффициент пересчета объема информационно-технологических работ в производительность аппаратного комплекса, определяемый временем отладки, коэффициентом готовности и т. д.; δ_j – коэффициент, учитывающий важность j-го ЦУ.

При ограничениях на общие капитальные затраты, связанные с развитием информационной сети в t-й период задача имеет вид

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\mu_i\left(\left(R_k+M_{ikt}\right)x_{ikt}-\left(R_k-M_{ik(t-1)}\right)x_{ikt}+\varepsilon_i x_{ik(t-1)}\right)\le R_t;$$

$$t=\overline{1,T},$$

где $M_{ikt}=Q_k\;R_i^*/(\alpha\,Q_{it})$ – добавка к стоимости i-го ЦУ k-й категории в t-й период, вносимая введением в строй ПУ 1-й и 2-й категорий; R_i – общие затраты на ПУ 1-й и 2-й категорий i-го ЦУ; ε_i – стоимость локальной сети i-го ЦУ с ПУ 4–6-й категорий и при ограничениях (2)–(4).

Большое значение в настоящее время в связи с повсеместной автоматизацией рабочих процессов придается совершенствованию структуры автоматизированных систем управления. Компьютерная система АСУ КС хранит основную информацию о работе подразделений и системы в целом, и выход ее из строя способен остановить работу всех служб. Очевидно, что такие жизненно важные системы должны обладать адекватным уровнем отказоустойчивости в рамках отведенных бюджетов [4].

Возможны два способа повышения доступности ресурсов программно-информационных технологий распределенных структур АСУ: путем увеличения индивидуальной надежности серверов и улучшения общесистемной отказоустойчивости [5]. В первом случае увеличивается надежность каждого элемента системы, что позволяет строить конфигурации высокой доступности из небольшого количества компонентов. Для построения надежной распределенной системы в рамках АСУ КС обычно используется большое количество не очень надежных компонентов, а высокая надежность всей системы достигается многократным дублированием. Также известны методы увеличения аппаратной надежности.

Однако основное внимание уделяется кластеризации. Имеются две реализации кластеров, обеспечивающих совместную работу нескольких компьютеров: аппаратная и программная. Аппаратный кластер предусматривает специальные компоненты для поддержки целостности кластера и обрабатываемых им данных. Программный позволяет реализовать кластер из универсальных серверов и сетевых технологий, но требует поддержки со стороны операционной системы: баланса загрузки, контроля работоспособности узлов, перераспределения ресурсов и решения других задач. Собственно аппаратные кластеры выпускаются уже давно, а сегодня начали появляться и программные кластеры.

Кластеры рассматриваются на качественно более высоком уровне – с точки зрения катастрофоустойчивости. Развитие катастрофоустойчивой архитектуры предполагает обеспечение защиты от незапланированных простоев во время и после катастрофы в географически распределенных узлах кластера, при которой отказ одного узла не приводит к прекращению работы всей системы.

В качестве примера рассмотрим АСУ, представляющую собой совокупность I кластеров. Обозначим номер кластера $i=\overline{1,I}$. Каждый кластер характеризуется катастрофоустойчивой категорией ($k=\overline{1,K}$), районным коэффициентом μ_i и потребностью в кластер-кворуме Q_{it} в момент времени t. На интервале времени T в каждый период планирования $t=\overline{1,T}$ выделяются материальные средства в размере R_t на развитие инфраструктуры системы кластеров. Районный коэффициент μ_i учитывает увеличение капитальных затрат на строительство кластера в особых районах (северных, сейсмических и т. д.).

Каждой категории k соответствует минимальное работоспособное значение целостности (кластер-кворум) Q_k и капитальные затраты (требуемые ресурсы) на развитие кластера R_k.

Обозначим через $q_{ikt}=Q_{it}-Q_k$ разность между требуемой минимальной целостностью i-го кластера в t-й период и кластер-кворумом k-й категории.

Пусть

$$\tilde{q}_{ikt}=\begin{cases}-q_{ikt}, & \text{если } q_{ikt}<0;\\ 0, & \text{если } q_{ikt}\ge 0.\end{cases}$$

Тогда выражение, характеризующее степень превышения потребностей в устойчивости к нарушению целостности, выглядит следующим образом:

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\tilde{q}_{ikt}\cdot x_{ikt}. \qquad (6)$$

Условие выбора для каждого кластера одной категории из допустимого множества формализуется в виде

$$\sum_{k=1}^{K}x_{ikt}=1;\quad i=\overline{1,I};\quad t=\overline{1,T},$$

где I – общее количество кластеров.

Условие, ограничивающее набор возможных категорий i-го кластера в каждый t-й период, выглядит так:

$$\sum_{k=1}^{K}k\cdot x_{ikt}\le K_{it}^*;\quad i=\overline{1,I};\quad t=\overline{1,T},$$

где $K_{it}^{*} = \min\limits_{Q_{it} \geq Q_k} k$ – минимальная категория, кластер-кворум которой полностью удовлетворяет потребности i-го кластера в t-й период планирования $k = \overline{1, K}$.

Учитывая районный коэффициент μ_i, ограничение на капитальные затраты в период времени t формализуется в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{I} \mu_i \sum_{k=1}^{K} x_{ikt} \cdot \left(R_k \cdot x_{ikt} - R_k \cdot x_{ik(t-1)} \right) \leq R_t .$$

В рассматриваемом случае важным условием является удовлетворение потребительских запросов и поэтому в качестве критерия оптимальности плана развития используется выражение (6), взятое по минимуму:

$$\min \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} \tilde{q}_{ikt} \cdot x_{ikt} .$$

Таким образом, план, обеспечивающий минимум дефицита надежности на всем интервале времени, выделенном на развитие системы, будет являться оптимальным.

Экспериментальная часть. С использованием алгоритмов расчета, изложенных в статье, разработан программный комплекс формирования гарантоспособных структур АСУ КС, включая комплекс имитационного моделирования для реализации функций модельного прототипа, анализа кластерной структуры и формирования плана ее развития.

Программная реализация решения задачи построена на нахождении оптимального плана в каждый конкретный период развития системы. При этом был введен ряд допущений:

а) структура пунктов управления АСУ одинакова;

б) изменение характеристик кластерной структуры происходит за один период планирования.

Программный комплекс состоит из трех частей:

1) имитационной модели;

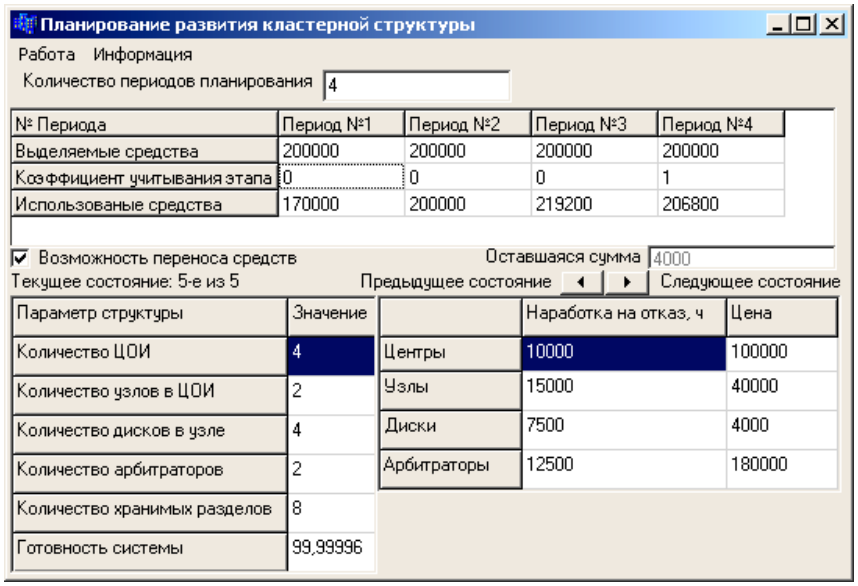
2) блока анализа надежности кластерной структуры, импортирующего результаты измерений в базу данных;

3) блока планирования развития кластерной структуры.

Для построения плана развития кластерных структур используется модуль планирования развития. При этом необходимо произвести ввод количества этапов планирования и ввод сумм, которые могут быть использованы на каждом этапе. С помощью соответствующего элемента можно также разрешить перенос неиспользованных денежных средств на следующие этапы планирования. После этого можно просмотреть планируемое состояние кластерной структуры (см. рисунок).

Таким образом, система компьютерной поддержки позволяет реализовать функции модельного блока прототипов для выбора гарантоспособных компонентов кластерной структуры АСУ КС, а также провести ознакомление с предметной областью: многоатрибутивными методами повышения надежности структурно-избыточных информационно-управляющих подсистем АСУ КС.

Анализ возможностей кластеризации автоматизированных систем управления космическими системами показал, что решение задачи формирования плана развития структуры АСУ КС может быть реализовано в виде максимизации целевой функции на множестве состояний системы. Для решения данной задачи в рамках программного комплекса были разработаны и реализованы алгоритмы анализа надежности и формирования плана развития кластерной системы. Результатом является программный комплекс анализа надежности и формирования плана развития гарантоспособных кластерных структур АСУ КС.



Окно программы «Планирование развития кластерных структур» с результатом планирования на последнем этапе

Разработанный программный комплекс позиционируется как система поддержки принятия решения в управлении развитием кластерных структур автоматизированных систем управления космическими системами.

Полученный план развития кластерной структуры системы напрямую зависит от выбранных экспертом для исследования вариантов состояния системы. Поэтому сформированный с помощью программного комплекса план развития кластерной структуры АСУ КС является субоптимальным.

На основе проведенной работы можно заключить, что кластеризация автоматизированных систем управления космическими системами является эффективным способом повышения надежности работы системы в целом и, следовательно, гарантоспособности реализации функциональных задач автоматизированных систем управления космическими системами.

Библиографические ссылки

1. Прудков В. В. Программные средства автономной отработки подсистем блока управления перспективных космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 1 (27). С. 7–9.

2. Носов В. И., Бактеев В. Н., Штанюк Л. А. Теория массового обслуживания // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29). С. 20–24.

3. Антамошкин О. А. Система поддержки принятия решений на основе многоатрибутивных методов // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 19–23.

4. Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Завьялова О. И. Формирование топологической структуры автоматизированной системы управления космическими системами // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2 (35). С. 82–86.

5. Шаймарданов Л. Г., Бойко О. Г. Метод решения задачи расчета надежности сложных систем при переменных параметрах потоков отказов агрегатов // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 3 (36). С. 131–133.

R. Yu. Tsarev, D. V. Kapulin, O. I. Zavialova, A. V. Demish

MODEL AND ALGORITHM CONFORMING OF PLANNING THE CLUSTER STRUCTURE OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF SPACE SYSTEMS

This paper presents a set of models for planning the development of automated control system of space systems. Particular attention is paid to improvement of reliability of automated control systems of space systems with respect to their clustered architecture organization.

Keywords: space system, cluster architecture, automated control system.

© Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Завьялова О. И., Демиш А. В., 2011

УДК 681.3

Е. А. Энгель

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИ ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ*

Применение классических математических методов для решения задач принятия решений затруднено, но эффективны интеллектуальные системы, представляющие собой синтез адаптивных и традиционных математических алгоритмов. На основе анализа существующих методологий интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений разработана модифицированная нечеткая нейросеть, устраняющая недостатки существующих методологий и более эффективная.

Ключевые слова: нечеткая нейронная сеть, принятие решений, интеллектуальные системы.

Анализ функционирования сложных технических объектов и систем и управление ими составляет основное содержание работы управленцев, аналитиков, специалистов в области обработки информации. Разработка методов и алгоритмов такого анализа и управления является предметом исследования многих направлений науки. Разработанные теории позволили и позволяют эффективно решать многие практические задачи как обработки информации, так и управления. Однако всегда существовал и существует значительный класс реальных задач, для которых применение классических математических методов либо невозможно, либо затруднено. Это связано с естественным разрывом между предположениями, на которых базируются те или иные математические методы, и свойствами информации о реальных объектах реальной задачи.

*Исследования выполнены в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Указанные задачи характеризуются сложной структурой объекта; необходимостью быстрого принятия решения на основе переработки больших объемов информации в условиях постоянно меняющихся внешних и внутренних характеристик системы; стохастическим и динамическим характером процессов в объекте; большой размерностью вектора входных факторов (десятки и сотни); наличием качественных, порядковых и количественных факторов; мультиколлинеарностью вектора входных факторов; дефицитом наблюдений и др.

Вышеперечисленные особенности приводят к повышению сложности описания модели при решении слабо формализованных задач. В таком случае говорят о необходимости информационной поддержки решения задачи, т. е. о необходимости разработки набора методов и технологических решений, позволяющих получить достоверное решение задачи. Такими задачами являются следующие:

– разработка и оптимизация информационных моделей для обеспечения лиц, принимающих решение (ЛПР), достаточным объемом актуальной релевантной информации;

– разработка эвристических процедур, позволяющих «отсеивать» заведомо «плохие» варианты решения задачи;

– разработка алгоритмов обработки неколичественной нечеткой информации для принятия на ее основе управленческих решений;

– разработка и реализация информационно-коммуникационной инфраструктуры систем поддержки принятия решений (локальных и корпоративных сетей).

Важным свойством таких систем поддержки принятия решений является наличие двух взаимодействующих компонентов: человека и компьютерной (формальной) системы. Основной проблемой разработки таких систем является учет человеком динамики реальных объектов, анализ и обработка неколичественной нечеткой информации и интерпретация результатов в формальной компоненте системы. При этом возникает также необходимость оптимизации алгоритмов взаимодействия компонент человеко-компьютерных систем и обработки нечеткой информации для принятия решений. В целом это представляет собой актуальную научную проблему. Реализация систем интеллектуального анализа данных на базе нечеткой нейросети – синтеза алгоритмов нейроинформатики и нечеткой логики – повышает качество обработки информации и снижает вычислительные затраты. Оптимальный результат обработки информации выбирается из широкого набора вариантов по условию наилучшей комплексной оценки эффективности моделей анализа данных. Создание и развитие новых методов решения слабо формализованных задач основано на автоматизации некоторых интеллектуальных функций анализа данных. На этом пути в настоящее время общезначимым является использование интеллектуальных информационных алгоритмов [1].

Аналитический обзор методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений. Построение систем интеллектуального анализа данных возможно дедуктивными и индуктивными способами [2].

Группа BISC в университете Беркли, Калифорния под руководством Лофте Задэ успешно реализует дедуктивный подход – нечеткую логику.

Группа красноярских ученых использовала индуктивный нейросетевой подход для решения широкого круга задач в различных областях человеческой деятельности. Достижения нейроинформатики в решении технологических задач привели к созданию целого спектра разнообразных нейронных сетей: сетей с прямым распространением сигнала, рекуррентных сетей, радиально базисных сетей.

Группа нейросетевых исследований (Neural Networks Research Group) в Университете Остина, штат Техас, под руководством Ристо Миккулайнена (Risto Miikkulainen) в рамках индуктивного подхода синтезирует нейросетевые и эволюционные алгоритмы, как и группа украинских ученых, разрабатывающих метод группового учета аргументов, предложенный Алексеем Григорьевичем Ивахненко. Метод группового учета аргументов был синтезирован с нечеткими алгоритмами.

Современные исследования интеллектуального анализа данных развиваются в направлении от экспериментальных систем до коммерческих систем – BI (Business Intelligence) [3]. Коммерческие системы имеют узкую специализацию и функциональный набор, востребованный рынком. NeurOK Data Mining Suite (разработка фирмы НейрОК Интелсофт) – это эффективное решение задач моделирования и обобщения данных, а также прогнозирования и оптимизации на основе технологий нейронных сетей, кластерного анализа и байесовой статистики. Показательно, что крупные производители систем баз данных (Oracle Inc.) включают в состав программного продукта систему описания и интерпретации бизнес-правил в форме продукций ЕСЛИ-ТО и систему логического вывода действий. Любое действие, которое выводится из бизнес-правил, реализуется в системе как транзакция обработки данных. Система Cognitive «Эксперт» (разработка фирмы Cognitive Technologies Ltd) предназначена для построения информационно-аналитических систем. В.Г. Царегородцев разработал систему нейросетевого анализа данных NeuroPro, которая реализует обычные слоистые нейросети. Автором разработана система MegaNeuro, послойно формирующая модифицированную нейросеть [4] из обычных однослойных нейросетей на основе метода группового учета аргументов. Эксперименты показывают, что система MegaNeuro эффективнее NeuroPro и нейросетвого пакета Matlab 5.0, поскольку модифицированная нейросеть реализует процедуру дообучения посредством сохранения основной части настроенной структуры нейросети; оценка константы Липшица модифицированной нейросети на порядок ниже оценки константы Липшица обычной слоистой ней-

росети; ошибка на тестовом множестве у модифицированной нейросети ниже, чем у обычной слоистой нейросети. Принципиальным отличием разработанной системы интеллектуального анализа данных MegaNeuro является синтез модифицированной нейросети (адаптация метода группового учета аргументов к нейросети) и нечеткой логики. Созданы развитые архитектуры гибридных систем: нечетких нейронных сетей, нечетких нейронных сетей с генетической настройкой параметров. Гибридные системы включают в себя слои радиально базисных нейронов, логических нейронов, традиционных пороговых суммирующих нейронов. Далее будем называть именно их гибридными системами. Алгоритм их обучения обычно комбинирует соревновательное обучение (по алгоритму победителя), генетическую оптимизацию параметров и классический метод обратного распространения ошибки. Опыт решения задач распознавания образов и классификации показывает, что для идентификации каждого класса объектов требуется обученная модифицированная нейросеть. Указанное обстоятельство и универсальные аппроксимационные свойства нейросетей хорошо укладываются в понятие функции принадлежности. Реализация последней как модифицированной нейросети позволяет избегать априорных предположений о характере распределения данных. Поскольку модифицированная нейросеть реализует процедуру дообучения посредством сохранения основной части настроенной структуры нейросети, возможна автоматическая корректировка функции принадлежности, т. е. создание базы знаний, обновляемой автоматически по мере поступления новой информации. При данном способе сохраняются все преимущества индуктивного (нейроинформатика) и дедуктивного (нечеткая логика) подходов. Селективная нечеткая нейросеть, реализуемая ПП MegaNeuro, имеет ряд отличий от существующих аналогов: структурно она представляет собой совокупность обученных модифицированных нейросетей и слоя специализированных нейронов, осуществляющих нечеткий вывод.

Постановка задачи. В достаточно общем виде задача принятия управленческих решений при интеллектуальной поддержке может быть представлена схемой

$$\{\{Y\}, \Phi\} \rightarrow Y^*,$$

где $\{Y\}$ – множество объектов (альтернатив); Φ – функция выбора (правило, устанавливающее предпочтительность на множестве альтернатив); Y^* – выбранные альтернативы (одна или более). Задача интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений – генерация множества объектов (альтернатив) и оценка принятия альтернативы в результате решения слабо формализованной задачи (СФЗ).

Под СФЗ в данной работе понимается набор, содержащий m точек экспериментальных данных $Z^i = (V_1^i, V_2^i, ..., V_c^i, \Omega_1^i, \Omega_2^i, ..., \Omega_q^i, W_1^i, W_2^i, ..., W_d^i)$, где $i \in \{1,.., m\}$; W – вектор ожидаемых реакций системы; V – вектор возможных состояний системы, представляющих собой количественное или качественное описание важнейших ресурсов, признаков и характеристик; Ω – вектор воздействий внешней среды. В рамках кибернетического подхода, используя принцип «черного ящика», функционирование системы может быть описано некоторой (неизвестной) вектор-функцией

$$Y = F(X), \quad (1)$$

где $X = \{(V_1^i, V_2^i, ..., V_c^i, \Omega_1^i, \Omega_2^i, ..., \Omega_q^i) | \ i = 1, ..., m\}$, $Y = W$.

Задачей моделирования является идентификация системы, состоящая в нахождении функционального отношения, алгоритма или системы правил в общей форме

$$Y' = G(X,p), \quad (2)$$

ассоциирующей вектор X с вектором Y' таким образом, что Y' и Y близки в некоторой метрике, отражающей цели моделирования, где p – вектор параметров модели $\hat{G}$. Отношение (2), воспроизводящее в указанном смысле функционирование системы, получило название «модель системы».

Термин «системы поддержки принятия решений» появился в начале 1970-х гг. С тех пор дано много определений СППР. Одно из них звучит следующим образом: «Системы поддержки принятия решений являются человеко-машинными объектами, которые позволяют лицам, принимающим решения (ЛПР), использовать данные, знания, объективные и субъективные модели для анализа и решения слабо формализованных и неструктурированных задач». Слабо формализованные задачи содержат как количественные, так и качественные переменные, причем качественные аспекты имеют тенденцию доминировать.

СППР состоит из одной или нескольких подсистем, представляющих собой информационные модели решения конкретных задач. Каждая из этих подсистем содержит компоненты, выполняющие соответствующие функции СППР:

– производят оценку обстановки (ситуаций), осуществляют выбор критериев и оценивают их относительную важность;

– генерируют возможные решения (сценарии действий);

– осуществляют оценку сценариев (действий, решений) и выбирают лучший;

– моделируют ситуацию принятия решения (в тех случаях, когда это возможно);

– осуществляют динамический компьютерный анализ возможных последствий принимаемых решений;

– производят сбор данных о результатах реализации принятых решений и осуществляют оценку результатов.

Для СФЗ характерны неопределенности вследствие свойств экспериментальных данных.

Во-первых, пространства входных и выходных переменных не могут, в общем случае, содержать все параметры, существенные для описания поведения системы. Это связано как с техническими ограничениями, так и с ограниченностью наших представлений о моделируемой системе. Кроме того, при увели-

чении числа переменных для построения модели необходимо увеличить объем экспериментальных данных. Эффект опущенных (скрытых) входных параметров может нарушать однозначность моделируемой функции.

Во-вторых, в данных всегда присутствуют ошибки разной природы, шум, а также противоречия отдельных измерений друг другу. За исключением простых случаев, искажения в данных не могут быть устранены полностью.

В-третьих, экспериментальные данные могут содержать пропущенные значения (например, вследствие потери информации, отказа измеряющих датчиков, невозможности проведения полного набора анализов и т. п.).

Меру достижения решения СФЗ будем характеризовать показателем e. При идентификации модели СФЗ возникает задача принятия решений в условиях неопределенности: при заданных условиях Z, с учетом неизвестных факторов ξ найти такую модель $\hat{G}$ во множестве реализуемых моделей решения СФЗ Q ($\hat{G} \in Q$), которая обеспечивает глобальный экстремум показателя e, соответствующий оптимальному решению задачи. Показатель e зависит от всех трех групп факторов $e = \rho(Z, \xi, Q)$. Однако, как показывает практика, для приемлемого решения СФЗ достаточно найти «хороший» локальный экстремум. Поэтому при заданных условиях во множестве реализуемых моделей решения СФЗ Q ищутся такие модели $\dot{G}_R$ ($\dot{G}_R \in Q$), которые обеспечивают приемлемое решение задачи, соответствующее приемлемому значению оценки показателя $e_R = \rho(Z, \xi, \dot{G}_R)$, где $R \in \{1, ..., K_0\}$. Такая задача трудноразрешима классическими методами оптимизации.

Формальный выбор критерия оценки достижения приемлемого решения СФЗ заключается в нижеследующем.

Для решаемой задачи существует допустимая абсолютная погрешность E' в значении системной функции $B = F(U)$, где U и B – области соответственно определения и значения функции. Иначе говоря, выполняется соотношение $B \approx F(U) \pm E'$. Приемлемое решение соответствует таким моделям $\dot{G}_R$, что на всей области определения U значения модельной функции $B'_R = \sigma(U, p^R)$ и системной $F(U)$ отличаются не более чем на E', т. е. $\forall \chi \in \{1, ..., \eta\}$ выполняется условие

$$\sup_U \left| B_\chi - B'_{R_\chi} \right| \le E'_\chi. \qquad (3)$$

Левая часть неравенства (3) представляет собой максимальную ошибку модели $\dot{G}_R$, прямое измерение которой на практике недостижимо, поскольку системная функция при произвольных значениях аргумента неизвестна. Таким образом, значение показателя e_R оценивается максимальной ошибкой модели $\dot{G}_R$.

В данной работе максимальная ошибка модели $\dot{G}_R$ оценивается значением вектора E_R, элементы которого $E_R\chi$ вычисляются по формуле

$$E_{R_\chi} = \max_X \left\| Y'_{R_\chi} - Y_\chi \right\|, \qquad (4)$$

где $\chi \in \{1, ..., \eta\}$, $Y'_R = \sigma(X, p^R)$. Величина E_R представляет собой оценку максимальной ошибки модели. Приемлемое решение вырабатывает модель $\dot{G}_R$, для которой выполняется соотношение

$$E_R \le E'. \qquad (5)$$

Таким образом, соотношение (5) – критерий оценки достижения приемлемого решения СФЗ. Если условие (5) истинно, то СФЗ решена; если ложно – точность решения СФЗ посредством реализации модели $\dot{G}_R$ будет ниже предъявленной.

Существует множество алгоритмов решения задачи выбора модели, дающей приемлемое решение СФЗ. Важнейшим из них является метод идентификации модели объекта для дальнейшего сопоставления их параметров, т. е. модификации p – вектора параметров модели. В последнее время методы идентификации сводят к двум основным направлениям:

– детерминистическому, основанному на анализе причинно-следственных связей, причем он включает в себя как детерминированные, так и статистические методы;

– методу эвристической самоорганизации, который включает в себя методы селекции, эволюции и адаптации.

Решение СФЗ представляет собой итерационный процесс взаимодействия человека и модели системы (рис. 1).

Итерация состоит из фазы анализа и подбора входных данных V^{new} для модели системы, выполняемой лицом, принимающим решение, и фазы оптимизации (поиска решения Y^{new} и выполнения его характеристик), реализуемой моделью системы.

Можно выделить несколько типов моделей, отличающихся по характеру запросов к ним. Перечислим лишь некоторые из них.

1. Моделирование отклика системы на внешнее воздействие.

2. Классификация внутренних состояний системы.

3. Прогноз динамики изменения системы.

4. Оценка полноты описания системы и сравнительная информационная значимость параметров системы.

5. Оптимизация параметров системы по отношению к заданной функции ценности.

6. Адаптивное управление системой.

Описываемые модели решают задачи, каждая из которых допускает постановку комбинированной задачи. В данной работе рассматривается широкий класс СФЗ: классификация объектов системы. Если в системе количество классов неизвестно, возможно путем проведения кластеризации свести проблему к задаче классификации.

Постановка задачи классификации внутренних состояний системы: известна принадлежность некоторого набора объектов $\{a^1, a^2, ..., a^m\} \subset A$ к подмножествам A_j, где $j \in \{1, ..., M\}$, M – количество классов; $A_1 \cup A_2 \cup ... \cup A_M \subset A$. Условие $A_\chi \cap A_\psi = \varnothing$ выполняется $\forall \chi \in \{1, ..., M\}$ и $\forall \psi \in \{1, ..., M\}$, где $\chi \ne \psi$.

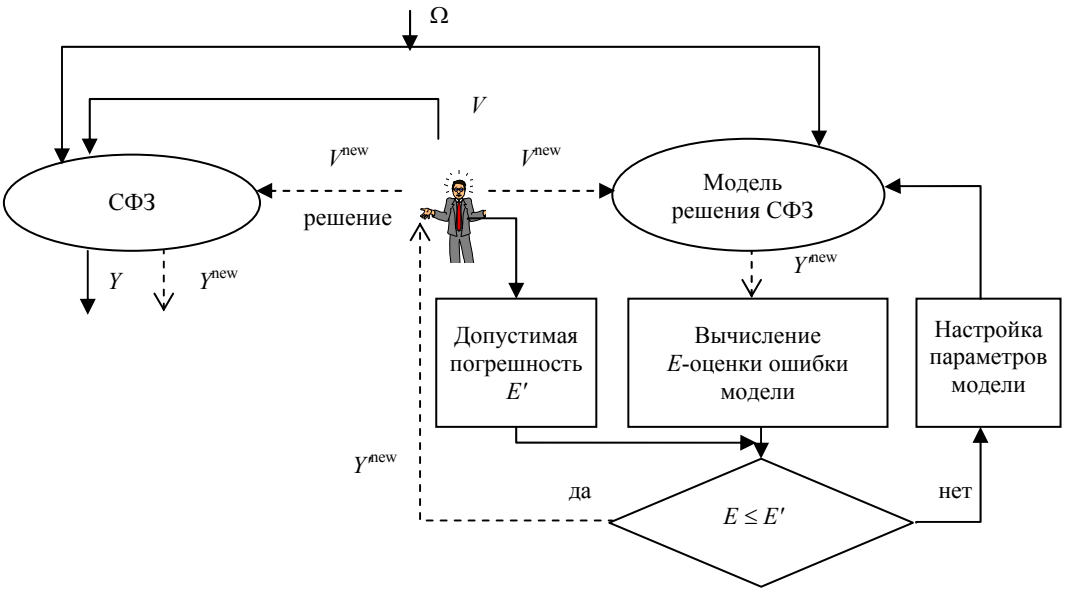


Рис. 1. Структурная схема решения СФЗ

Классифицировать набор объектов $\{a^{m+1}, a^{m+2}, ..., a^{m+l}\} \subset A$, т. е. $\forall k \in \{m + 1, m + 2, ..., m + l\}$ определить принадлежность объекта a^k к одному из подмножеств A_j, при условии, что $\{a^1, a^2, ..., a^m\} \cap \{a^{m+1}, a^{m+2}, ..., a^{m+l}\} = \varnothing$. Каждый объект характеризуется вектором X, представляющим собой количественное или качественное описание важнейших ресурсов, признаков и числом $Y \in \{1, ..., M\}$, равным идентификатору соответствующего класса. Решающее правило классификации может быть описано некоторой (неизвестной) вектор-функцией $Y = F(X)$.

Задачей моделирования является идентификация системы, состоящая в нахождении функционального отношения, алгоритма или системы правил в общей форме (2), ассоциирующей вектор X с вектором Y' таким образом, что Y' и Y близки в некоторой метрике, отражающей цели моделирования.

Допустимая относительная погрешность в значении системной функции $B = F(U)$: $E' < 0{,}5$, так как B – целое число. Примем $E' = 0{,}4$. Приемлемое решение вырабатывается моделью $\hat{G}$, для которой выполняется соотношение (5).

Поставленные в данном пункте СФЗ требуют для своего решения методов, адекватных по сложности моделируемому объекту. Идентификация модели СППР, выбор метода и средств идентификации также представляют собой слабо формализованные задачи. Основой для принятия решения зачастую является субъективный опыт и интуиция эксперта, следовательно, автоматизация решения СФЗ представляет собой довольно сложную задачу. Решение ее ведется в рамках таких научных направлений, как искусственный интеллект (ИИ) и теория распознавания образов.

Метод решения. Гибридные системы, которые в качестве базовой используют нейронные сети, интерпретируемые как системы нечеткого вывода, называются нечеткими нейронными сетями. Рассмотрим далее нечеткие нейронные сети как пример успешной технологии вычислительного интеллекта. Глубинная интеграция нечетких систем и нейросетей связана с разработкой новой архитектуры элементов нейросети. Для интеграции двух технологий – нечетких систем и нейрокомпьютинга – необходимо предложить способ четкого дискретного представления непрерывных функций принадлежности. Один из способов – выбор максимально большого интервала $[x_1, x_2]$, в котором представлены все нечеткие множества условных частей правил. Если разбить интервал с равным шагом, то любое нечеткое значение представляется четким вектором. Другой способ представления нечеткого понятия в виде четких данных состоит в представлении нечеткого множества в виде совокупности α-срезов (рис. 2).

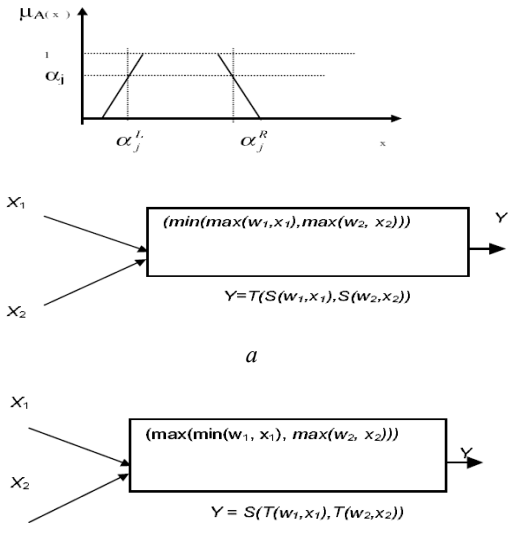


Рис. 2. α-срез, И- и ИЛИ-нейроны

При использовании α-срезов каждое α_i-подмножество представляется двумя числами – левой и правой границами: α-L_{ij}, a-R_{ij}, где j – номер α-среза, а i – номера точек на его левой и правой границах, т. е. α-срезы четко представляют непрерывную функцию принадлежности. Модификация модели нейрона для адаптации к нечетким системам касается выбора функции активации, реализации операций сложения и умножения, так как в нечеткой логике сложение моделируется любой треугольной конормой (например, max, $a + b – a \cdot b$, ...), а операция умножения – треугольной нормой (min, $a \cdot b$, ...).

И-нейроном называется нейрон, в котором умножение веса w на вход x моделируется конормой $S(w, x)$, а сложение – нормой $T(w, x)$.

Для двухвходового И-нейрона справедлива формула

$$Y = T[S(w_1, x_1), S(w_2, x_2)].$$

ИЛИ-нейроном называется нейрон, в котором умножение веса w и входа x моделируется нормой $T(w, x)$, а сложение взвешенных весов – конормой $S(w, y)$. Для двухвходового ИЛИ-нейрона справедлива формула

$$Y = S[T(w_1, x_1), T(w_2, x_2)].$$

Если выбрать в качестве Т-нормы min, а max – в качестве S-нормы, то формула преобразования ИЛИ-нейрона уточняется следующим образом:

$$\max[\min(w_1, x_1), \min(w_2, x_2)].$$

В качестве функции активации обычно используют радиальную базисную функцию $F(x) = \exp[–b \cdot (x^2 – a)]$.

Нечеткой нейронной сетью (ННС) обычно называют четкую нейросеть, которая построена на основе многослойной архитектуры с использованием И-, ИЛИ-нейронов. Нечеткая нейросеть функционирует стандартным образом на основе четких действительных чисел. Нечеткой является только интерпретация результатов.

Системы нечетких продукций строятся на основе понятия лингвистической переменной, которой называют пятерку объектов: ‹x, $T(x)$, U, G, M›, где x – собственное имя переменной; $T(x)$ – терминальное множество, т. е. набор значений переменной (нечетких меток); U – множество объектов (или универсум); G – синтаксические правила употребления; M – семантические правила употребления.

При создании гибридной технологии кроме объединения систем по данным можно использовать нейрокомпьютинг для решения частной подзадачи нечетких экспертных систем, а именно настройки параметров функции принадлежности. Функции принадлежности можно сформировать двумя способами: методом экспертной оценки; на основе статистики. Гибридные технологии предлагают третий способ: в качестве функции принадлежности выбирается параметризованная функция формы (например, гауссова кривая с параметрами b, a), параметры которой настраиваются с помощью нейросетей. Настройка параметров может быть получена в рамках алгоритма обратного распространения ошибки. Автором разработан метод формирования функции принадлежности для задачи классификации на основе модифицированной нейросети, который заключается в следующем: для каждого $j \in \{1, ..., M\}$, M – количество классов, формируется модифицированная нейросеть, реализующая классификацию $Y' = \begin{cases} 1, \text{если } X \in j \\ 0, \text{если } X \notin j \end{cases}$. Таким образом формируются M модифицированных нейросетей, которые образуют M функций принадлежности. Затем формируется логическая схема введения в структуру модифицированной нейросети И-, ИЛИ-нейронов. Таким образом, модифицированная нечеткая нейронная сеть наряду с классическими нейронами, являющимися пороговыми суммирующими элементами, включает в себя И-, ИЛИ-нейроны. Далее используется механизм нечеткого вывода Мамдани (Mamdani).

Результаты эксперимента. Используя разработанный метод построения и функционирования модифицированной нечеткой нейросети, была решена задача принятия решений WCCI 2010 – ORANGE [5]. ORANGE является маркетинговой набора данных. Управление взаимоотношениями с клиентами является ключевым элементом современных маркетинговых стратегий. Этот набор данных был извлечен из большой базы данных маркетинговых материалов от французской компании Telecom. Цель состоит в том, чтобы предсказать склонность потребителей сменить провайдера (отток), купить новые продукты или услуги (влечение), или купить обновления или дополнения по более выгодным предложениям (сверхпродажи). Трудности включают гетерогенную интерференцию зашумленных данных (числовые и категориальные переменные), а также несбалансированное распределение класса, что характеризует данную задачу как СФЗ. Категориальные переменные следующие:

3 10 16 25 27 32 33 47 49 59 65 73 75 76 79 81 88 96 98 100 105 112 113 121 128 132 138 140 141 148 152 153 154 167 173 181 187 194 209 216.

Данные задачи ORANGE разделены на части: обучающее множество, зачетное и тестовое. Для настройки модели использовали обучающее множество и входные данные зачетного множества. Сначала получили базу данных, используя численное представление категориальных переменных. В результате экспериментов была создана модифицированная нечеткая нейросеть, включающая в свою структуру три модифицированных нейросети, реализующих функции принадлежности трем классам и одного И-нейрона и двух ИЛИ-нейронов, с помощью программного обеспечения R и пакета MegaNeuro. Использование разработанной модифицированной нечеткой нейросети позволило повысить рейтинг решения задачи с 7 до 5 по сравнению с результатом нечеткой нейросети [5]. Оценка модифицированной нечеткой нейросети в сравнении с другими методами, успешно примененными к данной задаче (разновидности деревьев решений и Байесовские нейронные сети), отражена в таблице.

Рейтинг решения задачи ORANGE WCCI 2010

Рейтинг	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Оценка (AUC)	0,810 102	0,721 316	0,813 333	0,787 346	0,787 543	0,788 271	0,788 21	0,787 634	0,787 244	0,813 333

Таким образом, экспериментально, в сравнении с традиционными математическими и интеллектуальными методами, показана целесообразность использования и подтверждена высокая точность разработанной иерархической интеллектуальной системы для принятия решений. Показана целесообразность использования модифицированной нечеткой нейросети для моделирования систем поддержки принятия решений.

Библиографические ссылки

1. Технологии анализа данных / А. А. Барсегян и др. СПб. : БХВ-Петербург, 2007.

2. Анализ данных и процессов / А. А. Барсегян и др. СПб. : БХВ-Петербург, 2009.

3. Паклин Н. Б., Орешков В. И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. СПб. : Питер, 2009.

4. Энгель Е. А. Модифицированная нейросеть для обработки информации с использованием селекции существенных связей : автореферат дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2004.

5. Энгель Е. А., Ковалев И. В. Использование интеллектуальных методов для обработки информации на примере решения задач WCCI 2010 // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 3 (34). С. 4–9.

E. A. Engel

MODELS AND METHODS OF INTELLECTUAL SUPPORT IN MANAGEMENT DECISIONS FOR TECHNICAL SYSTEMS

Application of classical mathematical methods to solution of decision-making problems is somewhat difficult, but intelligent systems are more effective in such a case since intelligent systems are the synthesis of adaptive and conventional mathematical algorithms. On the basis of analysis of existing methodologies for intellectual support of management decisions, the author justifies the developed modified fuzzy neural network, as one, eliminating the drawbacks of existing methodologies, and being more effective.

Keywords: fuzzy neural network, decision making, intelligent systems.

© Энгель Е. А., 2011

Раздел
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.642.6

А. С. Васильцов, В. Н. Подвезенный

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ С ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

Описаны причины образования углеводородных загрязнений, виды загрязнений: поверхностные и глубинные. Рассмотрены теоретические основы процесса удаления загрязнений с помощью жидкого CO_2. Приведены формулы количественной оценки углеводородных загрязнений. Предложен механизм удаления углеводородных загрязнений с поверхности и устьев пор с помощью явлений термического «шока» и «газового клина». Рассмотрена эффективность очистки. Выведены уравнение условий непрерывности процесса бластинга топлива из открытых пор металла и формула определения времени процесса удаления загрязнений.

Ключевые слова: удаление загрязнений, глубинные загрязнения, криогенный бластинг, эффективность очистки, время очистки.

Проблемы подготовки (нейтрализация, промывка, обезжиривания) топливных баков летательных аппаратов и автомобилей (далее резервуаров), загрязненных нефтепродуктами, является актуальной как с точки зрения экологической и пожарной безопасности, так и значительных финансовых и трудовых затрат.

Загрязнения резервуаров, предназначенных для хранения нефти и нефтепродуктов, характеризуются большим содержанием асфальто-смолистых веществ, карбенов и карбоидов, представляющих собой твердые эмульгаторы, что создает значительные трудности при их очистке.

Отложения в резервуарах после хранения светлых нефтепродуктов характеризуются большим содержанием неорганических соединений, представляющих собой в основном продукты коррозии и иловые отложения.

Большое влияние на состав нефтеостатков оказывают смешение различных сортов нефтепродуктов, многократные подогревы и длительные сроки эксплуатации резервуаров без периодических очисток, в этом случае происходит накопление большого количества осадков, их уплотнение и образование твердой массы [1].

Определение количества загрязнений конструкционных материалов. Поскольку поверхностный слой конструкционного материала не является однородным и имеет дефекты, которые схематически рассматриваются [2] как трещины, щели клиновидного сечения (устья пор), неравномерно распространенные по его поверхности и глубине [3], то загрязнению подвергается не только наружная часть поверхностного слоя металла, но и внутренняя.

В начальный период налива нефтепродукта в резервуар за счет процессов сорбции, вызванных контактом металла топлива, происходит загрязнение наружного слоя поверхности металла топливом – образуется поверхностное загрязнение. В дальнейшем за счет диффузионных процессов нефтепродукт проникает через устье поры вглубь капиллярных пор и в результате адсорбции и капиллярной конденсации [4] заполняет их, образуя при этом глубинное загрязнение конструкционного материала.

В нашей работе глубинные загрязнения принимаются как загрязнения устьев пор, так как здесь находится основной объем глубинных загрязнений. Углеводороды, находящиеся в капиллярных порах, не оказывают значительного влияния на качество очистки поверхности.

При эксплуатации резервуара из объема хранимого нефтепродукта на внутреннюю поверхность резервуара оседают и адгезируются механические примеси, продукты разложения топлив и коррозии металлов.

Таким образом, после слива из резервуара основного количества нефтепродуктов на его стенках остаются адгезированные, поверхностные и глубинные загрязнения в виде инородных частиц и остатков топлив, находящихся в различных фазовых состояниях. Трудоемкость их удаления зависит от величины сил связи загрязнений с конструкционными материалами [5].

Загрязнения, в зависимости от их связи с твердым телом, бывают нефиксированными, слабофиксированными и прочнофиксированными. Адгезированные загрязнения соответствуют нефиксированным, а поверхностные и глубинные – слабофиксированным и прочнофиксированным [6].

Поверхностными и глубинными загрязнениями являются остатки нефтепродуктов, находящихся в резервуаре в различных фазовых состояниях. Суммарное количество остатков нефтепродуктов, удаляемое из резервуара ($M_б$), определяются по уравнению

$$M_б = M_{АД} + M_{ПМ}, \quad (1)$$

где $M_{АД}$ – масса нефтепродукта, адсорбированного наружной поверхностью конструкционных материалов, кг; $M_{ПМ}$ – масса нефтепродукта в устьях пор материала, кг.

Лимитирующей стадией процесса удаления остатков нефтепродуктов из резервуара является стадия удаления глубинных загрязнений – остатков топлив, находящихся в тупиковых порах металла, масса которых составляет 10–14 % от общей массы остатков топлив [7].

При проведении процесса удаления нефтепродуктов из пор конструкционных материалов необходимо

знать величину средней текущей (остаточной) концентрации нефтепродукта в порах, которая определяется уравнением

$$C_i = \frac{M_i}{\sum V_n}, \quad (2)$$

где C_i – текущая концентрация нефтепродукта в порах, кг/м^3; M_i – остаточное массосодержание нефтепродукта в порах, кг; $\sum V_n$ – суммарный объем пор в конструкционных материалах резервуара, м^3.

Исходя из условий непрерывности процесса удаления нефтепродуктов, определим остаточное массосодержание нефтепродукта в устьях пор металла:

$$\mathrm{M}_i = \mathrm{M}_o - \mathrm{M}', \quad (3)$$

где M′ – масса нефтепродукта в чистящем веществе, кг; M_o – исходное массосодержание нефтепродукта в устьях пор конструкционных материалов резервуара, кг, здесь

$$\mathrm{M}_o = \int_{\sum V_n} C_o dV_n, \quad (4)$$

где C_o – начальная концентрация нефтепродуктов в устьях пор, кг/м^3.

Так как в большинстве случаев начальная концентрация нефтепродуктов в устьях пор равна его плотности ($C_o = \rho_к$), а значение $\rho_к$ есть величина постоянная для каждого резервуара, то уравнение (4) можно записать:

$$\mathrm{M}_o = \rho_k \cdot \sum V_n, \quad (5)$$

где $\rho_к$ – плотность нефтепродукта, кг/м^3.

Количество нефтепродукта, удаленное из устьев пор конструкционных материалов резервуара за время, прошедшее от начала бластинга, равно

$$\mathrm{M}' = C' \times V', \quad (6)$$

где C' – текущая концентрация нефтепродукта в чистящем веществе, кг/м^3; V' – суммарный объем чистящего вещества, м^3.

Подставив в уравнение (2) значения уравнений (3), (5), (6), получим

$$C_i = \rho_k - \frac{C'V'}{\sum V_n}. \quad (7)$$

Таким образом, полученные уравнения дают возможность определить значения величин C_i, M_i, знание которых необходимо для оперативного управления процессом удаления остатков нефтепродуктов из резервуара и повышения качества зачистных работ.

Сущность процесса криогенного бластинга. Криогенный бластинг – это пневмо-абразивоструйный способ обработки поверхности. Гранулы сухого льда имеют значительно более низкую температуру, чем очищаемая поверхность. Резкое снижение температуры поверхностного слоя вызывает эффект «термического удара», при котором охлажденные до хрупкого состояния загрязнения легко отслаиваются от поверхности. Чем больше температурный градиент, тем меньше адгезия между материалом поверхности и загрязнениями ввиду различия их коэффициентов линейного расширения [1]. При этом основная масса объекта не охлаждается, и механические свойства конструкций не ухудшаются, что подтверждается экспериментально.

При соударении с поверхностью объекта к гранулам сухого льда подводится огромное количество холода. В результате теплообмена твердые частицы CO_2 мгновенно нагреваются и переходят в газообразное состояние, стремясь расшириться в объеме в сотни раз. Образовавшийся газ, частично проникая в пространство между загрязнениями и очищаемой поверхностью, образует так называемый газовый клин, отламывающий под давлением частицы загрязнений от поверхности.

Для полного удаления загрязнений необходимо перманентное механическое воздействие на очищаемую поверхность. Этот процесс обеспечивается за счет кинетической энергии гранул сухого льда, вылетающих из устройства распыла со значительной скоростью [1].

Углекислый газ расширяется в объеме, и кинетическая энергия гранул сухого льда отламывает и удаляет частицы загрязнений от поверхности (рис. 1).

Определение эффективности очистки криогенным бластингом. Очистка криогенным бластингом внутренней поверхности резервуаров представляет собой удаление загрязнений с помощью твердого CO_2 с необходимой полнотой или эффективностью.

Эффективность очистки можно оценить различными величинами.

Если обозначить начальное загрязнение образца (до очистки) $\mathrm{A}_н$, а конечное загрязнение (после очистки) $\mathrm{A}_к$, то эффективность очистки можно определить соотношению

$$\alpha_o = \frac{A_к}{A_н} \cdot 100\ \%, \quad (8)$$

где α_o – доля загрязнений от начального загрязнения, которая осталась на объекте после очистки, %; β_o – доля начального загрязнения, которую удалили с объекта в результате очистки, %, здесь

$$\beta_o = \frac{A_н - A_к}{A_н} \cdot 100\ \%. \quad (9)$$

Кроме того, эффективность очистки оценивают посредством коэффициента очистки:

$$\mathrm{K}_o = \frac{A_н}{A_к}. \quad (10)$$

Коэффициент очистки, характеризуя степень очистки, показывает, во сколько раз уменьшилось в результате очистки загрязнение поверхности.

Иногда для относительно больших значений коэффициента очистки используют логарифм этих значений, который обозначают D_o и называют индексом очистки:

$$D_o = \lg \frac{A_н}{A_к} = \lg K_o. \quad (11)$$

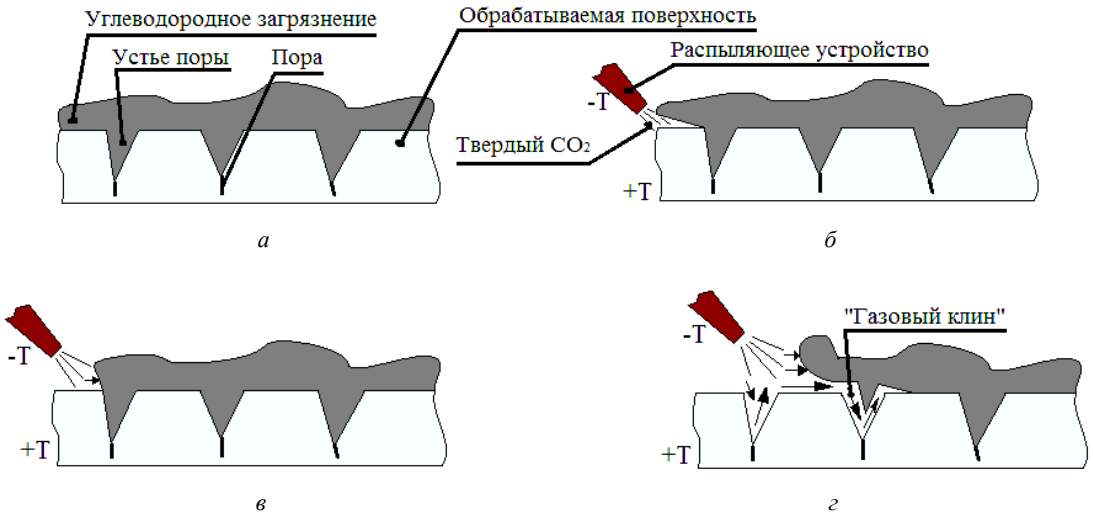


Рис. 1. Механизм удаления поверхностных и глубинных загрязнений:
а – загрязненная углеводородами поверхность; *б* – отслаивание загрязнений под влиянием Δ T;
в – удаление загрязнений в результате динамического воздействия твердых частиц CO_2;
г – удаление загрязнений из устьев пор металла газовым клином

Между величинами, определяющими эффективность очистки, существует определенная связь:

$$\alpha_o = 100 - \beta_o;\ \mathrm{K}_o = \frac{100}{\alpha};\ D_o = \lg K_o. \qquad (12)$$

Величина α_o изменяется обратно пропорционально изменению величины β_o: при понижении α_o величина β_o растет (рис. 2). Загрязнение после очистки всегда меньше начального загрязнения, поэтому $K_o > 1$.

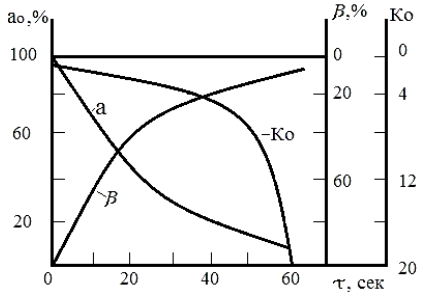


Рис. 2. Зависимость эффективности очистки от времени обработки τ, с

Максимальное значение коэффициента очистки в соответствии с уравнением 10 может быть равно бесконечности.

Итак, эффективность очистки можно определить при помощи различных величин: α_o, β_o, K_o, D_o.. Каждая из них характеризует полноту очистки и может служить критерием оценки качества работ по удалению загрязнений [6].

Определение времени очистки. В процессе криогенного бластинга удельный поток нефтепродукта, диффундирующий из объема устьев пор и проходящий через поверхность в единицу времени, согласно закону Фика, равен [8]:

$$I = -\frac{d\mathrm{M}}{S \times d\tau}, \qquad (13)$$

или, для одномерной диффузии, например, вдоль оси пор [9]:

$$I = -D_{\mathrm{M}}\left(\frac{dC}{dL}\right)_n, \qquad (14)$$

где M – масса диффундируемого вещества, кг; S – поверхность диффузии, м^2; τ – время, ч; D_{M} – коэффициент молекулярной диффузии, м^2/ч; C – концентрация нефтепродукта, кг/м^3; L – координата, нормальная к изоконцентрационной поверхности n, м.

В процессе удаления остатков загрязнений из объема устьев пор убыль топлива должна постоянно компенсироваться подводом чистящего вещества. Количество нефтепродукта, доставленного к устью поры диффузией, равно количеству нефтепродукта, поступившего в чистящее вещество в единицу времени:

$$\frac{dM'}{d\tau} = -\frac{dM}{d\tau}, \qquad (15)$$

где M – масса нефтепродукта в устьях пор, кг.

Массу нефтепродукта, перешедшего в чистящее вещество из объема устьев пор, рассчитывают по выражению

$$M' = \int_{V'} C' \cdot dV'. \qquad (16)$$

Массу нефтепродукта в устьях пор находят по формуле

$$M = \int_{\Sigma V_n} C_i \cdot dV_n. \qquad (17)$$

Для конструкционного материала, имеющего множество пор, убыль массы нефтепродукта из пор ΔM вычисляют по формуле

$$\Delta M = \int_{\Sigma V_n} (C_o - C_i) dV_n. \qquad (18)$$

Так как

$$\frac{d\Delta M}{d\tau} = -\frac{dM}{d\tau}, \quad (19)$$

то после подстановки значений уравнений (16) и (18) в уравнение (15) оно примет вид

$$\frac{d}{d\tau}\int_{V'} C' \times dV' = \frac{d}{d\tau}\int_{\Sigma V_n} (C_o - C_i)\cdot dV_n. \quad (20)$$

Уравнения (15) и (20) являются условием непрерывности процесса бластинга топлива из открытых (тупиковых) пор металла, объем которых постоянен во времени.

В процессе бластинга величина dM является потоком нефтепродуктов, извлекаемым из объема пор ΣV_n через поверхность диффузии S в единицу времени τ. С учетом уравнений (18), (19), (13) и (14) составим уравнение баланса процесса удаления нефтепродукта из открытых (тупиковых) пор поверхности конструкционных материалов резервуара:

$$\frac{d}{d\tau}\int_{\Sigma V_n} (C_o - C_i)dV_n = -D_M \int_S \left(\frac{dC}{dL}\right)_n \times dS. \quad (21)$$

Левая часть уравнения (21) выражает изменение массосодержания нефтепродукта в устьях пор металла. Правая часть уравнения учитывает изменение потока нефтепродукта под воздействием проникновения чистящего вещества в объем устьев пор.

Общее время процесса удаления нефтепродукта из устьев пор конструкционного материала, или время непрерывного контакта чистящего вещества с очищаемой поверхностью металла, находят из уравнения (21):

$$\tau = -\frac{1}{D_M}\int \frac{d\int_{\Sigma V_n}(C_o - C_i)dV_n}{\int_S \left(\frac{dC}{dL}\right)_n dS}. \quad (22)$$

Так как выражение

$$-D_M\left(\frac{dC}{dL}\right)_n$$

имеет конечную величину, то в конце процесса концентрация нефтепродукта в порах будет составлять $C_к = 0$, а весь объем устьев пор заполнен чистящим веществом. Поэтому время окончания процесса бластинга определяют по выражению

$$\tau_э = \lim_{c_к \to 0} \tau. \quad (23)$$

Таким образом, рассмотрены теоретические основы процесса удаления загрязнений с помощью жидкого CO_2. При криогенном бластинге учитываются не только поверхностные загрязнения, но и глубинные, находящиеся в устьях пор конструкционного материала. Исходя из этого предложен механизм удаления углеводородных загрязнений, сочетающий в себе термоудар с механическим воздействием. Математически определена эффективность очистки которая зависит от соотношения начального и конечного загрязнения образца. Выявлена зависимость эффективности очистки от времени обработки поверхности. Получена формула, определяющая общее время удаления углеводородов из устьев пор конструкционного материала.

Библиографические ссылки

1. Подвезенный В. Н., Васильцов А. С., Иванова С. И. Современные методы зачистки резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Красноярск : ИПК СФУ, 2009.

2. Лихтман В. И., Щукин Е. Д. Физико-химическая механика металлов. М. : Изд-во АН СССР, 1962.

3. Сулима А. М., Евстигнеев М. И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М. : Машиностроение, 1974.

4. Адсорбция в микропорах : тр. V конф. по теоретическим вопросам адсорбции. М. : Наука, 1983.

5. Зимон А. Д. Агдезия жидкости и смачивание. М. : Химия, 1974.

6. Зимон А. Д. Дезактивация. М. : Атомиздат, 1975.

7. Аксельрезд Г. А. Введение в капиллярно-химическую технологию. М. : Химия, 1983.

8. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1971.

9. Основы жидкостной экстракции / под ред. Г. А. Ягодина. М. : Химия, 1981.

A. S. Vasiltsov, V. N. Podvezenny

THEORETICAL FUNDAMENTALS OF DECONTAMINATION OF THE INNER SURFACE OF THE STORAGE TANKS

The article describes the reasons of hydrocarbon contamination and types of pollutions: surface and subsurface. The theoretical fundamentals of the decontamination process with the use of liquid CO_2 are considered. The formulas of quantitative evaluation of hydrocarbon contamination are presented.

The mechanism of hydrocarbon decontamination of the surface and pore throats with the help of thermal «shock» and the «gas wedge» is proposed, the efficiency of cleaning is considered.

The formula for determination of the time of the decontamination process has been calculated. The equation of continuity of fuel blasting process from the open pores of metal has been derived.

Keywords: decontamination, subsurface contaminations, cryogenic blasting, efficiency of cleaning, time of cleaning.

© Васильцов А. С., Подвезенный В. Н., 2011

УДК 524.33

С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин, Н. Н. Самусь

ВОСЕМЬ НОВЫХ ЗАТМЕННО-ДВОЙНЫХ СИСТЕМ В СОЗВЕЗДИИ КАССИОПЕИ

Несмотря на близость промышленных предприятий, культурных и спортивных сооружений, незамерзающий Енисей, оживленный проспект с его иллюминацией, в обсерватории Сибирского государственного аэрокосмического университета (СибГАУ) получен наблюдательный материал, по которому удалось открыть и исследовать восемь новых затменно-переменных звезд в созвездии Кассиопеи. Идентификационные номера звезд по каталогу USNO-A2.0: 1425-379853, 1425-413000, 1425-243950, 1425-458499,1425-207145, 1425-238265, 1425-424072, 1425-364307. Для поиска использовалась методика, основанная на том, что переменные звезды выпадают из общей зависимости среднеквадратического отклонения фотометрических измерений блеска звезд.

Ключевые слова: переменная звезда, затменно-переменные системы, астрономия, фотометрия, наблюдения.

Переменные звезды – это звезды, видимый блеск которых изменяется в течение времени. Многочисленные известные типы переменных звезд могут быть объединены в два больших класса – физические переменные звезды и затменные двойные системы. У первых причиной изменения блеска являются физические процессы в недрах или на поверхности звезды. У вторых блеск меняется вследствие затмений одной звезды другой.

Исследуя изменение блеска звезд, можно определить характер переменности и в результате определить, к какому типу относится данная переменная звезда. Знание типа переменности во многих случаях позволяет на основе фотометрических наблюдений оценить основные физические параметры звезды: массу, светимость, возраст, а у затменных переменных – параметры двойной системы.

Таким образом, переменные звезды дают достаточно много информации. Чем больше переменных звезд мы откроем в разных направлениях и на разном расстоянии, тем лучше будем знать нашу Галактику – Млечный Путь. Среди тысяч новых переменных наверняка окажутся интересные для астрофизики двойные системы с перетеканием вещества от одной звезды к другой, а также объекты, причину переменности блеска которых мы понимаем пока не до конца.

Благодаря интенсивному развитию электронно-вычислительной техники, компьютерных технологий и методов обработки в последние десятилетия повысилась эффективность получения информации не только на основе новых наблюдений, но и по архивным данным. В обсерваториях мира накоплены сотни тысяч фотографий звездного неба (прямых и спектральных). Начата реализация проектов по оцифровке накопленных фототек. По оцифрованным фототекам производится поиск переменных звезд [1].

Во избежание недоразумений следует отметить, что слово «новая» в словосочетании «новая переменная звезда» относится к слову «переменная», а не к слову «звезда». Другими словами, когда говорится «обнаружена новая переменная звезда», то подразумевается, что «обнаружена переменность блеска у известной звезды, считавшейся ранее не переменной».

Поиск новых переменных звезд проводился в поле площадью 2,3×2,3° с координатами центра кадра $\alpha = 00^h15^m00^s$, $\delta = 54°40'00''$ (J2000,0) в созвездии Кассиопеи. Всего за период наблюдений, с конца августа по начало ноября 2010 года, было получено около 1 500 ПЗС-изображений в интегральном свете. Наблюдения проводились в обсерватории СибГАУ при помощи телескопа-рефлектора с апертурой 400 мм и фокусным расстоянием 915 мм. В качестве светоприемного устройства использовалась ПЗС-матрица FLI ML 9 000. Масштаб изображения на матрице составляет 2,7"/пиксель.

Следует обратить особое внимание на обусловленное существующей инфраструктурой неблагоприятное расположение места наблюдений. Обсерватория расположена на крыше корпуса «П» СибГАУ. Тепловые потоки от здания и кондиционеров значительно ухудшают качество изображения. Находящиеся поблизости с корпусом промышленные предприятия, действующий стадион (на расстоянии ~700 м), незамерзающий Енисей (~1 000 м) и проспект Красноярский рабочий с оживленным движением и рекламной иллюминацией увеличивают световое и аэрозольное загрязнение. Это, в свою очередь, негативно сказывается на качестве фотометрии астрономических объектов [2].

Для экстремальных городских условий, в которых находится учебная обсерватория СибГАУ, эмпирическим путем была определена оптимальная экспозиция, которая составила 30 с. При увеличении экспозиции предельная звездная величина, фиксируемая на снимках, оставалась неизменной и составляла ~16^m.

Полученные снимки подвергались первичной обработке (учет темновых токов и плоского поля) и затем тщательно отбирались на предмет удовлетворительного качества.

С учетом того, что один снимок имеет объем примерно 18 248 Кб, полный объем 1 500 изображений составляет ~26 Гб. Оперировать такими объемами информации довольно сложно, поэтому для ускорения поиска новых переменных звезд была сделана выборка 20 снимков с приблизительно равными временными интервалами между ними, охватывающая 5 ч непрерывных наблюдений. Естественно, что такая

выборка обеспечит хорошее фотометрическое покрытие кривой блеска лишь для переменных звезд с периодом, соизмеримым с длительностью серии наблюдений (в нашем случае – 5 ч). Поле 2,3×2,3° было разделено на 36 взаимно перекрывающихся площадок размером 23×23′. В каждой площадке поиск переменных звезд проводился отдельно.

Для поиска переменных звезд использовалась программа CMunipack [3]. На электронных изображениях программа отыскивает звезды и проводит их фотометрию в условных величинах. Для каждого изображения создается файл со списком звезд, упорядоченным по убыванию блеска; их координаты выражены в пикселах. Далее исследователь выбирает опорный кадр (reference frame), и программа осуществляет отождествление звезд, найденных на разных кадрах. При активировании функции «поиск переменных звезд» строится график зависимости среднеквадратичного уклонения инструментальной звездной величины от величины на опорном кадре и блеска звезды. Поскольку ошибка фотометрии для слабых звезд больше, чем для ярких, уклонения плавно растут в сторону слабых звезд, а возможные переменные звезды расположены вне общего распределения, поскольку их блеск отличается от кадра к кадру не только из-за ошибок, но и из-за реальной переменности. Объекты, расположенные вне общего распределения, исследователь анализирует поштучно, выявляя звезды с явной переменностью. Далее, проводится проверка, не являются ли обнаруженные переменные объекты уже известными и внесенными в каталоги. Для этого проводится сравнение с базами данных Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ [4]) и Международного регистра переменных звезд VSX (The International Variable Star Index [5]). Окончательная фотометрия найденных новых переменных звезд проводилась в программе MaxIm DL; для исследования их периодичности применялась программа «Эффект» В. П. Горанского [6].

В пределах рассматриваемой площадки в созвездии Кассиопеи, используя выборку снимков, описанную выше, мы обнаружили восемь новых переменных звезд (см. таблицу). В таблице указаны координаты J2000,0, идентификация переменных звезд с каталогом USNO-A2.0, найденные типы переменности, звездные величины в максимуме и минимуме блеска (в инструментальной системе), эпоха минимума блеска и период изменения блеска.

Фазовые кривые блеска новых периодических переменных (см. таблицу) показаны на рис. 1–8. Все новые переменные звезды являются затменными.

Новая переменная звезда с идентификационным номером 1 425–379 853 по каталогу USNO-A2.0 является звездой типа Алголя (β *Персея*; тип EA по ОКПЗ). К этому типу относятся затменные двойные звезды со сферическими или слегка эллипсоидальными компонентами; кривая блеска позволяет фиксировать моменты начала и конца затмений (рис. 1). В промежутках между затмениями блеск остается почти постоянным или меняется не очень сильно, вследствие эффектов отражения, небольшой эллипсоидальности компонентов или физических изменений. Вторичный минимум у звезд с данным типом переменности наблюдается не всегда. Периоды изменения блеска переменных звезд типа EA заключены в очень широких пределах – от 0,2 и менее суток до 10 000 и более суток; амплитуды изменения блеска весьма различаются и могут достигать нескольких величин [7].

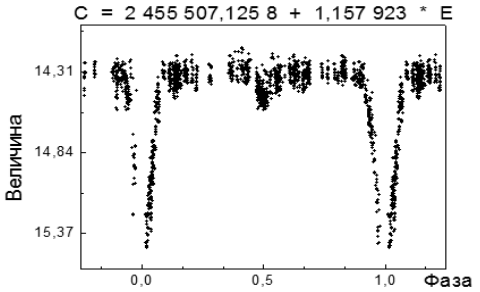


Рис. 1. Фазовая кривая блеска переменной звезды типа EA (номер звезды по каталогу USNO-A2.0 1 425–379 853)

Звезды USNO-A2.0 1 425–413 000 и 1 425–243 950, как оказалось, имеют переменность типа EB (прототип β *Лиры*). Это затменные двойные с эллипсоидальными компонентами, обладающие кривыми блеска, звезды не позволяют фиксировать моменты начала или конца затмений (вследствие непрерывного изменения видимого суммарного блеска системы в промежутках между затмениями); наблюдается вторичный минимум, глубина которого существенно меньше глубины главного минимума (рис. 2).

Новые затменно-переменные системы в Кассиопее

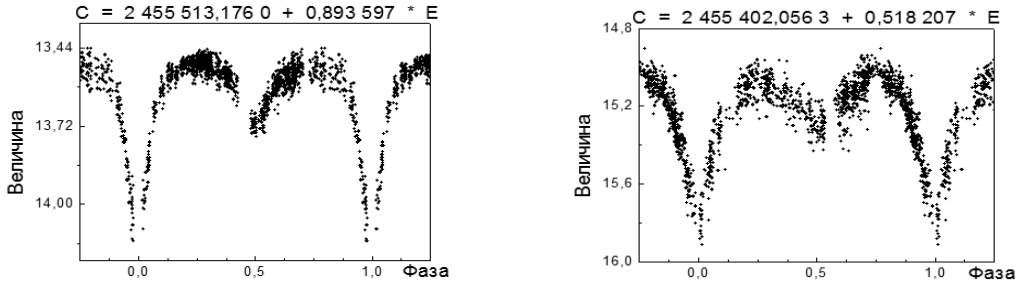
№	USNO-A2.0	α (J 2000)	δ (J 2000)	Тип	Max	Min	Min II	Эпоха (JD 24...)	*P*, сут
1	1 425–379 853	$00^h16^m02^s,53$	53° 54' 20",0	EA	$14^m,30$	$< 15^m,40$	$14^m,50$	55 507,125 8	1,157 923
2	1 425–413 000	$00^h17^m30^s,24$	55° 11' 15",5	EB	$13^m,50$	$< 14^m,15$	$13^m,73$	55 513,176 0	0,893 597
3	1 425–243 950	$00^h00^m58^s,70$	55° 28' 50",3	EB	$15^m,00$	$15^m,85$	$15^m,25$	55 402,056 3	0,518 207
4	1 425–458 499	$00^h19^m29^s,89$	53° 39' 58",5	EW	$13^m,25$	$13^m,75$	$13^m,70$	55 507,142 2	0,379 904
5	1 425–207 145	$00^h08^m23^s,94$	55° 28' 12",7	EW	$14^m,90$	$15^m,25$	$15^m,20$	55 402,263 2	0,891 133
6	1 425–238 265	$00^h09^m43^s,95$	54° 51' 32",2	EW	$13^m,15$	$13^m,42$	$13^m,42$	55 401,961 3	0,568 957
7	1 425–424 072	$00^h17^m58^s,73$	55° 37' 43",6	EW	$14^m,30$	$14^m,75$	$14^m,75$	55 400,587 1	0,369 606
8	1 425–364 307	$00^h15^m20^s,91$	53° 42' 49",6	EW	$13^m,30$	$<13^m,80$	$13^m,74$	55 507,272 0	0,334 240

Звезды с переменностью типа EB имеют периоды преимущественно больше 1^d (глубина минимумов может быть почти одинаковой), компоненты обычно ранних спектральных классов B–A. При периодах меньше 1^d минимумы разной глубины и компоненты по своему составу родственны затменным типа EW и состоят из звезд спектральных классов F-G-K. Амплитуды изменения блеска обычно меньше 2^m *V* [7].

Звезды по USNO-A2.0: 1 425–458 499, 1 425–207 145, 1 425–238 265, 1 425–424 072 и 1 425–364 307 показывают переменность типа EW (прототип *W Большой Медведицы*). Это затменно-двойные с периодами меньше 1^d, состоящие из почти соприкасающихся эллипсоидальных компонентов и обладающие кривыми блеска, не позволяющими фиксировать моменты начала и конца затмений; глубины главного и вторичного минимумов почти одинаковы или различаются незначительно (рис. 3).

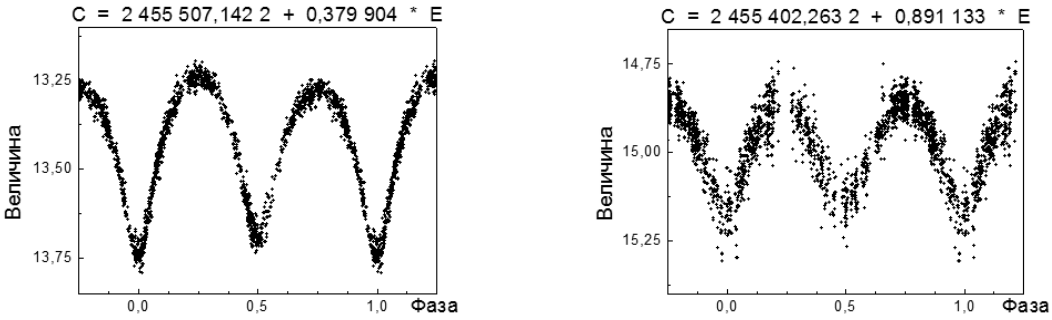
Амплитуды изменения блеска обычно меньше $0{,}8^m$ *V*. Спектральные классы компонентов обычно F–G или более поздние [7].

Новые переменные звезды имеют периоды, соизмеримые с интервалом наблюдений, из которого была произведена выборка ПЗС-изображений для поиска.

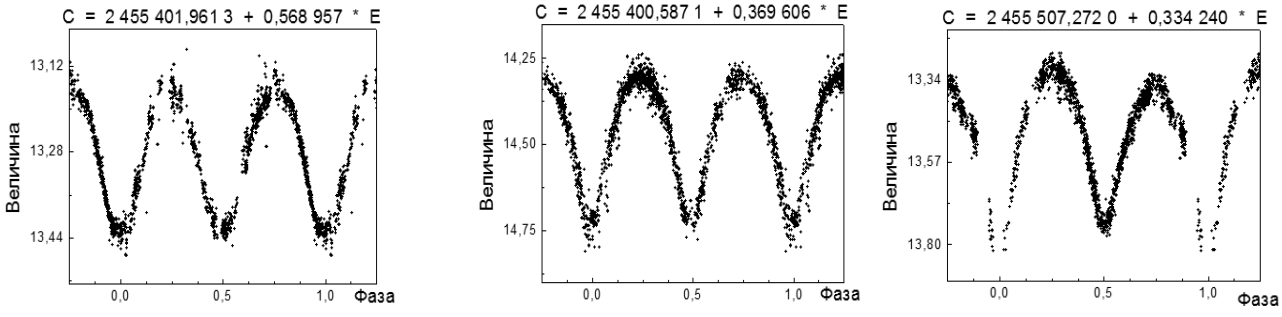


а *б*

Рис. 2. Фазовые кривые блеска переменных звезд типа EB
(номера звезд по каталогу USNO-A2.0: 1 425–413 000 (*а*) и 1 425–243 950 (*б*))



а *б*



в *г* *д*

Рис. 3. Фазовые кривые блеска переменных звезд типа EW
(номера звезд по каталогу USNO-A2.0: 1 425–458 499 (*а*), 1 425–207 145 (*б*),
1 425–238 265(*в*), 1 425–424 072 (*г*), 1 425–364 307 (*д*))

Мы предполагаем использовать выборку снимков, охватывающую больший временной промежуток, для поиска переменных звезд с большими периодами в данном поле.

В результате проведенной работы получен наблюдательный материал, выбрана и апробирована на практике методика поиска переменных звезд в условиях города, выявлено и исследовано восемь новых переменных звезд: определены типы переменности, периоды изменения блеска, максимумы и минимумы, начальные эпохи. В дальнейшем методика, описанная выше, будет использоваться для поиска новых переменных звезд в обсерватории СибГАУ.

Библиографические ссылки

1. Новые переменные звезды на оцифрованных пластинках московской фототеки. Поле 66 Змееносца / Д. М. Колесникова, Л. А. Сат, К. В. Соколовский и др. Астрономический журнал. 2010. Т. 87, № 11. С. 1087–1105.

2. Миронов А. В. Прецезионная фотометрия [Электронный ресурс]. URL: http://www.astronet.ru/db/msg/1211924.

3. C-MUNIPACK, Package of software utilities for reducing astronomy CCD images intended on a observation of variable stars [Электронный ресурс]. URL: http://c-munipack.sourceforge.net/.

4. Общий каталог переменных звезд [Электронный ресурс]. URL: http://www.sai.msu.ru/groups/cluster/gcvs/cgi-bin/search.htm.

5. The International Variable Star Index [Электронный ресурс]. URL: http://www.aavso.org/vsx/index.php.

6. Горанский В. П. WinEfK. Программа поиска периодов переменных звезд (методы Лафлера–Кинмана, Диминга, построения кривых блеска и т. д.) [Электронный ресурс]. URL: http://www.variablestars.ru/FILES/winefk.rar.

7. Классификация переменных звезд в соответствии с IV изданием ОКПЗ [Электронный ресурс]. URL: http://variablestars.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=61#5.

8. Гофмейстер К., Рихтер Г., Венцель В. Переменные звезды : пер. с нем., М., 1990.

9. Самусь Н. Н. Переменные звезды : учеб. пособие [Электронный ресурс]. URL: http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/.

S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin, N. N. Samus

EIGHT NEW ECLIPSING BINARY SYSTEMS IN CASSIOPEIA

Despite closely located industrial enterprises, cultural and sports facilities,the never-freezing Yenisei,a brisk avenue with its illumination, we were able to discover and study eight new eclipsing binary system in Cassiopeia using observations acquired at the new SibSAU observatory.

Keywords: variable star, eclipsing binaries system, astronomy, photometry, observation.

© Веселков С. А., Лапухин Е. Г., Самусь Н. Н., 2011

УДК. 621.454.2

А. Г. Воробьев, И. Н. Боровик, С. Ха

РАЗРАБОТКА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ, РАБОТАЮЩЕГО НА ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА И КЕРОСИНЕ

Дается описание конструкции жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) малой тяги, работающего на перекиси водорода и керосине. Приведены основные технические характеристики, представлены результаты гидравлических испытаний.

Ключевые слова: ЖРД малых тяг, перекись водорода.

Использование высококонцентрированной перекиси водорода (ВПВ) в ракетных двигателях как монотоплива началось в 30-х гг. 20 в. в Германии. Это направление активно используется до настоящего времени в двигателях РД–107, РД–108 и их последующих модификациях на ракетоносителях (РН) «Восток», «Союз» и другие. Дальнейшие разработки ракетных двигателей различного назначения с использованием ВПВ как монотоплива, а также двухкомпонентного топлива ВПВ + керосин продолжаются в настоящее время [4; 5].

К новым задачам относится разработка ЖРД тягой 500 Н, работающего на компонентах ВПВ и керосине, которая осуществлялась по контракту между Московским авиационным институтом (МАИ) и Чунгнамским национальным университетом (Южная Корея). Решение этой задачи базировалось на опыте создания в МАИ на кафедре «Ракетные двигатели» жидкостного ракетного двигателя (ЖРДМТ) с тягой 200 Н [1–3].

Разработка нового двигателя являлась итерационным процессом. Первоначально получены основные параметры двигателя (давление в камере сгорания p_K, соотношение компонентов $J_{уд}$, расходы компонентов $\dot{m}_O$, $\dot{m}_Г$), построен газодинамический профиль камеры сгорания и сопла, рассчитаны параметры смесеобразования (число форсунок, относительный расход на завесу $\bar{m}_{зав}$).

С использованием математической модели теплового состояния камеры сгорания [6] было рассчитано ожидаемое температурное поле конструкции КС и ожидаемый удельный импульс двигателя $J_{уд}$.

Конструкция двигателя. В двигателе малой тяги (ДМТ) МАИ–500ВПВК (рис. 1) сопло присоединяется к камере сгорания с помощью аргонно-дуговой сварки (рис. 2).

На внешней стенке критического сечения сопла имеется местное утолщение (пояс) необходимое для обеспечения требуемого теплового режима.

Камера сгорания присоединяется к смесительной головке с помощью болтового соединения по фланцам и уплотняется через уплотнительное кольцо из медного сплава М3М. Все составные части камеры сгорания, кроме фланца, изготавливаются из сплава ХН60ВТ или их аналога по теплофизическим свойствам. Фланец камеры сгорания изготавливается из стали 12Х18Н10Т.

Основные технически характеристики двигателя представлены в таблице.

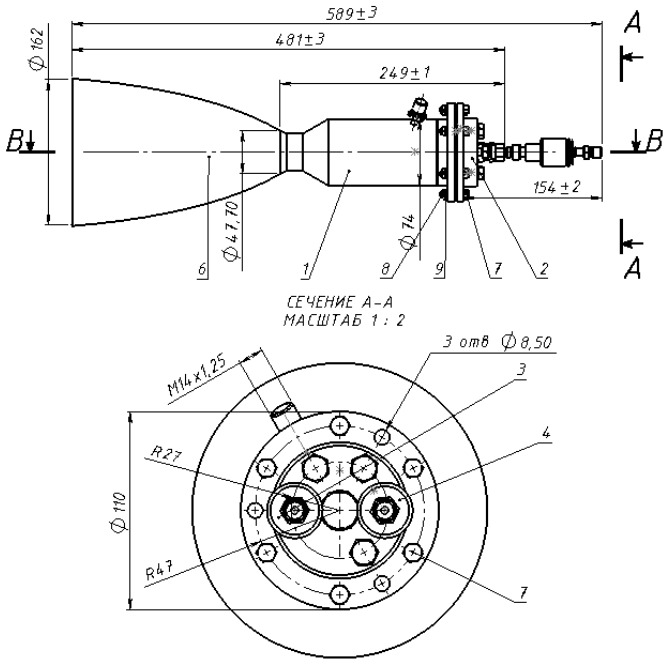


Рис. 1. Вид двигателя 500ВПВК:
1 – камера сгорания; *2* – смесительная головка; *3* – штуцер подвода горючего; *4* – штуцер подвода окислителя; 6 – сопло; *7*, *8*, *9* – крепеж

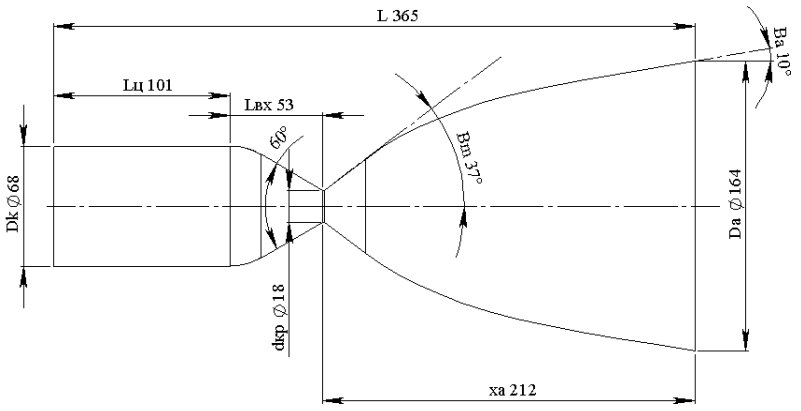


Рис. 2. Газодинамический профиль камеры сгорания и сопла

Технические характеристики двигателя ДМТ МАИ–500ВПВК

Параметр	Значение
Компоненты топлива	96 % H_2O_2 + керосин
Тяга двигателя	500 Н
Максимальная длительность включения	90 с
Удельный импульс в вакууме	≥ 290 с
Давление в камере сгорания	≈ 1 Мпа
Степень расширения сопла по давлению	1 000
Минимальная длительность импульса	50 мс
Суммарная масса	≤ 2,5 кг
Длина двигателя	≤ 350 мм
Давление на входе в клапаны	Не более 1,5 Мпа
Напряжение электропитания клапанов	27±3 в
Год разработки	2008–2010

Конструкция смесительной головки. Для проведения исследовательских работ, связанных с оптимизацией смесеобразования и воспламенения несамовоспламеняющихся компонентов топлива выбирают тип и количество смесительных элементов, схемы их расположения на плоскости форсуночной головки, организацию завесного охлаждения, способ и конструктивное оформление системы воспламенения топливной композиции и др.

Смесительная головка была сделана съемной. В головке предусмотрены регуляторы для распределения компонентов топлива в форсунки на центральную зажигательную часть и завесу.

Основной проблемой организации рабочего процесса в ЖРДМТ является малый объем камеры сгорания, в котором трудно совместить качественный распыл и смешение компонентов с не менее качественной защитой стенок от высокотемпературных продуктов сгорания. Равномерное распределение компонентов топлива по сечению камеры сгорания реализуется при большом количестве смесительных элементов. Однако для ЖРДМТ нецелесообразно снижать расход на одну ступень форсунки ниже 2 г/с, так как при малых размерах проточной части форсунки погрешности технологических процессов изготовления начинают существенно влиять на ее характеристики. Форсунка горючего является внутренней ступенью, а форсунка окислителя – внешней ступенью. Исходя из этих соображений в качестве основного варианта была выбрана семифорсуночная головка с двухкомпонентными центробежными форсунками, с центральной форсункой-зажигателем.

Система зажигания основана на разложении ВПВ на твердом катализаторе с последующим впрыском керосина в продукты разложения.

Общий вид смесительной головки показан на рис. 3.

Соединение пластин (рис. 4) с соответствующей герметизацией полостей окислителя и горючего выполняется посредством пайки по шаблонам в вакууме. В процессе изготовления двигателя применена технология пайки пластин, исключающая затекание припоя в подводящие к камерам закручивания малоразмерные тангенциальные каналы центробежных форсунок. Ввиду технологических ограничений форсунки горючего сделаны составными.

Пластинчатые головки имеют очевидные преимущества по сравнению с другими конструкциями:

1) обладают малым объемом заклапанных полостей, что обеспечивает лучшие динамические качества двигателя;

2) реализуется упрощенная технология изготовления двухкомпонентных центробежных форсунок, обычно по схеме 1+6; 1+6+12;

3) обеспечивается надежная герметичность полостей О и Г, благодаря технологии пайки в вакууме;

4) сравнительно просто обеспечивается организация низкоперепадной завесы.

Были проведены технологические испытания головки с целью проверки технологии пайки и прочности припоя форсунок.

После пайки полученный блок пластин испытывается на герметичность, затем вставлялся в корпус головки и приваривался по краю (рис. 5).

Гидравлические испытания. Во время гидравлических испытаний, которые осуществлялись на стендах МАИ, проверялись герметичность между пластинами головки, качество изготовления смесительных элементов, отсутствие запаянных каналов в результате пайки пластин, полная функциональность регуляторов расходов компонентов, а также получали расходные характеристики ступеней форсунок, завесы и гидроопрессовки двигателя перед огневыми испытаниями.

Результаты использовались для дальнейшей настройки огневого стенда на проектные значения соотношения компонентов, суммарного расхода и оптимизации расхода окислителя на завесное пленочное охлаждение.

Для расчета расходов компонентов на каждой форсунке и расхода на завесу посегментно было спроектировано и изготовлено специальное устройство.

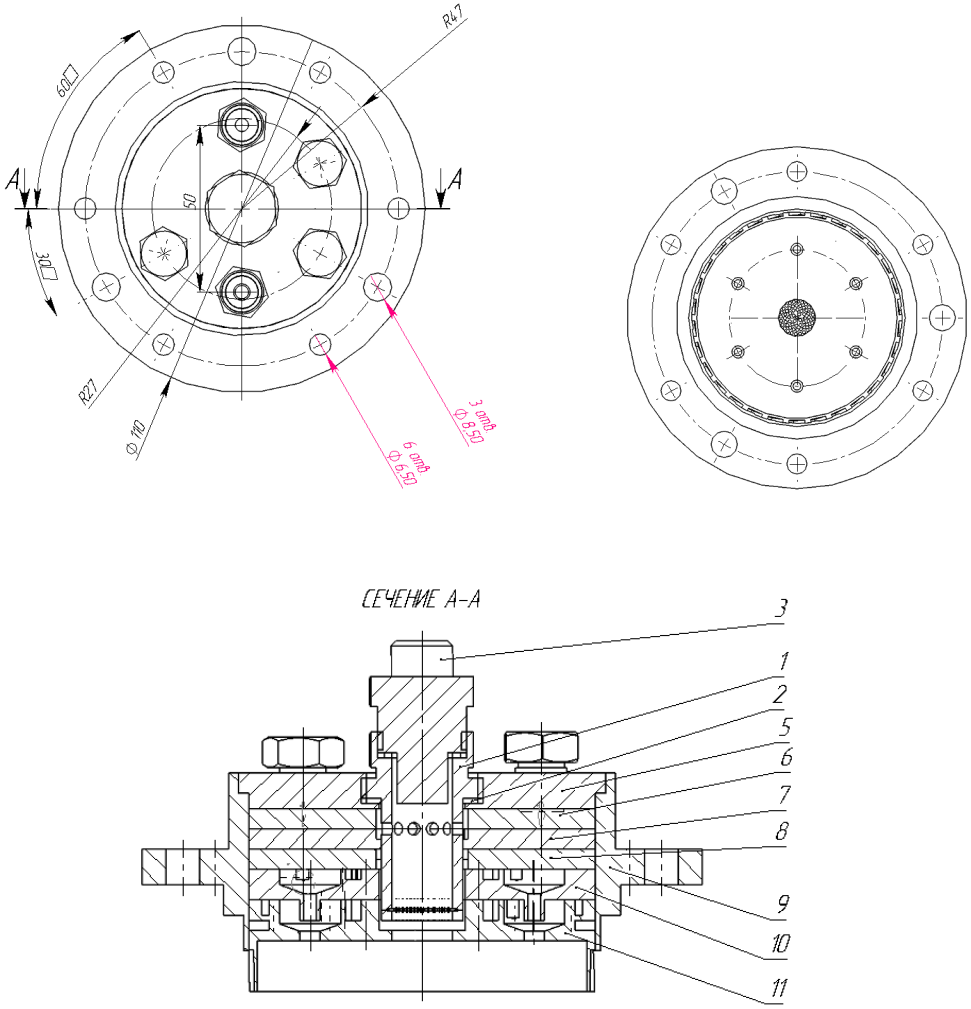


Рис. 3. Конструкция смесительной головки ЖРД МТ:
1 – устройство зажигания; *2* – уплотнение на устройстве зажигания; *3* – входные штуцеры; *5* – крышка; *6* – распределительная пластина; *7* – распределительная пластина окислителя; *8* – распределительная пластина горючего; *9* – корпус головки; *10* – пластина горючего; *11* – пластина окислителя (системы регулирования расхода на завесу и системы регулирования компонентов на рис. не показаны)

Рис. 4. Набор пластин
для форсуночной головки

Рис. 5. Камера сгорания и головка двигателя
ДМТ МАИ-500ВПВК

Это дало возможность получить функциональные зависимости между величинами входных давлений и соответствующих расходов компонентов топлива:

$$\dot{m}_{г_i} = f(p_{вх,г}); \quad \dot{m}_{о_i} = f(p_{вх,о}),$$

где $\dot{m}_{г_i}$, $\dot{m}_{о_i}$ – расходы горючего и окислителя для каждой форсунки; $p_{вх,г}, p_{вх,о}$ – входные давления горючего и окислителя.

На форсунки внутреннего смешения при совместной работе ступеней оказывает влияние расходные характеристики индивидуально работающих ступеней. Поэтому проливаются как отдельно работающие ступени форсунок окислителя и горючего, так и вся головка при совместной их работе.

Качество распыла смесительной головки было оценено с помощью экспериментальной установки на базе анализирующего прибора Malvern Spraytec, состоящего из смесительной головки ЖРДМТ, системы подачи компонента в смесительную головку ЖРДМТ, устройства сбора распыленного компонента и самого прибора (рис. 6, 7). Анализирующий прибор «Malvern Spraytec» представляет собой оптическую измерительную систему, реализующую эффект дифракции света на каплях распыленной жидкости.

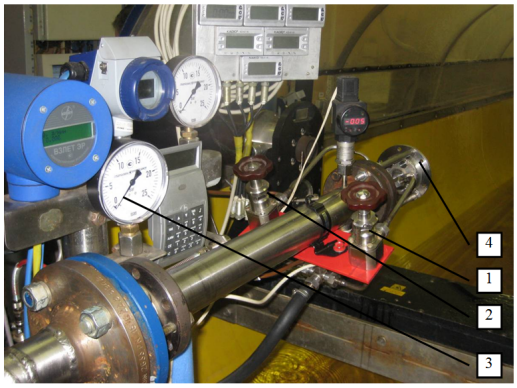


Рис. 6. Испытания распыла головки двигателя ДМТ МАИ-500 на анализаторе Malvern Spraytec: *1* – вентиль подачи О; *2* – вентиль подачи Г; *3* – система измерения давления в магистралях подачи и расходов; *4* – закрепленная смесительная головка

Рис. 7. Испытания распыла головки двигателя ДМТ МАИ-500 на анализаторе Malvern Spraytec

Были проведены комплексные испытания, в результате которых получены данные о качестве распыла для различных режимов работы головки (рис. 8). Полученные результаты соответствуют теоретическим представлениям о зависимости мелкости распыла от геометрических характеристик форсунок и параметров режима работы.

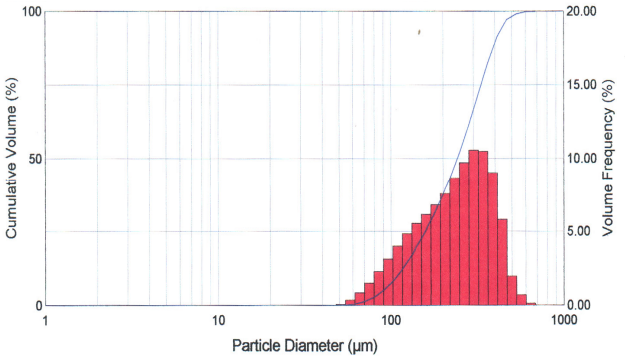


Рис. 8. Результаты распыла компонентов для смесительной головки двигателя ДМТ МАИ-500 на анализаторе Malvern Spraytec

Таким образом, спроектирован и произведен ЖРДМТ тягой 500 Н, работающий на компонентах высококонцентрированной перекиси водорода и керосине.

Проведены гидравлические испытания смесительных головок. Определены расходные характеристики форсунок по линии окислителя и горючего.

По результатам гидравлических испытаний выбраны рабочие параметры смесеобразования, являющиеся основой для программы огневых испытаний.

Библиографические ссылки

1. Козлов А. А., Абашев В. М. Расчет и проектирование жидкостного ракетного двигателя малой тяги. М. : МАИ, 2003.

2. Kozlov A. A., Abashev V. M., Hinckel J. N. Organization of the working process in the small thrust engine LRESTh MAI-200 // 52-nd International Astronautical Congress (October 1–5, 2001) Toulouse, France.

3. Kozlov A. A., Abashev V. M, Mordovin V. Z. The development of thrusters with lamellar mixing head, guaranteed high combustion efficiency of propellant // Chinese-Russian-Ukrainian workshop on space propulsion (September 17–19, 2002). Xian, China.

4. Kozlov A. A., Abashev V. M, Mordovin V. Z., Basanova I. A. Investigation of the working process in liquid rocket engine of small thrust at high concentration hydrogen peroxide with kerosene or alcohol with catalyst // Chinese-Russian-Ukrainian workshop on space propulsion (September 17–19, 2002). Xian, China.

5. Зрелов В. Н., Серегин Е. П. Жидкие ракетные топлива. М. : Химия, 1975.

6. Воробьев А. Г. Математическая модель теплового состояния ЖРД МТ // Вестник МАИ. 2007. Т. 14, № 4. С. 42–49.

A. G. Vorobiev, I. N. Borovik, S. Ha

DEVELOPING LRE OF LOW THRUST USING PROPELLANTS: STRONG HYDROGEN PEROXIDE WITH KEROSENE

The paper is devoted to development of liquid rocket engine of low thrust which expends propellants: strong hydrogen peroxide with kerosene. The paper includes technical description of the engine, the main engine parameters and results of hydraulic test.

Keywords: LRE of low thrust, strong hydrogen peroxide.

© Воробьев А. Г., Боровик И. Н., Ха С., 2011

УДК 621.45 – 181.4:629.78

М. В. Краев

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ РЕШЕТКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА*

С учетом конструктивных особенностей проточной части рабочей решетки центробежного насоса проанализировано обтекание профилей лопаток потока вязкой жидкости. Выполнен гидродинамический расчет параметров рабочей решетки.

Ключевые слова: гидродинамика, центробежный насос, поток, профиль, лопатка, рабочая решетка, пограничный слой.

Входные кромки лопаток рабочего колеса (РК) центробежного насоса (ЦБН) оказывают подтормаживающее действие на поток, а, следовательно, его формирование. Пограничные слои, образующиеся на поверхностях входной кромки, не только управляются потоком, но и оказывают на него обратное влияние через толщину вытеснения δ^* и потери импульса δ^{**} (рис. 1). Для определения этого влияния рассмотрим составляющие сил, действующих на входную кромку лопатки и их удельный вклад в баланс потерь энергии при течении вязкой жидкости в рабочей решетке ЦБН.

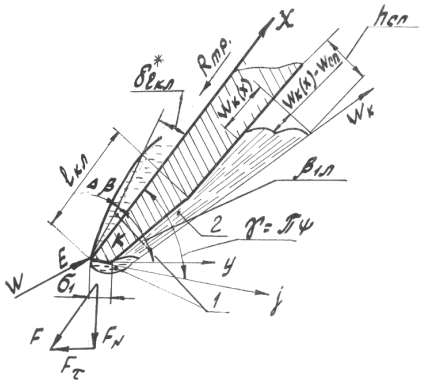


Рис. 1. Расчетная схема обтекания входной кромки лопатки потоком вязкой жидкости:
1 – ламинарный пограничный слой; *2* – спутное течение

Выражение для касательного напряжения τ на ограничивающих поверхностях рабочей решетки РК определим, воспользовавшись табличной функцией $f_2(x)$ работы [1]:

$$f_2(x) = \frac{\delta_z^{**} \cdot \tau_0}{\nu \rho W_{(x)}}. \quad (1)$$

Согласно [1] скорость потенциального течения в ядре потока в решетке профилей можно записать в виде

$$W_{(j)} = Cj^m, \quad (2)$$

где C и m – постоянные величины, здесь

$$m = \frac{\Psi}{2-\Psi} = \frac{\gamma}{2\pi-\gamma}. \quad (3)$$

При формировании входной кромки лопатки, совместимой с осью Y ($\gamma = \beta_{1л}$),

$$m = \frac{\beta_{1л}}{2\pi-\beta_{1л}}. \quad (4)$$

Для лопатки на расстоянии, равном σ_1, от входной кромки, при $j = \sigma_1$; $W_{(j)} \approx W_к$ имеем

$$C = \frac{W_к}{\sigma_1^m}, \quad (5)$$

и выражение (2) получим в виде

$$W_{(j)} = \frac{W_к}{\sigma_1^m} j^m. \quad (6)$$

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (ГК № П231 от 23.04.2010).

Величина касательных напряжений при обтекании решетки профилей входной кромки, согласно выражению (1), с учетом (6) будет составлять

$$\tau_{01} = \frac{\rho \nu f_2(æ)}{\delta_1^{**}} W_к \left(j / \sigma_1 \right)^m, \qquad (7)$$

где δ_1^{**} – толщина потери импульса, которую выразим в виде [1]:

$$\left(\delta_1^{**}\right)^2 = \frac{æ \nu dj}{dW(j)}. \qquad (8)$$

Тогда выражение (7) получим в виде

$$\tau_{01} = \rho f_2(æ) \sqrt{\frac{\nu W_к^2 \left(j / \sigma_1 \right)^{2m} dW_{(j)}}{æ dj}}, \qquad (9)$$

или

$$\tau_{01} = \rho f_2(æ) \sqrt{\frac{W_к^3 \nu m}{æ \sigma_1} \left(j / \sigma_1 \right)^{(3m-1)}}.$$

Интегрированием выражения (9) получим значение силы трения по кромке лопатки рабочей решетки:

$$F_{\tau(j)} = \int_0^j \tau_{01(j)} dj = \frac{2\rho f_2(æ)}{(3m+1)} \sqrt{\frac{W_к^3 \nu m \sigma_1}{æ} \left(j / \sigma_1 \right)}. \qquad (10)$$

Величина силы трения, определяемая вязкостью жидкости по входной кромке лопатки длиной σ_1, будет иметь вид

$$F_{\tau\sigma_1} = \frac{2\rho f_2(æ)}{(3m+1)} \sqrt{\frac{W_к^3 \nu m \sigma_1}{æ}}. \qquad (11)$$

При различной кинематической вязкости от $0{,}7 \cdot 10^{-6}$ м^2/с до $1 \cdot 10^{-4}$ м^2/с и плотности сила трения вдоль входной кромки лопатки возрастает и тем больше, чем выше вязкость рабочей жидкости (рис. 2).

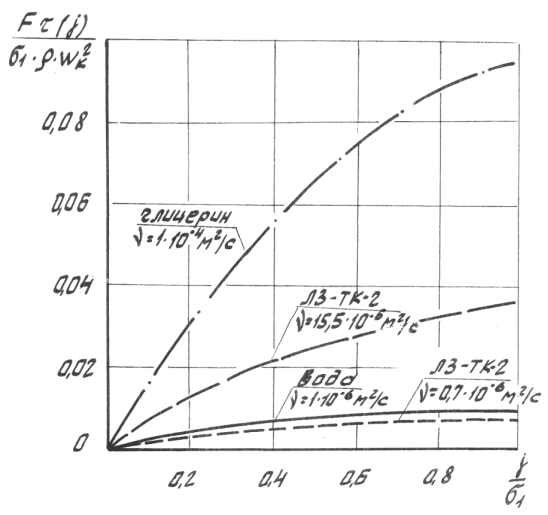


Рис. 2. Изменение параметров пограничного слоя рабочей решетки профилей вдоль входной кромки лопатки

Решив уравнение для напорной стороны лопатки, получим значение силы трения:

$$F_{\tau x} = \int_0^l \tau_{01(x)} dx = \frac{2\rho f_2(æ)}{(3m+1)} \sqrt{\frac{W_к^3 \nu m l}{æ} \left(\frac{x}{l} \right)^{3m+1}}, \qquad (12)$$

или

$$F_{\tau l} = \frac{2\rho f_2(æ)}{(3m+1)} \sqrt{\frac{W_к^3 \nu m l}{æ}}. \qquad (13)$$

Следует отметить, что конечная толщина лопатки и параметры ее входной кромки не только формируют поток на входе рабочей решетки профилей, но и оказывают на него подтормаживающее действие за счет силы реакции F и стесняющее действие за счет конечной толщины $\delta_л$ с суммарной площадью лопаток на входе, соизмеримой с проходным сечением решетки.

Полную силу F, действующую на поток со стороны кромки, можно разложить на две составляющие: F_N – нормальную к входной кромке и F_τ – касательную, которая представляет собой силу трения, определяемую вязкостью жидкости. Сила F_N вычисляется согласно закону распределения давления вдоль входной кромки лопатки величиной σ_1:

$$F_N = \int_0^{\sigma_1} P dj. \qquad (14)$$

Для определения силы F_N (рис. 1), нормальной к входной кромке лопатки, согласно выражению (14) имеем:

$$F_N = \int_0^{\sigma_1} P dj = \int_0^{\sigma_1} (P_1 - P_к) dj + P_к \sigma_1. \qquad (15)$$

Запишем уравнение энергии потока в рабочей решетке в виде

$$P_1 - P_к = \rho \frac{\left(W_к^2 - W^2\right)}{2} = \frac{\rho}{2} \left[W_к^2 - \left(\frac{W_к^{jm}}{\sigma_1^m} \right)^2 \right] = \frac{\rho W_к^2}{2} \left[1 - \left(\frac{j}{\sigma_1} \right)^{2m} \right], \qquad (16)$$

тогда

$$F_N = \int_0^{\sigma_1} \frac{\rho W_к^2}{2} \left[1 - \left(\frac{j}{\sigma_1} \right)^{2m} \right] dj + P_к \sigma_1 = \frac{\rho W_к^2}{2} \int_0^{\sigma_1} \left[1 - \left(\frac{j}{\sigma_1} \right)^{2m} \right] dj + P_к \sigma_1 = \frac{\rho W_к^2}{2} \sigma_1 \frac{2m}{2m+1}. \qquad (17)$$

Ламинарный пограничный слой, образовавшийся на входной кромке лопатки величиной δ_1, затем стекает к тыльной поверхности и распространяется по длине канала аналогично плоскому спутному потоку (рис. 1). Ламинарное спутное течение, как правило, неустойчиво, так как в нем профили скоростей имеют точку перегиба и поэтому оно переходит в турбулентное [1; 2].

Экспериментальные данные по изучению картины течения в РК [3] показывают, что даже в высокоэффективных РК имеется зона отрыва, которая к выходу из РК распространяется на 15–30 % по шагу канала. Спутная струя вдоль тыльной стороны лопатки характеризуется в [4] постоянным значением скорости $W_{\text{сп}}$ по шагу с величиной 20–30 % от среднерасходной скорости основного потока.

Анализ фотографий и визуализация течений по тыльной стороне лопатки РК ЦБН позволили уточнить картину течения и создать расчетную модель, позволяющую оценить границы спутного потока и учесть его влияние в общем балансе потерь энергии [3].

При течении вязкой жидкости за входной кромкой лопатки образовавшийся ламинарный пограничный слой при обтекании уступа величиной $\sigma_1 = \delta_1 / \sin\beta_{1л}$ срывается с поверхности профиля (точка К на рис. 1). За точкой отрыва распространяется зона спутного потока вдоль тыльной стороны лопатки. Согласно [1], граница расширяющейся спутной струи и толщина зоны смешения двух плоских струй несжимаемой жидкости принимается изменяющейся пропорционально расстоянию $l(x)$ от начальной точки К:

$$\frac{dh_{\text{сп}}}{dl(x)} = \pm C\frac{1-\bar{W}_{\text{к}}}{1+\bar{W}_{\text{к}}}, \qquad (18)$$

где

$$\bar{W}_{\text{к}} = \frac{W_{\text{к}}}{W_{\text{сп}}}.$$

По опытным данным Б. А. Жесткова и др. [5], значение константы C для начального участка плоской струи рекомендуется принимать равным 0,27, что хорошо согласуется с нашими опытами по визуализации [3].

Опытами О. В. Яковлевского, Б. А. Жесткова и др. показано в [1], что при $\bar{W}_{\text{к}} \geq 0{,}4$ течение спутного потока характеризуется независимостью угла раскрытия зоны спутного потока от отношения скоростей. При этом расчеты основного участка спутного течения, исключающего образование циркуляционной зоны, ограничиваются значением $\bar{W}_{\text{ок}} \leq 3$, что соответствует условию постоянства статического давления по длине струи.

Следует отметить, что при существенно больших значениях $\bar{W}_{\text{к}} = \frac{W_{\text{к}}}{W_{\text{сп}}}$ линии тока в спутном потоке существенно искривляются, отражаясь на характере течения канала. Возникает картина течения с обратным током [3]. Это связано с тем, что вследствие смешения струй, имеющих скорости $W_{\text{к}} >> W_{\text{сп}}$, образуется положительный градиент давления, приводящий к особенно сильному торможению струи меньшей скорости. Возможно полное ее торможение с образованием замкнутой циркуляционной зоны [3].

Для основного участка спутного потока принимаем, что профиль скорости состоит из отрезков профилей струйного пограничного слоя и пограничного слоя на стенке, причем сопряжение этих профилей осуществляется на границе пристеночного слоя при $y = \delta(\sigma_1)$. Для турбулентного на стенке пограничного слоя принятое распределение скоростей подчиняется закону «одной седьмой»

$$\frac{W_{(x)}}{W_{(\text{к})}} = \left(\frac{y}{\delta(y)}\right)^{1/7}, \qquad (19)$$

где $W_{\text{к}}$ – скорость на границе пристеночного пограничного слоя с толщиной $\delta(y)$.

Значения параметров $l(x)_{\text{н}}$ и $h_{\text{сп.н}}$ соизмеримы с толщиной пограничного слоя $\delta(\sigma_1)$ потока, обтекающего клин, и основной вклад в характеристики спутного потока вносит основной участок, длина которого не менее чем на два порядка больше начального и переходного участков.

Рассмотрим влияние изменения давления в потоке на основные свойства зоны турбулентного смешения. Г. Н. Абрамовичем [5] показано, что в случае малости толщины зоны смешения $h_{\text{сп}} \ll l(x)$, ей присущи все особенности пограничного слоя, в частности, можно пренебрегать изменением давления по толщине зоны смешения спутного потока. Таким образом, в зоне смешения струй профили скорости не зависят от радиального градиента давления, так как на границах струйного пограничного слоя конечной толщины полученные градиенты скорости равны нулю и профиль скорости соответствует безградиентному течению.

С учетом градиентного течения основного потока параметр утолщения зоны спутного потока запишем, согласно решению [5], в виде

$$\frac{dh_{\text{сп}}}{dl(x)} = \bar{W}_{\text{осп}} - l(x)\frac{d\bar{P}}{dl(x)} \times$$
$$= C\frac{1-\bar{W}_{\text{осп}}}{1+\bar{W}_{\text{осп}}} + 2C\frac{\times\sqrt{\left[1-l(x)\frac{d\bar{P}}{dl(x)}\right]\left[\bar{W}^2_{\text{осп}} - l(x)\frac{d\bar{P}}{dl(x)}\right]}}{1-\bar{W}^2_{\text{осп}}}, \qquad (20)$$

где $\bar{P} = \frac{2P}{\rho W^2_{\text{ок}}}$ – приведенное давление, величина которого определяется в зависимости от градиента давления по длине канала, $P = f(l(x))$.

Интегрированием уравнения (20) при граничном условии на носике лопатки, в точке К $l(x) = 0$ и $h_{\text{сп}} = 0$ получим выражение для расчета толщины спутного потока.

Радиальному градиенту давления будет сопутствовать обязательное от центра РК радиальное движение жидкости на обеих границах зоны смешения ($\bar{W}_{\text{сп}} \neq 0$

и $W_к \neq 0$). При этом величина $\frac{d\bar{P}}{dl(x)}$ в рабочей решетке РК не должна превышать определенного значения, приводящего к полному торможению спутной струи и образованию вихревого обратного течения в решетке профилей РК по тыльной стороне лопатки.

Из уравнений Бернулли, связывающих местную скорость и давление в потенциальной части потока для струй одинаковой несжимаемой жидкости (ρ = const), получим

$$W_{сп}^2 - W_{осп}^2 = W_к^2 - W_{ок}^2, \quad (21)$$

или

$$\frac{W_к^2}{W_{ок}^2} = \frac{1-\left(\frac{W_{осп}}{W_{ок}}\right)^2}{1-\left(\frac{W_{ок}}{W_к}\right)^2} = \frac{1-W_{осп}^2}{1-W_{сп}^2}. \quad (22)$$

Для образования вихревого обратного течения в спутном потоке достаточно условие $W_{сп} = 0$. Тогда (22) будет иметь вид

$$\frac{W_к^2}{W_{ок}^2} = 1 - W_{осп}^2, \quad (23)$$

или

$$\frac{2(P-P_0)}{\rho W_0^2} \le \bar{W}_{осп}^2. \quad (24)$$

Откуда наибольшая величина повышения давления в зоне смешения потоков определяется по выражению

$$\frac{2(P-P_0)}{\rho W_{ок}^2} \le \bar{W}_{осп}^2. \quad (25)$$

Величина давления по тыльной стороне лопатки, при котором в канале РК формируется вихревой поток, составит

$$P_\tau(x) = \frac{2W_{осп}^2}{\rho W_{ок}^2} - P_0 = \frac{2W_{осп}^2}{\rho W_{окр}^4} - P_0. \quad (26)$$

Например, при $\bar{W}_{осп} = 1$ прирост давления в зоне смешения не может превышать скоростного напора струи основного потока, имеющего большую скорость [2; 5].

Зависимость местного отношения скорости $\bar{W}_{сп}$ на границах зоны смешения от градиента давления по длине рабочей решетки РК, используя [5], выразим

$$W_{сп}^2 = \frac{W_{осп}^2 - \frac{d\bar{P}}{dl(x)}l(x)}{1-\frac{d\bar{P}}{dl(x)}l(x)}. \quad (27)$$

Откуда следует, что при положительном градиенте давления $\frac{d\bar{P}}{dl(x)} > 0$ имеет место его предельное значение, при котором происходит полное торможение потока ($\bar{W}_{сп} = 0$) на границе зоны смешения:

$$\frac{d\bar{P}}{dl(x)}l(x) = \bar{W}_{осп}^2. \quad (28)$$

Скорость спутного потока для течения вдоль входной кромки лопатки длиной σ_1, совпадающей с осью Y (см. рис. 1), аналогично выражению (6):

$$W_{осп} = \frac{W_{ок}}{j^m} y^m. \quad (29)$$

При обтекании лопатки с клинообразной входной кромкой, совпадающей с осью Y, с учетом выражений (3) и (4), для потока, стекающего с входной кромки лопатки длиной σ_1 на ее тыльную поверхность (точка К на рис. 1), отношение скоростей спутного и основного потоков выразим формулой

$$\bar{W}_{осп} = \frac{W_{осп}}{W_{ок}} = \left(\frac{\sigma_1}{l(x)}\right)^m = \bar{\sigma}_1^m. \quad (30)$$

Величина повышения давления в зоне смешения потоков будет

$$\frac{2(P-P_0)}{\rho W_к^2} \le \bar{\sigma}_1^{2m}. \quad (31)$$

Из указанных зависимостей вытекает, что при работе РК с лопатками конечной толщины на вязкой и невязкой жидкостях характеристики зоны спутного потока зависят от соотношения величин входной кромки и длины лопатки, заданного градиента давления по длине зоны смешения, максимальная величина которого определяется уравнением (31).

Величину относительной скорости спутного потока из уравнения (27) выразим

$$\bar{W}_{сп}^2 = \frac{\bar{\sigma}_1^{2m} - \frac{d\bar{P}}{dl(x)}l(x)}{1-\frac{d\bar{P}}{dl(x)}l(x)}. \quad (32)$$

При $\frac{d\bar{P}}{dl(x)} = 0$ полученное выражение соответствует безградиентному обтеканию профиля лопатки и согласуется с известными зависимостями [5].

Решение полученных уравнений позволяет определить изменение относительной скорости спутного потока ($\bar{W}_{сп}$) при градиентном обтекании тыльной стороны рабочей решетки лопатки, границы зоны спутного потока $h_{сп}$ в зависимости от относительной скорости набегающего потока $W_{осп}$ при различных значениях как угла натекания потока (β_1), так и относительной длины входной кромки лопатки (σ_1). В результате найдены границы и оптимизированы условия, при которых в решетке РК реализуется спут-

ное безвихревое течение, что обеспечивает наилучшие энергетические характеристики. На рис. 3 приведены зависимости наибольшего значения $\bar{W}_{\text{сп}} = f\dfrac{d\bar{P}}{dl(x)}$ без образования вихревых и обратных зон в рабочей решетке с тыльной стороны лопатки при изменении величины ($\bar{\sigma}_1^m$) от 0 до 1, что соответствует изменению угла натекания потока от 0 до 90°.

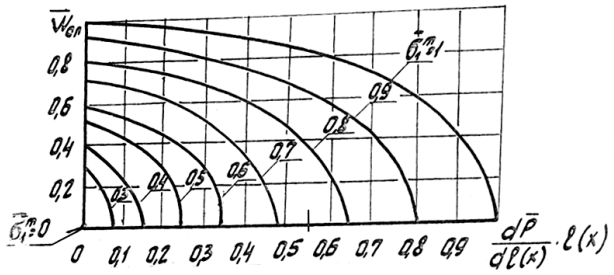


Рис. 3. Зависимость относительной скорости спутного потока в рабочей решетке РК от относительного перепада давления при различных углах натекания потока

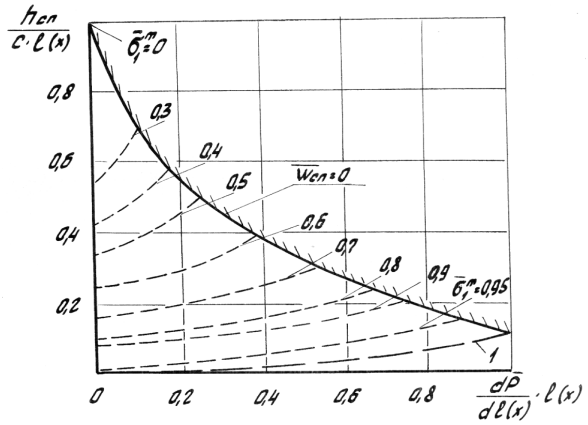


Рис. 4. Расчетное значение границы спутного потока при $\bar{W}_{\text{сп}} = 0$

При предельных значениях угла $\beta_{1л}$ в первом случае ($\beta_{1л} = 0°$) поток касателен к окружности канала лопаток ($\bar{\sigma}_1^m = 1$), а во тором – перпендикулярен ($\bar{\sigma}_1^m = 0$), что соответствует течению на кромках лопаток как при обтекании уступов и впадин. Показательно, что с ростом угла установки профиля рабочей решетки относительная величина наибольшего значения перепада давления уменьшается. В противном случае в решетке лопаток РК реализуется вихревое течение с отрывом потока по тыльной стороне лопатки.

Расчетное значение параметров спутного потока во всем диапазоне изменения угла установки, соотношения входной кромки и длины лопатки приведены на рис. 4 (пунктирные линии).

Полученные зависимости ограничены кривой, соответствующей критическому соотношению скоростей основного и спутного потоков: $\bar{W}_{\text{сп}} = 0$. При этом режиме за счет нарастания давления в основном потоке спутная струя тормозится до нуля и дальнейшее нарастание давления в рабочей решетке центробежного насоса приведет к вихревому течению с отрывом потока по тыльной стороне лопатки.

Библиографические ссылки

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1969.

2. Чжен П. Отрывные течения. В 2 т. М. : Мир, 1972. Т. 1.

3. Экспериментальное исследование и математическое моделирование нестационарных турбулентных течений в агрегатах подачи энергодвигательных установок летательных аппаратов (III этап) : отчет по НИР / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; рук. М. В. Краев. ГК № П 231 от 23.04.2010. ГР № 0121.020100038. Красноярск, 2011.

4. Краева Е. М. Теоретический анализ обтекания решетки профилей малорасходных центробежных насосов потоком вязкой жидкости // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 1(27). С. 96–99.

5. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М. : Физматгиз, 1960.

M. V. Kraev

CALCULATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THE WORKING LATTICE OF CENTRIFUGAL PUMP

In view of the design features of the flow part of the working lattice of centrifugal pump the analysis of flow profiles of the blades of a viscous fluid is performed. The hydrodynamic calculation of parameters of the working lattice is performed and presented as well.

Keywords: hydrodynamics, centrifugal pump, flow profile, blade, working lattice, boundary layer.

© Краев М. В., 2011

УДК 629.78.018.3

С. А. Крат

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПОСОБА СУММИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ ОТ ОТДЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Обоснована потребность объединения световых потоков от отдельных источников излучения при тепловакуумной отработке космических аппаратов (КА). Изложена теория расчета схемы суммирования потоков при построении оптической системы имитатора Солнца.

Ключевые слова: источник излучения, схема суммирования, тепловакуумные испытания, имитатор Солнца, оптическая система.

При проектировании оптических систем, в частности, таких как имитатор солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов, зачастую становится актуальной задача объединения световых потоков, полученных из нескольких (возможно десятков) источников излучения, в единый.

Эта задача возникает при необходимости иметь световое пятно большого размера – 4 м^2 и более, а серийно выпускаемых ламп сопоставимой мощности нет ввиду узкой области применения. Здесь возникает вопрос оптимального совмещения геометрии излучения каждого отдельного источника с остальными, чтобы получить такой суммарный поток, который можно было бы рассматривать как единое целое и применять для его преобразования законы оптики.

При этом необходимо решать задачу либо при построении совершенно нового имитатора солнечного излучения, либо при встраивании излучательной системы в уже существующую светооптическую схему.

Проблема суммирования целиком зависит от условий, в которых строится имитатор Солнца и его излучательная система, и требований, предъявляемых к имитатору солнечного излучения. Это, в первую очередь, габаритные условия – площадь для размещения излучательной системы, площадь, на которой нужно «собрать» итоговое световое пятно, и возможные расстояния между этими площадями. Требования заключаются в мощности итогового светового пятна и его спектральном составе. Ограничения, образованные габаритными условиями, и предъявляемые к ИСИ требования определяют постановку задачи суммирования. Несколько усложняет задачу неопределенность, связанная с потерей энергии (возможно и качества) излучения на поверхностях оптических элементов. Поэтому, если речь идет о построении «нового» имитатора Солнца, то задачу суммирования нужно определять, уже предполагая уровень потери мощности потока после этого суммирования, поскольку требования предъявляются, как правило, к световому пятну на испытываемом космическом аппарате. Здесь необходимо предварительно установить, сколько и какие оптические элементы планируется разместить после суммирования.

При встраивании системы излучения в уже существующую схему величина последующих потерь, как правило, известна.

Таким образом, чтобы приступить к расчету схемы суммирования, необходимо заранее определить следующие параметры:

– мощность и площадь сформированного светового пятна;

– мощность и спектральную характеристику одного источника излучения;

– расстояние от источников излучения до сформированного пятна.

Рассмотрим принципиальный подход к построению такой схемы суммирования световых потоков, когда необходимо объединить мощности от нескольких источников излучения на сколь это возможно минимальной площади S(м^2), сформировав таким образом сходящийся световой поток, причем расстояние от источников излучения до сформированного пятна тоже должно быть минимальным – L(м) (рис. 1).

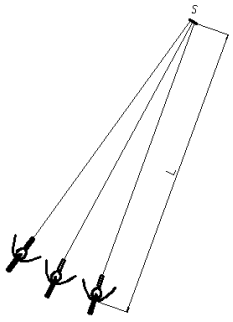


Рис. 1. Условная схема суммирования световых потоков от нескольких источников

При этом на площади S необходимо получить световой поток мощностью $Фes$ [Вт]. Мощность светового потока одного источника излучения обозначим $Фei$. Тогда количество источников излучения для формирования светового потока требуемой мощности можно вычислить по формуле

$$N = \frac{\Phi_{es}}{\Phi_{ei} \cdot \eta_i \cdot \tau_i},$$

где η_i – КПД одного источника излучения; τ_i – энергетическая эффективность связки «источник излучения – облучаемая площадка».

КПД источника излучения однозначно определяется подобранным типом источника.

Обоснование подбора типа источника излучения для имитатора Солнца подробно приведено в работе [1].

Энергетическая эффективность связки «источник излучения – облучаемая площадка» зависит от площади поверхности зеркального элемента (рефлектора), собирающего равномерно излучаемые источником во все стороны лучи и направляющего их в нужную зону. Разумеемся, чем больше охватывает рефлектор лампу, тем выше эффективность.

Также при построении схемы суммирования необходимо учесть, что угол, образованный суммой потоков (угол падения), не должен превышать 30°, для того чтобы весь поток прошел границу «воздух–стекло», а не претерпел частичного отражения.

Далее приведем геометрические обоснования для расчета кривых рефлекторов и схемы суммирования.

Для того, чтобы собрать равномерно исходящие от источника лучи в небольшой зоне (идеально – в точке), очень удобно использовать свойства кривой 2-го порядка – эллипса.

Известно, что нормаль и касательная к эллипсу в любой точке М являются биссектрисами, соответственно, внутреннего и внешнего углов, образованных радиусами-векторами, проведенными из фокусов эллипса в эту точку (рис. 2) [2].

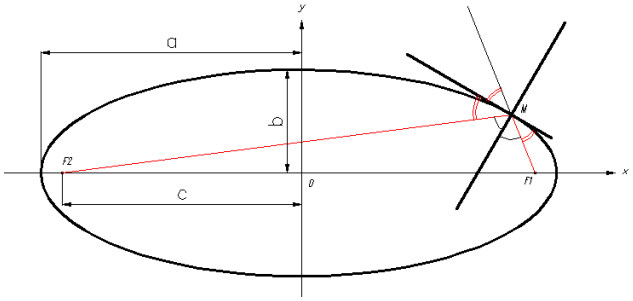


Рис. 2. Нормаль и касательная к эллипсу в точке

Отсюда, если предположить, что точечный источник излучения размещен в первом фокусе эллипса, а внутренняя поверхность эллипса является зеркальной, то любой луч, исходящий из первого фокуса, отразившись от зеркальной поверхности, непременно попадет во второй фокус. Это объясняется из законов отражения (угол падения света равен углу отражения и от кривой свет отражается также, как от касательной, проведенной в точку падения) и теоремы равенства вертикальных углов.

Таким образом, выполнив рефлектор в виде эллипсоида вращения, получим, что весь световой поток от источника излучения, попавший на стенки рефлектора и отразившись от них, соберется во втором фокусе (рис. 3).

Для эффективности рефлектора, выполненного в виде эллипсоида вращения, взаимосвязь между его параметрами – полуосями a и b и расстоянием c существенна (рис. 2):

$$a^2 = b^2 + c^2.$$

Это означает, с одной стороны, что чем меньше расстояние от вершины эллипса до первого фокуса (в котором размещен источник излучения), тем большая часть излучения попадет на его поверхность и далее – в требуемую зону. С другой же стороны, это влечет за собой увеличение межфокального расстояния или расстояния от источника до облучаемой площадки (эллипс получается более вытянутый).

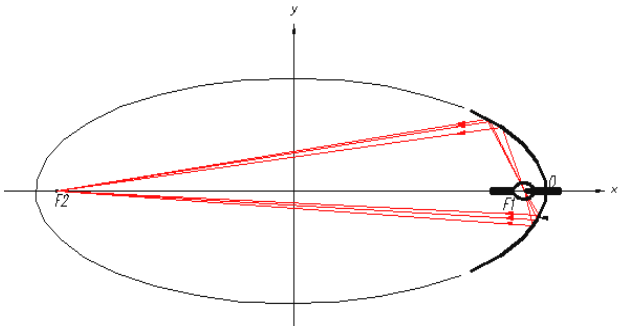


Рис. 3. Рефлектор в виде эллипсоида вращения

Здесь важно для построения схемы суммирования найти «золотую середину». Если обозначить расстояние от вершины рефлектора до первого фокуса OF_1, а расстояние от вершины до второго фокуса OF_2, то задав числовое значение OF_2 и изменяя в допустимых пределах OF_1, можно составить множество систем уравнений типа:

$$\begin{cases} OF_1 = a - c; \\ OF_2 = a + c. \end{cases}$$

Тогда, используя вышеприведенную связь параметров, нетрудно определить все характеристики возможных эллипсоидов-рефлекторов. Оптимальным будет являться тот эллипсоид, площадь поверхности которого при равных наружных диаметрах больше.

Площадь поверхности эллипсоида однозначно определяется длиной дуги эллипса, которая является образующей данного эллипсоида. Ее можно вычислить по формуле

$$l = a\int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - e^2 \cos^2 t}\, dt\,,$$

где $e^2 = \dfrac{a^2 - b^2}{a^2}$ – квадрат эксцентриситета эллипса; $t = \arctan(\varphi k \cdot \tan\varphi)$ – эксцентрический угол; φ – угол точки на эллипсе, здесь $\varphi \in (0, \dfrac{\pi}{2}), k = \dfrac{a}{b}$.

Далее, на основе известного количества источников излучения и оптимальных параметров одного рефлектора-эллипсоида уже можно сформировать схему суммирования потоков. Для этого, задав наружный диаметр одного рефлектора и зная расстояние OF_2, получим телесный угол светового потока одного источника излучения. Очевидно, что совместив вторые фокусы F_2 всех рефлекторов в одну точку, получим некоторый «суммарный» поток, мощность

которого в этой точке будет равна сумме мощностей потоков отдельных рефлекторов. При этом вершины всех рефлекторов будут располагаться на поверхности сферы с центром в точке совмещения вторых фокусов рефлекторов. Способ размещения рефлекторов относительно друг друга определяет требование компактности в конструкторском решении построения системы излучения и минимально возможный телесный угол «суммарного» потока.

Возможные построения схем суммирования световых потоков от 7 и 10 источников излучения показаны на рис. 4.

Со схемой суммирования (см. рис. 4) можно работать, как со световым потоком от одного источника излучения с углом сходимости, определенным «крайними» позициями рефлекторов. Понятно, что суммарный поток не будет иметь «четкой» конусообразной формы, но это будет некая его часть – «вырезка». Пример преобразования такого суммарного потока двояковогнутой линзой в параллельный показан на рис. 5.

Для определения углов наклонов отдельных рефлекторов в составе схемы суммирования рассмотрим треугольник *OOiF*2 и его проекции на плоскости *YOZ* и *XOZ* (рис. 6).

Здесь $|O_iF2|$ – расстояние от вершины *i*-го рефлектора до второго фокуса всех рефлекторов, а x_i и y_i – координаты *i*-го рефлектора. Углы наклона рефлектора по *x* и *y* можно определить из проекций треугольника *OOiF2* на плоскости *YOZ* и *XOZ*. Это углы *Lx* и *Ly* соответственно. Угол *Lx* равен углу *OyiF2O* как вертикальный. Аналогично угол *Ly* равен углу *OxiF2O*. Обозначив $|O_iF2|$ за *f*, имеем

$$\sin Lx = \frac{y_i}{|OyiF2|},$$

где

$$|OyiF2| = \sqrt{f^2 - x_i^2},$$

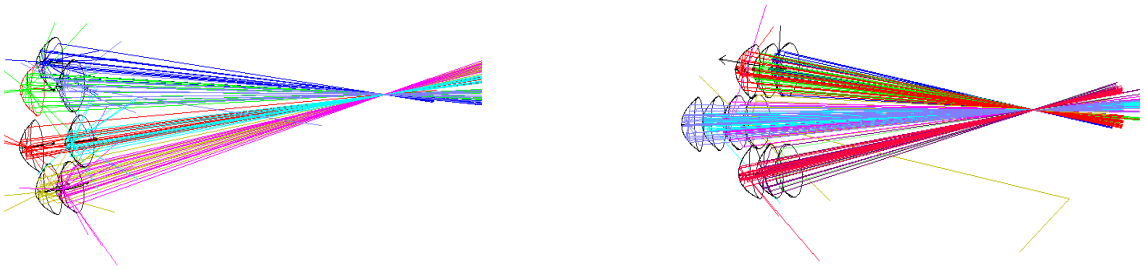
откуда

$$Lx = \arcsin\left(\frac{y_i}{\sqrt{f^2 - x_i^2}}\right).$$

Аналогично

$$\sin Ly = \frac{x_i}{|OxiF2|},\ |OxiF2| = \sqrt{f^2 - y_i^2},$$

$$Ly = \arcsin\left(\frac{x_i}{\sqrt{f^2 - y_i^2}}\right).$$



а *б*

Рис. 4. Схемы суммирования световых потоков для 7 и 10 источников излучения:
а – 7 источников излучения; *б* – 10 источников излучения

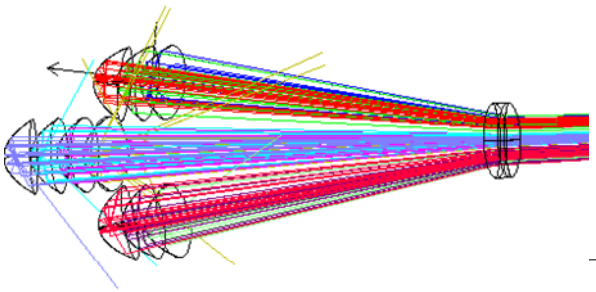


Рис. 5. Преобразование суммарного светового потока в параллельный

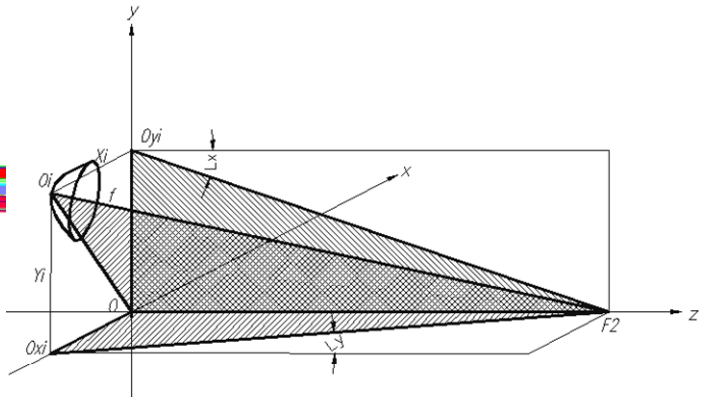


Рис. 6. Определение углов наклонов рефлекторов

Все изложенное идеально справедливо лишь для точечных источников излучения. Но в реальной практике источники имеют конечные размеры. Для предложенных в работе [1] ксеноновых ламп OSRAM «точечный источник излучения» – это конусообразная дуга длиной в 13 мм. Здесь возникает вопрос об отклонениях лучей светового потока в силу этого отличия, и должен быть проведен дальнейший расчет с учетом возможных отклонений. Современные компьютерные программы для оптических расчетов позволяют с достаточной точностью вводить такие параметры источника излучения, как форма дуги и пространственное распространение потока. В результате, расчетные модели, как правило, подтверждаются на практике.

Библиографические ссылки

1. Крат С. А., Филатов А. А., Христич В. В. Тепловакуумные испытания космического аппарата: опыт создания имитатора солнечного излучения на основе современных газоразрядных ламп высокого давления // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 2 (28). С. 73.

2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1986.

S. A. Krat

THEORETICAL BASES OF COMPOSITING TECHNIQUE OF LIGHT STREAMS FROM SEPARATE SOURSES OF RADIATION FOR SC LAND WORKING OFF

In the article the author proves the requirement of association of light streams, from separate radiation sources, at thermal vacuum working off of SC and presents a theory of calculation of the streams summation scheme, for construction of optical system of the Sun simulator.

Keywords: radiation source, summation scheme, thermal vacuum tests, the Sun simulator, optical system.

© Крат С. А., 2011

УДК 681.7.069.2

С. А. Крат, А. А. Филатов, В. В. Двирный, В. В. Христич, А. К. Шатров

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕТООПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ИМИТАТОРА СОЛНЦА ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОТРАБОТКИ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены вопросы повышения требований к наземной тепловой отработке космических аппаратов (КА) в части имитации солнечного излучения в связи с выпуском негерметичных КА нового поколения. Поставленные задачи решены за счет создания эффективной системы излучения, построенной на базе современных серийно выпускаемых ламп солнечного спектра. Рассмотрено построение модели светооптической схемы имитатора Солнца в программном пакете Zemax с последующей ее параметрической оптимизацией.

Ключевые слова: тепловакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, источник излучения, светооптическая схема, параметрическая оптимизация, ХВО-лампы.

На современном этапе создания КА, требующем улучшения их технических характеристик и увеличения срока активного существования (САС) (до 10–15 лет) планируется производство спутников на основе бесконтейнерных аппаратов с пассивной системой терморегулирования (СТР). Создаются КА с использованием сотовых панелей с встроенными тепловыми трубами, специальных радиационных поверхностей и большого количества обогревателей. Надежность таких КА высока, так как отсутствуют критичные, с точки зрения надежности элементы, приводящие к отказам (гермоконтейнеры, жидкостные контуры и т. д.).

С производством негерметичных КА нового поколения (далее по тексту НКА) связано усовершенствование испытательной базы для наземной экспериментальной отработки (НЭО) и проводятся мероприятия по повышению точности и качества условий космического пространства, воспроизводимых действующими имитационными установками.

Одним из основных этапов наземной экспериментальной отработки КА считаются тепловакуумные испытания, которые проводятся на специально оборудованном стенде, оснащенным имитатором солнечного излучения (ИСИ).

Недостаточность методической базы построения оптических систем и компоновок ИСИ, низкие КПД существующих систем ИСИ предполагают дополнительные исследования в этой области, а создание НКА повышает требования к точности воспроизводимых имитаторами условий.

Здесь рассмотрены вопросы построения эффективной системы излучения имитатора Солнца в составе стенда для НЭО ОАО «ИСС» ТБК-120.

Обоснование выбора источника излучения для ИСИ ТБК-120 приведено в работе [1]. Суть построения системы излучения на базе метода «совмещенных фокусов» заключается в формировании квазипараллельного потока имитации солнечного излучения заданного диаметра с энергетической мощностью, равной сумме энергетических мощностей отдельных источников излучения, посредством совмещения фокусов отдельных рефлекторов-эллипсоидов и отрицательной линзы-конденсора.

На базе метода «совмещенных фокусов» выполнен аналитический габаритный расчет системы излучения ИСИ ТБК-120. Однако такой расчет позволяет лишь в первом приближении оценить реализацию оптической системы, поскольку источники излучения оцениваются как точки, распространяющие излучение равномерно по всем направлениям, а ход лучей рассматривается вблизи оптической оси системы. В реальной оптической системе источник излучения имеет конечные размеры, характерные распределение мощности излучения в дуге лампы и пространственное распространение силы света. Такая оптическая система обладает искажениями проекций в виде аберраций (изображение одной точки имеет вид расплывчатого пятна) и дисторсий (нарушение геометрического подобия). Точный аналитический расчет системы с учетом этих факторов является сложным и громоздким, а зачастую просто невозможным. Современная программа для оптического проектирования ZEMAX позволяет проводить анализ реальных оптических систем с большим количеством компонентов и учетом вышеназванных факторов.

Далее будут рассмотрены вопросы моделирования и оптимизации выполненного габаритного расчета на базе вычислительной модели по критериям максимума эффективности и минимума неравномерности с применением программного пакета ZEMAX.

Основной проблемой, усложняющей моделирование данной оптической системы, явилась проблема задания источника излучения, моделирующего реальные характеристики лампы OSRAM XBO 10000 OFR – неравнояркость дуги и пространственное распределение силы света [2]. Моделирование источника, отличного от стандартных источников ZEMAX, требует создания специальной динамической библиотеки, задающей эти характеристики.

Анализ представленных в [2] характеристик лампы показал, что распределение яркости в объеме источника обладает круговой симметрией. Таким образом, описать неравнояркость источника можно с помощью двух функций – в плоскости *XZ* и по оси *Y*.

При аппроксимации функций распределения яркости в координатных осях пакета ZEMAX выяснилось, что в плоскости *XZ* распределение яркости можно описать следующей функцией:

$$B(r) = A_1 + B_1 r + C_1 r^2 + D_1 r^3 + E_1 r^4 + F_1 r^5,$$

$$r = \sqrt{x^2 + z^2},$$

где A_1 = 0,986 47; B_1 = 0,516 69; C_1 = –3,194 46; D_1 = –3,964 73; E_1 =13,011 85; F_1 = –7,250 73.

По оси *Y*

$$B(y) = A_2 + B_2 y + C_2 y^2 + D_2 y^3 + E_2 y^4 + F_2 y^5 + G_2 y^6,$$

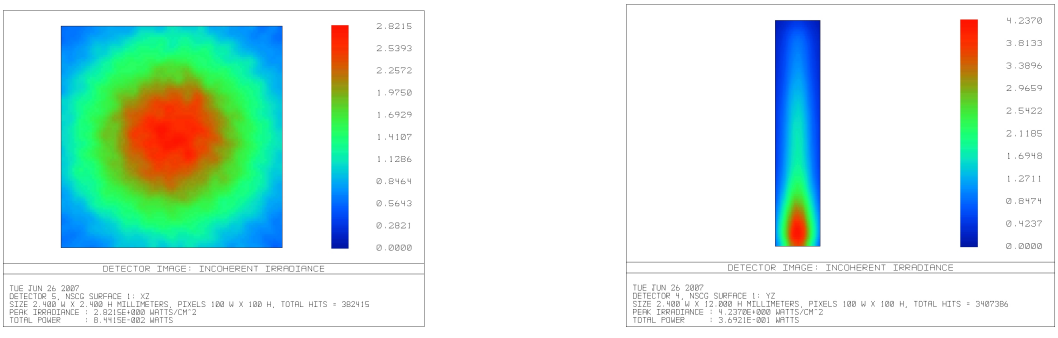
где A_2 = 1,017 52; B_2 = 0,478 44; C_2 = –30,676 5; D_2 =128,915 51; E_2 = –228,483 74; F_2 =187,279 52; G_2 = –58,430 25.

В соответствии с созданными функциями на языке C++ составлен, скомпилирован и внедрен исходный код для динамической (DLL) библиотеки ZEMAX. Теперь интенсивность каждого луча в зависимости от того, из какого места объема источника он формируется, нормируется яркость, определяемая функциями $B(r)$ и $B(y)$. Другими словами, каждая точка в объеме источника получила свою индивидуальную яркость, но ее кривая силы света не поменяла свою форму. Тогда построенная модель представляет собой цилиндрический неравнояркий источник света (рис. 1).

ИСИ ТБК-120 с источником, моделирующим лампу OSRAM XBO 10000 OFR, приведен на рис. 2.

При распределении интенсивности в плоскости, перпендикулярной оптической оси линзы щита (рис. 3), мощность каждого источника принята равной 1/7 Вт, т.е. суммарная мощность светового щита равна 1 Вт. Тогда значение мощности, приходящееся на детектор, позволяет автоматически получить значение эффективности части схемы, предшествующей этому детектору.

Распределение интенсивности излучения в плоскостях параболоидного зеркала и планшета и распределение интенсивности в поперечных сечениях плоскости контроля излучения показаны на рис. 4, 5.



а *б*

Рис. 1. Распределение яркости для неравнояркого источника – дуги лампы XBO 10000 W/HS OFR:
а – в плоскости *XZ*; *б* – в плоскости *YZ*

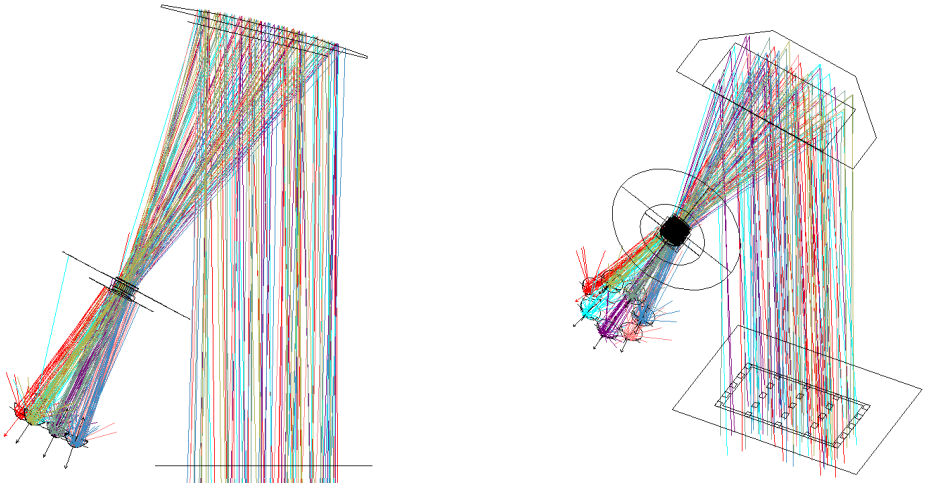


Рис. 2. Вид светооптической схемы с источником, моделирующим лампу OSRAM XBO

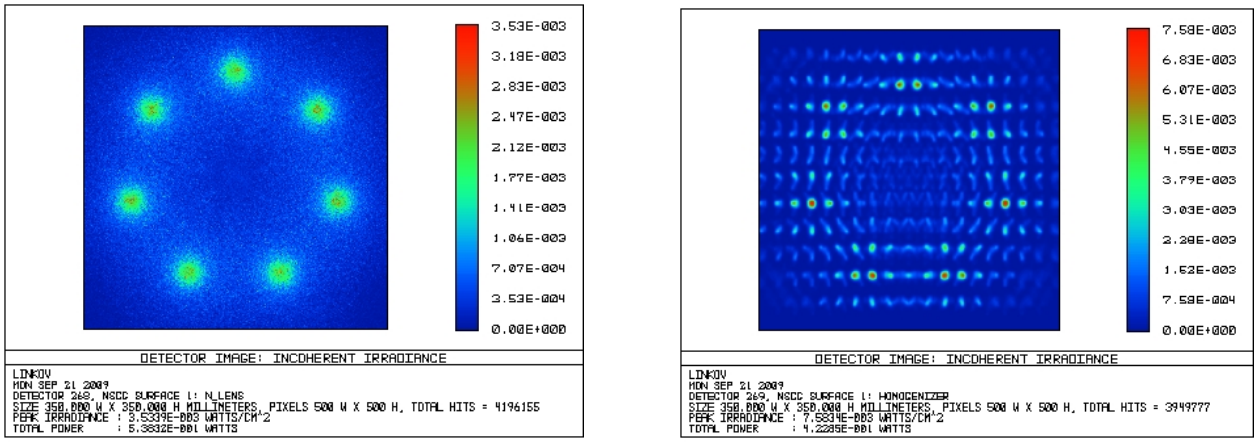


Рис. 3. Распределение интенсивности в плоскости, перпендикулярной оптической оси линзы щита и расположенной непосредственно перед отрицательной линзой (слева) и непосредственно за иллюминатором (справа), размер детектора 350 × 350 мм

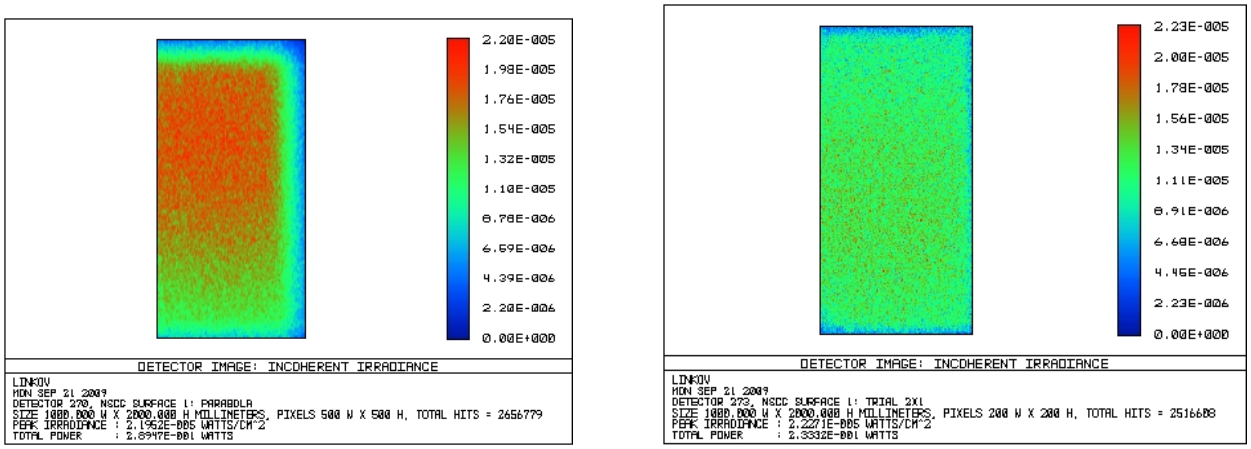


Рис. 4. Распределение интенсивности в плоскости параболоидного зеркала (*слева*) и в плоскости контроля излучения (*справа*), размер детектора 1 000×2 000 мм

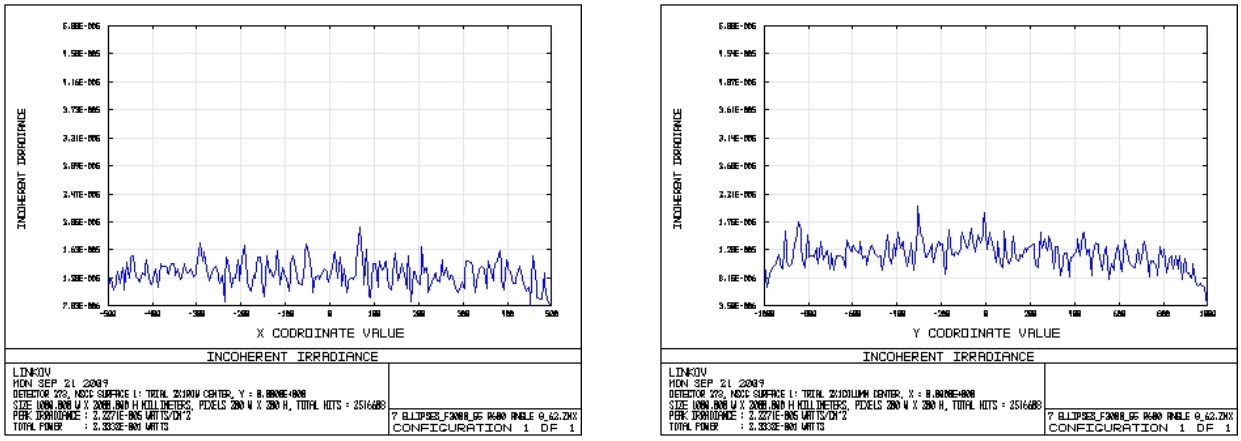


Рис. 5. Поперечные сечения (через центр детектора) распределения интенсивности в плоскости контроля излучения, размер детектора 1,0×2,0 м

Эффективность схемы от светового щита к планшету уменьшается (табл. 1).

Таблица 1

Потери в светооптической схеме

Элементы светооптической схемы	Мощность на детекторе, Вт
Световой щит	1
Перед отрицательной линзой	0,538
После смесителя	0,422
На параболоидном зеркале	0,289
На планшете	0,233

Данные таблицы показывают, что основные потери происходят между световым щитом и отрицательной линзой, а также между смесителем и параболоидным зеркалом. Причиной первых потерь является конечная эффективность эллиптического рефлектора, равная приблизительно 60 %. Причина вторых – вследствие того, что реальный источник не является точечным, расходимость за линзой несколько превышает числовую апертуру смесителя, и часть лучей теряется в смесителе, претерпевая полное внутреннее отражение от боковых граней элементов смесителя.

Для минимизации данных потерь и отысканию оптимальных параметров светооптической системы необходимо прибегнуть к параметрической оптимизации светооптической системы. Используемый источник излучения не является точечным источником, а кроме того, не является и равноярким. Данное обстоятельство делает аналитическое вычисление оптимальных параметров системы неоправданно сложным. Поэтому целесообразно воспользоваться возможностями современного программного обеспечения, позволяющего оптимизировать систему в непоследовательном режиме.

Параметрическая оптимизация светооптической схемы в программном пакете ZEMAX. Задача параметрической оптимизации представляет собой итерационный процесс отыскания минимума оценочной функции, в ходе которого параметры системы, объявленные переменными, изменяются.

В программном пакете ZEMAX используется оценочная функция следующего вида:

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i},$$

где W_i – вес операнда; V_i – текущее значение операнда; T_i – целевое значение операнда.

Для оптимизации светооптической схемы была сконструирована следующая оценочная функция:

$$MF^2 = \frac{1}{460}\left[10\left(\frac{P_V^{(1)} - P_T^{(1)}}{P_V^{(13)} - P_T^{(13)}} + \frac{P_V^{(5)} - P_T^{(5)}}{P_V^{(13)} - P_T^{(13)}} + \frac{P_V^{(21)} - P_T^{(25)}}{P_V^{(13)} - P_T^{(13)}}\right) + 20\frac{P_V^{(11)} - P_T^{(11)}}{P_V^{(15)} - P_T^{(15)}} + 400(P_V^{1x2} - P_T^{1x2})\right],$$

где $P_V^{(N)}$ – текущее значение мощности светового потока, приходящегося на N-ый детектор, $P_T^{(N)}$ – целевое значение мощности светового потока, приходящегося на N-ый детектор, P_V^{1x2} – текущее значение мощности светового потока, приходящееся на область 1×2 м, а P_T^{1x2} – целевое значение того же параметра. Для описания промежуточных результатов будем пользоваться следующими критериями: эффективностью светооптической схемы и неравномерностью в заданной области (рис. 6).

В качестве оптимизируемых параметров первоначально были выбраны следующие:

– радиус кривизны в осевой точке для кривой рефлектора R_0;

– коэффициент деформации кривой рефлектора k;

– расстояние от центральной точки светового щита до вершины вогнутой поверхности L;

– радиус кривизны отрицательной линзы R.

Промежуточные результаты оптимизации даны в табл. 2.

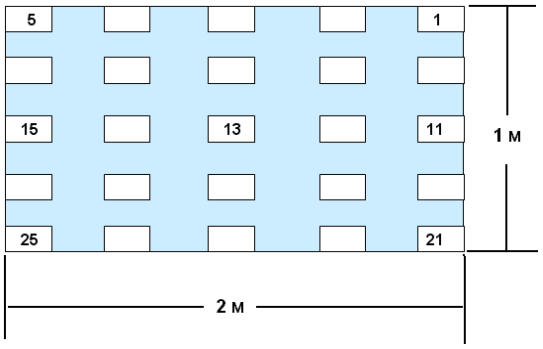


Рис. 6. Схема расстановки детекторов при анализе и оптимизации

На основе анализа данных табл. 2 в качестве рабочей была выбрана схема с параметрами:

$$R_0 = 108{,}1096; \qquad R = 600;$$
$$k = -0{,}92928; \qquad L = 2211.$$

Выбор данной схемы обусловлен выбором компромисса между эффективностью и неравномерностью. Для улучшения равномерности было решено незначительно изменить углы наклона рефлекторов, сохранив при этом эффективность схемы (табл. 3).

За счет оптимизации углов наклона удалось несколько улучшить равномерность, сохранив при этом эффективность схемы (табл. 4).

Таблица 2

Промежуточные результаты оптимизации

R_0, мм	k	L, мм	R, мм	Эффективность, %	Неравномерность в области 1×2 м, %	Неравномерность в области 0,9×1,8 м, %
107,69	0,917763	2300	–264	19	13,7	4,8
107,7213	0,918854	2300	–300	22	15,6	4,7
107,804	0,921739	2300	–400	25	22,3	9,8
107,8809	0,924427	2300	–500	26	23,5	11,6
107,8927	0,92484	2300	–516	26	23,5	11,8
107,399	0,907654	1847	–424	22	18,4	7,0
107,7798	0,920896	2213	–457	22	19,2	6,6
107,9015	0,925146	2354	–474	22	20	7,5
108,0196	0,929283	2211	–600	23,8	19,1	6,4

Таблица 3

Углы наклона рефлекторов

№ рефлектора п/п	Координата вершины рефлектора X, мм	Координата вершины рефлектора Y, мм	Угол поворота рефлектора вокруг оси X, град.	Угол поворота рефлектора вокруг оси Y, град.	Угол поворота рефлектора вокруг оси X, град.	Угол поворота рефлектора вокруг оси Y, град.
			До оптимизации		После оптимизации	
1	0.0	450.0	8.62	0	9.24	0
2	351,9	280,6	5,37	–6,73	5,75	–7,22
3	438,7	–100,2	–1,91	–8,41	–2,05	–9,01
4	195,3	–405,5	–7,77	–3,73	–8,33	–4,00
5	–195,3	–405,5	–7,77	3,73	–8,33	4,00
6	–438,7	–100,2	–1,91	8,41	–2,04	9,01
7	–351,9	280,6	5,37	6,73	5,75	7,21

Таблица 4

Характеристики окончательной схемы до и после оптимизации углов наклона рефлекторов

R_0, мм	k	L, мм	R, мм	Углы наклона рефлекторов	Эффективность, %	Неравномерность в области 1×2 м, %	Неравномерность в области 0,9×1,8 м, %
108,0196	0,929283	2211	–600	До оптимизации	23,8	19,1	6,4
108,0196	0,929283	2211	–600	После оптимизации	23,8	16,4	7,6

Повышение требований к наземной тепловой отработке негерметичных космических аппаратов в части имитации солнечного излучения делает актуальными замену водоохлаждаемых высокомощных ламп на маломощные (до 10 кВт) воздухоохлаждаемые серийно выпускаемые лампы солнечного спектра и дальнейшее исследование в области построения методических основ создания имитаторов Солнца на базе этих ламп.

Представленная модель позволит оперативно прогнозировать результаты изменения настроек и параметров оптической системы ИСИ, а также проводить параметрическую оптимизацию с использованием разных целевых функций.

Библиографические ссылки

1. Крат С. А., Филатов А. А., Христич В. В. Тепловакуумные испытания космического аппарата: опыт создания имитатора солнечного излучения на основе современных газоразрядных ламп высокого давления // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 2 (28). С. 73.

2. XBO Theatre Lamps [Electronic resource] // Technology and Applications. URL: www.osram.com (data of visit 13.04.2010).

S. A. Krat, A. A.Filatov, V. V. Dvirnyj, V. V. Hristich, A. K. Shatrov

PHOTONIC SCHEMES MODELLING AND PARAMETRICAL OPTIMIZATION OF THE SUN SIMULATOR FOR THERMAL WORKING OF UNTIGHT SPACECRAFTS

The authors consider questions of severization of requirements to spacecraft land thermal working regarding sunlight imitation in connection with production of untight spacecraft of new generation. A model of construction of photonic scheme of the Sun simulator in the software package is considered, with its subsequent parametric optimization.

Keywords: thermal vacuum tests, sunlight simulator, radiation source, photonic scheme, parametric optimization, XBO-lamps.

© Крат С. А., Филатов А. А., Двирный В. В., Христич В. В., Шатров А. К., 2011

УДК 629.7.017.1

В. В. Лукасов, Н. В. Никушкин

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПО ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ЭКИПАЖЕМ ВОЗДУШНОГО СУДНА В ПОЛЕТЕ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ

Предложена методика оказания помощи экипажу воздушного судна при выходе из аварийной ситуации в полете с использованием вероятностного метода.

Ключевые слова: авиационная техника, экипаж, аварийная ситуация, признак, вероятность появления состояния, вероятность проявления признака.

Анализ инцидентов, авиационных происшествий и катастроф, произошедших с летательными аппаратами (ЛА), показывает, что все они происходят по вине человека или техники. При подготовке и выполнении полета на человека или технику влияют различные факторы, которые в ряде случаев приводят к тяжелым последствиям.

Рассмотрим эти факторы.

На авиационную технику влияют качество серийного производства, качество выполнения требований летной и технической эксплуатации, своевременное и полное проведение технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и техника пилотирования воздушного судна, и другие факторы.

На экипаж оказывают влияние обученность, регулярность выполнения полетов, качество подготовки к полету, физическое и психологическое состояние членов экипажа и ряд других факторов.

К отказам и неисправностям может привести как сама авиационная техника, так и ее эксплуатация на земле и в воздухе.

Из опыта эксплуатации летательных аппаратов известно, что проявление одного отказа, неисправности или ошибочного действия не приводят к тяжелым последствиям, и только одновременное сочетание или последовательное наложение их могут спровоцировать аварийную ситуацию.

За десятки лет эксплуатации накоплен большой статистический материал, который дает возможность проанализировать, сделать выводы, определить причины, принять меры по предупреждению аналогичных случаев или своевременных действий, приводящих к выходу из аварийной ситуации.

При выполнении полета экипаж заинтересован в возможности самостоятельно определить причину, предвидеть дальнейший ход развития аварийной си-

туации и принять единственное правильное решение, т. е. экипаж в любой ситуации должен быть готовым к самостоятельным правильным действиям.

Каждая неисправность или отказ проявляется в виде одного или нескольких признаков, которые не всегда явно указывают на них.

В полете возможны два варианта развития событий при аварийной ситуации:

– проявление признака или несколько признаков, которые дают полное представление о состоянии воздушного судна, т. е. явно указывают на неисправность или отказ;

– проявление признака или несколько признаков, по которым трудно однозначно сказать, какой отказ или неисправность возникли. В этом случае невозможно принять правильное решение, а значит, любое действие или бездействие только усугубит аварийную ситуацию.

Наиболее опасны аварийные ситуации второго варианта и, именно, с такими чаще приходится встречаться в полете.

Используя расчетные данные одного из методов теории вероятностей, можно оказать помощь командиру (пилоту) в принятии решения в сложной ситуации. Для этого воспользуемся методом Байеса, который имеет возможность охватывать, взаимосвязывать, обрабатывать и получать результат от большого количества переменных параметров в различных условиях обстановки.

Чтобы применить этот метод, необходимо определить независимые случайные величины (для нас это факторы, отрицательно влияющие на выполнение полетного задания), закономерные повторения их в количественном значении, на основе статистических данных и по формуле Байеса рассчитать вероятность возникновения конкретной аварийной ситуации.

Формула Байеса имеет вид

$$P(S_i / k_j) = P(S_i)\frac{P(k_j / S_i)}{P(k_j)}, \qquad (1)$$

где $P(S_i)$ – вероятность появления состояния S_i, определяемая по статистическим данным; $P(k_j/S_i)$ – вероятность проявления признака аварийного состояния k_j у объектов с состоянием S_i; $P(k_j)$ – вероятность появления признака аварийного состояния k_j во всех объектах независимо от состояния объекта.

Обобщенная формула Байеса относится к случаю, когда обследование проводится по комплексу признаков К, включающему признаки $k_1, k_2, ..., k_v$. Каждый из признаков k_j имеет τ_j разрядов ($k_{j1}, k_{j2}, ..., k_{js}, ..., k_j\tau_j$). В результате обследования становится известной реализация признака

$$K_j^* = k_{js} \qquad (2)$$

и всего комплекса признаков K^* (индекс* означает конкретное значение (реализацию) признака). Формула Байеса для комплекса признаков имеет вид

$$P(S_i/K^*) = P(S_i)\,P(K^*/S_i) / P(K^*), \quad (i = 1, 2, ..., n), \qquad (3)$$

где $P(S_i/K^*)$ – вероятность диагноза S_i после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков K; $P(S_i)$ – вероятность появления состояния S_i (по предшествующей статистике).

В практических задачах, особенно при большом числе признаков, применяется условие независимости признаков даже при наличии существенной корреляции между ними.

Вероятность проявления комплекса признаков K^* определяется по выражению

$$P(K^*) = \sum_{S=1}^{n} P(S_C)\,P(K^*/S_C), \qquad (4)$$

где S_c – сочетание неисправных состояний.

Для комплекса признаков обобщенная формула Байеса может быть записана в виде

$$P(S_i / K^*) = \frac{P(S_i)P(K^*/S_i)}{\sum_{s=1}^{n} P(S_C)P(K^*/S_C)}, \qquad (5)$$

а

$$\sum_{i=1}^{n} P(S_i / K^*) = 1, \qquad (6)$$

т. е. одно из состояний обязательно реализуется, а реализация одновременно двух состояний невозможна.

Теорема гипотез является основой для применения, но прямое ее использование не дает требуемого результата. Чтобы достичь его, необходимо ее развить, углубить путем преобразования, трансформации обобщенной формулы Байеса, определением условий применения, построением требуемых расчетных математических моделей, составлением алгоритма поиска неисправностей.

Раскрывая теорему гипотез, определим возможные варианты сочетаний признаков и неисправных состояний:

I – проявление одного признака в одной аварийной ситуации;

II – проявление одного признака в двух аварийных ситуациях;

III – проявление двух признаков в одной аварийной ситуации;

IV – проявление двух признаков в двух аварийных ситуациях;

V – проявление двух признаков в трех аварийных ситуациях;

VI – проявление трех признаков в двух аварийных ситуациях.

В каждом варианте необходимо рассматривать предполагаемые аварийные ситуациии с учетом их возможного проявления. Для этого целесообразно определить условия, при которых признаки будут рассматриваться как случаи I, а неисправные состояния как вариации II.

Условия предопределяют необходимость выполнения следующих операций:

1. Выполнение расчета по случаям:

I а) – при одновременном проявлении всех признаков;

I б) – при неявном проявлении (не проявлении) первого признака. Неявное проявление признака означает, что признак слабо выражен;

I в) – при неявном проявлении (не проявлении) второго признака;

I г) – при неявном проявлении (не проявлении) обоих признаков.

2. Рассмотреть в каждом случае вариации II для следующих состояний:

II а) – для первого рассматриваемого неисправного состояния (S_1);

II б) – для второго рассматриваемого неисправного состояния (S_2);

II в) – для третьего рассматриваемого неисправного состояния (S_3).

Эти условия применяют только для того варианта, в котором одновременно имеется два и более признака, две и более аварийной ситуации.

Каждую аварийную ситуацию необходимо рассматривать по всем четырем случаям:

I а), I б), I в) и I г) – проявления или не проявления признаков.

Для удобства и большей наглядности предлагается строить диагностическую матрицу общего вида (табл. 1), которая состоит из столбцов, где размещены конкретные признаки, а в последнем – вероятности $P(k_j/S_i)$, и строк, в которых содержатся значения вероятности аварийных ситуаций.

Для получения необходимых расчетных зависимостей из обобщенной формулы Баейса используйте данные таблицы.

Рассмотрим получение выражений для наиболее сложного V варианта.

V вариант – проявление двух признаков (k_1 и k_2) в трех неисправных состояниях (S_1, S_2 и S_3).

V вариант будем рассматривать в 4 случаях при проявлении или не проявлении двух признаков, и в 3 вариациях, т. е. для трех неисправных состояний.

Вариация II а) для первой аварийной ситуации (S_1):

для случая I а) – одновременное проявление двух признаков (k_1 и k_2) в аварийной ситуации S_1. Используя обобщенную формулу Баейса (5), получим выражение $P(S_1/k_1k_2)$:

$$P(S_1/k_1k_2)=\frac{P(S_1)P(k_1/S_1)P(k_2/S_1)}{P(S_1)P(k_1/S_1)P(k_2/S_1)+P(S_2)P(k_1/S_2)\times \\ \times P(k_2/S_2)+P(S_3)P(k_1/S_3)P(k_2/S_3)}. \quad (7)$$

В числителе имеется произведение значения $P(S_i)$ – вероятность появления аварийной i-ой ситуации (применительно к рассматриваемому случаю S_1) $P(S_1)$, на значение $P(K^*/S_i)$ – вероятность проявления комплекса признаков (для нашего случая одновременное проявление признаков k_1 и k_2), в аварийной ситуации (для рассматриваемого случая S_1) – $P(k_1k_2/S_1)$ или $P(k_1/S_1)\,P(k_2/S_1)$.

Исходя из этих обозначений в числителе получим выражение $P(S_1)\,P(k_1k_2/S_1)$ или $P(S_1)\,P(k_1/S_1)\,P(k_2/S_1)$.

В знаменателе имеется сумма произведения значения $P(S_c)$ – вероятность появления сочетаний аварийных ситуаций (для рассматриваемого случая S_1, S_2 и S_3 – определяют количество слагаемых) – $P(S_1)$, $P(S_2)$ и $P(S_3)$, на значение $P(K^*/S_c)$ – вероятность проявления комплекса признаков (в рассматриваемом случае – одновременное проявление признаков – k_1 и k_2), в сочетании аварийных ситуаций (S_1, S_2 и S_3) – $P(k_1/S_1)\,P(k_2/S_1) + P(k_1/S_2)\,P(k_2/S_2) + P(k_1/S_3)\,P(k_2/S_3)$.

В результате в знаменателе получаем выражение

$$P(S_1)\,P(k_1/S_1)\,P\,(k_2/S_1) + P(S_2)\,P(K_1/S_2)\,P(K_2/S_2) + \\ + P(S_3)\,P(K_1/S_3)\,P(K_2/S_3).$$

После сведения рассмотренных выражений, получим расчетную зависимость 7.

Аналогичными действиями получены выражения для случая I б) – при неявном проявлении первого признака в аварийной ситуации S_1 – $P(S_1/\bar{k}_1k_2)$; для случая I в) – при неявном проявлении второго признака в аварийной ситуации S_1 – $P(S_1/k_1\bar{k}_2)$; для случая I г) – при неявном проявлении обоих признаков в аварийной ситуации S_1 – $P(S_1/\bar{k}_1\bar{k}_2)$.

Проделав подобные действия с вариацией II б), получим выражение для второй аварийной ситуации (S_2) и с вариацией II в) – для третьей аварийной ситуации (S_3).

Каждое полученные выражение вида (7) представляет собой одну, из всего многообразия аварийных ситуаций, математическую модель, ту, которая может возникнуть на борту воздушного судна в какой-то определенный момент.

Диагностическая матрица общего вида

Аварийные ситуации S_i	Вероятность проявления признака k_j			$P(S_i)$
	по k_1	по k_2	по k_3	
	$P(k_1/S_i)$	$P(k_2/S_i)$	$P(k_3/S_i)$	
S_1	$P(k_1/S_1)$	$P(k_2/S_1)$	$P(k_3/S_1)$	$P(S_1)$
S_2	$P(k_1/S_2)$	$P(k_2/S_2)$	$P(k_3/S_2)$	$P(S_2)$
S_3	$P(k_1/S_3)$	$P(k_2/S_3)$	$P(k_3/S_3)$	$P(S_3)$

Экипаж точно будет знать, какой отказ или неисправность возникла, что позволит принять единственно правильное решение: продолжить полет, прекратить выполнение полетного задания, выключить двигатель, или перейти на другой режим полета, идти на вынужденную посадку, продолжать полет с повышенным контролем параметров работы двигателей и систем, запросить экстренную посадку и т. д.

Для этого необходимо, в соответствии с предложенной методикой, иметь расчеты по возникновению отказов и неисправностей всех систем и агрегатов данного типа воздушного судна, составить программу по определению отказов и неисправностей и ввести ее в бортовую вычислительную машину.

В полете, путем введения проявившихся признаков в БЦВМ, командир получит информацию об истинном состоянии системы воздушного судна. Зная его в данный момент, командир (пилот) принимает единственно правильное решение, выполняет необходимые операции и снижает риск или выводит воздушное судно из аварийной ситуации.

Библиографические ссылки

1. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З. Надежность машин. М. : Высш. шк., 1988.

2. Воробьев В. Г., Константинов В. Д. Техническая диагностика авиационного оборудования. М. : Транспорт, 2000.

3. Лукасов В. В. Метод поиска неисправностей и его использование в обеспечении надежности летательных аппаратов : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2006.

V. V. Lukasov, N. V. Nikushkin

SOLUTION OF A PROBLEM OF SUPPORT OF THE DESISION TO BE MADE BY A CREW TEAM WHEN AN EMERGENCY SITUATION OCCURS WILE IN FLIGHT

The authors offer a method for support of the desision to be made by a crew team to avoid the emergency when such situation occurs wile in flight, with the help of a probabilistic method.

Keywords: *aircraft, crew, emergency, sign, probability of a state, probability of warning expression.*

© Лукасов В. В., Никушкин Н. В., 2011

УДК 629.7.064.52

Е. А. Мизрах, Д. К. Лобанов

ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЬ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЭНЕРГОСИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА*

Разработана методика динамического синтеза нагрузочных устройств с рекуперацией электроэнергии в сеть электропитания испытательного комплекса энергосистем космического аппарата.

Ключевые слова: энергосбережение, нагрузочное устройство, рекуперация.

Энергосистемы современных космических аппаратов (КА) работают, как правило, на постоянном токе и содержат первичные и вторичные источники электрической энергии для электропитания бортовых электротехнических систем. При наземных испытаниях вторичных источников электропитания (ВИЭП) КА большой мощности (свыше пяти киловатт) возникают проблемы с утилизацией энергии нагрузочных устройств. Авторами предложен один из вариантов решения этой проблемы – рекуперация потребленной энергии в сеть постоянного тока, питающую испытываемый вторичный источник электропитания [1].

Энергосберегающий испытательный комплекс (рис. 1) для наземных испытаний мощных ВИЭП КА содержит в своем составе имитатор солнечной батареи (имитатор СБ), воспроизводящий выходные вольтамперную характеристику (ВАХ) и полное внутреннее сопротивление СБ; нагрузочное устройство рекуперационного типа (НУРТ), имитирующее вольтамперную характеристику и полное внутреннее сопротивление реальных бортовых потребителей.

НУРТ содержит непрерывный стабилизатор тока (НСТ) и импульсный стабилизатор тока (ИСТ) стабилизаторы тока, находящиеся в следующей взаимосвязи: НСТ стабилизирует выходной ток $I_{\text{ВИЭП}}$, а ИСТ, выполненный на основе импульсного преобразователя (ИП), стабилизирует ток через непрерывный регулирующий элемент (НРЭ).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

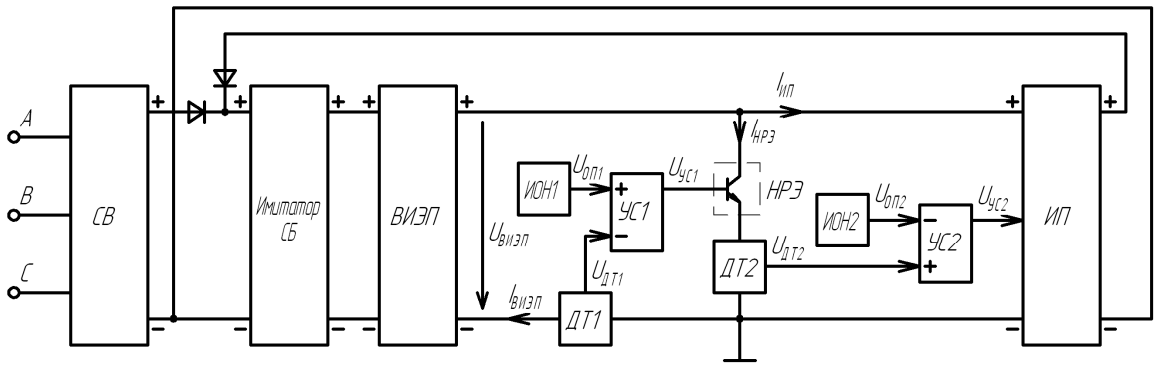


Рис. 1. Структурная схема энергосберегающего испытательного комплекса:
СВ – стабилизирующий выпрямитель; ВИЭП – первичный источник электропитания; имитатор СБ – имитатор солнечной батареи; ИП – импульсный преобразователь; ИОН – источник опорного напряжения; УС – усилитель-сумматор напряжения; ДТ – датчик тока

Это позволяет уменьшить рассеиваемую мощность НРЭ, его габариты и массу. НСТ образуют НРЭ, датчик тока ВИЭП (ДТ1), источник опорного напряжения (ИОН1), усилитель-сумматор напряжения (УС1). ИСТ образуют ИП, датчик тока ДТ2, протекающего через НРЭ, ИОН2 и усилитель-сумматор УС2.

Принцип работы НУРТ поясняют диаграммы напряжений и токов (рис. 2). В момент времени t_0 происходит наброс тока ВИЭП, в момент времени t_2 – сброс. В момент времени t_0 увеличивается опорное напряжение $U_{ОП1}$, что приводит к увеличению тока, протекающего через НРЭ, и выходного тока ВИЭП.

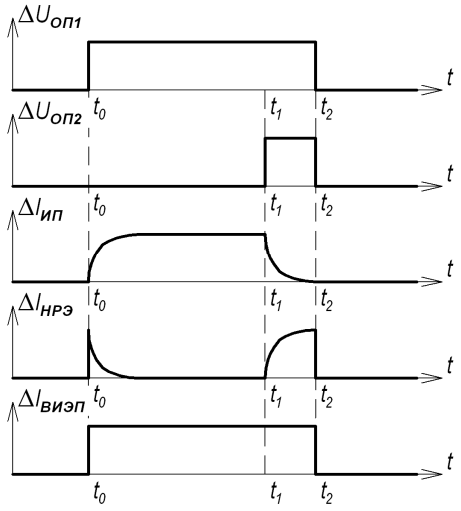


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов при набросе и сбросе выходного тока ВИЭП

Увеличение тока $I_{НРЭ}$ в свою очередь приводит к увеличению напряжений $U_{ДТ2}$, $U_{УС2}$ и к увеличению входного тока ИП – $I_{ИП}$. Так как НСТ стабилизирует ток $I_{ВИЭП}$, равный сумме токов $I_{НРЭ}$ и $I_{ИП}$, то увеличение тока $I_{ИП}$ приводит к уменьшению тока $I_{НРЭ}$ и наоборот. Таким образом, ток $I_{НРЭ}$ возвращается к прежнему значению. Высокая скорость нарастания входного тока НУРТ при имитации ступенчатого наброса нагрузки обеспечивается полным открытием НРЭ. НРЭ остается в открытом состоянии до тех пор, пока входной ток ИП не увеличится до значения входного тока НУРТ. По мере того как входной ток ИП увеличивается, ток через НРЭ будет уменьшаться.

Для сброса тока $I_{ВИЭП}$ необходимо предварительно увеличить ток $I_{НРЭ}$ за счет уменьшения тока $I_{ИП}$. Для этого в момент времени t_1 увеличивается напряжение $U_{ОП2}$, что приводит к уменьшению тока $I_{ИП}$ и к увеличению тока $I_{НРЭ}$. В момент времени t_2 уменьшаются напряжения $U_{ОП1}$ и $U_{ОП2}$, что приводит к уменьшению токов $I_{НРЭ}$ и $I_{ВИЭП}$.

По структурной схеме (см. рис. 1) составим схему замещения силовой части системы ВИЭП–НУРТ (рис. 3). На схеме замещения испытываемый ВИЭП представлен в виде источника напряжения $E_{ВИЭП}$ с внутренним импедансом $Z_{ВИЭП}$, НРЭ и ИП – как источники тока $J_{НРЭ}$ и $J_{ИП}$ с внутренними адмитансами $Y_{НРЭ}$ и $Y_{ИП}$ соответственно.

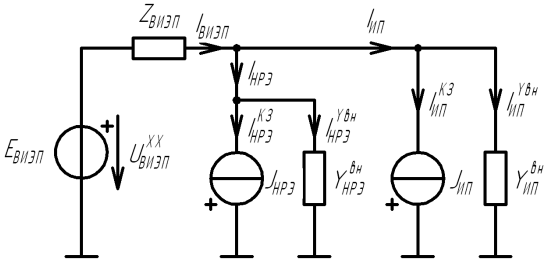


Рис. 3. Схема замещения для системы ВИЭП–НУРТ

Исходя из структурной схемы и схемы замещения, запишем уравнения в операторном виде, описывающие процессы в системе ВИЭП – НУРТ:

$$I_{ВИЭП}(s) = I_{НРЭ}(s) + I_{ИП}(s) = \\ = I^{КЗ}_{НРЭ}(s) + I^{Yвн}_{НРЭ}(s) + I^{КЗ}_{ИП}(s) + I^{Yвн}_{ИП}(s); \quad (1)$$

$$I^{КЗ}_{НРЭ}(s) = U_{УН1}(s) W^{КЗ}_{НРЭ}(s); \quad (2)$$

$$I^{КЗ}_{ИП}(s) = U_{УН2}(s) W^{КЗ}_{ИП}(s); \quad (3)$$

$$U_{\text{ДТ1}}(s) = I_{\text{ВИЭП}}(s) K_{\text{ДТ1}}; \quad (4)$$

$$U_{\text{ДТ2}}(s) = I_{\text{НРЭ}}(s) K_{\text{ДТ2}}; \quad (5)$$

$$U_{\text{УС1}}(s) = \left(U_{\text{ОП1}}(s) - U_{\text{ДТ1}}(s)\right) W_{\text{УС1}}(s); \quad (6)$$

$$U_{\text{УС2}}(s) = \left(U_{\text{ДТ2}}(s) - U_{\text{ОП2}}(s)\right) W_{\text{УС2}}(s); \quad (7)$$

$$I_{\text{НРЭ}}^{Y\text{вн}}(s) = \left(U_{\text{ВИЭП}}^{\text{XX}}(s) - Z_{\text{ВИЭП}}(s) I_{\text{ВИЭП}}(s)\right) Y_{\text{НРЭ}}(s); \quad (8)$$

$$I_{\text{ИП}}^{Y\text{вн}}(s) = \left(U_{\text{ВИЭП}}^{\text{XX}}(s) - Z_{\text{ВИЭП}}(s) I_{\text{ВИЭП}}(s)\right) Y_{\text{ИП}}(s), \quad (9)$$

где $I_{\text{ВИЭП}}$ – выходной ток испытываемого ВИЭП; $I_{\text{НРЭ}}$ – ток, протекающий через НРЭ; $I_{\text{ИП}}$ – входной ток ИП; $I_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}$ – ток короткого замыкания НРЭ; $I_{\text{НРЭ}}^{Y\text{вн}}$ – ток, обусловленный внутренним адмитансом НРЭ; $I_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}$ – входной ток короткого замыкания ИП; $I_{\text{ИП}}^{Y\text{вн}}$ – входной ток ИП, обусловленный внутренним адмитансом ИП; $U_{\text{УС1}}$ – выходное напряжение УС1; $U_{\text{УС2}}$ – выходное напряжение УС2; $W_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}(s)$ – передаточная функция (ПФ) НРЭ, связывающая $I_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}$ с сигналом управления $U_{\text{УС1}}$; $W_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s)$ – ПФ ИП, связывающая $I_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}$ с сигналом управления $U_{\text{УС2}}$; $U_{\text{ОП1}}$ – выходное напряжение ИОН1; $U_{\text{ОП2}}$ – выходное напряжение ИОН2; $U_{\text{ДТ1}}$ – выходное напряжение ДТ1; $U_{\text{ДТ2}}$ – выходное напряжение ДТ2; $W_{\text{УС1}}(s)$ – ПФ УС1; $W_{\text{УС1}}(s)$ – ПФ УС2; $U_{\text{ВИЭП}}^{\text{XX}}$ – выходное напряжение холостого хода ВИЭП.

По уравнениям (1)–(9) составлена функциональная схема системы ВИЭП–НУРТ (рис. 4).

Усилители-сумматоры описываются уравнениями апериодических звеньев [2], а их ПФ имеют вид

$$W_{\text{УС1}}(s) = \frac{K_{\text{УС1}}}{\frac{K_{\text{УС1}}}{f_{\text{оу1}}} s + 1};$$

$$W_{\text{УС2}}(s) = \frac{K_{\text{УС2}}}{\frac{K_{\text{УС2}}}{f_{\text{оу2}}} s + 1}, \quad (10)$$

где $K_{\text{УС1}}$, $K_{\text{УС2}}$ – коэффициенты усиления УС1 и УС2, $f_{\text{оу1}}, f_{\text{оу2}}$ – частота единичного усиления УС1 и УС2.

ПФ и внутренний адмитанс НРЭ и ИП были определены экспериментально на макетах с помощью непосредственного измерения амплитудной частотной (АЧХ) и фазовой частотной характеристик (ФЧХ) и последующей аппроксимации:

$$W_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s) = \frac{I_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s)}{U_{\text{УС2}}(s)} = \gamma \frac{K_{\text{ШИМ}}}{R_{\text{вых}}^{\text{ИП}}} W_{\text{вх ф}}(s) \frac{R_{\text{вых}}^{\text{ИП}} C_{\text{вых. ф}} s + 1}{L_{\text{вых. ф}} C_{\text{вых. ф}} s^2 + \frac{L_{\text{вых. ф}}}{R_{\text{вых}}^{\text{ИП}}} s + 1}; \quad (11)$$

$$Y_{\text{ИП}}(s) = \frac{I_{\text{ИП}}^{Y\text{вн}}(s)}{U_{\text{ВИЭП}}(s)} = \frac{\gamma^2}{R_{\text{вых}}^{\text{ИП}}} W_{\text{вх ф}}(s) \frac{R_{\text{вых}}^{\text{ИП}} C_{\text{вых. ф}} s + 1}{L_{\text{вых. ф}} C_{\text{вых. ф}} s^2 + \frac{L_{\text{вых. ф}}}{R_{\text{вых}}^{\text{ИП}}} s + 1}; \quad (12)$$

$$R_{\text{вых}}^{\text{ИП}} = \frac{U_{\text{СВ}}}{I_{\text{вых}}^{\text{ИП}}}; \quad (13)$$

$$K_{\text{ШИМ}} = \frac{U_{\text{ВИЭП}}}{U_{\text{ПИЛ}}}; \quad (14)$$

$$W_{\text{вх. ф}}(s) = \frac{1}{R_{\text{п}} C_{\text{вх. ф}} s + 1}; \quad (15)$$

$$W_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}(s) = \frac{I_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}(s)}{U_{\text{УС1}}(s)} = \frac{K_{\text{НРЭ}}}{T_{\text{НРЭ}}^2 s^2 + 2\xi_{\text{НРЭ}} T_{\text{НРЭ}} s + 1}; \quad (16)$$

$$Y_{\text{НРЭ}}(s) = \frac{I_{\text{НРЭ}}^{Y\text{вн}}(s)}{U_{\text{ВИЭП}}(s)} = \frac{Y_{0\ \text{НРЭ}}\left(T_{Y\text{нрэ1}} s + 1\right)}{T_{Y\text{нрэ2}}^2 s^2 + 2\xi_{Y\text{нрэ}} T_{Y\text{нрэ2}} s + 1}; \quad (17)$$

$$Z_{\text{ВИЭП}}^{\text{ВН}}(s) = Z_{0\ \text{ВИЭП}}\left(T_{\text{ВИЭП}} s + 1\right), \quad (18)$$

где γ – коэффициент заполнения ИП; $U_{\text{ВИЭП}}$ – выходное напряжение ВИЭП; $U_{\text{СВ}}$ – выходное напряжение СВ; $U_{\text{ПИЛ}}$ – размах выходного напряжения генератора пилообразного напряжения ШИМ-контроллера; $R_{\text{п}}$ – сопротивление проводов, $C_{\text{вх. ф}}$ – емкость конденсатора входного фильтра ИП; $I_{\text{вых}}^{\text{ИП}}$ – выходной ток ИП; $C_{\text{вых. ф}}$ – емкость конденсатора выходного фильтра ИП; $L_{\text{вых. ф}}$ – индуктивность дросселя выходного фильтра ИП; $K_{\text{НРЭ}}$ – коэффициент передачи НРЭ; $T_{\text{НРЭ}}$, $T_{Y\text{нрэ1}}$, $T_{Y\text{нрэ2}}$ – постоянные времени НРЭ; $\xi_{\text{НРЭ}}$, $\xi_{Y\text{нрэ}}$ – коэффициенты относительного демпфирования; $Y_{0\ \text{НРЭ}}$ – активная составляющая адмитанса НРЭ; $Z_{0\ \text{ВИЭП}}$ – активная составляющая импеданса ВИЭП; $T_{\text{ВИЭП}}$ – постоянная времени ВИЭП. Исследуем НСТ и ИСТ на устойчивость частотным методом. В соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис.4, по формуле Мезона [3] составим ПФ разомкнутых контуров НСТ и ИСТ:

$$W_{\text{НСТ РК}}(s) = \frac{U_{\text{ОП1}}(s)}{U_{\text{ДТ1}}(s)} = \frac{W_{\text{УС1}}(s) W_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}(s) K_{\text{ДТ1}} + W_{\text{УС1}}(s) W_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}(s) \times \times K_{\text{ДТ1}} W_{\text{УС2}}(s) W_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s) K_{\text{ДТ2}}}{1 + Y_{\text{НРЭ}}(s) Z_{\text{ВИЭП}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s) Z_{\text{ВИЭП}}(s) + + Z_{\text{ВИЭП}}(s) Y_{\text{НРЭ}}(s) K_{\text{ДТ2}} W_{\text{УС2}}(s) W_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s)}; \quad (19)$$

$$W_{\text{ИСТ РК}}(s) = \frac{U_{\text{ОП2}}(s)}{U_{\text{ДТ2}}(s)} = \frac{W_{\text{УС2}}(s) W_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s) K_{\text{ДТ2}} Z_{\text{ВИЭП}}(s) Y_{\text{НРЭ}}(s) + + W_{\text{УС2}}(s) W_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s) K_{\text{ДТ2}} W_{\text{УС1}}(s) W_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}(s) K_{\text{ДТ1}}}{1 + Y_{\text{НРЭ}}^{\text{ВН}}(s) Z_{\text{ВИЭП}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s) Z_{\text{ВИЭП}}(s) + + W_{\text{УС1}}(s) W_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}(s) K_{\text{ДТ1}}}. \quad (20)$$

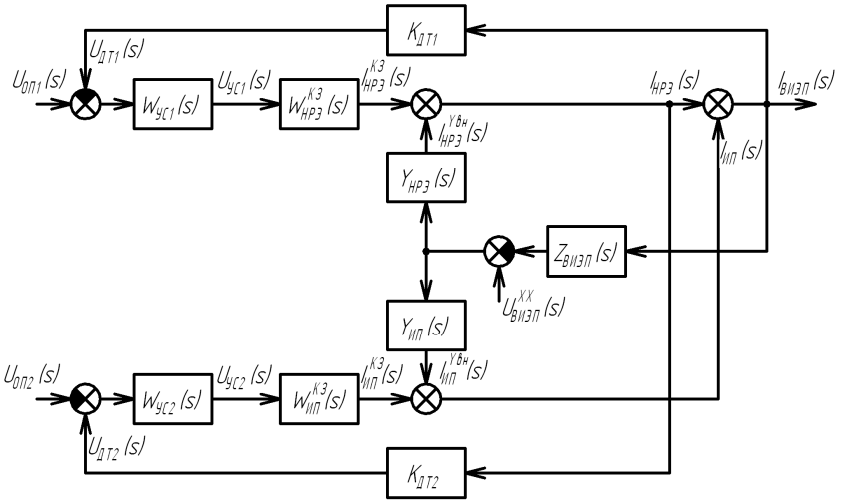


Рис. 4. Функциональная схема для системы ВИЭП–НУРТ

Статические коэффициенты передачи $K_{\text{НСТ}} = \left|W_{\text{НСТ РК}}\left(j\omega\right)\right|_{\omega\to 0}$ и $K_{\text{ИСТ}} = \left|W_{\text{ИСТ РК}}\left(j\omega\right)\right|_{\omega\to 0}$ разомкнутых контуров НСТ и ИСТ находят методами теории автоматического управления [3] исходя из требования заданной точности стабилизации тока ВИЭП и тока НРЭ соответственно:

$$\underset{t\to\infty}{\varepsilon_{\text{НСТ}}}\left(t\right) = \frac{U_{\text{ОП1}}}{1+K_{\text{НСТ}}}, \tag{21}$$

$$\underset{t\to\infty}{\varepsilon_{\text{ИСТ}}}\left(t\right) = \frac{U_{\text{ОП2}}}{1+K_{\text{ИСТ}}}, \tag{22}$$

где $\varepsilon_{\text{НСТ}}$ – величина ошибки стабилизации тока ВИЭП, $\varepsilon_{\text{ИСТ}}$ – величина ошибки стабилизации тока НРЭ.

$K_{\text{УС1}}$ и $K_{\text{УС2}}$ находят из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} K_{\text{НСТ}} = \left|W_{\text{НСТ РК}}\left(K_{\text{УС1}}, K_{\text{УС2}}, j\omega\right)\right|_{\omega\to 0}, \\ K_{\text{ИСТ}} = \left|W_{\text{ИСТ РК}}\left(K_{\text{УС1}}, K_{\text{УС2}}, j\omega\right)\right|_{\omega\to 0}. \end{cases} \tag{23}$$

Числитель ПФ разомкнутого контура НСТ представляет собой сумму двух слагаемых $W_{\text{Ч1}}\left(j\omega\right)$ и $W_{\text{Ч2}}\left(j\omega\right)$:

$$W_{\text{Ч}}\left(j\omega\right) = W_{\text{Ч1}}\left(j\omega\right) + W_{\text{Ч2}}\left(j\omega\right), \tag{24}$$

где

$$W_{\text{Ч1}}\left(j\omega\right) = W_{\text{УС1}}\left(j\omega\right)W^{\text{КЗ}}_{\text{НРЭ}}\left(j\omega\right)K_{\text{ДТ1}}, \tag{25}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{Ч2}}\left(j\omega\right) &= W_{\text{УС1}}\left(j\omega\right)W^{\text{КЗ}}_{\text{НРЭ}}\left(j\omega\right)\times \\ &\times K_{\text{ДТ1}}W_{\text{УС2}}\left(j\omega\right)W^{\text{КЗ}}_{\text{ИП}}\left(j\omega\right)K_{\text{ДТ2}}. \end{aligned} \tag{26}$$

Если логарифмические АЧХ слагаемых числителя пересекаются, то на общей ЛАЧХ ПФ разомкнутого контура НСТ в точке пересечения возможен резонансный провал. Поскольку на частоте пересечения $\omega_{\text{п}}$ ЛАЧХ модули слагаемых числителя равны – $\left|W_{\text{Ч1}}\left(j\omega_{\text{п}}\right)\right| = \left|W_{\text{Ч2}}\left(j\omega_{\text{п}}\right)\right| = K_i\left(\omega_{\text{п}}\right)$ – то глубина провала определяется разностью фаз ПФ слагаемых числителя:

$$\begin{aligned} W_{\text{Ч}}\left(j\omega_{\text{п}}\right) &= W_{\text{Ч1}}\left(j\omega_{\text{п}}\right) + W_{\text{Ч2}}\left(j\omega_{\text{п}}\right) = \\ &= \left|W_{\text{Ч1}}\left(j\omega_{\text{п}}\right)\right|\cos\varphi_1 + j\left|W_{\text{Ч1}}\left(j\omega_{\text{п}}\right)\right|\sin\varphi_1 + \\ &+ \left|W_{\text{Ч2}}\left(j\omega_{\text{п}}\right)\right|\cos\varphi + j\left|W_{\text{Ч2}}\left(j\omega_{\text{п}}\right)\right|\sin\varphi_2 = \\ &= \left|K_i\left(\omega_{\text{п}}\right)\right|\left(\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2 + j\left(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_2\right)\right). \end{aligned} \tag{27}$$

Анализ выражения (27) показывает, что глубина провала будет минимальной, если выполняется условие

$$-2\pi/3 \pm 2\pi k \le \varphi_1 - \varphi_2 \le +2\pi/3 \pm 2\pi k, \tag{28}$$

где $k = \overline{0,n}$.

Выполнение этого условия достигается увеличением коэффициента усиления $K_{\text{УС1}}$ и уменьшением коэффициента усиления $K_{\text{УС2}}$, при этом не должен уменьшаться статический коэффициент $K_{\text{НСТ}}$ в контуре НСТ. Анализ числителя выражения (19) показывает, что частота пересечения $\omega_{\text{п}}$ в большей степени зависит от коэффициента $K_{\text{УС2}}$, чем от $K_{\text{УС1}}$, так как $W_{\text{УС1}}(s)$ входит в качестве множителя в оба слагаемых числителя (19). При уменьшении коэффициента $K_{\text{УС2}}$ частота пересечения $\omega_{\text{п}}$ будет сдвигаться в низкочастотную область, тем самым уменьшая разность фаз φ_1–φ_2. Задача усложняется тем, что при подборе коэффициентов $K_{\text{УС1}}$ и $K_{\text{УС2}}$ усилителей-сумматоров изменяются их ФЧХ, что приводит к изменению ФЧХ ПФ разомкнутых контуров НСТ и ИСТ.

Желаемую частоту пересечения $\omega^{\text{ж}}_{\text{п}}$, по которой выполняется условие (28), можно определить по неравенству (29), а коэффициенты усиления $K_{\text{УС1}}$ и $K_{\text{УС2}}$, обеспечивающие пересечение ЛАЧХ слагаемых числителя ПФ $W_{\text{НСТ РК}}\left(\text{s}\right)$ на данной желаемой частоте, можно найти из решения системы уравнений (30):

$$\begin{aligned} -2\pi/3 \pm 2\pi k \le \arg\left(W_{\text{Ч1}}\left(j\omega^{\text{ж}}_{\text{п}}\right)\right) - \arg\left(W_{\text{Ч2}}\left(j\omega^{\text{ж}}_{\text{п}}\right)\right) \le \\ \le +2\pi/3 \pm 2\pi k; \end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{cases} \left|W_{\text{ч1}}\left(K_{\text{УС1}}, j\omega_{\text{п}}^{\text{ж}}\right)\right| = \left|W_{\text{ч2}}\left(K_{\text{УС1}}, K_{\text{УС2}}, j\omega_{\text{п}}^{\text{ж}}\right)\right| \\ \left|W_{\text{НСТ РК}}\left(K_{\text{УС1}}, K_{\text{УС2}}, j\omega_{\text{п}}^{\text{ж}}\right)\right|_{\omega\to 0} = K_{\text{НСТ}} \end{cases}. \quad (30)$$

При уменьшении коэффициента $K_{\text{УС2}}$ коэффициент передачи $K_{\text{ИСТ}}$ разомкнутого контура ИСТ должен обеспечивать приемлемую точность стабилизации тока через НРЭ.

Числитель ПФ разомкнутого контура ИСТ также представляет собой сумму двух слагаемых, однако, практически во всем диапазоне частот выполняется условие (31) и меньшим слагаемым можно пренебречь:

$$W_{\text{УС2}}(s)W_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s)K_{\text{ДТ2}}Z_{\text{ВИЭП}}(s)Y_{\text{НРЭ}}(s) << \\ << W_{\text{УС2}}(s)W_{\text{ИП}}^{\text{КЗ}}(s)K_{\text{ДТ2}}W_{\text{УС1}}(s)W_{\text{НРЭ}}^{\text{КЗ}}(s)K_{\text{ДТ1}}. \quad (31)$$

В результате ЛАЧХ ПФ разомкнутого контура ИСТ не будет иметь резонансного провала.

Приведены ЛАЧХ и ФЧХ числителя $W_{\text{ч}}(j\omega)$ и составляющих его слагаемых $W_{\text{ч1}}(j\omega)$ и $W_{\text{ч2}}(j\omega)$ согласно выражению (19) для разных коэффициентов $K_{\text{УС1}}$ и $K_{\text{УС2}}$ (рис. 5):

$$L_{\text{ч}}(\omega) = 20\lg\left(\left|W_{ч}(j\omega)\right|\right); \quad (32)$$

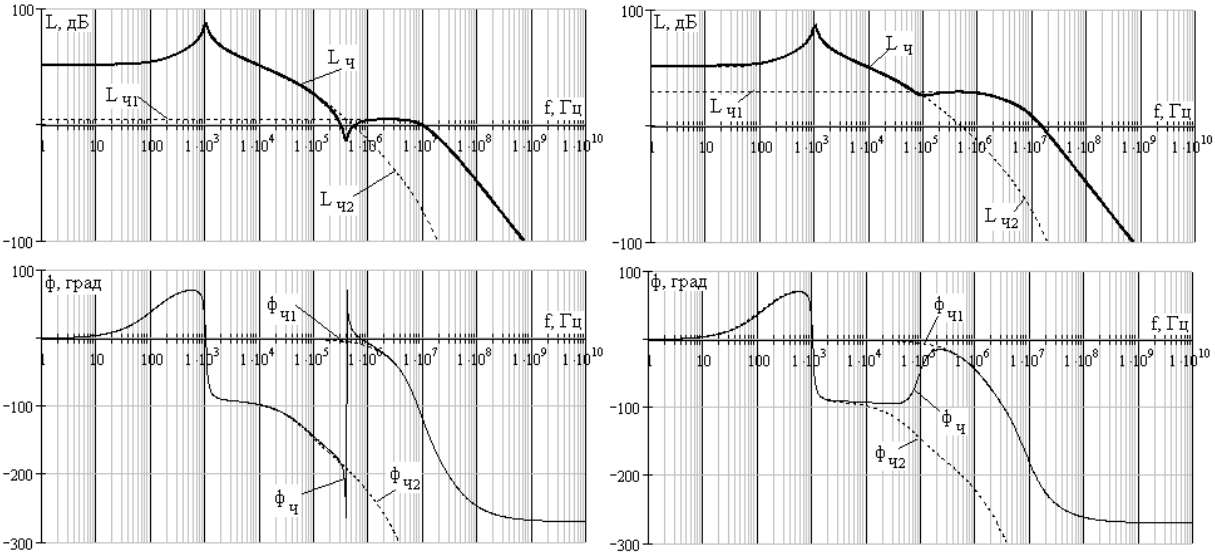
$$\varphi_{\text{ч}}(\omega) = \arg\left(W_{\text{ч}}(j\omega)\right). \quad (33)$$

На частоте пересечения (рис. 5, *а*) наблюдается резонансный провал на ЛАЧХ и скачок на ФЧХ, так как условие (28) не выполняется. В этом случае для обеспечения устойчивости контура НСТ необходимо существенно уменьшить частоту среза и, следовательно, быстродействие НСТ. Выполнение условия (28) уменьшает глубину провала на ЛАЧХ и величину скачка на ФЧХ (рис. 5, *б*), что позволяет обеспечить устойчивость НСТ при большей частоте среза и более высокое быстродействие. Для этого случая выполним динамический синтез ИСТ и НСТ, воспользовавшись методом В. В. Солодовникова [3].

Распространенными требованиями при испытаниях систем электропитания являются: обеспечение максимальной скорости нарастания тока $dI_{\text{ВИЭП}}/dt \ge a$, [А/с]; максимального тока $I_{\text{ВИЭП}}^{\max}$, [А]; обеспечение переходных отклонений по току $\Delta I_{\text{ВИЭП}}$, [А]. Для примера предъявим к системе следующие требования: скорость нарастания тока $I_{\text{ВИЭП}}a$ = 2,5 А/мкс; максимальный ток $I_{\text{ВИЭП}}^{\max}$ = 25 А; переходные отклонения по току $\Delta I_{\text{ВИЭП}}$ = ±5 А. Исходя из данных требований, для НСТ можно определить необходимое время регулирования $T_{\text{р НСТ}}$ = 10 мкс и перерегулирование $\sigma_{\text{НСТ}} \le 10$ %.

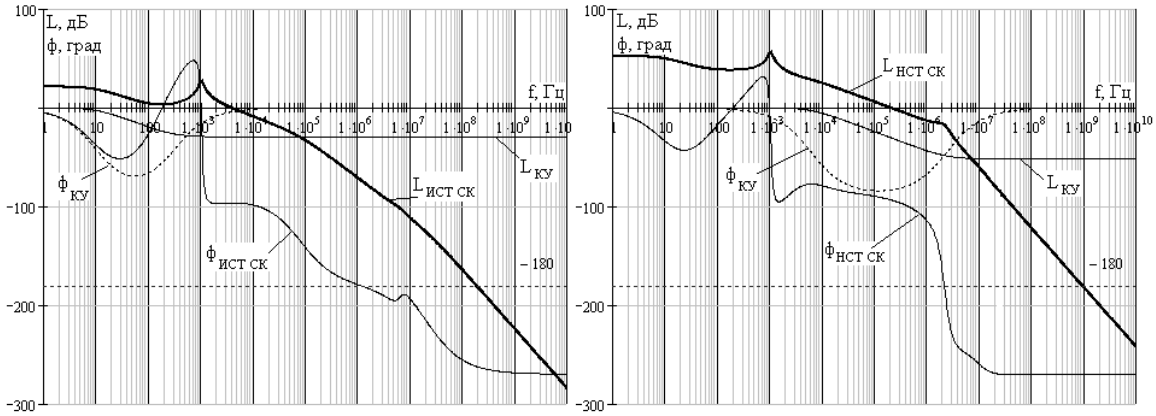
По методу В.В. Солодовникова [3] найдены желаемая частота среза НСТ $f_{\text{жНСТ}}$ = 125 кГц, запас по фазе $\gamma_{\text{НСТ}}$ = 50° и граничные значения ординат среднечастотного участка ЛАЧХ $L_{m\,\text{НСТ}}$ = ±17 дБ.

Требования к динамическим свойствам ИСТ можно выбрать исходя из следующих соображений. ИСТ должен ограничить ток НРЭ до того, как температура кристаллов транзисторов НРЭ достигнет максимально допустимой. Например, для НРЭ, состоящего из восьми полевых транзисторов IRF740N и при максимальном токе $I_{\text{НРЭ}}$ = 25А, время регулирования ИСТ должно составлять $T_{\text{рИСТ}} \le$ 5мс. Перерегулирование $\sigma_{\text{ИСТ}}$ не должно быть большим, так как оно может приводить к перегрузке НРЭ. Для перерегулирования $\sigma_{\text{ИСТ}}$ = 20 % вычислены желаемая частота среза для ИСТ $f_{\text{жИСТ}}$ = 250Гц, запас по фазе $\gamma_{\text{ИСТ}}$ = 50° и граничные значения ординат среднечастотного участка ЛАЧХ $L_{m\,\text{ИСТ}}$ = ±17 дБ.



а *б*

Рис. 5. ЛАЧХ и ФЧХ числителя и слагаемых числителя ПФ разомкнутого контура НСТ:
а – при $K_{\text{НСТ}}$ = 400, $K_{\text{УС1}}$ = 2,2, $K_{\text{УС2}}$ = 50; *б* – при $K_{\text{НСТ}}$ = 400, $K_{\text{УС1}}$ = 41, $K_{\text{УС2}}$ = 2,5



а *б*

Рис. 6. ЛАЧХ и ФЧХ ПФ скорректированных разомкнутых контуров ИСТ (*а*) и НСТ (*б*) и корректирующих устройств (КУ)

Поскольку нескорректированные ИСТ и НСТ не обладают требуемыми запасами устойчивости, то необходима коррекция частотных характеристик. Анализ показал, что обеспечение устойчивости и требуемого качества регулирования относительно просто достигается применением последовательных корректирующих устройств интегро-дифференцирующего типа (рис. 6).

На основании изложенного авторами предложена следующая методика динамического синтеза нагрузочных устройств рекуперационного типа:

1. Исходя из заданной ошибки стабилизации тока ВИЭП выбирают коэффициент $K_{НСТ}$ разомкнутого контура НСТ согласно выражению (21).

2. Исходя из заданной ошибки стабилизации тока, протекающего через НРЭ, выбирают коэффициент $K_{ИСТ}$ разомкнутого контура ИСТ согласно выражению (22).

3. Строят ЛАЧХ и ФЧХ слагаемых числителя ПФ разомкнутого контура НСТ на основе выражений (32), (33) и определяют разность фаз φ_1–φ_2 на частоте пересечения $\omega_п$.

4. Если разность фаз φ_1–φ_2 не удовлетворяет условию (28), то с помощью выражения (29) определяют желаемую частоту пересечения $\omega_п^ж$ ЛАЧХ слагаемых числителя ПФ разомкнутого контура НСТ.

5. С помощью выражения (30) находят коэффициенты $K_{УС1}$, $K_{УС2}$ усилителей-сумматоров, обеспечивающих пересечение ЛАЧХ слагаемых числителя ПФ разомкнутого контура НСТ на желаемой частоте $\omega_п^ж$. При этом уменьшается статический коэффициент передачи $K_{ИСТ}$ разомкнутого контура ИСТ. Если требование обеспечения заданной точности стабилизации тока НРЭ критично, то можно увеличить границы интервала, указанного в выражении (28), в который должна попадать разность фаз φ_1–φ_2, на 20 %. На практике это не оказывает существенного влияния на вид ЛАЧХ и ФЧХ ПФ разомкнутого контура НСТ.

6. Исходя из технических требований, предъявляемых к испытательному комплексу, задают требования к динамическим характеристикам НСТ и ИСТ. Методами теории автоматического управления проводят расчет корректирующих устройств, обеспечивающих заданные показатели качества переходного процесса.

В скорректированном контуре ИСТ частота среза $f_{ИСТ}$ = 37 кГц, запас по фазе $\gamma_{ИСТ}$ = 83°. В скорректированном контуре НСТ частота среза $f_{НСТ}$ = 190 кГц, запас по фазе $\gamma_{НСТ}$ = 87°. Переходные процессы в НУРТ (рис. 7) при набросе и сбросе тока $I_{ВИЭП}$, полученные в результате моделирования в пакете Micro-CAP, удовлетворяют предъявляемым требованиям.

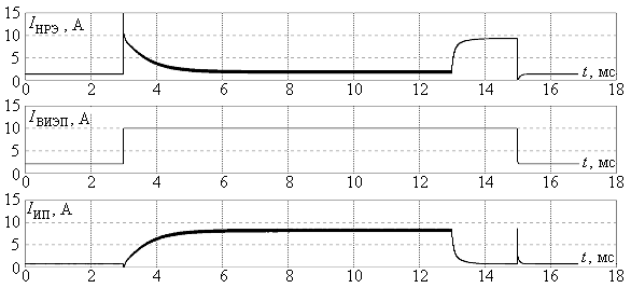


Рис. 7. Переходные процессы в системе ВИЭП–НУРТ

Разработанная методика динамического синтеза нагрузочных устройств рекуперационного типа позволяет проектировать НУРТ с требуемыми динамическими характеристиками и качеством переходных процессов.

Библиографические ссылки

1. Мизрах Е. А., Лобанов Д. К. Энергосберегающее нагрузочное устройство для испытаний систем электропитания постоянного тока // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 6 (32). С. 56.

2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. М. : Мир, 1982.

3. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М. : Наука, 1989.

E. A. Mizrakh, D. K. Lobanov

DYNAMIC SYNTHESIS OF DC LOAD WITH ENERGY RECUPERATION INTO POWER NETWORK OF SPACECRAFT POWER SUPPLY SYSTEM TEST COMPLEX

The method of dynamic synthesis of DC load with energy recuperation into power network of spacecraft power supply system test complex has been developed.

Keywords: energy-efficiency, DC load, recuperation.

© Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., 2011

УДК 621.396.962.23

В. А. Фельк, Ю. С. Воронцов, А. Н. Фомин, А. И. Ступников

ИЗМЕРЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

Предложена методика высокоточного измерения дальности с использованием модифицированного эффекта Доплера.

Ключевые слова: эффект Доплера, фазовая автоподстройка частоты.

Измерение абсолютного значения дальности можно реализовать путем осуществления приращения частоты излученного радиосигнала при условии, что фаза принятого сигнала от переотражающей антенны в точке излучения исходного радиосигнала будет стационарна. Это условие можно выполнить за счет изменения частоты исходного радиосигнала таким образом, чтобы разность фаз принимаемого сигнала от переотражающей антенны и исходного радиосигнала была равна нулю. Данный принцип измерения можно реализовать, используя генератор исходного радиосигнала, которым будет управлять устройство фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) по сигналу рассогласования, принимаемого от переотражающей антенны [1]. Особенность метода заключается в том, что можно измерять абсолютную дальность с точностью менее длины волны.

Теоретическое обоснование метода. Измеряемое расстояние *D* определяется по соотношению:

$$D = \frac{c}{2f}\frac{\psi}{360^\circ} = \frac{\lambda}{2}(n + \varphi), \qquad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны; f – частота генератора управляемого напряжением (ГУН); ψ – полная фазовая задержка; λ – длина волны; n – целая часть фазовой задержки сигнала.

Здесь введено обозначение $\varphi = \frac{\psi - 360^\circ n}{360^\circ}$, $n = \frac{\psi}{360^\circ}$.

Работа ФАПЧ при использовании интегрального закона регулирования обеспечивает значение $\varphi = 0$ за счет изменения частоты ГУН f, поэтому получаем:

$$D + d = \frac{c}{2(f + \Delta f)}n, \qquad (2)$$

где d – приращение дальности.

Из соотношений (1) и (2) получаем выражение для приращения дальности d:

$$d = \frac{cn}{2(f + \Delta f)} - \frac{cn}{2f} = \frac{cnf - cnf - cn\Delta f}{2(f + \Delta f)f} \approx -\frac{cn\Delta f}{2f^2}. \qquad (3)$$

Последнее выражение представим в обобщенном виде:

$$\frac{d}{D} = -\frac{\Delta f}{f}. \qquad (4)$$

Описание экспериментальной установки. Современные цифровые синтезаторы частоты гигагерцового диапазона обеспечивают шаг перестройки частоты 100 Гц и менее, что позволяет использовать их в предложенном методе [2]. В лабораторных условиях макет локатора приведен в масштабе расстояний 1 : 200, что позволяет осуществить работы в пределах помещения лаборатории на малых мощностях излучения с использованием приборов общего назначения: осциллографа С1–91 и анализатора спектра СК4–59. Значения приращения частоты на 1 мм перемещения антенны ретранслятора согласно выражению (4) составит 600 кГц, что с достаточной точностью измеряется анализатором спектра СК4–59. Осциллографом С1–91 регистрируется огибающая принимаемого сигнала с выхода синхронного детектора.

На выходе генератора имеем сигнал частотой 2,85 ГГц с диапазоном перестройки 15 МГц и мощностью 5 мВт. Нагрузкой генератора является микрополосковый полуволновой вибратор, расположенный в фокусе параболического отражателя диаметром 1 м, что обеспечивает коэффициент антенны равный 30 дБ.

В макете принимаемый сигнал от переотражателя детектируется фазовым детектором, усиливается на 70 дБ и после синхронного детектирования наблюдается на экране осциллографа С1–91 (рис. 1, 2).

Генератор макета выполнен на транзисторе VT1 (типа КТ640) по схеме емкостной трехточки с заземленным коллектором. Синхронное детектирование сигнала осуществляется на базовом переходе транзистора VT1 и усиленный сигнал этим же транзистором снимается с его коллектора и подается на двухкаскадный полосовой усилитель с коэффициентом усиления 80 дБ и затем на выход. Перестройка генератора осуществляется изменением коллекторной емкости транзистора VT1 путем изменения тока коллектора R1. Нестабильность генератора не превышает 100 кГц.

Антенна ретранслятора представляет собой параболическое зеркало диаметром 1 м, в фокусе которой расположен коммутируемый полуволновой микрополосковый вибратор. Коммутируется вибратор Pin-диодом Д1, обеспечивающим короткое замыкание вибратора тока Pin-диода 10 мА и холостой ход ($R_{\text{pin}} > 1$ кОм) при обратном напряжении на Pin-диоде, равном 10 В. Управляется Pin-диод импульсным генератором. Электрическая схема ретранслятора приведена на рис. 3.

Импульсный генератор выполнен на транзисторах VT1-VT2 и представляет собой симметричный мультивибратор. Частота генерирования составляет 300 Гц. Коммутируемая нагрузка на Pin-диоде обеспечивает переключение фазы сигнала отражения на 180°, это позволяет идентифицировать сигнал ретранслятора от сигналов окружающих объектов, подвижных и неподвижных.

Экспериментальная проверка метода. Методика лабораторных испытаний заключается в регистрации приращения несущей частоты генератора в зависимости от величины перемещения положения ретранслятора до локатора.

Ноль фазы отраженного сигнала регистрируется на осциллографе С1–91, а частота сигнала излучения и его мощность – анализатором спектра СК4–59. Расстояние между антеннами устанавливается равным 5 м. Параболические отражатели не используются, а антеннами являются полуволновые микрополосковые вибраторы. Величина перемещения ретранслятора измеряется линейкой со шкалой нониуса (использована готовая механическая часть от волноводной измерительной линии).

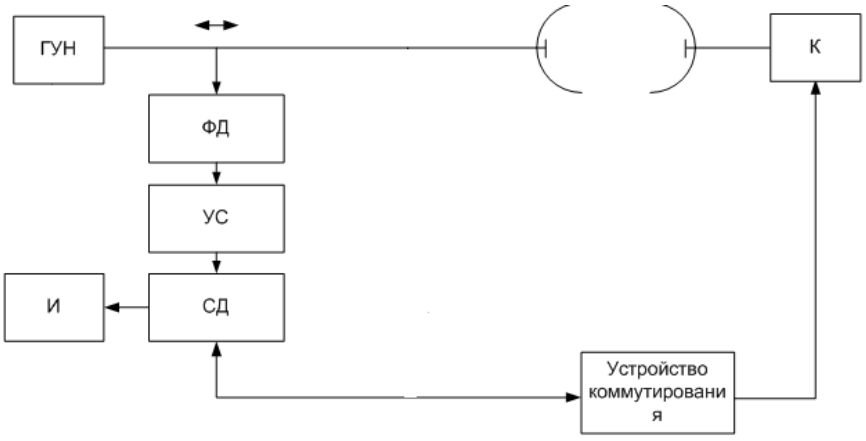


Рис. 1. Структурная схема макета:
ГУН – генератор управляемый напряжением; ФД – фазовый детектор; УС – усилитель;
СД – синхронный детектор; И – точка индикации огибающей выходного сигнала СД;
К – коммутатор переизлучающей антенны, установленной на точке переизлучения

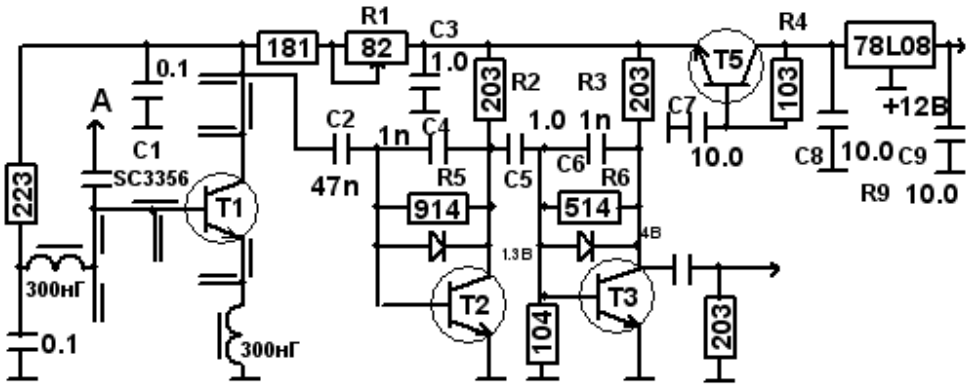


Рис. 2. Принципиальная схема макета

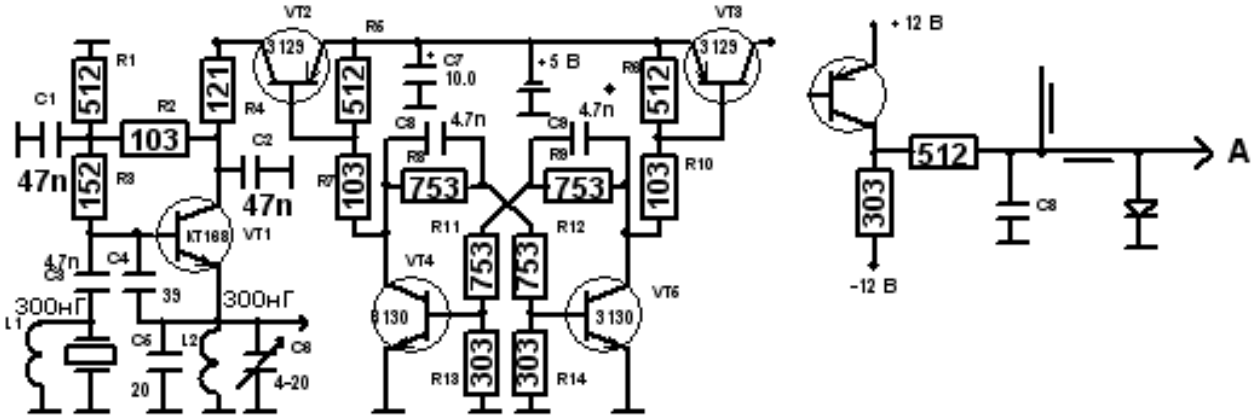


Рис. 3. Электрическая схема ретранслятора

Таблица 1

Результаты испытаний макета

№ цикла измерения	*d*, мм	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1	Δ*f*, МГц	0	1,200	2,450	2,600	4,750	6,000	7,250	8,400	9,650	10,800	12,000
2	Δ*f*, кГц	0	1,250	2,400	3,700	4,800	5,900	7,100	8,400	9,600	10,850	11,900
3	Δ*f*, кГц	0	1,200	2,400	3,600	4,800	5,950	7,150	8,300	9,550	10,800	12,050

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

l, мм	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
U, мВ	80	180	200	200	80	100	0	140	200	220	200	100	0	100	180	180

Частота генератора сигнала устанавливается вручную с помощью потенциометра R1 (см. рис. 2). Количество циклов измерений равно трем при шаге $d = 2$ мм в диапазоне изменений $d = \pm 10$ мм относительно заднего положения, устанавливаемого по нулю фазы сигнала на средней несущей частоте. Результаты испытаний приведены в табл. 1 при начальной частоте генератора сигнала, равной 2 840 МГц, что соответствует $d = 0$.

Согласно табл. 1, погрешность измерения величины приращения *d* антенны ретранслятора составляет менее 0,5 мм. Расстояние между антеннами увеличено до 21 м. Уровень шума – 20 мВ. Результаты эксперимента представлены в табл. 2. Расчетная точность метода измерения абсолютной дальности, реализованного на описанной установке, составляет ~0,01 мм.

По зависимости выходного напряжения от приращения расстояния построен график (рис. 4).

Таким образом, использование параболических отражателей метрового диаметра на макете и ретрансляторе повысит энергетику канала на 120 дБ, что обеспечит увеличение дальности на 30 дБ (до 500 м). Для обеспечения дальности 1 км необходимо повысить мощность генератора макета на 12 дБ, т. е. до величины 20 мВт. Шаг частоты перестройки генератора должен быть не более 1 кГц. Реализацию режима ФАПЧ целесообразно осуществить с использованием микроЭВМ.

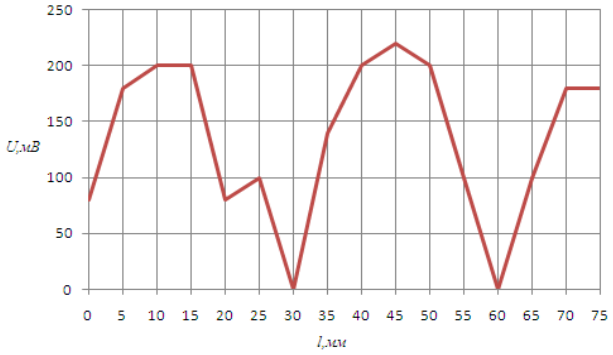


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения от приращения расстояния

Библиографические ссылки

1. Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А. Системы фазовой автоподстройки частоты : монография. М. : Связь, 1972.

2. Коновалов Г. Ф. Радиоавтоматика : монография. М. : Высш. шк., 1990.

V. A. Fel'k, Yu. S. Vorontsov, A. N. Fomin, A. I. Stupnikov

MEASUREMENT OF DISTANCE WITH THE HELP OF THE MODIFIED DOPPLER EFFECT

The method of high-precision measurement of distance is suggested with the use of the modified Doppler effect.

Keywords: Doppler effect, phase self-tuning of frequency.

© Фельк В. А., Воронцов Ю. С., Фомин А. Н., Ступников А. И., 2011

УДК 629.735.064

Л. Г. Шаймарданов, О. Г. Бойко

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ ПОТОКОВ ОТКАЗОВ АГРЕГАТОВ

Предложен метод эквивалентной линеаризации переменного параметра потока отказов агрегатов.

Ключевые слова: надежность функциональных систем, интегральная функция вероятности отказа, параметр потока отказов.

В работах [1–3] предложен метод расчета надежности сложных функциональных систем самолетов гражданской авиации при стационарности потока отказов ω. В соответствии с ним вероятность отказа функциональной системы рассчитывается на дискретных отрезках времени [0, *t*].

Для вероятности отказа агрегатов принято следующее распределение равномерной плотности, при котором интегральная функция распределения записывается в виде

$$q(t) = \omega \cdot t. \quad (1)$$

Распределение с равномерной плотностью вероятности соответствует условию стационарности, накладываемому на пуассоновский поток отказов. Здесь уместно отметить, что на практике потоки отказов функциональных систем более редкие, чем агрегатов, и также пуассоновские.

Приняв $t = 1$, из выражения (1) можно определить вероятность отказа за 1 ч, как этого требуют нормы летной годности самолетов:

$$q(1) = \omega \cdot 1 = \omega_1. \quad (2)$$

Для принятия дискретного отрезка времени [0, *t*] протяженностью τ как единичного (например, 3 600 с или продолжительность типового полета самолета) в указанных работах предложено приводить к τ параметр потока отказов, при этом

$$\omega_\tau = \omega \cdot \tau. \quad (3)$$

Тогда выражение (2) запишется в виде

$$q(\tau) = \omega_\tau \cdot 1. \quad (4)$$

При определении вероятности отказа агрегата на отрезке τ, принятом за единичный, интегральная функция определена уже как дискретное событие. Это обеспечивает корректность применения теоремы умножения вероятности для расчета надежности сложной системы.

Для системы с общим резервированием, состоящей из *n* параллельно включенных подсистем, содержащих по *n* последовательно соединенных агрегатов, выражение для расчета вероятности отказа записывается в виде

$$Q_c = \{1 - [1 - q(\tau)]^n\}^n. \quad (5)$$

В отмеченных работах по выражению (5) определяется вероятность отказа системы только на дискретных отрезках времени [0, *t*]. Ему не приписываются свойства интегральной функции вероятности отказа системы.

В монографии [4] отмечается, что даже у обслуживаемых (восстанавливаемых) агрегатов потоки отказов могут быть медленно меняющимися во времени, т. е. $\omega = var$. При работе необслуживаемых систем, имеющих различные виды резервирования (горячий резерв, холодный резерв, скользящее резервирование), потоки отказов агрегатов, естественно, возрастают по мере увеличения наработки. В связи с этим задача построения решения для расчета надежности системы при переменных по времени параметрах потоков отказов агрегатов является актуальной.

Для решения поставленной задачи необходимо заменить на единичном отрезке времени [0, *t*] переменный параметр потока отказов эквивалентным постоянным. Для этого можно использовать метод, разработанный в [1–3]. В теории колебаний для решения задачи с нелинейным трением широко применяется метод эквивалентной линеаризации. В ряде случаев нелинейные дифференциальные уравнения с нелинейным диссипативным звеном не имеют решения. Для приведения таких уравнений к линейным дифференциальным уравнениям и используется этот метод.

Нелинейное диссипативное звено заменяют линейным при условии равенства диссипируемой энергии колебаний при одинаковой амплитуде колебаний.

В рассматриваемой работе предлагается метод замены на отрезке времени [0, t] переменного параметра потока отказов $\omega(t)$ постоянным $\omega_э$ при условии равенства вероятности отказа агрегата $q(t)$ при постоянном и переменном параметрах потоков отказов (рис. 1).

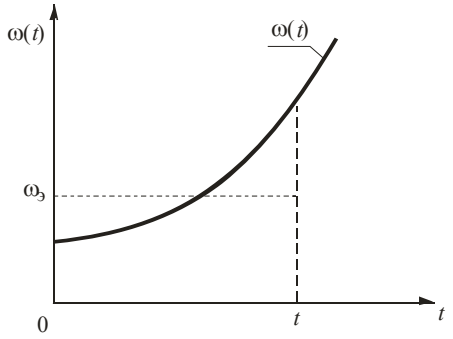


Рис. 1. Замена переменного параметра потока отказов $\omega(t)$ постоянным $\omega_э$

Интегральная функция вероятности отказа агрегата вида (1) предполагает параметр потока отказов ω численно равным плотности вероятности распределения с равномерной плотностью. Тогда условие эквивалентности $\omega(t)$ и $\omega_э$ на отрезке [0, t] определится в виде

$$\omega_э \cdot t = \int_0^t \omega(\tau) d\tau , \qquad (6)$$

откуда

$$\omega_э = \frac{\int_0^t \omega(\tau) d\tau}{t} . \qquad (7)$$

В левой части равенства (6) $\omega_э$ принимается постоянным на отрезке времени [0, t]. Вместе с этим при изменении протяженности отрезка [0, t] изменяется и величина $\omega_э$. Но в пределах рассматриваемого отрезка [0, t] запись $\omega_э \cdot t$ означает не что иное, как определение вероятности отказа на отрезке при распределении с равномерной плотностью вероятности. Это обеспечивает возможность построения для агрегата интегральной функции распределения вероятности отказа, если задаться различными значениями протяженности отрезка [0, t].

В качестве иллюстрации предлагаемого метода (рис. 2) приведены различные реализации переменного значения параметра потока отказов $\omega(t)$ в виде

$$\omega(t) = a + kt \qquad (9)$$

для ряда значений a и k.

Для рассматриваемого примера приведены интегральные функции распределения вероятности отказа агрегата, построенные в соответствии с предложенным методом эквивалентной линеаризации (рис. 3).

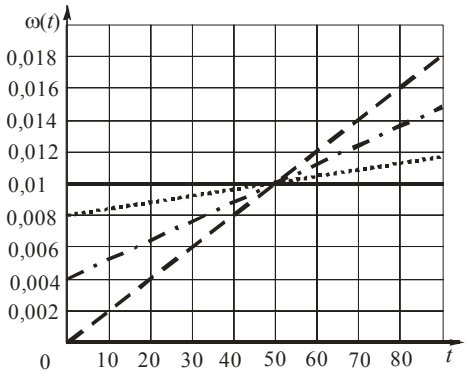


Рис. 2. Пример зависимостей параметра потока отказов от времени:
—— $a = 0{,}01$, $k = 0$; – – – $a = 0$, $k = 0{,}0002$; – · – $a = 0{,}004$, $k = 0{,}00012$; ····· $a = 0{,}008$, $k = 0{,}00004$

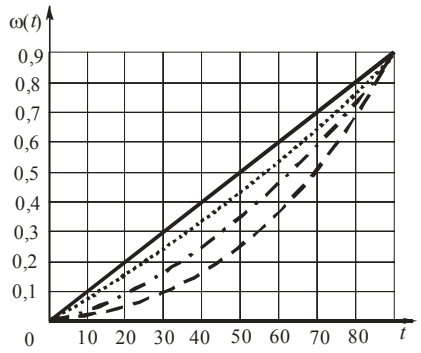


Рис. 3. Интегральные функции распределения вероятности отказа агрегата, построенные методом эквивалентной линеаризации:
—— $a = 0{,}01$, $k = 0$; – – · $a = 0$, $k = 0{,}0002$; – · – $a = 0{,}004$, $k = 0{,}00012$; ····· $a = 0{,}008$, $k = 0{,}00004$

Разработанный метод эквивалентной линеаризации обеспечивает возможность решения задачи расчета надежности сложных функциональных систем, приведенных в работах [1–3] для случая, когда параметры потоков отказов агрегатов переменны во времени.

Библиографические ссылки

1. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Математическое моделирование схемной надежности сложных систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2010. Вып. 3. С. 82–88.

2. Бойко О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации : монография // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий / РАН. М., 2009.

3. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Моделирование надежности агрегатов функциональных систем самолетов // Проблемы машиностроения и надежности машин. М., 2010. Вып. 5. С. 35–39.

4. Новожилов Г. В., Неймарк С., Цесарский Л. Г. Безопасность полетов, концепция и технологии. М. : Машиностроение, 2003.

L. G. Shaymardanov, O. G. Boyko

METHOD FOR SOLUTION OF A PROBLEM OF CALCULATION OF RELIABILITY OF COMPLICATED SYSTEMS WITH VARIABLE PARAMETERS OF BREAKDOWN OF AGGREGATES

The method of equivalent linearization variable parameters of stream of breakdown of aggregates is presented in the article

Keywords: functional systems reliability, breakdown probability integral function, breakdown stream parameter.

© Шаймарданов Л. Г., Бойко О. Г., 2011

Раздел
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.791.72

В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев, Т. Г. Вейсвер

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЛУЧА ПО СТЫКУ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ*

Рассматриваются методы повышения точности позиционирования луча в условиях действия магнитных полей при электронно-лучевой сварке.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, индукция магнитного поля, отклонение луча.

Влияние магнитных полей проявляется в отклонении траектории пучка электронов от прямолинейной (рис. 1). Наличие составляющей магнитного поля напряженностью H, направленной вдоль стыка, приводит к отклонению X луча в направлении, перпендикулярном линии стыка. При этом возникает угол θ между плоскостью стыка и касательной к траектории луча в точке падения его на свариваемую поверхность. Видно, что при точном позиционировании электронного луча по стыку верхних кромок (рис. 1, *б*) сохраняется погрешность ε пропорциональная углу θ и толщине свариваемых деталей. Наличие угла θ приводит к частичному несплавлению h свариваемых плоскостей.

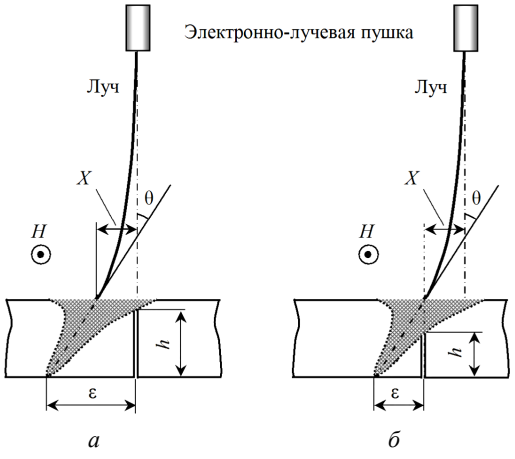


Рис. 1. Отклонение луча под действием магнитного поля

Отклонение электронного пучка зависит от величины магнитной индукции на отрезке его траектории от пушки до поверхности свариваемых деталей, от величины L этого отрезка, а также от ускоряющего напряжения электронно-лучевой пушки, определяющего скорость электронов. Поскольку ускоряющее напряжение и рабочее расстояние L определяются технологией сварки, для уменьшения отклонения пучка следует снижать величину магнитной индукции [1]. При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) наиболее неблагоприятное воздействие оказывает составляющая индукции, ориентированная вдоль направления сварки.

Применяются различные способы снижения магнитной индукции в зоне сварки [1; 2]. К ним относятся предварительное размагничивание изделий, подлежащих ЭЛС путем нагрева до температуры Кюри с последующим охлаждением в отсутствии магнитного поля; путем перемагничивания в пределах гистерезисной петли реверсированным постоянным током с убывающей амплитудой; оснащение сварочной пушки практически на всем участке до изделия лучеводом из магнитомягкого материала.

Предварительное размагничивание позволяет значительно снизить уровень намагниченности свариваемых деталей, однако не обеспечивает неизменным этот уровень при сварке. Не всегда возможен нагрев изделия до температуры Кюри, например, в случае сварки термически упрочненных сталей при высоких требованиях к точности геометрии свариваемого изделия. Размагничивание (особенно крупногабаритных деталей) представляет собой трудоемкий и дорогостоящий процесс. Применение магнитных экранов в рабочем пространстве позволяет частично нейтрализовать действие магнитного поля, что связано с ограничением зоны обзора сварочной ванны.

Разработаны устройства компенсации продольной составляющей магнитной индукции в зоне сварки [2]. В них реализован способ, при котором измеряют продольную составляющую магнитного поля и создают компенсирующее поле с помощью электромагнитных катушек, ток в которых регулируется таким образом, чтобы поле, измеряемое датчиком, было минимизировано. Применение таких устройств ограничивается отсутствием методики компенсации в случае действия неоднородных магнитных полей. Другим фактором, ограничивающим применение этого способа, являются трудности конструктивного и технологического характера, связанные с необходимостью размещения электромагнитных катушек, расположенных в непосредственной близости от места сварки.

Следует отметить, что при ЭЛС наиболее неблагоприятное влияние на качество сварного шва оказывает не отклонение X луча от стыка, а возникновение угла θ. Отклонение может быть скомпенсировано (перемещением луча, или свариваемых деталей), а наличие θ приводит к частичному несплавлению деталей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (код проекта 2.1.2/9274).

Расчеты показывают следующее [3]. Если в рабочем пространстве «пушка – свариваемые детали» действует однородное магнитное поле напряженностью 40 А/м (это поле приблизительно равно магнитному полю Земли), направленное вдоль стыка, то при ускоряющем напряжении 30 кВ и рабочем расстоянии L = 250 мм отклонение X составит 2,65 мм, и угол θ будет равен 1,21°. В случае точного позиционирования луча по стыку верхних кромок при толщине свариваемых деталей, например, 20 мм наличие такого угла приведет к промаху в корне шва 0,4 мм. Если в рабочем пространстве действует магнитное поле напряженностью 300 А/м, сконцентрированное у поверхности свариваемых деталей (детали намагничены, или поле вызвано токами термо-электродвижущей силы при сварке разнородных материалов), то соответствующие отклонения окажутся равными: X = 2,65 мм; θ = 2,44°. Анализируя примеры, можно заметить, что отклонения пучка для рассмотренных случаев равны, а углы наклона отличаются в два раза. Это говорит о том, что при воздействии магнитных полей, сконцентрированных вблизи поверхности свариваемых деталей, могут иметь место значительные углы, которые в неблагоприятном случае отклонение луча перпендикулярно плоскости стыка приводят к значительному отклонению в корне шва.

Уменьшить погрешность ε можно следующим способом [4]. После наведения луча на стык верхних кромок (рис. 2, положение 1) уменьшают расстояние L пушка – свариваемые детали на величину, равную глубине проплавления, в частности на величину, равную толщине свариваемых деталей δ (рис. 2, положение 2), и производят сварку. В результате таких манипуляций луч оказывается смещенным относительно стыка верхних кромок, но благодаря характерной для ЭЛС геометрии проплавления обеспечивается сплавление кромок по всей плоскости стыка.

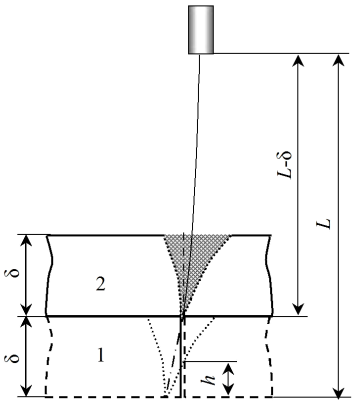


Рис. 2. Простой способ уменьшения величины несплавления

Способ прост в реализации и эффективен при ЭЛС в условиях действия однородных магнитных полей. Способ позволяет также компенсировать погрешности, обусловленные возникновением угла наклона траектории луча из-за неточной установки электронно-лучевой пушки, а также в условиях применения широко распространенных отклоняющих систем с угловым перемещением луча (особенно при значительных уходах стыка).

Более широкие возможности дает способ [5], при котором по результатам измерения магнитного поля в рабочем пространстве рассчитывается угол θ (рис. 3, поз. 1) и электронно-лучевую пушку поворачивают на этот угол (рис. 3, поз. 2). Рассогласования положений луча и стыка, связанные с угловой коррекцией траектории пучка электронов, компенсируют, например, системой слежения за стыком (рис. 3, поз. 3).

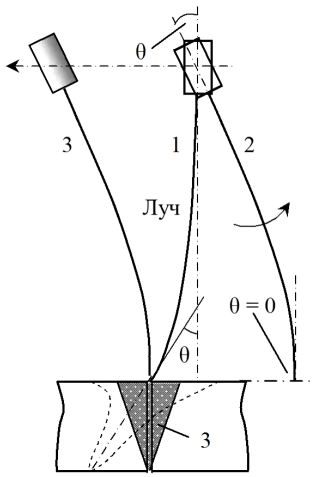


Рис. 3. Способ коррекции траектории луча

Угол θ может быть определен по следующей формуле [3]:

$$\theta = \frac{e}{mV}\int_0^z B(z)dz, \qquad (1)$$

где $B(z) = \mu\mu_0 H(z)$; $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-2}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость; z – ось, совпадающая с геометрической осью электронно-лучевой пушки.

Выражение $B(z)$ можно представить в виде полинома по степеням z:

$$B(z) = B_0 + B_1 z + B_2 z^2 + \ldots B_n z^n,$$

где B_0, B_1, B_2, ..., B_n – постоянные коэффициенты.

В этом случае формула (1) преобразуется к виду, удобному для практических расчетов:

$$\theta = \frac{e}{mV}\left(B_0 z + B_1\frac{z^2}{2} + B_2\frac{z^3}{3} + \cdots + B_n\frac{z^{n+1}}{n+1}\right); \qquad (2)$$

Коэффициенты B_0, ..., B_n находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} B(z_0) = B(0) = B_0, \\ B(z_1) = B_0 + B_1 z_1 + B_2 z_1^2 + \cdots + B_n z_1^n, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ B(z_k) = B_0 + B_1 z_k + B_2 z_k^2 + \cdots + B_n z_k^n, \end{cases} \qquad (3)$$

где $0 \le k \le n$; $B(0)$, $B(z_1)$, ..., $B(z_k)$ – индукции магнитного поля в точках $z = 0$, $z = z_1$, ..., $z = z_k$.

Точность определения θ при ограниченном количестве точек измерения зависит от степени неоднородности магнитного поля. Зная индукции поля, например, в двух точках $z = 0$ и $z = z_1$, можно осуществить линейную аппроксимацию закона $B(z)$:

$$B(z) = B_0 + B_1 z.$$

В этом случае из выражения (2) и системы уравнений (3) с учетом того, что z изменяется от 0 до L, получим:

$$\theta = \frac{e}{mV}\left[B(0)\cdot L + \frac{B(z_1) - B(0)}{z_1}\cdot\frac{L^2}{2}\right]. \qquad (4)$$

Применение двух датчиков, измеряющих индукции магнитного поля в двух точках, позволяет определить точное значение угла θ при действии однородного и линейного неоднородного магнитных полей.

Повысить точность измерения угла θ в условиях нелинейного распределения $B(z)$ можно путем дополнительного измерения производных от индукции $B(z)$ в точках $z = z_k$. При этом коэффициенты находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} B(0) = B_0, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ B(z_k) = B_0 + B_1 z_k + \cdots + B_n z_k^n, \\ B'(0) = B_1, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ B'(z_k) = B_1 + 2B_2 z_k + \cdots + nB_n z_k^{n-1}. \end{cases} \qquad (5)$$

Например, зная индукции и производные от них в двух точках $z = 0$ и $z = z_1$, можно осуществить аппроксимацию закона $B(z)$ полиномом третьей степени:

$$B(z) = B_0 + B_1 z + B_2 z^2 + B_3 z^3,$$

где коэффициенты $B_0, ..., B_3$ определяются из системы:

$$\begin{cases} B(0) = B_0, \\ B(z_1) = B_0 + B_1 z_1 + B_2 z_1^2 + B_3 z_1^3, \\ B'(0) = B_1, \\ B'(z_1) = B_1 + 2B_2 z_1 + 3B_3 z_1^2, \end{cases} \qquad (6)$$

где $B'(0)$ и $B'(z_1)$ – производные по z от индукции в точках $z = 0$ и $z = z_1$.

В этом случае выражение для расчета угла θ примет вид

$$\theta = \frac{e}{mV}\left(B_0 L + B_1\frac{L^2}{2} + B_2\frac{L^3}{3} + B_3\frac{L^4}{4}\right). \qquad (7)$$

Повышение степени полинома, аппроксимирующего закон распределения $B(z)$, приводит к повышению точности определения угла θ.

Координата z_1 определяется расчетным путем или экспериментально. При известной номенклатуре свариваемых изделий могут быть составлены таблицы пользователей с указанием диапазонов z_1, внутри которых будет обеспечиваться требуемая точность совмещения луча с плоскостью стыка при угловой коррекции положения луча в соответствии с выражениями (4) или (7).

Например, закон изменения индукции магнитного поля $B(z)$ над поверхностью свариваемых деталей, имеющих остаточную намагниченность, описывается выражением

$$B(z) = \frac{a\cdot B(L)}{a + (z - L)}, \qquad (8)$$

где $B(z) = \mu\mu_0 H(z)$; $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-2}$ гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость; $B(L)$ – индукция поля на поверхности деталей.

В этом случае расстояние z_1 может быть определено из условия равенства углов θ, полученных при интегрировании нелинейного закона $B(z)$, определяемого выражением (8) и его аппроксимациями в соответствии с уравнениями (4), (7).

При напряженности магнитного поля вблизи поверхности свариваемых деталей 300 А/м, a = 0,003 м^2 и L = 0,25 м точное значение угла θ, определенное интегрированием выражения (8) в соответствии с формулой (1) в пределах от 0 до L составит: $\theta = 4{,}7\cdot 10^{-2}$ рад. (2,69°).

Значения угла θ и относительных ошибок его определения при фиксированном положении ($z = 0$) первой группы датчиков магнитного поля и различных координатах z_1, установки второй группы датчиков (осуществлена аппроксимация распределения индукции магнитного поля $B(z)$ полиномами первого и третьего порядков) приведены в таблице. Видно, что при линейной аппроксимации индукции магнитного поля $B(z)$ ошибка определения угла θ не превышает 20 % при координате z_1 расположения второй группы датчиков, находящейся в пределах 170÷200 мм. При нелинейной аппроксимации диапазон z_1, где ошибка такая же, значительно расширяется и находится в пределах 120÷235 мм.

При ограничении пределов z_1 от 180 до 190 мм (формула (4)) и от 180 до 225 мм (формула (7)), соответственно, погрешность может быть уменьшена практически в 20 раз.

Следует отметить, что z_1 не зависит от степени намагниченности деталей $B(L)$.

Для оценки характера распределения магнитных полей в рабочем пространстве произведены измерения напряженности этих полей на различных высотах над свариваемыми деталями. Измерения произведены при электронно-лучевой сварке широкой номенклатуры крупногабаритных изделий корпусного и агрегатного назначения. Установлено, что диапазон изменения напряженности магнитного поля лежит в пределах 0–600 А/м. Такие магнитные поля могут приводить к возникновению значительных углов между скоростью электронов и плоскостью стыка свариваемых деталей, что подтверждает целесообразность применения коррекции траектории электронного луча по результатам измерения магнитных полей.

В качестве датчиков магнитного поля использованы дифференциальные феррозонды [6]. Оси чувствительности феррозондов направлены вдоль свариваемого стыка. При этом одна группа датчиков устанавливается на срезе электронно-лучевой пушки ($L = 0$), а вторая – в расчетной точке z_1 рабочего пространства.

Значения угла θ и относительных ошибок его определения

z_1, мм	Значения угла, град.		Ошибка, %	
	формула (4)	формула (7)	формула (4)	формула (7)
120	1,41	2,14	47,75	20,40
125	1,46	2,18	45,75	18,98
130	1,52	2,22	43,57	17,53
135	1,58	2,26	41,19	16,07
140	1,65	2,30	38,60	14,61
145	1,73	2,34	35,76	13,17
150	1,81	2,38	32,66	11,76
155	1,91	2,41	29,25	10,40
160	2,01	2,45	25,51	9,14
165	2,12	2,48	21,39	7,99
170	2,24	2,51	16,87	7,01
175	2,37	2,53	11,91	6,23
180	2,52	2,54	6,46	5,69
185	2,68	2,55	0,50	5,41
190	2,86	2,55	–6,00	5,41
195	3,05	2,54	–13,05	5,69
200	3,25	2,53	–20,61	6,23
205	3,47	2,52	–28,64	6,33
210	3,69	2,53	–37,00	6,23
215	3,92	2,55	–45,51	5,41
220	4,15	2,63	–53,88	2,54
225	4,36	2,76	–61,72	–2,58
230	4,54	2,99	–68,56	–10,97
235	4,68	3,92	–73,88	–23,18

Одно из конструктивных исполнений размещения феррозондового датчика в рабочем пространстве показано на рис. 4. Габаритные размеры датчиков обеспечивают их применение практически без ограничений в условиях ЭЛС.

Рис. 4. Электронно-лучевая пушка КЭП-2М с датчиком магнитного поля

Коррекция траектории луча может осуществляться как перемещением электронно-лучевой пушки (см. рис. 3), так и с помощью электромагнитной отклоняющей системы с двойным преломлением луча.

Таким образом, при действии однородных магнитных полей оказывается приемлемым простой способ устранения дефектов, заключающийся в уменьшении рабочего расстояния на глубину проплавления.

При осуществлении коррекции траектории луча по результатам измерений параметров магнитного поля в рабочем пространстве достаточно производить измерения в двух точках при относительно нежестких требованиях к месту расположения второй группы датчиков.

Библиографические ссылки

1. Назаренко О. К. Отклонение пучка электронов при электронно-лучевой сварке // Автомат. сварка. 1982. № 1. С. 33–39.

2. Непорожний В. Ю. Устройство для компенсации остаточного магнитного поля при электронно-лучевой сварке толстолистовых сталей // Автомат. сварка. 1984. № 3. С. 68–70.

3. Лаптенок В. Д., Браверманн В. Я., Мурыгин А. В. Расчет отклонения пучка электронов в магнитном поле при электронно-лучевой сварке // Деп. в ВИНИТИ 06.08.86, № 5580. С. 36.

4. А. с. 1255342 СССР, МКИ[3] И 23 К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / В. Я. Браверман, В. Д. Лаптенок, С. Г. Баякин и др. ; опубл. 07.09.86, Бюл. № 33.

5. А. с. 1405977 СССР, МКИ[3] В 23 К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и устройство для его осуществления / В. Д. Лаптенок, В. Я. Браверман, В. Б. Помогалов и др. ; опубл. 30.06.88.

6. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. Л. : Энергия, 1969.

V. Ya. Braverman, V. S. Belozertcev, T. G. Veisver

ACCURACY INCREASE OF BEAM POSITIONING RELATIVE TO JOINT AT ELECTRON-BEAM WELDING UNDER CONDITIONS OF MAGNETIC FIELDS ACTION

The authors consider methods of accuracy increase of beam positioning under the magnetic fields action at electron beam welding.

Keywords: electron beam welding, magnetic induction, beam deflection.

© Браверман В. Я., Белозерцев В. С., Вейсвер Т. Г., 2011

УДК 539.4

М. А. Воеводина, Г. Г. Крушенко

К ВОПРОСУ О «ЧЕРНЫХ ПЯТНАХ» В ЧУГУНЕ С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

Исследовали неметаллические включения в чугуне с шаровидным графитом. Показано влияние исходного содержания серы на загрязненность расплава различными размерными группами включений.

Ключевые слова: чугун с шаровидным графитом, неметаллические включения.

Механические свойства отливок из серого чугуна зависят в значительной степени от формы графитных включений, наиболее благоприятной из которых является глобулярная.

Получение чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) обеспечивается применением присадок – сфероидизирующих и графитизирующих модификаторов (например, магния или РЗМ) [1]. При этом продукты их взаимодействия с расплавом – неметаллические включения (НВ) выделяются либо в виде рассредоточенных точечных включений, либо в виде скоплений. Образование неметаллических включений является неизбежным процессом технологии производства отливок из ЧШГ. При этом отливки получаются с дефектами, называемыми пятнистыми или «черными пятнами».

Относительно природы и механизма образования «черных пятен» в отливках из ЧШГ в литературе имеются различные мнения.

В первых исследованиях, посвященных изучению этого вопроса, считали, что эти дефекты представляют собой ликваты, обогащённые сульфидами магния и марганца, в которых имеются также графит и другие НВ [2]. А согласно работе [3] «черные пятна» в отливках из ЧШГ представляют собой скопления сульфидов магния и графита. Тогда как автор работы [4] считает, что «черные пятна» – это сульфиды магния. По мнению автора в работе [5], основную роль в образовании «чернот» играют карбиды MgC_2 и MgC_3, а в работе [6] наличие этих дефектов связывают с коагуляцией и всплыванием НВ. В работе [7] установлено, что «черные пятна» состоят из сегрегирующих оксидов и сульфидов магния, оксидов алюминия, кальция, железа и кремния, тогда как в работе [8] основной причиной возникновения дефектов в виде «черных пятен» считают попадание при заливке расплава в форму оксидной пленки. По их мнению, на частицах этой плены, как на готовых центрах, выкристаллизовываются продукты взаимодействия магния с примесями чугуна. Эту точку зрения разделяют авторы работ [9; 10], но при этом они считают, что образование оксидной пленки происходит в течение всего процесса разливки расплава и заполнения полости литейной формы, в результате чего попадание ее в отливку не исключает даже тщательная очистка поверхности расплава в ковше. Частицы пленки, попавшие в форму, оказывают существенное влияние на формирование «черных пятен». Они инициируют процесс коагуляции образующихся дисперсных MgO и MgS, ускоряя всплывание последних в верхние зоны отливки. На этих комплексных включениях возможна также коагуляция графитной фазы, что объясняет повышенную концентрацию углерода в составе «черных пятен».

Обобщая изложенные точки зрения, можно считать, что при сфероидизирующей обработке расплава ЧШГ магний прежде всего активно взаимодействует с кислородом и серой с образованием MgO и MgS. При этом попутно может образовываться неметаллическая фаза более сложного состава.

В настоящей работе выполнены термодинамические и металлографические исследования неметаллической фазы в чугуне, обработанном магнием.

При этом чугун модифицировали лигатурой (Ni + 15 масс. % Mg), смешанной с ферросилицием ФС75. Чугун выпускали в ковш из печи при 1 400 °С, где его выдерживали 2–3 мин. Полученные отливки разрезали на два продольных темплета, на поверхности которых готовили макрошлифы для получения серных отпечатков по методу Баумана и микрошлифы для металлографических исследований.

Серосодержащие включения на серных отпечатках темплетов классифицировали на пятнистые и точечные. К ним относили включения соответственно

размером более и менее 0,1 мм. Мелкие включения (< 0,1 мм) на серных отпечатках темплетов отливок, видимые при увеличении в 32 раза, классифицировали как точечные. Дисперсные включения исследовали на микрошлифах при увеличении в 300 раз. Качественный анализ НВ проводили на оптическом микроскопе с рентгеновским микроанализатором «Camebax» и JSM-Jeol.

Относительную площадь, занятую «пятнами», определяли планиметрическим методом Делесса [11] на всей поверхности серного отпечатка темплета как $F_п/F_0$, а относительную площадь точечных включений – путем просмотра шлифов под оптическим микроскопом при увеличении в 32 раза: $F_т/F_0$, где $F_п$ – площадь, занятая пятнистыми включениями, мм^2; $F_т$ – площадь, занятая точечными включениями, мм^2; F_0 – общая площадь поверхности темплета, мм^2.

Для оценки загрязненности чугуна дисперсными включениями применяется метод «Л», рекомендованный ГОСТ 1778–70 [12; 13], который позволяет судить о суммарной загрязненности чугуна включениями, о загрязненности НВ по их видам. Требуемая точность анализа (ошибка не более 10 %) достигается при длине подсчета 100…150 мм.

Экспрессивный металлографический анализ включений проводили указанным методом с использованием оптических микроскопов МИМ-7, МИМ-8. Шлифы рассматривали при увеличении в 300 раз и длине подсчета 200 мм.

Загрязненность чугуна включениями вычисляли по формуле

$$И_i = \frac{\sum n_i \times a_i}{l}, \qquad (1)$$

где $И_i$ – индекс загрязненности чугуна НВ i-й размерной группы; Σn_i – суммарное количество включений в i-й группе; a_i – средний размер включений в i-й группе, мкм; l – длина подсчета, мкм.

Общая загрязненность чугуна НВ имеет вид

$$И = \sum_{i=1}^{k} n_i ,$$

где k – количество размерных групп включений.

Микрорентгеноспектральный качественный анализ включений ЧШГ выполняли на электронном микроскопе JSM-35 фирмы «Jeol» и «Camebax» в рентгеновских лучах при увеличении в 800 раз.

Наличие в расплаве ЧШГ неметаллических частиц – продуктов взаимодействия модификатора с компонентами чугуна – оценивали путем термодинамического анализа возможных реакций, а также с помощью микрорентгеноспектрального анализа НВ в местах точечных и пятнистых скоплений частиц.

Термодинамическую возможность образования сульфида магния в расплаве чугуна при обработке его магнием оценивали по изменению энергии Гиббса для реакции [Mg] + [S] = [MgS]. Реальное изменение энергии Гиббса рассчитывали по формуле

$$\Delta G_{MgS} = \Delta G^0_{MgS} + R \times T \times \ln \frac{a_{MgS}}{a_{MgS} \cdot a_S}; \qquad (2)$$

$$\Delta G^0_{MgS} = 19{,}14 \times \lg\left(f_{Mg} \times [Mg] \times f_S \times [S] \right) \qquad (3);$$

где [Mg] и [S] – содержания магния и серы в расплаве, соответственно, % масс.; f_{Mg} и f_s – коэффициенты активности серы и магния, соответственно; a_{Mg} – активность сульфида магния, ее приняли равной единице.

Коэффициент активности серы рассчитывали по параметрам взаимодействия 1-о и 2-о порядков:

$$\lg f_S = e_S^C \times [C] + e_S^{Si} \times [Si] + e_S^{Mn} \times [Mn] + \\ + e_S^S \times [S] + r_S^C \times [C]^2 + r_S^{Si} \times [Si]^2 . \qquad (4)$$

Отсутствующие в литературе значения параметров e_S^j и r_S^j, выраженные в массовых процентах, определяли через мольные параметры взаимодействия ε_S^j и ρ_S^j.

При расчете ε_S^j учитывали его температурную зависимость в следующем виде:

$$\varepsilon_S^j = z \times \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon^j_{S1873}}{z} \right)^{\frac{1873}{T}} \right], \qquad (5)$$

где $z = 10$ – координационное число атомов железа.

Параметры взаимодействия 2-го порядка, выраженные в объемных процентах, определяли по следующей формуле:

$$\rho_S^j = \frac{\left(\varepsilon_i^S\right)^2}{2 \times z} + \frac{\varepsilon_j^j}{z} \times \left(\varepsilon_j^S - \frac{z}{2} \right). \qquad (6)$$

По аналогичной методике рассчитывали параметры взаимодействия магния с компонентами чугуна (рис. 1). По полученным значениям параметров взаимодействия определяли коэффициент активности магния следующим образом:

$$\lg f_{Mg} = e_{Mg}^{Si} \times [Si] + e_{Mg}^{C} \times [C] + \\ + e_{Mg}^{O} \times [O] + r_{Mg}^{C} \times [C]^2 + r_{Mg}^{Si} \times [Si]^2 . \qquad (7)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 1, *а*. Анализ расчетных данных показал, что при температурах разливки чугуна и заполнения полости литейной формы изменение энергии Гиббса для реакции образования сульфида магния отрицательно по величине в широком диапазоне реальных концентраций серы и магния. При содержании серы в чугуне 0,01 % значение изменения энергии Гиббса менее отрицательно (ΔG_{MgS} = –575 кДж), чем в расплаве чугуна с исходным содержанием серы 0,05 % (ΔG_{MgS} = –600 кДж). Это свидетельствует о том, что в жидком чугуне при различных концентрациях серы в широком диапазоне температур расплава до начала затвердевания возможно образование сульфида магния.

По аналогичной методике оценивали возможность образования оксида магния MgO, ($MgO \times SiO_2$).

В расплаве чугуна при различных концентрациях магния и кислорода может образоваться оксид и оксисиликат магния (см. рис. 1, *б*).

Термодинамические расчеты показали, что в интервале 1250–1450 °С в расплаве чугуна возможно образование оксида и сульфида магния, комплексного оксида $MgO \times SiO_2$. При модифицировании и заполнении полости литейной формы неметаллические частицы находятся в твердом состоянии. Об этом свидетельствует наличие на шлифах включений остроугольной формы и формирование ими крупных скоплений включений из отдельных точечных.

При исследовании образцов под микроскопом обнаружили включения неправильной формы размером 25…30 мкм, которые классифицировали как сульфид магния. Включения оксида магния светло-серого цвета размером 10…15 мкм часто встречаются в виде вытянутых цепочек. Включения, состоящие из светло-серого пятна с наложением темно-серого, рассматривали как оксисульфидные.

В расплаве чугуна, обработанном никель-магниевой лигатурой, максимальное количество включений приходится на включения сульфида магния ($И = 3{,}2 \times 10^{-3}$), индекс загрязненности по оксисульфидам несколько меньше ($И = 2{,}4 \times 10^{-3}$), содержание включений оксида магния минимально ($И = 1{,}73 \times 10^{-3}$).

В пробе из верхней части отливки анализировали крупные скопления НВ («черные пятна»). Поверхность отливки, содержащая «черное пятно», неоднородная, пористая.

Микрофотография локального скопления НВ приведена на рис. 2. Исследуемое включение находится в средней части фотоснимка. По характеристическим лучам выявили наличие во включении магния, серы, кремния, алюминия, марганца и фосфора.

Содержание серы во включении превышает его концентрацию в металлической матрице. Такой же характер имеют распределение магния и кремния. Однако распределение магния имеет более контрастный характер. Из этого следует, что «черное пятно» представляет собой неметаллическую фазу на основе соединений магния. На отдельных участках вне пятнистого включения имеет место повышенное содержание только кремния или алюминия. Это указывает на то, что одни НВ по составу ближе к оксидам и оксисульфидам магния и кремния, другие – к оксидам кремния или алюминия.

Исследовали влияние содержания серы в исходном расплаве на загрязненность отливок из магниевого чугуна пятнистыми, точечными и дисперсными включениями (рис. 3). Влияние исходного содержания серы на количество пятнистых дефектов в чугуне представлено на рис. 3, *а*. При высоком исходном содержании серы (0,07 %) пятнистые дефекты занимают до 12 % площади темплета. В отливках из магниевого чугуна с исходным содержанием серы (0,01 %) пятнистые дефекты практически не образуются.

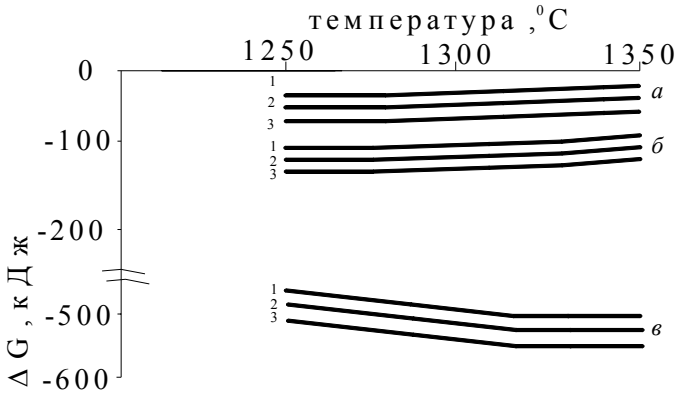
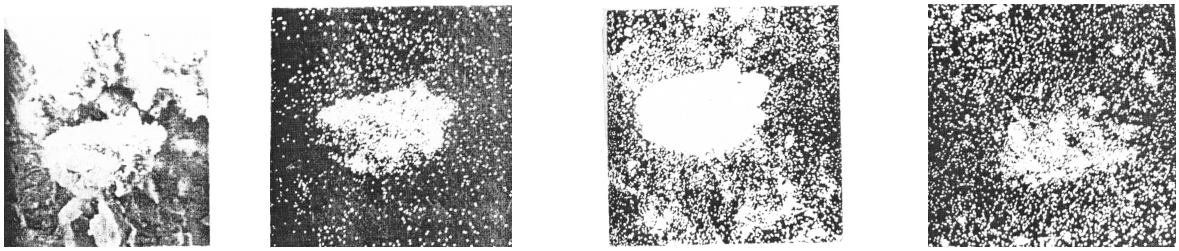


Рис. 1. Влияние температуры расплава чугуна на значение избыточной энергии Гиббса химических реакций:
а – Mg + S = MgS: [Mg] = 0,03 %, [O] = 0,003 %, [S], %: 1 – 0,01, 2 – 0,03, 3 – 0,07;
б – Mg + O = MgO: [O] = 0,003 %, [S] – 0,03 %, [Mg], %: 1 – 0,02, 2 – 0,04, 3 – 0,06;
в – Mg + Si + 3×O = $MgO \times SiO_2$: [Mg] – 0,03 %, [O] = 0,003 %, [Si] = 3,2 %, [S], %: 1 – 0,01, 2 – 0,03, 3 – 0,07



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Распределение элементов на поверхности излома ЧШГ:
а – общий вид излома; *б*, *в*, *г* – распределение серы $S_{K\alpha}$, магния $Mg_{K\alpha}$ и кремния $Si_{K\alpha}$ соответственно

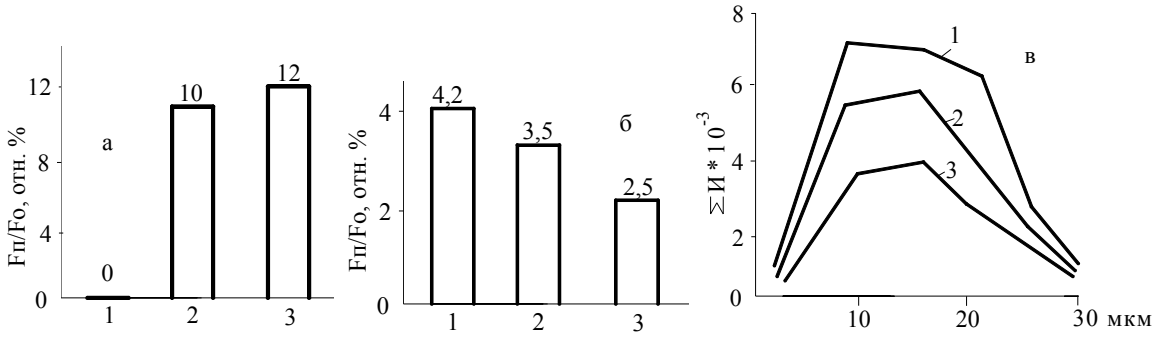


Рис. 3. Загрязненность ЧШГ неметаллическими включениями:
а–в: *а* – загрязненность пятнистыми; *б* – точечными и дисперсными; *в* – включениями;
1–3 – исходное содержание серы в чугуне: 1 – 0,01 %; 2 – 0,03 %; 3 – 0,07

Однако количество точечных дефектов при отсутствии на серных отпечатках темплетов отливок пятнистых дефектов максимально – 4,2 отн. % в сравнении с другими вариантами.

Анализ дисперсных включений в чугуне с различным исходным содержанием серы показал, что наибольшее их количество обнаружено в чугуне с низким исходным содержанием – 0,01 % (рис. 3, *в*, кривая 3). Минимальное количество дисперсных включений – в расплаве с высоким исходным содержанием серы 0,03 % занимает промежуточное положение (рис. 3, *в*, кривая 2).

Таким образом, показано, что при сфероидизирующем модифицировании чугуна магнием в расплаве образуются, в основном, твердые неметаллические включения на основе оксида и сульфида магния. Выявлены зависимости загрязненности чугуна различными размерными группами включений от содержания серы в исходном расплаве. Показано, что пятнистые дефекты образуются в расплаве чугуна с исходным содержанием серы свыше 0,01…0,02 %. Количество точечных и дисперсных включений при этом больше, чем в отливках из модифицированного чугуна с исходным содержанием серы 0,03…0,07 %. Максимальное количество пятнистых дефектов обнаружено в образцах из чугуна с исходным содержанием серы 0,07 %.

Библиографические ссылки

1. Ковалевич Е. В. Новая технология получения чугуна с шаровидным графитом // Литейное производство. 1989. № 8. С. 3–4.

2. Ващенко К. И., Софрони Л. Магниевый чугун // Высокопрочные чугуны. Киев : Машгиз. 1960. С. 485.

3. Шапранов И. А. Неметаллическая фаза в магниевом чугуне // Высокопрочные чугуны. Киев : Машгиз. 1954. С. 271–274.

4. Балинский В. Р. О сере в чугуне, обработанном магнием // Литейное производство. 1954. № 2. С. 18–19.

5. Петриченко А. М. Влияние некоторых факторов на структуру высокопрочного чугуна и продолжительность действия магния // Высокопрочные чугуны. Киев : Машгиз. 1954. С. 76–80.

6. Королев В. М. Включения в магниевом чугуне и методы их устранения // Литейное производство. 1959. № 5. С. 17–18.

7. Kiessling R. Nonmetallic Inclusions and their Effects on the Properties of Ferrous Alloys // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. 2008. № 4 P. 6278–6283.

8. Рыжиков А. А., Захаров В. А., Лебедь И. И. Борьба с черными пятнами в отливках из магниевого чугуна // Литейное производство. 1962. № 6. С. 10–12.

9. Шицман Е. Б., Самарин А. А. О природе неметаллических включений в магниевом чугуне // Высокопрочные чугуны. Киев: Машгиз. 1964. С. 69–73.

10. Изосимов В. А., Усманов Р. Г., Канафин М. Н. Влияние химического состава высокопрочного чугуна на его механические свойства // Литейное производство. 2004. № 6. С. 32–38.

11. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М. : Металлургия. 1976.

12. ГОСТ 1778–70. Металлографические методы определения НВ. М. : Изд-во стандартов, 1970.

13. Шульте Ю. А., Шаломеев А. А., Молоков С. А. Контроль НВ в литой стали // Литейное производство 1968. № 1. С. 46–47.

M. A. Voevodina, G. G. Krushenko

TO THE QUESTION OF «BLACK STAINS» IN PIG-IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE

The authors investigated nonmetallic inclusions in pig-iron with spherical graphite. Influence of the initial grade of sulfur on impurity of a liquid with various dimensional groups of inclusions

Keywords: pig-iron with spherical graphite, nonmetallic inclusions.

© Воеводина М. А., Крушенко Г. Г., 2011

УДК 539.3

А. В. Кацура

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕЖИМОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Известные методы формообразования конструкционных сплавов в холодном состоянии методом многоударной выколотки приводят к появлению недопустимого коробления и монтажных напряжений, что оказывает заметное влияние на усталостную долговечность элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА).

Ключевые слова: деформирование, формообразование, прочность, долговечность, коррозия.

В настоящее время в авиастроении ведутся исследования по практической отработке концепции и обоснованию возможности использования явления ползучести для изготовления криволинейных панелей обшивки и деталей каркаса планера летательных аппаратов (ЛА) с обеспечением технологичности, конструктивной прочности и долговечности изделий. Использование этого реологического явления при формообразовании деталей обеспечивает значительное сокращение технологического цикла и трудоемкости изготовления элементов авиационных конструкций, повышение точности выполнения аэродинамических обводов при сборке, снижение объема подгоночных работ и уровня монтажных напряжений.

Опыт разработки технологии формообразования монолитных панелей в режиме ползучести и результаты исследований показали, что для многих традиционных алюминиевых сплавов (например, АК4-1, В95) процесс деформирования можно успешно совместить с режимом искусственного старения, без оказания существенного влияния параметров температурно-силового воздействия на требуемые конечные прочностные характеристики и коррозионные свойства.

Известно, что влияние предварительного деформирования на прочностные характеристики сплавов определяется большим числом факторов. Это длительность действия и величина повышенной температуры, уровень статической нагрузки, степень остаточной деформации, которые приводят к изменению механических характеристик, трансформации структуры, обусловленной старением материала. Кроме того, есть основания ожидать, что в определенном диапазоне параметров (при определенных условиях) процесса формообразования деформирование упрочняет материал [1].

В результате исследований автором выявлено влияние параметров процесса формообразования, основанного на пластической деформации при определенной схеме нагружения, на прочностные характеристики и коррозионные свойства деталей из алюминиевых сплавов, которые отражают эффекты, вызванные формоизменением с остаточной деформацией заготовок, не превышающей 1,5 % и характерной для большинства крупногабаритных фрезерованных панелей крыла и панелей фюзеляжа планера ЛА. Полученные данные о статической прочности образцов, изготовленных из фрезерованных заготовок плиты сплавов В95пчТ2 и В95пчТ3, в исходном состоянии (вариант 1), деформированных по традиционной технологии (вариант 2) и деформированных в режиме ползучести (вариант 3) приведены в таблице. Видно, что по сравнению со сплавом В95пчТ3 бóльшую чувствительность к деформированию показал сплав В95пчТ2.

Следует отметить, что сплав В95пчТ2 после деформирования в режиме ползучести (при температуре 180 ºС) имеет показатели прочности близкие к показателям исходного полуфабриката сплава В95пчТ3. При этом формообразование в режиме ползучести для сплава В95пчТ3 не оказало влияния на значения условного предела прочности и условного предела текучести, а также на сопротивление усталости (σ_{max} = 160 МПа; R = 0,1; f = 20 Гц), по сравнению с подобными характеристиками исходного полуфабриката (рис. 1).

Результаты усталостных испытаний образцов с центральным круглым отверстием (K_t = 2,6) из плиты и листа сплава В95пчТ2 представлены на рис. 2, 3. Кривые усталости для трех уровней циклического нагружения σ_{max} = 200, 180, 160 МПа при коэффициенте асимметрии цикла R = 0,1 и частоте циклического нагружения f = 20 Гц построены по средним логарифмическим значениям выборок. Установлено, что формообразование сплава в режиме ползучести практически не влияет на сопротивление усталости образцов на исследуемых уровнях циклического нагружения в сравнении с исходным состоянием. Подобный характер влияния технологических обработок на характеристики сопротивления развитию трещин усталостных (СРТУ) выявлен при осевом циклическом нагружении образцов с центральной трещиной (рабочее сечение 3,5 × 60 мм) из плиты сплава В95пчТ2, с частотой 5 Гц и коэффициентом асимметрии R = 0,1 при постоянной нагрузке для всех серий образцов.

На усредненных кинетических диаграммах (рис. 4) представлены зависимости скорости $\Delta 2l/\Delta N$ роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK в вершине усталостной трещины. Полученные данные показывают, что деформирование плиты сплава В95пчТ2 (ε = 0,2 %) в режиме ползучести (кривая 3) не оказывает, в сравнении с исходным полуфабрикатом (кривая 1), значимого влияния на рост трещин на всех стадиях их развития. Несколько быстрее (в 1,3 раза, средний диапазон диаграммы) развиваются трещины в образцах, прошедших формование многоударной выколоткой (кривая 2).

Статическая прочность образцов, изготовленных из фрезерованных заготовок, деформированных при различных режимах формообразования

№ варианта обработки образца	Обработка образцов	Статическая прочность при растяжении $l_o = 5{,}65\sqrt{F_o}$					
		В95пчТ2, плита толщиной 40 мм			В95пчТ3, плита толщиной 40 мм		
		Толщина образцов 3,5 мм			Толщина образцов 2,0 мм		
		ε = 0,2 %			ε = 1,0 %		
		$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
1	Исходное состояние	552	474	8,4	519	44	7,9
2	Деформирование многоударной выколоткой при нагреве 150 ºС	511	454	9,0	517	453	7,7
3	Деформирование в режиме ползучести методом заневоливания при температуре 180 ºС в течение 45 мин	514	434	8,5	517	452	6,5

Примечание: l_o – длина рабочей части образца; F_o – площадь расчетного сечения образца.

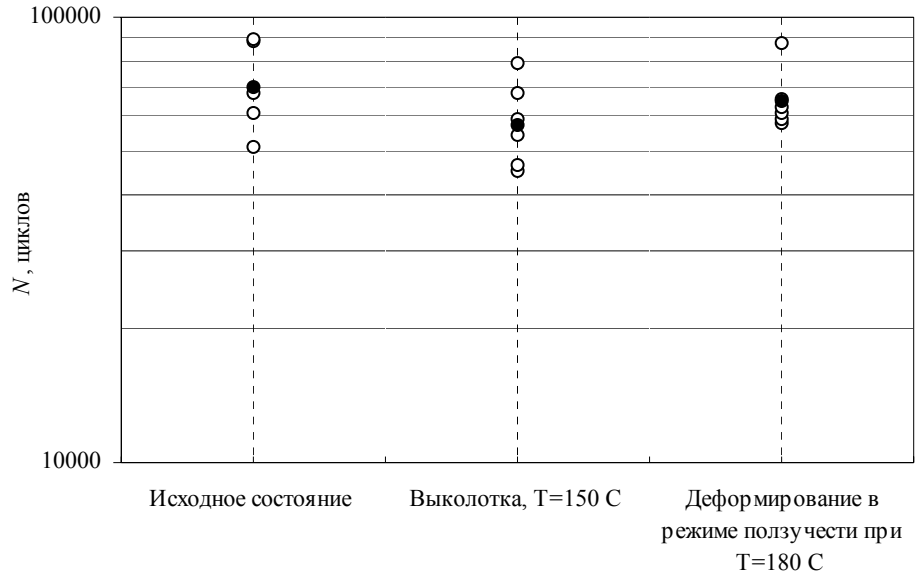


Рис. 1. Усталостная долговечность образцов с отверстием (K_t = 2,6), изготовленных из заготовок сплава В95пчТ3, деформированных (ε = 1,5 %) при различных режимах формообразования σ_{max} = 160 МПа; R = 0,1; f = 20 Гц: по традиционной технологии (○); в режиме ползучести (●)

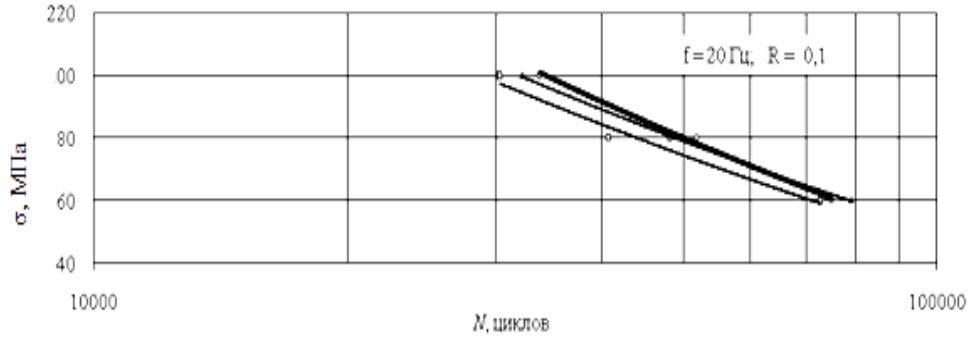


Рис. 2. Усталостная долговечность образцов с отверстием (K_t = 2,6), изготовленных из заготовок сплава В95пчТ2 (лист 5,8 мм, вырезка в направлении проката), деформированных (ε = 0,2 %) при различных режимах формообразования: при различных режимах формообразования: в исходном состоянии (○); после деформирования многоударной выколоткой (□); после деформирования в режиме ползучести (△)

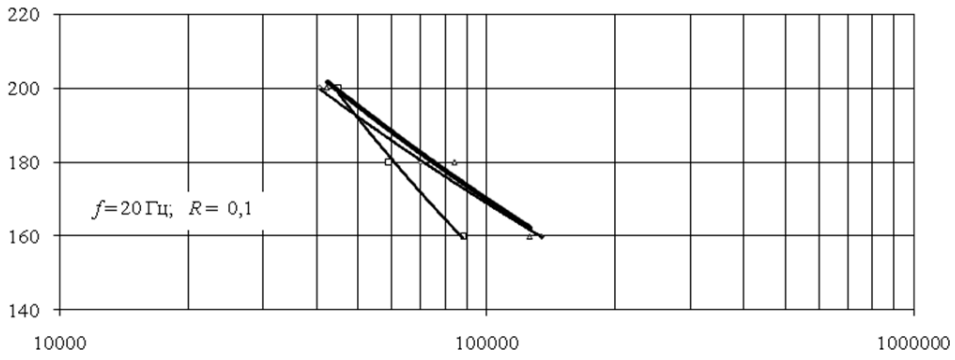


Рис. 3. Усталостная долговечность образцов (рабочее сечение 3,5 × 30 мм) с отверстием (K_t = 2,6), изготовленных из заготовок сплава В95пчТ2 (плита, вырезка в направлении проката), деформированных (ε = 0,2 %) при различных режимах формообразования: в исходном состоянии (○); после деформирования многоударной выколоткой (□); после деформирования в режиме ползучести (△)

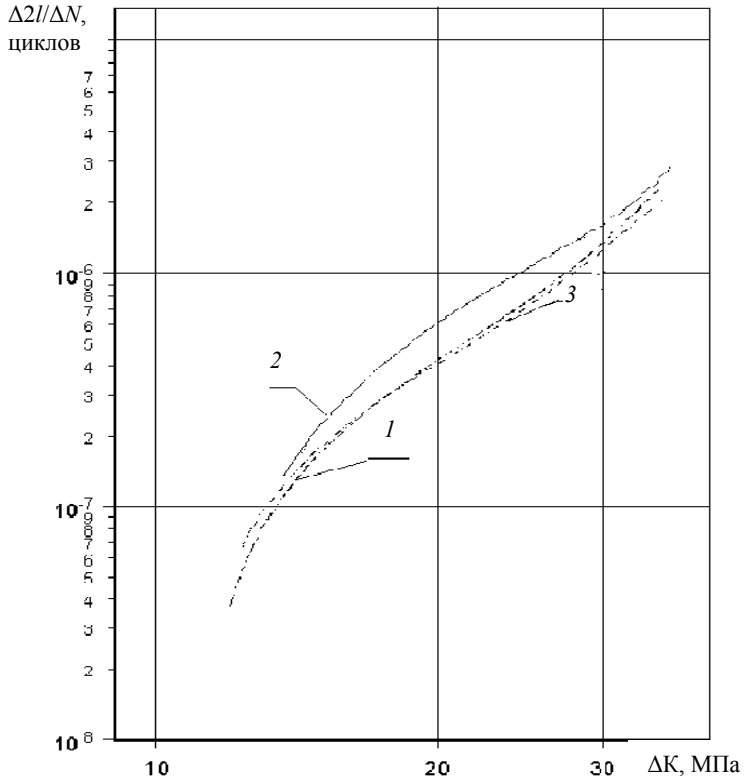


Рис. 4. Зависимость скорости развития трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений для плиты сплава В95пчТ2 (сплав В95пчТ2, плита толщиной 40 мм, направление вырезки образца вдоль проката, рабочее сечение образца – 3,5 × 60 мм; σ_{max} = 98 МПа; R = 0,1; f = 10 Гц): исходное состояние (*1*); деформирование многоударной выколоткой при T = 150 ºС (*2*); деформирование в режиме ползучести при T = 180 ºС методом заневоливания (*3*)

Сплав В95пчТ2 демонстрирует повышенную стойкость к коррозионному растрескиванию независимо от варианта обработки: все образцы простояли в стандартном электролите под нагрузкой (при заданном напряжении, равном $0{,}75\sigma_{0,2}$) (контрольная временная база 90 суток без разрушения (ГОСТ 9.019)).

У образцов после деформирования в режиме ползучести интенсивность поражения местной коррозией значительно ниже. Анализ шлифов образцов сплава В95пчТ2 (всех серий) после испытаний по ГОСТ 9.021 на межкристаллитную коррозию (МКК) показал, что несмотря на внешнее поражение поверхности (потерю блеска, характерную для всех рассмотренных случаев), очагов развития МКК не обнаружено. После стандартных испытаний в течение 7 суток по ГОСТ 9.904 все образцы имеют примерно одинаковую, близкую к третьему баллу, стойкость к расслаивающей коррозии. Аналогичные результаты получены при стандартных испытаниях на межкристаллитную, расслаивающую коррозию и коррозионное растрескивание

для образцов всех исследуемых вариантов формоизменения образцов сплава В95пчТ3 [2].

Деформирование в режиме ползучести оказало несущественное влияние на изменение микроструктуры плиты сплава В95пчТ2, в частности, произошло незначительное укрупнение нерастворимых фаз по сравнению с микроструктурой исходного полуфабриката. При деформировании выколоткой отмечено неравномерное дробление зерен, что, по-видимому, обусловливает большее рассеяние экспериментальных данных при испытании образцов на сопротивление развитию трещин усталости.

Следует учитывать, что температура режима искусственного старения (160...180 ºС), при которой происходит формообразование, не может обеспечить полной релаксации напряжений, создаваемых в деталях при заневоливании. При этом остаточные напряжения ведут к упругой отдаче (пружинению), которую необходимо учитывать при выборе деформации заневоливания. Можно предположить, что снизить эффект пружинения либо избежать его, но без увеличения допускаемых температур, можно интенсификацией процесса деформирования. Это особенно важно при формообразовании деталей из сплавов 1163, Д16чТ, 2024Т351, применяемых в авиационных конструкциях, как правило, в естественно состаренном состоянии. Формообразование методом заневоливания для этих сплавов возможно только при нормальной температуре. Отсюда, для получения требуемой геометрии, заготовку, с учетом упругой отдачи, необходимо деформировать с большим упреждением, т. е. с большей начальной деформацией. Уменьшение усталостной долговечности после деформирования сплава при исследованных параметрах подтверждает необходимость поиска методов, способствующих снижению отрицательного влияния деформирования [3].

Нагрев естественно состаренных сплавов инициирует ускоренное старение и, как следствие, изменение механических свойств: снижение сопротивления усталости и характеристик вязкости разрушения. В силу этого, формообразование деталей из таких сплавов требует других подходов и становится необходимым поиск новых режимов, не связанных с нагревом сплавов. Например, реализовать формообразование при нормальной температуре можно за счет интенсификации реологического процесса путем наложения дополнительных силовых полей типа магнитно-импульсного или электрического воздействия на материал, позволяющего за счет кратковременного нагрева обеспечить при определенной схеме нагружения требуемые или приемлемые параметры деформирования и требуемую величину конечной пластической деформации в металлах и сплавах, облегчить релаксацию общих и локальных остаточных напряжений в зонах их опасной концентрации.

Автором была проведена оценка влияния процессов формообразования с использованием импульсного тока на сопротивление усталости конструктивных элементов из сплава Д16чАТ. Представлены зависимости сопротивления усталости конструктивных образцов, деформированных с применением электростимуляции, от длительности воздействия импульса τ, совпадающего по направлению с продольной осью заготовок.

Показано, что воздействие импульсного электрического тока перед операцией деформирования сплава Д16чАТ повышает сопротивление усталости (рис. 5) на исследуемых уровнях циклических напряжений по сравнению с усталостной долговечностью подобных образцов в исходном состоянии.

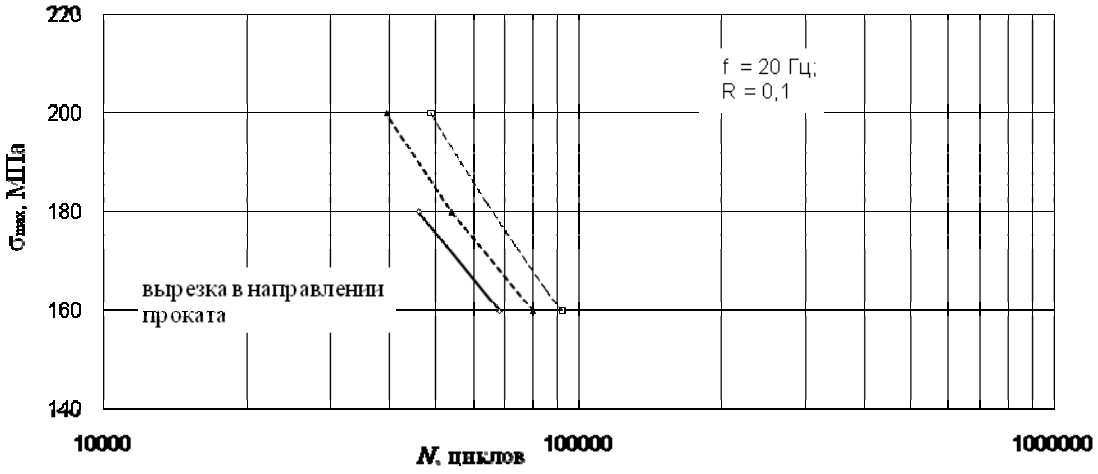


Рис. 5. Усталостная долговечность образцов с отверстием (K_t = 2,5), изготовленных из балок (сплав Д16чАТ лист 4,0 мм), деформированных (ε = 1,5 %) при нормальной температуре после воздействия импульсного электрического тока: исходное состояние (◇); деформирование после воздействия ИЭТ, τ = 120 с, T = 60 °С (□); деформирование после воздействия ИЭТ, τ = 30 с, T = 60 °С (▲)

Так, воздействие импульсного электрического тока (ИЭТ) с длительностью импульса 120 с, направленного вдоль проката, повышает усталостную долговечность образцов на 25 %, а при длительности воздействия импульса 30 с – на 15 % [4].

Таким образом, при исследовании влияния параметров процесса формообразования с остаточной деформацией заготовок, не превышающей 1,5 %, характерной для большинства крупногабаритных фрезерованных панелей крыла и панелей фюзеляжа планера ЛА, на прочностные характеристики и коррозионные свойства деталей из алюминиевых сплавов В95пчТ2, В95пчТ3, Д16чАТ, установлено, что механические свойства сплава В95пчТ2 после деформирования в режиме ползучести (при температуре 180 ºС) имеют показатели прочности исходного полуфабриката сплава В95пчТ3.

Показано, что формообразование в режиме ползучести практически не влияет на сопротивление усталости образцов из сплава В95пчТ2 на исследуемых уровнях циклического нагружения в сравнении с исходным состоянием.

Установлено, что у образцов из сплава В95пчТ2 после деформирования в режиме ползучести интенсивность поражения местной коррозией значительно ниже. Сплав В95пчТ2 демонстрирует повышенную стойкость к межкристаллитной, расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию независимо от варианта обработки.

Аналогичные результаты получены при стандартных испытаниях на межкристаллитную коррозию и коррозионное растрескивание для образцов всех исследуемых вариантов формоизменения образцов сплава В95пчТ3 [5].

Установлено, что воздействие импульсного электрического тока перед операцией деформирования сплава Д16чАТ повышает сопротивление усталости на исследуемых уровнях циклических напряжений в сравнении с усталостной долговечностью подобных образцов в исходном состоянии.

Библиографические ссылки

1. Кузнецов А. А., Алифанов О. М., Ветров О. М. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и сортамента. М. : Машиностроение, 1970.

2. Акопян К. Э., Бутушин С. В., Семин А. В. Анализ данных о коррозионном состоянии самолетов типа ТУ-154, базирующихся в различных региональных управлениях гражданской авиации // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2007. № 119. С. 41–49.

3. Туманов А. Т., Квасов Ф. И., Фридляндер И. Н. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов : пер. с англ. М. : Металлургия, 1972.

4. Бутушин С. В. Анализ живучести материала конструкции планера воздушных судов, имеющих длительную эксплуатационную наработку // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2008. № 130. С. 7–13.

5. Остаточные напряжения в деталях из высокопрочного алюминиевого сплава В95 после различных методов обработки / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов, В. И Змиевский, А. В. Можаев // Проблемы прочности. 1980. № 8. С. 60–62.

A. V. Katsura

ANALYSIS OF EFFECTS OF REGIMES OF FORM COMPOSITION ON STRENGTH AND CORROSIVE PROPERTIES OF ELEMENTS OF ALUMINUM ALLOY BASED STRUCTURES

All widely known methods of form composition of structural alloys in the cold state via poly-percussive drifting lead to occurrence of intolerable buckling and mounting tensions, which drastically affect the life duration of aircraft structures.

Keywords: deformation, form composition, durability, life duration, corrosion.

© Кацура А. В., 2011

УДК 621.924

В. А. Левко, А. А. Левко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ*

Проведены исследования потока рабочей среды отверстий с малой площадью поперечного сечения. Разработан новый состав рабочей среды, наполненной алмазными пастами. Экспериментальная обработка зубчатого венца показала применимость рабочей среды нового состава для обработки малых отверстий.

Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, кольцевая щель, рабочая среда, площадь поперечного сечения, выравнивающее устройство.

Одной из проблем в машиностроении является финишная обработка отверстий и каналов малых размеров. В машиностроении существует определенный класс деталей, характеризующийся наличием отверстий, каналов или фасонных поверхностей с поперечными сечениями, имеющими малую площадь. К деталям с такими отверстиями можно отнести каналы в тангенциальных форсунках ЖРД, отверстия в охлаждаемых лопатках газотурбинных двигателей, отверстия в инжекторах дизельного топлива. К фасонным поверхностям можно отнести поверхности шлицев, зубчатых венцов малогабаритных шестерен. Например, при абразивно-экструзионной обработке (АЭО) таких отверстий рабочая среда традиционного состава по ряду причин не может совершать процесс сдвигового течения.

Для обработки таких деталей применяется технология микроАЭО, с применением РС с пониженной вязкостью. Однако ее применение ведет к снижению производительности обработки, так как среды для микроАЭО очень слабо проявляют упругие свойства.

Целью данных исследований являлось определение такого состава среды, который позволил бы проводить финишную обработку малых отверстий традиционной двунаправленной АЭО. Такое решение существенно расширило бы технологические возможности данного способа. Обработка таких отверстий на установках для двунаправленной АЭО позволит увеличить коэффициент загрузки оборудования и повысит производительность.

Известно, что рабочая среда при АЭО представляет собой вязкоупругую полимерную основу, наполненную абразивными зернами различной дисперсности. При сдвиговом течении в обрабатываемом канале в потоке рабочей среды возникают как касательные, так и нормальные напряжения [1]. Дисперсность зерен и степень наполнения основы абразивными зернами определяют эффективную вязкость и жесткость рабочей среды [1; 2]. Количество абразивных зерен и их величина определяют характеристики вязкоупругих цепочек, образующихся при сдвиговом течении рабочей среды в обрабатываемом канале. Размер звена определяет условия деформации как отдельной вязкоупругой цепочки, так и рабочей среды в целом [3]. Вид и характер деформации рабочей среды оказывает влияние на условия контакта микровыступов единичного абразивного зерна с микровыступами обрабатываемой поверхности и учитывается в модели контактных взаимодействий при АЭО [4].

Визуальные исследования течения рабочей среды в конусных каналах позволили уточнить качественную картину потока. Установлено, что при неправильном выборе состава рабочей среды в обрабатываемом канале малого сечения происходит образование комплекса зерен, препятствующего течению сдвига. Поршень рабочего цилиндра не смог обеспечить необходимую величину напряжения сдвига и произошло заклинивание абразивного инструмента. Для АЭО таких каналов необходимо использовать РС специальных составов с пониженной вязкостью [5].

Исследования проведены в два этапа. На первом этапе определялась технологическая возможность применения для финишной обработки малых отверстий двунаправленной АЭО средой на основе каучука СКТ. На втором этапе проведена обработка зубчатого венца шестерни рабочей средой, состав которой выбран по установленным на первом этапе зависимостям.

Основной целью первого этапа было установление эмпирических зависимостей АЭО каналов с малыми отверстиями от состава среды и технологических параметров обработки. Для исследований был разработан образец 1 (рис. 1), изготовленный из сплава АМг 6. Канал 2 получен фрезерованием концевой фрезой. Реперная точка 3 предназначена для контроля изменения глубины канала.

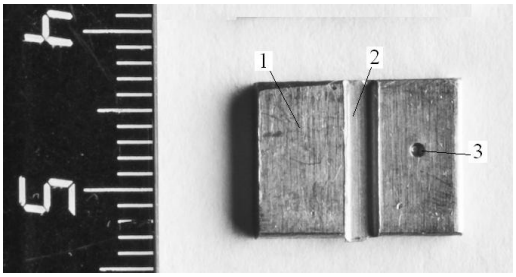


Рис. 1. Образец с малым отверстием

*Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные, научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (грант № П 11 21).

Основой приспособления имитатора малого отверстия (рис. 2) является цилиндрический корпус 1 с внутренними выточками и осевым отверстием. Вкладыш 2, устанавливаемый в выточку, имеет паз для размещения образца 3. Ответный вкладыш, вводимый в эту же выточку, образует с образцом отверстие малого сечения. Ответный вкладыш на рисунке не показан. С двух сторон корпуса устанавливаются переходники 4, реализующие перестройку профиля потока от цилиндрического диаметром 25 мм (рабочий цилиндр установки) к цилиндрическому диаметром 10 мм (осевое отверстие корпуса).

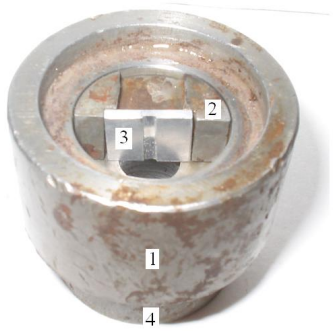


Рис. 2. Приспособление имитатор малого отверстия

Геометрические характеристики обрабатываемого канала: длина $L_к$ = 10 мм, размеры сечения 2 × 0,625 мм, площадь поперечного сечения $S_{сеч}$ = 1,25 мм^2, периметр поперечного сечения $SP_{сеч}$ = 4,25 мм, площадь минимального поперечного сечения канала $S_{min} = S_{сеч}$, суммарная площадь обрабатываемой поверхности $S_{обр} = L_к \; SP_{сеч}$ = 42,5 мм^2. Форма, размер и угол входного $Z_{вх}$ и выходного $Z_{вых}$ отверстия канала идентичны: $Z_{вх} = Z_{вых}$. Исходная шероховатость исследуемой поверхности отверстия $Ra_{исх}$ = 0,4…0,51 мкм.

Исходя из величины $L_к$, принят предварительный диапазон величин сдвигающих давлений среды на входе $P_{вх}$ = 10…12 МПа, а на выходе $P_{вых}$ = 0…2 МПа. Отношение $L_к / S_{сеч}$ = 8,0 и $S_{обр} / S_{сеч}$ = 10 влияет на выбор коэффициента эффективной вязкости η среды и дисперсности наполнителя.

Первоначально за основу был выбран традиционный состав рабочей среды. В качестве наполнителя – электрокорунд белый, зернистостью Ba = 80 мкм. Введение ряда пластификаторов позволило на 25…30 % снизить вязкость РС. При этом показатель степени наполнения (весовой) Ka уменьшился с 50 до 40 %. При АЭО средой такого состава привело к заклиниванию среды в обрабатываемом канале при сдвигающем давлении $P_{вх}$ = 10 МПа и $P_{вых}$ = 12 МПа.

Для решения этой проблемы авторами в качестве наполнителя предложено использовать алмазные пасты АСМ по ГОСТ 25593–84, предназначенные для доводки и полирования. Исходя из условий обработки, было выбрано три пасты: АСН 60/40 НОМ Г, АСН 60/40 ПОМ Г и АСН 60/40 ВОМ Г.

Разработана технология смешивания каучука СКТ с алмазными пастами, обеспечивающая однородный состав среды и равномерное распределение алмазных зерен в ее объеме.

Состав среды (весовой): каучук СКТ – 40 %, алмазная паста – 60 %, дисперсность наполнителя Ba = 40…60 мкм. Поскольку в составе паст содержатся поверхностно-активные вещества, дополнительные пластификаторы в РС не вводились. Степень наполнения РС алмазными зернами составила для среды на основе пасты АСН 60/40 НОМ Г – Ka = 6 %, на основе пасты АСН 60/40 ПОМ Г – Ka = 14 %, на основе пасты АСН 60/40 ВОМ Г – Ka = 28 %.

Второй проблемой, наблюдаемой при АЭО малых отверстий, была существенная перестройка профиля потока на входе в прямоугольное малое отверстие. Ее характер подобен картине, наблюдаемой при визуальном исследовании течения среды через прямоугольное отверстие в перегородке [5].

Зона формирующегося сдвигового течения в рабочем цилиндре и переходнике имеет размеры малого отверстия. Размеры зоны сжатия среды на порядок больше. Эта зона оказывает дополнительное сопротивление перемещению поршня в рабочем цилиндре. В данном случае коэффициент $\xi_{кв}$, характеризующий потери давления потока при экструзии всего объема РС, имеет безразмерную величину в интервале 19…25. Этот эффект увеличивает время полуцикла экструзии на 20…30 %.

Нами предложено решение, направленное на минимизацию влияния перестройки профиля потока на входе в отверстие на производительность АЭО. Было предположено, что мгновенное изменение направления течения среды в отверстии на противоположное позволит улучшить условия обработки.

При мгновенном изменении направления потока, которое не превышает время релаксации среды, характер деформации потока сохранится. Зоны деформации сохранят свой профиль. Деформация растяжения мгновенно сменяется деформацией течения сдвига. При этом нормальные напряжения в среде возникают не только на входе в канал, но и в самом отверстии. За счет этого уменьшается время экструзии среды на один полуцикл и увеличивается величина прижатия зерен к обрабатываемой поверхности.

Исследуемые параметры: Ra – шероховатость обработанной поверхности; ΔRa – изменение шероховатости; Δh – величина удаляемого слоя. Регулируемые параметры: степень наполнения рабочей среды Ka – 6, 14, 28 %; время полуцикла экструзии Δt – 0,6; 1,2; 1,8 с. Сдвигающее давление – $P_{вх}$ = 12 МПа. Время обработки – 60 с.

Эксперименты проведены по плану Коно (m = 2). Для математической обработки произведено кодирование переменных x_1 = Ka, $x_2 = \Delta t$, y_1 = Ra, $y_2 = \Delta$Ra, $y_3 = \Delta h$.

Получены следующие эмпирические зависимости:

$$\mathrm{Ra} = 0{,}341 - 0{,}001\mathrm{Ka} + 0{,}075\,8\Delta t + 0{,}000\,03\mathrm{Ka}^2 - $$
$$- 0{,}028\Delta t^2 - 0{,}002\,5\mathrm{Ka}\Delta t;$$

$$\Delta\mathrm{Ra} = 0{,}052 + 0{,}006\mathrm{Ka} - 0{,}043\,7\Delta t - 0{,}000\,127\mathrm{Ka}^2 +$$
$$+ 0{,}026\,85\Delta t^2 + 0{,}001\,36\mathrm{Ka}\Delta t;$$

$$\Delta h = 5{,}448 + 0{,}275\mathrm{Ka} - 8{,}096\Delta t - 0{,}000\,83\mathrm{Ka}^2 +$$
$$+ 3{,}61\Delta t^2 + 0{,}303\mathrm{Ka}\Delta t.$$

Повышение степени наполнения среды для всех вариантов АЭО привело к увеличению производительности обработки и позволило достичь за 60 с шероховатости поверхности малого отверстия $\mathrm{Ra} = 0{,}25$ мкм.

Анализ полученных зависимостей показал, что при увеличении параметров Ka и Δt шероховатость обработанного отверстия Ra монотонно убывает на всем исследуемом интервале, а величина удаленного слоя Δh в отверстии монотонно возрастает. Подобная зависимость наблюдается и вне исследуемого интервала. Исследуемая функция неограниченно возрастает или убывает, что делает спорной применимость зависимостей вне исследуемого диапазона.

Установлено, что при существующей конструкции установки невозможно обеспечить мгновенное изменение направления потока, которое не превышает время релаксации рабочей среды. Поэтому при экспериментальной обработке малых отверстий характер деформации потока при переключении системы не сохранялся. Наблюдалась полная перестройка профиля потока при каждом полуцикле АЭО.

Результаты исследований показали, что увеличение весового содержания алмазных зерен в рабочей среде до 25…28 % позволяет обеспечить оптимальное сочетание вязких и упругих свойств среды, при которых сохраняется возможность течения сдвига среды в отверстии с малым поперечным сечением и ее максимальное по величине напряженно-деформированное состояние.

Известно, что стальные шестеренки обладают на порядок большей ударной прочностью зубьев, чем латунные или алюминиевые, т. е. их живучесть при авариях намного выше. У таких шестеренок величина наклепа, вызванного высоким уровнем вибраций, существенно ниже. Эти обстоятельства делают необходимым применение стальных шестеренок в ответственных деталях.

Одной из проблем операций формообразования зубчатого венца 1 шестеренки (рис. 3) является финишная обработка зуба и удаления заусенцев 2. К малым отверстиям можно отнести впадины зубчатого венца.

Визуальные исследования течения в образце с зубчатым венцом позволили выявить особенности течения среды при АЭО подобных каналов (рис. 4). В первоначальный момент времени наблюдаются две зоны 2, в которых происходит деформация сжатия, а также большая зона 1 с деформацией растяжения. После достижения критического значения напряжения деформация растяжения переходит в деформацию сдвигового течения и наблюдается зона 3.

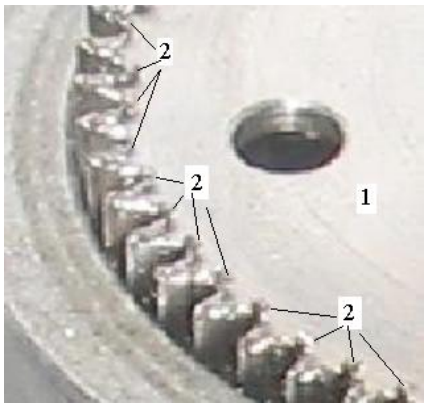


Рис. 3. Шестеренка после операции нарезания зубьев

В целом в канале наблюдается градиент скорости потока среды. Расходные характеристики в каждом из двенадцати зубчатых каналов практически одинаковы. На выходе из канала наблюдается зона 5 волнового истечения среды с одновременным упругим восстановлением.

Установлен равномерный расход рабочей среды по всем каналам, а также пульсация потока при прохождении канала. Коэффициент местных потерь $\xi_{\text{кв}} \approx P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}} = 5{,}2$.

Сопоставление результатов данных исследований с данными, полученными при исследовании АЭО малых отверстий рабочей средой, наполненной алмазной пастой, позволило сделать вывод о возможности АЭО зубчатого венца шестеренки. Для этого было разработано специальное приспособление (рис. 5).

Шестеренка 1 при обработке базируется на внутренний уступ корпуса 2 и внутреннее тело 5 основания 3. Переходники 4 обеспечивают установку приспособления в рабочие цилиндры установки УЭШ-25 и перестройку профиля потока среды. Восемь отверстий внутреннего тела 5 обеспечивают требуемое направление потока к зубчатому венцу и равномерное распределение потока по всему обрабатываемому диаметру.

По данной схеме обработано несколько шестерен. Параметры шероховатости поверхности и изменения геометрических размеров зубчатого венца, а также степень удаления заусенцев оценивалось после 300 с обработки.

Состав среды (весовой): каучук СКТ – 40 %, алмазная паста – 60 %, дисперсность наполнителя $\mathrm{Ba} = 40…60$ мкм. Использована паста АСН 60/40 ВОМ Г – $\mathrm{Ka} = 28$ %. Сдвигающее давление $P_{\text{вх}} = 12$ МПа. Шероховатость ПС контролировалась на профилометре М253, изменение линейных размеров – на координатно-измерительной машине «Оптон 8».

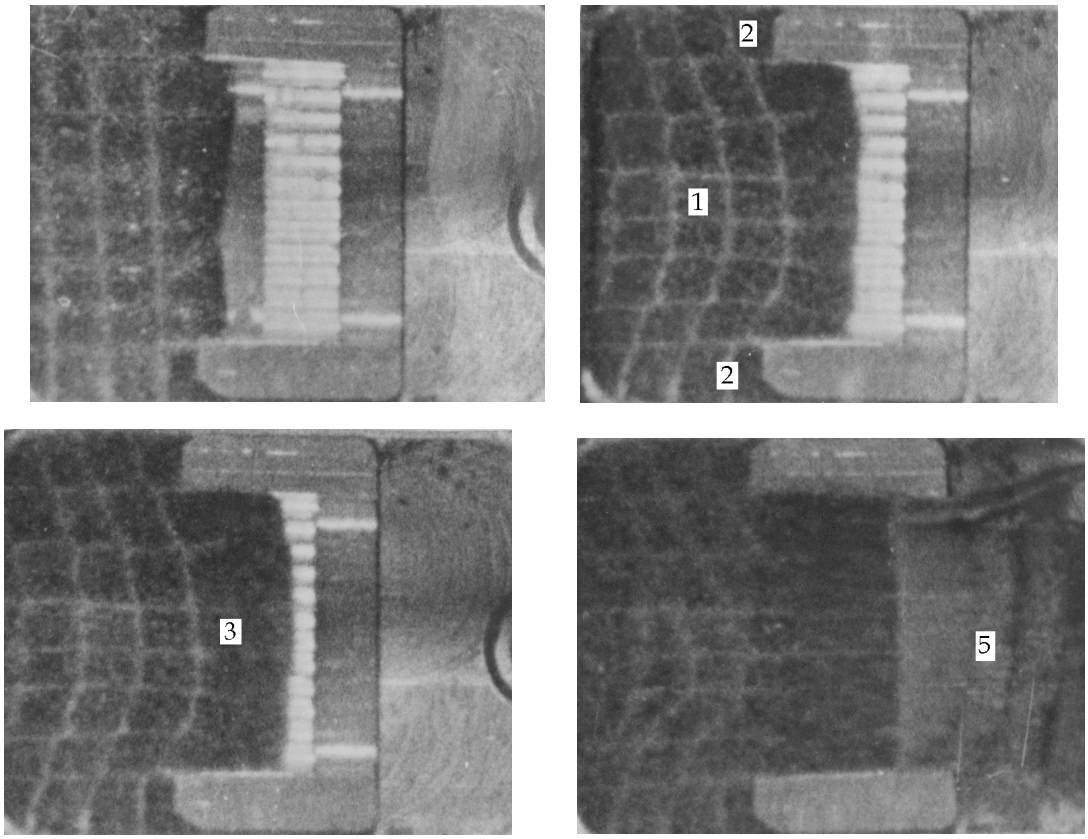


Рис. 4. Процесс через зубчатый фрагмент малых отверстий

Рис. 5. Приспособление для АЭО зубчатого венца шестеренки

Исходная шероховатость ПС Ra = 0,62…0,69 мкм, шероховатость ПС после АЭО – Ra = 0,52…0,55 мкм по всей поверхности канала. Величина снимаемого припуска составила 0,05…0,08 мм. Заусенцы при данной схеме АЭО удалить не удалось. Рекомендовано перед операцией АЭО удалять заусенцы торцевым шлифованием.

В результате исследований процесса АЭО малых отверстий была подана заявка на патент Российской Федерации «Рабочая среда для абразивно-экструзионной обработки малых отверстий».

Рабочая среда для абразивно-экструзионной обработки малых отверстий относится к отделочной обработке рабочей средой, подаваемой под давлением, и может быть использована для улучшения качества поверхности сквозных каналов с малой площадью поперечного сечения в деталях машин. В среде в качестве абразивного наполнителя и пластификатора ис-

пользуют мазеобразные алмазные пасты типа Е или Г. Весовое содержание в среде алмазных зерен 24…28 % и использование в качестве основы синтетического каучука СКТ обеспечивает такое сочетание вязких и упругих свойств среды, при котором сохраняется возможность ее сдвигового течения в отверстии с малым поперечным сечением и максимальное по величине напряженно-деформированное состояние, позволяющее добиваться максимальной производительности.

Библиографические ссылки

1. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 7. С. 96–100.

2. Левко В. А., Пшенко Е. Б. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 11. С. 64–68.

3. Левко В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чебоксар. гос. пед. ун-та. Механика предельного состояния : сб. науч. тр. / под ред. акад. Д. И. Ивлева ; Чувашск. гос. педаг. ун-т. Чебоксары, 2008. № 2. С. 85–94.

4. Левко В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий // Авиационная техника. Известия вузов / под ред. проф. В. А. Фирсова ; Казан. гос. техн. ун-т. 2009. № 1. С. 59–62.

5. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко [и др.] // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 138–145.

V. A. Levko, A. A. Levko

RESEARCH OF ABRASIVE EXTRUSION-TYPE PROCESSING OF SMALL HOLES

The research of flow of operating environment of holes with small cross-sectional area were performed. A new composition of the working media, filled with diamond paste, was developed. The experimental processing of a gear wreath revealed the applicability of the new operating environment for the processing of holes with small cross-sectional area.

Keywords: abrasive extrusion-type processing, annular gap, medium, cross-sectional area, leveling device.

© Левко В. А., Левко А. А., 2011

УДК 621.924

В. А. Левко, М. А. Лубнин, С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, Л. П. Сысоева

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ, КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ*

Разработана методика, позволяющая существенно сократить затраты на проведение исследований. Описаны все этапы оценки точности, качества и эффективности обработки.

Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, кольцевая щель, рабочая среда, площадь поперечного сечения, выравнивающее устройство.

Лабораторией отделочных методов СибГАУ совместно со специалистами ОАО «Красмаш» проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований процесса абразивно-экструзионной обработки (АЭО), направленных на разработку теоретических основ расчета точности, качества и эффективности АЭО при изготовлении конкретных деталей. Результатом этой работы является расчетная методика, позволяющая оптимизировать затраты на технологическую подготовку производства при использовании метода АЭО. Методика включает в себя шесть этапов.

На первом этапе осуществляется выбор гидродинамической модели для предварительного расчета расходно-напорных характеристик потока рабочей среды в зависимости от геометрических характеристик и площади обрабатываемой поверхности деталей с последующей коррекцией расчета с учетом влияния возникающих в потоке касательных и нормальных напряжений.

*Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные, научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». (грант № П 11 21).

На втором этапе реализуется выбор требуемого состава рабочей среды как абразивного инструмента по предложенным зависимостям вязкоупругих свойств с учетом величины сдвигающих напряжений в рабочем цилиндре установки.

На третьем этапе проводятся расчеты фактической площади контакта, величины и направления сил, возникающих при контакте, а также размерности сближения (величину съема материала) при единичном контакте в зависимости от величины и вида абразивного зерна, степени наполнения рабочей среды, характеристик потока, состояния поверхностного слоя обрабатываемой детали и ее физико-механических свойств в базовом канале.

На четвертом этапе ведется расчет шероховатости обработанной поверхности и производительности обработки выбранной среды в базовом канале на основе контактной модели.

На пятом этапе производится перерасчет шероховатости поверхности и производительности обработки в исследуемом канале с учетом расходно-напорных характеристик потока.

На шестом этапе осуществляется верификация расчетов при помощи моделирования процесса АЭО, а также экспериментальная отработка технологии на образцах с использованием опытно-промышленного оборудования.

Разработка начинается с анализа конструктивных особенностей обрабатываемой детали. Последовательность анализа следующая: выбирается тип обрабатываемой поверхности – внутренняя или наружная; при обработке наружных поверхностей деталь должна помещаться в приспособление, внутренняя поверхность которого образовывала с ней канал, по которому будет продавливаться среда.

Определяется общее количество проточных каналов в обрабатываемой детали: один или более. Во втором случае, в конструкции приспособления предусматриваются полости для переформирования профиля потока рабочей среды. Как правило, для лопастных деталей характерно, что все каналы идентичны друг другу. Это позволяет проводить полный геометрический анализ на одном канале.

Для этого устанавливаются геометрические характеристики обрабатываемого канала: длина $L_к$, площадь и периметр поперечного сечения $S_{сеч}$, площадь минимального поперечного сечения канала S_{min}, суммарная площадь обрабатываемой поверхности $S_{обр}$, форма, размер и угол входного $Z_{вх}$ и выходного $Z_{вых}$ отверстия канала. Поперечное сечение канала может быть постоянной и переменной формы $S_{сеч} \neq \text{const}$.

Длина обрабатываемого канала $L_к$ определяет диапазон величин сдвигающих давлений среды на входе $P_{вх}$ и выходе $P_{вых}$ из канала. Отношение $L_к / S_{сеч}$ и $S_{обр} / S_{сеч}$ влияет на выбор коэффициента эффективной вязкости η среды. При больших значениях данных показателей применяются среды с пониженной вязкостью и наоборот. Если не учитывать данного обстоятельства, то возможно заклинивание среды большой вязкости в канале большой длины или значительное увеличение машинного времени при использовании сред низкой вязкости для АЭО каналов с малым значением коэффициентов $L_к / S_{сеч}$ и $S_{обр} / S_{сеч}$.

Далее, с учетом материала детали, производится оценка исходного состояния поверхностного слоя обрабатываемого канала: параметры шероховатости Ra или Rz, R_{max}, Sm; параметры волнистости Wa или Wz, W_{max}; параметры наклепа степень $u_н$, глубина $h_н$ и градиент $u_{гр}$

$$u_н = \frac{H\mu_{max} - H\mu_{исх}}{H\mu_{исх}} 100, \quad u_{гр} = \frac{H\mu_{max} - H\mu_{исх}}{h_н},$$

где $H\mu_{max}$ – максимальная поверхностная микротвердость; $H\mu_{исх}$ – исходная микротвердость материала.

Результаты анализа исходного состояния сравниваются с требованиями к поверхностному слою, указанными в конструкторской документации. Устанавливается приближенная величина минимального припуска на обработку.

Из созданного нами перечня выбирается состав рабочей среды: материал абразивного зерна и степень дисперсности Ba, а также процентное содержание Ka наполнителя в среде по массе. Перечень построен на соответствии вязкоупругих свойств среды с обрабатываемостью материала и величиной дефектного слоя.

Если в перечне необходимая информация отсутствует, определение вязкоупругих свойств рабочей среды проводится по методикам [1]. При установлении коэффициента эффективной вязкости геометрические характеристики приспособления устанавливают из подобия площади поперечного сечения и всей площади внутренней поверхности обрабатываемого канала.

Характер течения рабочей среды в каналах обрабатываемой детали в качестве абразивного инструмента зависит от их конфигурации, геометрических размеров и формы поперечного сечения.

При выборе гидродинамической модели проводится анализ зон течения рабочей среды в обрабатываемых каналах. При АЭО внутреннего канала, имеющего подобную конфигурацию входного и выходного отверстий, анализ проводят следующим образом.

Для двунаправленной схемы АЭО деталей, имеющих подобную конфигурацию входного и выходного отверстий, можно выделить три основные зоны течения (рис. 1). Зона рабочих цилиндров 1 представляет собой круглый канал постоянного сечения, в котором поршень, выступая в роли передвижной стенки, выдавливает РС через зону 2 переходников сквозь обрабатываемую деталь 3. Переходники 2 позволяют сформировать на входе в канал обрабатываемой детали 3 необходимый профиль потока РС. Перестройка

профиля происходит от кругового сечения рабочего цилиндра до профиля входного отверстия канала детали 3.

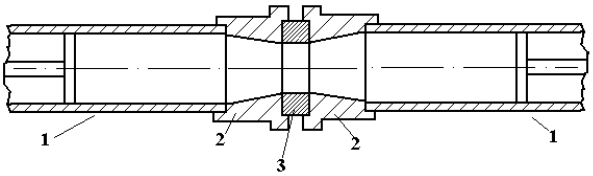


Рис. 1. Зоны течения при двунаправленной АЭО

Поэтому внутренний канал переходников имеет переменную форму поперечного сечения. Форма сечения такого канала плавно меняется от окружности на входном отверстии до формы входного отверстия канала детали 3. Если форма этого отверстия имеет сложный профиль, то обычно профиль сопрягаемого выходного отверстия переходника 2 упрощается до окружности, в которую вписывается профильное входное отверстие детали 3. Зону 2 можно отнести к течению в диффузоре, кольцевом зазоре или плоской щели. Если обрабатывается деталь, у которой количество входных и выходных отверстий совпадает, но они имеют разную конфигурацию, то переходники 2 будут иметь различную форму. Для этого случая выделяется четыре зоны течения.

Для однонаправленной схемы АЭО (рис. 2) выделено четыре основные зоны течения. Зона рабочего цилиндра 1 представляет собой круглый канал постоянного сечения, в котором поршень, выступая в роли передвижной стенки, выдавливает РС через зону 2 переходников сквозь обрабатываемую деталь 3, которая крепится планкой 4.

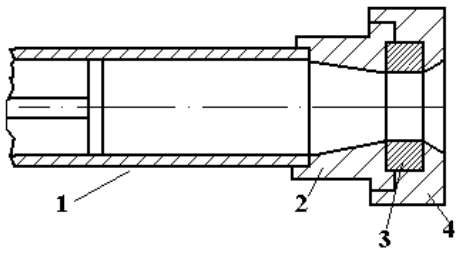


Рис. 2. Зоны течения при однонаправленной АЭО

Характер течения в зонах 1, 2, и 3 аналогичен характеру течения при двунаправленной АЭО. Зону течения 4 относят к диффузору. Эта зона течения носит вспомогательный характер. Ее основная задача – препятствовать образованию фаски на кромке выходного отверстия обрабатываемой детали.

Анализ классификации течений различных сред позволил выявить следующее. Процесс АЭО относится к классу внутренних течений в канале. Экспериментальные исследования показали [2], что плотность РС остается постоянной при широком интервале напряжений сдвига и температуры потока, т. е. это несжимаемая среда. Коэффициент динамической вязкости η среды при АЭО характеризует эффективную вязкость, учитывающую вязкоупругие потери и потери потока на трение с обрабатываемым поверхностным слоем. Коэффициент η может изменяться в широком диапазоне, в зависимости от величины сдвигающего напряжения γ', температуры T и молекулярно-массового состава среды. Информационно-технический обзор составов РС [3], а также результаты исследований [1] зависимости коэффициента эффективной вязкости РС от ее состава и величины γ' позволили установить, что для АЭО диапазон лежит в пределах от 1 000 Па·с до 500 000 Па·с.

Для потока среды при АЭО характерны малые числа Рейнольдса $\mathrm{Re} << 1$. Так как для неньютоновских сред динамическая вязкость η является коэффициентом пропорциональности сдвигового напряжения γ' и градиента скорости du/dy, то η определяется по зависимости $\tau = \tau_0 + \eta_0\gamma' = \tau_0 + \eta_0 du/dy$, а не по выражению $\tau = \eta du/dy$.

В связи с этим остается открытым вопрос о влиянии вязкоупругих свойств полимерной среды на характер течения в следующих зонах: в центральной зоне, в которой рабочая среда движется как несжимаемая невязкая жидкость, т. е. в «ядре потока»; течение возле обрабатываемой поверхности, которое можно отнести к несжимаемым вязким течениям в пограничном слое; течение в переходной области, описываемое моделью вязкого несжимаемого течения.

В переходной области возникают вязкие эффекты, но их величина значительно меньше, чем величина аналогичных эффектов в пограничном слое. Размер каждой зоны зависит от состава рабочей среды, конфигурации канала и величины напряжения сдвига. Далее рассмотрена применимость различных моделей потока среды для описания течения в указанных зонах.

При обработке лопастных деталей зоны течения возникают в нескольких каналах, образованных между обрабатываемой поверхностью и внутренней поверхностью приспособления (рис. 3). Зоны рабочих цилиндров имеют аналогичный характер течения, такой же как и в первом случае. Вторая зона возникает между нижней направляющей 4 и основой приспособления 5. В этой зоне происходит перестройка профиля от круглого течения к кольцевому течению или к сочетанию течений в диффузоре и кольцевом зазоре. В третьей зоне, образованной внешней поверхностью детали 3 и внутренней поверхностью крышки 2, происходит непосредственная обработка. Характер течения зависит от конфигурации обрабатываемых каналов.

После разделения на зоны течения осуществляется выбор моделей течения среды в проточных каналах. При выборе модели расчета среды проводят анализ геометрических характеристик и площади обрабатываемой поверхности деталей. Основные шаги последовательности выбора модели приведены в таблице.

Течение в зоне 1, помимо состава РС, определяется внутренним диаметром цилиндра, длиной хода штока и величиной сдвигающего давления на штоке.

Влияние состояния поверхностного слоя рабочего цилиндра на характер потока среды минимально, так как он имеет высокую твердость и шероховатость Ra << 0,16 мкм.

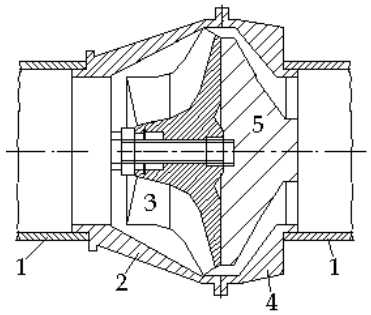


Рис. 3. Зоны течения в нескольких каналах, образованных внешней поверхностью детали и внутренней поверхностью приспособления

Течение в зоне 2 сопровождается перестройкой профиля потока от круглого в зоне 1 к требуемому в зоне 3 профилю потока. Для АЭО одноканальных деталей характер течения сводится к течению в диффузоре. При АЭО многоканальных деталей характер течения сводится к течению в кольцевом зазоре или к сочетанию течений в диффузоре и кольцевом зазоре. При проектировании геометрии канала переходника исходят из этих требований, учитывая условие минимизации площади его внутренней поверхности.

Течение в зоне 3 должно обеспечить условия для равномерной обработки всей поверхности канала до требуемой шероховатости с заданной производительностью. При этом точность обработки должна находится в пределах заданного допуска на обработку.

Для приближенного расчета напорно-расходных характеристик для различных моделей течения в зоне 3 применяются уравнения, соответствующие типу канала. Это могут быть укороченные уравнения Навье-Стокса, точные решения гидродинамических уравнений течения в круглом прямом канале, прямоугольной и кольцевой щели.

Если зона 3 содержит несколько обрабатываемых каналов с подобными геометрическими характеристиками, то расчет ведется для одного исследуемого канала, а при анализе течения во всех зонах, скорости потока и давление среды в данных каналах принимают аналогичными скоростям и давлениям потока в исследуемом канале. Общий расход среды в зоне 3 находится как сумма расходов во всех ее каналах.

Если зона 3 содержит один канал с переменной формой сечения, то для расчета параметров потока, такой канал рассматривают как совокупность нескольких областей течения основного типа с установлением общих граничных условий на границе раздела областей течения.

В результате расчетов по модели течения получается распределение скорости и давления потока в обрабатываемом канале, а также распределение касательных напряжений рабочей среды на стенке канала. Данное решение является приближенным и дополняется расчетом распределения нормальных напряжений на стенке канала с учетом влияния абразивного наполнителя на параметры потока. Результаты расчетов являются исходными данными для моделей контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью.

Последовательность выбора моделей течения РС в проточных каналах

№ п/п	Шаг	Примечание
1	Выбор вида АЭО	Характеристика обрабатываемых каналов: непроточные каналы – орбитальная АЭО; проточные каналы с одинаковым количеством входных и выходных отверстий – двунаправленная АЭО; проточные каналы с различным количеством входных и выходных отверстий – однонаправленная АЭО
2	Разделение на зоны течения	Однонаправленная АЭО – 4 зоны. Двунаправленная АЭО – 3 или 4 зоны в зависимости от конфигурации входных и выходных отверстий
3	Зона 1. Рабочий цилиндр установки	Модель течения в круглом прямом канале. Зона начального осесимметричного и установившегося течения. Начальные условия задаются на штоке
4	Зона 2. Переходники для закрепления одноканальных деталей	Модель течения в диффузоре. Зона перестройки профиля потока от круглого к профилю обрабатываемого канала. Начальные условия находятся из решения течения в зоне 1. Решение течения в зоне 2 задает начальные условия зоны 3
5	Зона 2. Переходники для закрепления многоканальных деталей	Модель течения в диффузоре и/или кольцевом канале. Начальные условия находятся из решения течения в зоне 1. При задании начальных условий для зоны 3 необходимо дать оценку равномерности расхода РС во всех обрабатываемых каналах и рассмотреть перестройку профиля потока на входном отверстии каждого канала
6	Зона 3. Каналы детали	Модели течения для различных каналов
7	Зона 2. Влияние переходников на процесс истекания потока из каналов детали	Для деталей с проточными каналами с одинаковым количеством входных и выходных отверстий модели течения являются обратносимметричными во входных зонах 2. Для однонаправленной АЭО зона 4 – модель свободного истечения и оценка эффекта упругого восстановления струи
8	Зона 1. Рабочий цилиндр установки для АЭО	Модель течения в круглом прямом канале. Расчет является проверочным. Для АЭО с системой противодавления решается обратная задача оценки влияния выходного давления на параметры потока в зонах 2 и 3

Механизм возникновения упругих деформаций в потоке РС при АЭО рассмотрен в [3].

На втором этапе осуществляется окончательный выбор требуемого состава рабочей среды как абразивного инструмента. Для этого установлены эмпирические зависимости таких упругих характеристик среды, как коэффициент Пуассона и модуль Юнга от параметров Ва и Ка [1]. Величину коэффициента эффективной вязкости η выбирают по разработанным рекомендациям в зависимости от геометрических характеристик обрабатываемого канала.

Разработка технологии АЭО на третьем и четвертом этапах ведется на базовом канале простой формы – круглое поперечное сечение постоянной формы. Для создания методики расчета фактической площади контакта, величины и направления сил, возникающих при контакте, а также размерности сближения (величины съема материала) при единичном контакте проведен анализ контактных процессов при АЭО [4].

Контакт рабочей среды (как абразивного инструмента) с деталью при АЭО имеет ряд особенностей. Вращение рабочей среды как абразивного инструмента в обрабатываемом канале отсутствует. В контакте находятся разные по физико-механическим свойствам тела, причем среда представляет собой композицию из самых твердых алмазных или абразивных зерен с вязкоупругой полимерной средой [5]. Контакт происходит при сдвиговом течении среды в достаточно узком диапазоне скоростей (0,001…0,1 м/с), а напряженно-деформированное состояние вязкоупругой основы определяет степень подвижности зерен в контакте. В контакте возникают температуры 30…250 °С, а градиент температур в среде и детали различный.

Экспериментально наблюдалось пристеночное вращение абразивного зерна совместно с некоторым объемом рабочей среды [6]. При этом частота вращения зависит от скорости сдвигового течения и размеров вращающегося объема среды и обеспечивает периодическую смену микронеровностей абразивного зерна, находящихся в контакте, что обусловливает эффект постоянного самозатачивания.

При расчете необходимо учитывать влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки [7].

Для расчета АЭО тонких осесимметричных каналов большой длины рекомендуется использовать модель течения рабочей среды, построенную на преобразованной модели Каргина–Слонимского–Рауза [8].

Расчеты на основе контактной модели на четвертом этапе показали, что суммарная производительность АЭО позволяет эффективно производить обработку любых материалов, начиная от сплавов цветных металлов и заканчивая труднообрабатываемыми поверхностями (сразу после литья или термообработки) [4].

Так, для обработки круглого канала с постоянным сечением радиусом R = 0,0125 м в детали, выполненной из стали 12Х18Н10Т (твердость НВ = 450, модуль упругости E = 220 000 МПа, μ = 0,3) и имеющей максимальную шероховатость $R_{\text{max д}}$ = 4,72 мкм, радиус микронеровностей $\rho_{\text{д}}$ = 55 мкм, коэффициенты для расчета опорной кривой $b_{\text{д}}$ = 2 и $\nu_{\text{д}}$ = 1,6, была выбрана полидисперсная среда с приведенной зернистостью Ва = 320 мкм. Данная среда имеет следующие характеристики: плотность среды ρ = 1 410 кг/м^3, E = 0,116 МПа, μ = 0,4, $R_{\text{max и}}$ = 40,2 мкм, $\rho_{\text{и}}$ = 160 мкм, $b_{\text{и}}$ = 1,7 и $\nu_{\text{и}}$ = 1,1.

При установившемся режиме деформирования и величине сдвигающего давления на входе $P_{\text{вх}}$ = 6 МПа установлены фактические площади контакта микронеровностей. Общая фактическая площадь единичного упругопластического контакта микронеровностей A_r = $7 \cdot 10^{-6}$ мм^2. Сближение между поверхностями обрабатываемой детали и рабочей среды на единичную микронеровность при упругом контакте составило 0,6 мкм, при пластическом контакте – 0,037 мм. Такая величина пластического сближения обусловлена течением основы, вызванным перемещением абразивного зерна в контакте. Объем мгновенно снимаемого слоя материала за один контакт составил $2{,}871 \cdot 10^{-8}$ мм^3. Изменение шероховатости микронеровности за один контакт равно 0,000 124 мкм.

Исходя из общего количества абразивных зерен, вступивших в контакт с рассматриваемой микронеровностью поверхностного слоя, рассчитаны изменение шероховатости, и величина износа по времени. Поскольку модуль упругости E среды на несколько порядков меньше, чем у материала обрабатываемой детали, удаление материала детали на единичном контакте происходит на наноуровне. Следует учитывать, что за один цикл экструзии единичная микронеровность поверхности, в зависимости от объема рабочей установки для АЭО и размеров обрабатываемого канала, вступает в контакт приблизительно от 500 до 10 000 раз.

На пятом этапе поученные результаты контактных взаимодействий накладываются на поле распределения расходно-напорных характеристик потока среды в обрабатываемом канале. Верификация расчетных данных показывает, что расхождение составляет не более 5 %. На основании методики создан информационно-расчетный модуль и разработана технология АЭО детали типа корпус крыльчатки.

На шестом этапе назначаются параметры технологического процесса абразивно-экструзионной обработки конкретных деталей.

Внедрение методики обеспечило сокращение объема и сроков экспериментальных исследований при разработке технологических процессов АЭО новых деталей.

Библиографический список

1. Экспериментальное определение коэффициентов вязкости, упругости и пластичности рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / П. А. Снетков, В. А. Левко, М. А. Лубнин, Е. Б. Пшенко // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 134–138

2. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 7. С. 96–100.

3. Левко В. А. Абразивно-экструзионная обработка: современный уровень и теоретические основы процесса : монография ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007.

4. Левко В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий // Авиационная техника. Известия вузов / под ред. проф. В. А. Фирсова ; Казан. гос. техн. ун-т. 2009. № 1. С. 59–62.

5. Левко В. А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке // Металлообработка. 2008. № 3 (45). С. 19–23.

6. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко, М. А. Лубнин, П. А. Снетков и др. // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 138–145.

7. Левко В. А., Пшенко Е. Б. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 11. С. 64–68.

8. Левко В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чебоксар. гос. педаг. ун-та. Механика предельного состояния : сб. науч. тр. / под ред. акад. Д. И. Ивлева ; Чувашск. гос. педаг. ун-т. Чебоксары, 2008. № 2. С. 85–94.

V. A. Levko, M. A. Lubnin, S. K. Sysoev, A. S. Sysoev, L. P. Sysoeva

METHOD OF ASSESSMENT OF ACCURACY, QUALITY AND EFFICIENCY OF ABRASIVE FLOW PROCESSING OF SPAIR PARTS

The technique, which allows to significantly reduce the costs of research have been completed. All the stages of evaluating the accuracy, quality and efficiency are described.

Keywords: abrasive flow machining, annular gap, medium, cross-sectional area, leveling device.

© Левко В. А., Лубнин М. А., Сысоев С. К., Сысоев А. С., Сысоева Л. П., 2011

УДК 621.316

Е. А. Мизрах, А. С. Сидоров, С. Б. Ткачев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА АДМИТАНС И УСТОЙЧИВОСТЬ ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С КАСКАДНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ*

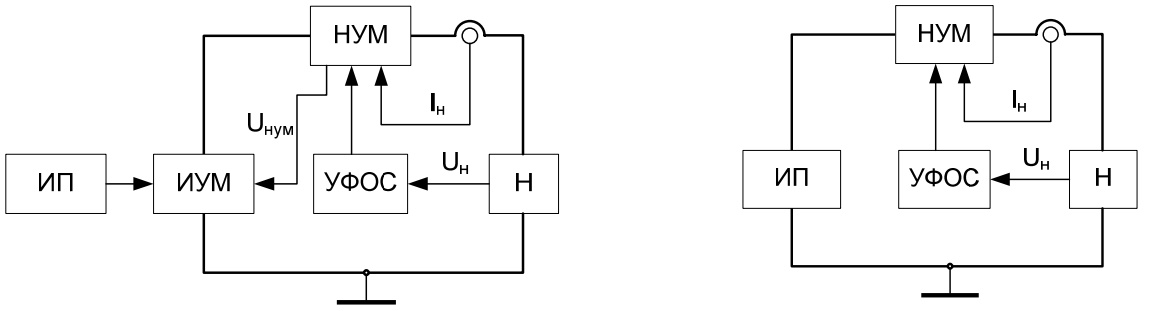
Исследовано влияние динамических свойств импульсных стабилизаторов напряжения на адмитанс и устойчивость имитаторов солнечных батарей с каскадным включением непрерывного и импульсного усилителей мощности. Сформулированы ограничения на параметры сглаживающего LC-фильтра импульсного стабилизатора напряжения.

Ключевые слова: импульсный стабилизатор напряжения, имитатор солнечной батареи, устойчивость, адмитанс.

В настоящее время одной из перспективных топологий имитаторов солнечных батарей (ИСБ) (рис. 1), позволяющей с требуемой точностью воспроизводить ВАХ и импеданс (адмитанс) солнечных батарей мощностью более 1 кВт, является топология ИСБ с каскадным включением непрерывного и импульсного усилителей мощности (рис. 1, *а*), где ограничение мощности рассеивания непрерывного усилителя мощности (НУМ) осуществляется путем стабилизации напряжения на его регулирующих элементах (РЭ) с помощью импульсного усилителя мощности (ИУМ). Данная топология строится на основе другой топологии – ИСБ последовательного типа (рис. 1, *б*).

Вопросы устойчивой работы ИСБ последовательного типа и влияния импеданса источника питания на адмитанс имитатора достаточно хорошо проработаны в [1; 2]. Но, в ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ в отличие от ИСБ последовательного типа появляется еще одна отрицательная связь по напряжению, причем ИУМ стабилизирует только часть своего выходного напряжения, а другая часть определяется нагрузкой. Актуальными являются вопросы влияния динамических свойств импульсного стабилизатора напряжения на устойчивость и адмитанс ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (ГК №П530).



а *б*

Рис. 1. Топологии имитаторов солнечных батарей:
а – ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ; *б* – ИСБ последовательного типа; ИП – источник питания; ИУМ – импульсный усилитель мощности; Н – нагрузка; НУМ – непрерывный усилитель мощности; УФОС – устройство функциональной обратной связи

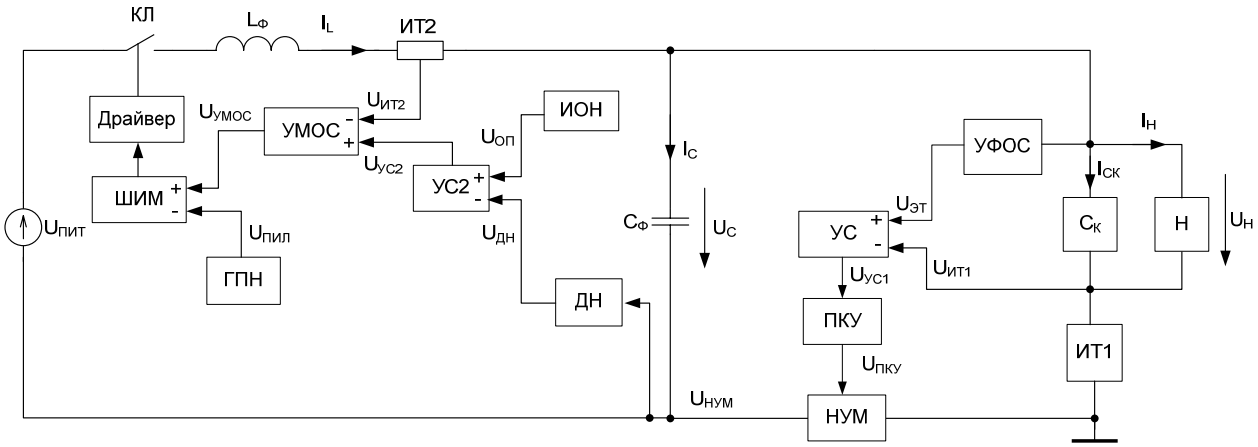


Рис. 2. Структурная схема ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ

Структурная схема ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ представлена на рис. 2. В структуре данного имитатора можно выделить три большие подсистемы:

1. Непрерывный стабилизатор тока (НСТ) нагрузки, образованный усилителем-сумматором (УС), последовательным корректирующим устройством (ПКУ), НУМ, измерителем тока (ИТ) и корректирующим конденсатором (СК).

2. Устройство функциональной обратной связи (УФОС) по напряжению нагрузки, которое задает вольтамперную характеристику (ВАХ) солнечной батареи (СБ) в некотором масштабе и вырабатывает эталонное напряжение UЭТ для стабилизатора тока.

3. Импульсный стабилизатор напряжения (ИСН) на регулирующих элементах НУМ, которой состоит из делителя напряжения (ДН), источника опорного напряжения (ИОН), УС2, усилителя местной обратной связи (УМОС) по среднему току дросселя, генератора пилообразного напряжения (ГПН), широтно-импульсного модулятора (ШИМ), драйвера, ключа (КЛ), источника питания (UПИТ), сглаживающего фильтра ($L_ф$ и $C_ф$).

Функциональная схема для приращений ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ, полученная путем объединения функциональных схем ИСБ последовательного типа [1] и функциональной схемы импульсного стабилизатора напряжения [3–5], представлена на рис. 3.

Согласно работе [6], передаточные функции устройств НСТ и их параметры имеют следующий вид:

– передаточная функция НУМ по управлению:

$$W_{НУМ}(s) = \frac{K_{НУМ}}{T_{НУМ}^2 s^2 + 2\xi_{НУМ} T_{НУМ} s + 1},$$

где $K_{НУМ} \approx 2{,}45$ А/В – коэффициент передачи НУМ по управлению; $T_{НУМ} \approx 1{,}14 \cdot 10^{-7}$ с – постоянная времени НУМ по управлению; $\xi_{НУМ} \approx 0{,}75$ – коэффициент относительного демпфирования;

– адмитанс НУМ

$$Y_{НУМ}(s) = \frac{Y_{0НУМ}\left(T_{УНУМ1} s + 1\right)}{T_{Y_{НУМ}2}{}^2 s^2 + 2\xi_{УНУМ} T_{УНУМ2} s + 1},$$

где $Y_{0НУМ} \approx 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ Сим – активная составляющая адмитанса НУМ; $T_{УНУМ1} \approx 3{,}25 \cdot 10^{-4}$ с, $T_{УНУМ2} \approx 1{,}35 \cdot 10^{-7}$ с – постоянные времени адмитанса НУМ; $\xi_{УНУМ} \approx 0{,}95$ – относительный коэффициент демпфирования;

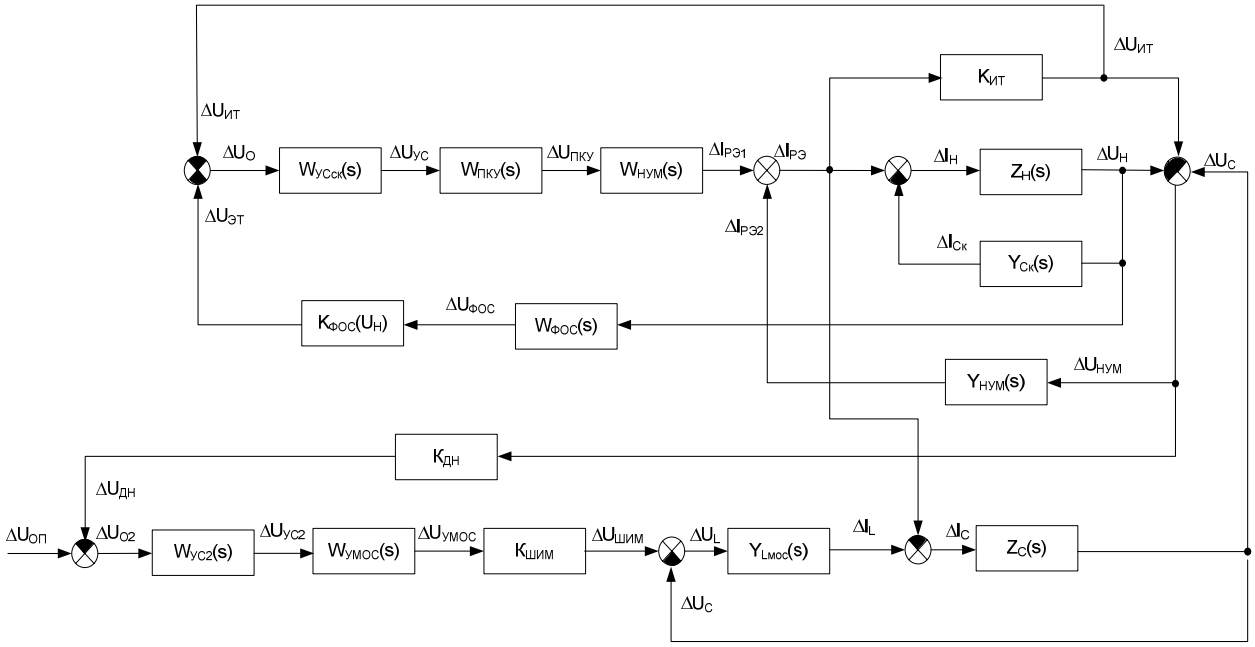


Рис. 3. Функциональная схема имитатора СБ с каскадным включением НУМ и ИУМ

– передаточная функция УС

$$W_{\text{УС}}(s) = \frac{K_{\text{УС}}}{T_{\text{УС}}s + 1},$$

где $K_{\text{УС}}$ и $T_{\text{УС}}$ – коэффициент передачи и постоянная времени УС;

– передаточная функция ПКУ

$$W_{\text{ПКУ}}(s) = \frac{(T_{\text{ПКУ1}}s + 1)(T_{\text{ПКУ2}}s + 1)}{(T_{\text{ПКУ3}}s + 1)(T_{\text{ПКУ4}}s + 1)},$$

где $T_{\text{ПКУ}i}$ – постоянные времени ПКУ.

адмитанс корректирующего конденсатора: $Y_{C_{\text{К}}}(s) = C_{\text{К}}s$, где $C_{\text{К}}$ – емкость корректирующего конденсатора.

Согласно [2] $K_{\text{УС}}$, $T_{\text{УС}}$, $T_{\text{ПКУ}i}$, $C_{\text{К}}$ рассчитываются исходя из воспроизведения имитатором требуемого адмитанса СБ.

Математическая модель УФОС в малосигнальном режиме представляет собой дифференциальный коэффициент передачи $K_{\text{ФОС}}(U_{\text{Н}}, I_{\text{КЗ}}, U_{\text{ХХ}}) = \left|\partial F_{\text{ФОС}}(U_{\text{Н}}, I_{\text{КЗ}}, U_{\text{ХХ}})/\partial U_{\text{Н}}\right|$, зависящий от точки линеаризации ПХ и параметров ВАХ ИСБ, и передаточную функцию, которая имеет вид

$$W_{\text{ФОС}}(s) = \frac{1}{\left(T_{\text{ФОС1}}^2 s^2 + 2\xi_{\text{ФОС1}}T_{\text{ФОС1}}s + 1\right)\times} \times \left(T_{\text{ФОС2}}^2 s^2 + 2\xi_{\text{ФОС2}}T_{\text{ФОС2}}s + 1\right)\left(T_{\text{ФОС3}}s + 1\right)$$

где $T_{\text{ФОС1}} = 8{,}84\cdot10^{-8}$ с, $T_{\text{ФОС2}} = 2{,}12\cdot10^{-8}$ с, $T_{\text{ФОС3}} = 1{,}6\cdot10^{-8}$с – постоянные времени; $\xi_{\text{ФОС1}} = 0{,}5$, $\xi_{\text{ФОС2}} = 0{,}1$ – коэффициенты относительного демпфирования.

Согласно [3–5], передаточные функции устройств ИСН имеют следующий вид:

– передаточная функция УМОС:

$$W_{\text{УМОС}}(s) = \frac{K_{\text{УМОС}}(T_Z s + 1)}{s(T_P s + 1)},$$

где $K_{\text{УМОС}}$ – коэффициент усиления при ω = 1, T_Z и T_P – постоянные времени, причем $T_Z > T_P$;

– коэффициент передачи ШИМ и КЛ равен $K_{\text{ШИМ}} = U_{\text{ПИТ}} / U_{\text{ПИЛ}}$, где $U_{\text{ПИТ}}$ – напряжение источника питания ИСН; $U_{\text{ПИЛ}}$ – размах пилообразного напряжения;

– адмитанс дросселя фильтра с учетом местной обратной связи (МОС) по среднему току дросселя:

$$Y_{L\text{МОС}}(s) = \frac{Y_L(s)}{1 + W_{\text{МОС}}(s)}, \quad (1)$$

где $Y_{L1}(s) = \dfrac{1}{L_{\Phi}s + R_{L\Phi} + R_{\text{ИТ2}}}$ – адмитанс дросселя фильтра с учетом активных потерь в преобразователе (потери в коммутирующих полупроводниковых элементах и статические потери в обмотках трансформатора и дросселя выходного фильтра) и в измерителе среднего тока дросселя; L_{Φ} – индуктивность дросселя фильтра; $R_{L\Phi}$ – сопротивление потерь; $R_{\text{ИТ2}}$ – сопротивление измерителя среднего тока дросселя, $W_{\text{МОС}}(s) = W_{\text{УМОС}}(s)K_{\text{ШИМ}}Y_L(s)K_{\text{ИТ2}}$ – передаточная функция разомкнутого контура МОС по среднему току дросселя;

– импеданс конденсатора фильтра $Z_C(s)$ с учетом эквивалентного последовательного сопротивления (ESR):

$$Z_C(s) = \frac{R_{СФ} C_Ф s + 1}{C_Ф s},$$

где $C_Ф$ – емкость конденсатора фильтра; $R_{СФ}$ – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора.

При анализе влияния динамических свойств ИСН на динамические свойства ИСБ удобнее пользоваться следующими характеристиками ИСН: передаточной функцией разомкнутого контура ИСН и импедансами фильтра и ИСН.

В [4] показано, что между частотой преобразования $f_{ПР}$, частотой среза разомкнутого конутра МОС $f_{СРмос} \approx f_{ПР}/(2\pi)$, частотами $f_Z = 1/(2\pi T_Z)$ и $f_P = 1/(2\pi T_Р)$ существует соотношение $f_Z < f_{СРмос} < f_{ПР} = f_Р$, которое с учетом условия $|W_{МОС}(j\omega)| \gg 1$, где $0 \le \omega \le \omega_{СРмос}$, позволяет упростить (1):

$$Y_{LМОС}(j\omega) \approx \frac{1}{W_{УМОС}(j\omega) K_{ШИМ} K_{ИТ2}} \approx \approx \frac{j\omega}{K_{УМОС} K_{ШИМ} K_{ИТ2} (T_Z j\omega + 1)}, \ \omega < \omega_{СР\,МОС}. \quad (2)$$

Согласно (2) в диапазоне частот $0 \le \omega \le 1/T_Z$ благодаря МОС адмитанс дросселя приобретает емкостной характер, где эквивалентная емкость дросселя равна

$$C_L = \frac{1}{K_{УМОС} K_{ШИМ} K_{ИТ2}}.$$

Адмитанс фильтра с МОС определяется выражением:

$$Y_{ФМОС}(s) = Y_{LМОС}(s) + \frac{1}{Z_C(s)} = Y_{LМОС}(s) + Y_C(s).$$

Передаточная функция разомкнутого контура ИСН имеет вид:

$$W_{РКИСН}(s) = \frac{W_{УС2}(s) W_{УМОС}(s) K_{ШИМ} \times \times Y_{LМОС}(s) Z_{ФМОС}(s) K_{ДН}}{1 + Z_{ФМОС}(s) Y_Н(s)},$$

где $Z_{ФМОС}(s) = 1/Y_{ФМОС}(s)$ – эквивалентный импеданс фильтра; $Y_Н(s)$ – адмитанс нагрузки.

В режиме *XX*, когда $Y_Н(s) = 0$, передаточная функция разомкнутого контура ИСН принимает вид:

$$W_{РКИСНxx}(s) = W_{УС2}(s) W_{УМОС}(s) K_{ШИМ} \times \times Y_{LМОС}(s) Z_{ФМОС}(s) K_{ДН}. \quad (3)$$

Выходной импеданс ИСН определяется следующим выражением:

$$Z_{ИСН}(s) = \frac{Z_{ФМОС}(s)}{1 + W_{РКИСНxx}(s)}. \quad (4)$$

Проанализируем влияние динамических свойств ИСН на адмитанс имитатора. В таблице представлены адмитанс ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ и, в целях сравнения, адмитанс ИСБ последовательного типа [2]. Сравнивая соответствующие слагаемые адмитансов имитаторов, можно сделать вывод, что охват РЭ НУМ обратной связью по напряжению приводит к изменению адмитанса НУМ.

Рассмотрим влияние передаточной функции разомкнутого контура ИСН в режиме *XX* на $\dot{Y}_{НУМ}(s)$. Как правило, в ИСН между частотой среза разомкнутого контура ИСН $\omega_{СРисн}$, частотой среза разомкнутого контура МОС по среднему току дросселя $\omega_{СРмос}$ и частотой преобразования $\omega_{пр}$ выполняется соотношение $\omega_{СРисн} < \omega_{СРмос} < \omega_{пр}$ [4]. Поэтому, с учетом выражение (2) в диапазоне частот $0 \le \omega < \omega_{СРисн}$ ПФ $W_{РКИСНxx}$ принимает вид:

$$W_{РКИСНxx}(j\omega) = = \frac{W_{УС2}(j\omega) W_{УМОС}(j\omega) K_{ШИМ} Z_{ФМОС}(j\omega) K_{ДН}}{W_{УМОС}(j\omega) K_{ШИМ} K_{ИТ2}} = = \frac{W_{УС2}(j\omega) Z_{ФМОС}(j\omega) K_{ДН}}{K_{ИТ2}}. \quad (5)$$

Согласно (5) в диапазоне частот $0 \le \omega < \omega_{СРисн}$ существенное влияние на $W_{РКИСНxx}$ оказывает импеданс фильтра $Z_{ФМОС}$ с МОС по среднему току дросселя, который в области низких и средних частот имеет емкостной характер, т. е. ПФ $W_{РКИСНxx}$ обладает относительно большим коэффициентом передачи в области низких и средних частот. Поэтому, благодаря охвату обратной связью по напряжению регулирующих элементов НУМ модуль адмитансно-частотной характеристики (АдЧХ) $|\dot{Y}_{НУМ}(j\omega)|$ в диапазоне частот $0 \le \omega < \omega_{СРисн}$ уменьшается по сравнению с модулем АдЧХ $|Y_{НУМ}(j\omega)|$, что согласно работе [2] положительно сказывается как на статической, так и на динамической точности имитатора.

Адмитансы имитторов

ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ	ИСБ последовательного типа
$Y_{КАС}(s, U_Н) = Y^{к}_{СТ}(s) + Y^{к}_{ФОС}(s, U_Н) + Y_{Ск}(s)$	$Y_{ПОС}(s, U_Н) = Y_{ФОС}(s, U_Н) + Y_{СТ}(s) + Y_{С_К}(s)$
$Y^{к}_{СТ}(s) = \frac{\dot{Y}_{НУМ}(s)}{1 + W_{СК}(s) + K_{ИТ1} \dot{Y}_{НУМ}(s) + Z_{ИСН}(s) Y_{НУМ}(s)}$	$Y_{СТ}(s) = \frac{Y_{НУМ}(s)}{1 + W_{СК}(s) + K_{ИТ} Y_{НУМ}(s) + Z_{ИП}(s) Y_{НУМ}(s)}$
$Y^{к}_{ФОС}(s, U_Н) = \frac{K_{ФОС}(U_Н) W_{ФОС}(s) W_{УС}(s) W_{ПКУ}(s) W_{НУМ}(s)}{1 + W_{СК}(s) + K_{ИТ1} \dot{Y}_{НУМ}(s) + Z_{ИСН}(s) Y_{НУМ}(s)}$	$Y_{ФОС}(s, U_Н) = \frac{K_{ФОС}(U_Н) W_{ФОС}(s) W_{УС}(s) W_{ПКУ}(s) W_{НУМ}(s)}{1 + W_{СК}(s) + K_{ИТ} Y_{НУМ}(s) + Z_{ИП}(s) Y_{НУМ}(s)}$
$\dot{Y}_{НУМ}(s) = \frac{Y_{НУМ}(s)}{1 + W_{РКИСНxx}(s)}$	
$W_{СК}(s) = W_{УС}(s) W_{ПКУ}(s) W_{НУМ}(s) K_{ИТ}$	

Выше частоты $\omega_{СРисн}$ будет выполняться условие $|\dot{Y}_{НУМ}(j\omega)| = |Y_{НУМ}(j\omega)|$. Поэтому без ущерба для точности полученных результатов примем, что $|\dot{Y}_{НУМ}(j\omega)| = |Y_{НУМ}(j\omega)|$ вне зависимости от диапазона частот. Отсюда, если $Z_{ИП}(s) = Z_{ИСН}(s)$, то адмитанс ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ будет равен адмитансу ИСБ последовательного типа.

В работе [2] было получено условие, которому должен удовлетворять импеданс ИП ИСБ последовательного типа, исходя из наименьшего влияния на адмитанс имитатора

$$|Z_{ИП}(j\omega)| < |Z_{ИПпр}(j\omega)| = \left|\frac{1+W_{РКж}(j\omega)}{Y_{НУМ}(j\omega)} - K_{ИТ}\right|,$$
$$\omega \in 0...\omega_{СРж},$$

где $|Z_{ИПпр}(j\omega)|$ – модуль предельной импедансно-частотной характеристики (ИЧХ) ИП ИСБ последовательного типа; $\omega_{СРж}$ – желаемая частота среза РК НСТ; $W_{РКж}$ – желаемая передаточная функция РК НСТ, которая в диапазоне частот $0 \le \omega < \omega_{СРж}$ имеет вид

$$W_{РКж}(j\omega) = \frac{K_{РКж}}{(T_{РКж1}j\omega + 1)},$$

где $K_{РКж}$ – желаемый коэффициент передачи, $T_{РКж1} = K_{РКж} / \omega_{СРж}$.

Так как $Z_{ИП}(s) = Z_{ИСН}(s)$, то модуль ИЧХ ИСН должен удовлетворять условию:

$$|Z_{ИСН}(j\omega)| < |Z_{ИПпр}(j\omega)| = \left|\frac{1+W_{РКж}(j\omega)}{Y_{НУМ}(j\omega)} - K_{ИТ}\right|, \quad (6)$$
$$\omega \in 0...\omega_{СРж}.$$

График $|Z_{ИПпр}(j\omega)|$ при типовых $\omega_{СРж} \approx 3{,}14 \cdot 10^6$ с$^{-1}$ и $K_{РКж} = 200$ представлен на рис. 4. Как видно из графика в области НЧ импеданс ИП может быть порядка мегаом, но по мере роста частоты он должен становиться меньше.

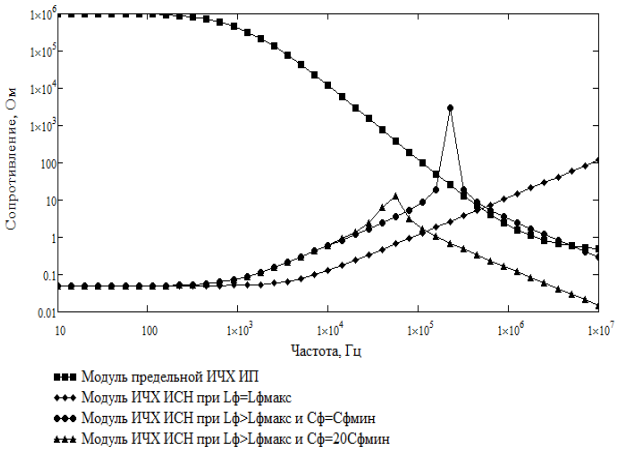


Рис. 4. Графики ИЧХ ИСН

Проанализируем импеданс ИСН. С учетом (5) импеданс ИСН (4) в диапазоне частот $0 \le \omega < \omega_{СРисн}$ принимает вид:

$$Z_{ИСН}(j\omega) = \frac{Z_{Фэкв}(j\omega)W_{УМОС}(j\omega)K_{ШИМ}K_{ИТ2}}{W_{УС2}(j\omega)W_{УМОС}(j\omega)K_{ШИМ}Z_{Фэкв}(j\omega)K_{ДН}} = \frac{K_{ИТ2}}{W_{УС2}(s)K_{ДН}} \approx \frac{K_{ИТ2}}{K_{УС2}K_{ДН}}, \quad (7)$$

т. е. имеет чисто активный характер. Выше частоты среза разомкнутого контура ИСН $\omega_{СРисн}$ импеданс ИСН определяется импедансом (параметрами) *LC*-фильтра.

Учитывая, что обычно выполняются условия $K_{ИТ2} < 1$ Ом, $K_{УС2} \gg 1$, $K_{ДН} < 1$, то в диапазоне частот $0 \le \omega < \omega_{СРисн}$, где $\omega_{СРисн}$ обычно не превышает несколько килогерц, условие (6) автоматически выполняется. Таким образом, (6) накладывает ограничения только на параметры *LC*-фильтра.

Определим наибольшее значение индуктивности дросселя фильтра $L_{Фмакс}$. Приравнивая $L_{Фмакс}\omega = |Z_{ИПпр}(j\omega)|$ при $\omega = \omega_{СРж}$, получим

$$L_{Фмакс} = \frac{|Z_{ИПпр}(j\omega_{СРж})|}{\omega_{СРж}}.$$

При $\omega_{СРж} \approx 3{,}14 \cdot 10^6$ с$^{-1}$ получим $L_{Фмакс} \approx$ 1,8мкГн. На рис. 4 представлен модуль ИЧХ ИСН при $Z_{ИСН0} = 0{,}05$Ом и $L_Ф = L_{Фмакс}$. Как видно из графиков, условие (6) в диапазоне частот $0 \le \omega < \omega_{СРж}$ в полной мере выполняется.

Как показывает практика, полученная на примере величина индуктивности дросселя не достаточна для выполнения условия непрерывности тока дросселя, поэтому определим наименьшую емкость конденсатора, при которой индуктивность дросселя не будет оказывать влияния на адмитанс ИСБ. Для этого рассмотрим условие $C_{Фмин}\omega = 1/|Z_{ИПпр}(j\omega)|$ при $\omega = \omega_{СРж}$:

$$C_{Фмин} \le \frac{1}{|Z_{ИПпр}(j\omega_{СРж})|\omega_{СРж}}.$$

При $\omega_{СРж} \approx 3{,}14 \cdot 10^6$ с$^{-1}$ получим $C_{Фмин} \approx$ 53 нФ. Модуль ИЧХ ИСН при $L_Ф > L_{Фмакс}$ и $C_Ф = C_{Фмин}$ представлен на рис. 4. Как видно из графика, на частоте сопряжения индуктивной составляющей ИЧХ ИСН и импеданса конденсатора образуется резонансный выброс, который не позволяет в полной мере выполнить условие (6). Поэтому величину емкости конденсатора $C_Ф$ предлагается выбирать с запасом в 20–100 раз:

$$C_Ф \ge 20\frac{1}{|Z_{ИПпр}(j\omega_{СРж})|\omega_{СРж}}. \quad (8)$$

Модуль ИЧХ ИСН при $L_Ф > L_{Фмакс}$ и $C_Ф = 20C_{Фмин} \approx$ $\approx$ 1 мкФ представлен на рис. 4. Видно, что теперь условие (6) в диапазоне частот $0 \le \omega < \omega_{СРж}$ в полной мере выполняется.

Таким образом, при расчете параметров *LC*-фильтра ИСН для ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ

накладывается ограничение, согласно которому емкость конденсатора фильтра должна быть не меньше некоторой минимальной величины.

Рассмотрим вопрос устойчивой работы ИСН. Особенностью работы ИСН в составе ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ является то, что ИСН производит стабилизацию только части своего выходного напряжения – напряжение на РЭ НУМ, тогда как другая часть – напряжение нагрузки – зависит от импеданса нагрузки и формируется НСТ и УФОС. Поэтому для расчета КУ, обеспечивающего устойчивую работу ИСН, необходимо определить ПФ РК ИСН с учетом НСТ и УФОС.

Используя формулу Мезона, по функциональной схеме, представленной на рис. 3, получим передаточную функцию разомкнутого контура ИСН, работающего в составе ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ:

$$W_{\text{РКИСНк}}(s,U_{\text{Н}}) = \frac{\Delta U_{\text{ДН}}(s)}{\Delta U_{\text{О2}}(s)} = \\ = W_{\text{РКИСНхх}}(s)\frac{1+Z_{\text{Н}}(s)Y^{*}_{\text{ПОС}}(s,U_{\text{Н}})}{1+Z_{\text{Н}}(s)Y^{**}_{\text{ПОС}}(s,U_{\text{Н}})}, \quad (9)$$

где

$$Y^{*}_{\text{ПОС}}(s,U_{\text{Н}}) = Y^{*}_{\text{ФОС}}(s,U_{\text{Н}}) + Y_{\text{Ск}}(s),$$

$$Y^{*}_{\text{ФОС}}(s,U_{\text{Н}}) = \frac{K_{\text{ФОС}}(U_{\text{Н}})W_{\text{ФОС}}(s)W_{\text{УСск}}(s)\times \\ \times W_{\text{ПКУ}}(s)W_{\text{НУМ}}(s)}{1+W_{\text{СК}}(s)},$$

$$Y^{**}_{\text{ПОС}}(s,U_{\text{Н}}) = Y^{**}_{\text{ФОС}}(s,U_{\text{Н}}) + Y^{**}_{\text{СТ}}(s,U_{\text{Н}}) + Y_{\text{Ск}}(s)$$

$$Y^{**}_{\text{ФОС}}(s,U_{\text{Н}}) = \\ = \frac{K_{\text{ФОС}}(U_{\text{Н}})W_{\text{ФОС}}(s)W_{\text{УСск}}(s)W_{\text{ПКУ}}(s)W_{\text{НУМ}}(s)}{1+W_{\text{СК}}(s)+K_{\text{ИТ1}}Y_{\text{НУМ}}(s)+Z_{\text{Фмос}}(s)Y_{\text{НУМ}}(s)},$$

$$Y^{**}_{\text{СТ}}(s,U_{\text{Н}}) = \\ = \frac{Y_{\text{НУМ}}(s)}{1+W_{\text{СК}}(s)+K_{\text{ИТ1}}Y_{\text{НУМ}}(s)+Z_{\text{Фмос}}(s)Y_{\text{НУМ}}(s)}.$$

Графики $\left|Y^{*}_{\text{ПОС}}(j\omega,U_{\text{Н}})\right|$ и $\left|Y^{**}_{\text{ПОС}}(j\omega,U_{\text{Н}})\right|$ при типовых значениях $C_{\Ф}$ = 10 мкФ и $L_{\Ф}$ = 200 мкГн представлены на рис. 5.

Как видно из графиков, в диапазоне частот до нескольких килогерц, являющихся частотой среза РК ИСН, модули выражений $\left|Y^{*}_{\text{ПОС}}(j\omega,U_{\text{Н}})\right|$ и $\left|Y^{**}_{\text{ПОС}}(j\omega,U_{\text{Н}})\right|$ совпадают, что позволяет упростить (9):

$$W_{\text{РКИСНк}}(s,U_{H}) \approx W_{\text{РКИСНхх}}(s).$$

Таким образом, при исследовании устойчивости ИСН, работающего в составе ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ, можно использовать передаточную функцию ИСН в режиме *XX* (3).

Условие устойчивости по частотным характеристикам $|W_{\text{РКИСНхх}}(j\omega)|$ и $\varphi_{\text{РК}} = \arg(W_{\text{РКИСНхх}}(j\omega))$ имеет вид

$$\omega_{\text{СР}} < \omega_{\text{П}},$$

где $\omega_{\text{СР}}$ – частота среза, при которой $|W_{\text{РКИСНхх}}(j\omega_{\text{СР}})| = 1$; $\omega_{\text{П}}$ – частота, при которой $\varphi_{\text{РК}}(\omega_{\text{П}}) = -180°$.

Как правило, для обеспечения устойчивой работы ИСН между частотой среза разомкнутого контура ИСН $\omega_{\text{ср}}$ и частотой преобразования (модуляции) $\omega_{\text{пр}}$ должно выполняться условие $\omega_{\text{ср}} \le \omega_{\text{пр}}/5$ [4; 5]. В то же время, как показывают результаты моделирования [1], быстродействие ИСН оказывает существенное влияние на качество переходных процессов на токовой ветви ВАХ имитатора СБ. Поэтому, для повышения качества переходных процессов ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ необходимо, чтобы частота среза ИСН была как можно больше. Руководствуясь наибольшим быстродействием ИСН, используя передаточную функцию разомкнутого контура ИСН в режиме ХХ (3) и методы, изложенные в [4; 5], можно провести синтез корректирующего устройства, обеспечивающего устойчивость и требуемого быстродействие ИСН.

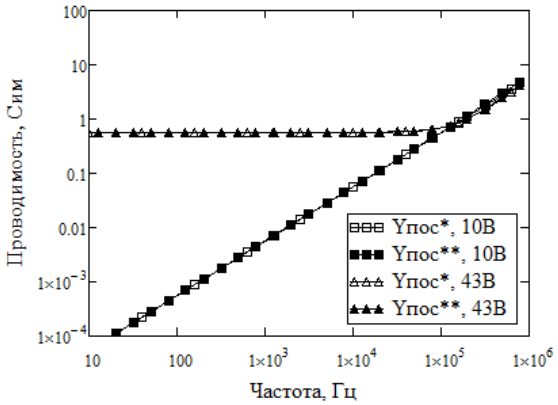


Рис. 5. Графики $\left|Y^{*}_{\text{ПОС}}(j\omega,U_{\text{Н}})\right|$ и $\left|Y^{**}_{\text{ПОС}}(j\omega,U_{\text{Н}})\right|$

Таким образом, в работе исследовано влияние импульсного стабилизатора напряжения на адмитанс и устойчивость имитатора с каскадным включением непрерывного и импульсного усилителей мощности. Показано, что для наименьшего влияния импеданса ИСН на адмитанс имитатора емкость конденсатора фильтра ИСН должна удовлетворять условию (8). Для исследования и обеспечения устойчивости ИСН следует использовать передаточную функцию разомкнутого контура ИСН в режиме холостого хода (3).

Библиографические ссылки

1. Мизрах Е. А., Сидоров А. С. Об абсолютной устойчивости процессов в имитаторах солнечных батарей // Приборостроение (Известия высших учебных заведений) / Санкт-Петербургский гос. ун-т информационных технологий, механики и оптики. 2011. Т. 54. № 4. С. 28–33.

2. Балакирев Р. В., Мизрах Е. А., Сидоров А. С. Синтез требуемых адмитансных частотных характеристик имитатора солнечной батареи // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 2(9). С. 24–29.

3. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2005.

4. Dixon L. Average Current Control of Switching Power Supplies // Unitrode Power Supply Design Seminar Handbook, Seminar 700, 1990. Topic 5. P. 5.1–5.14.

5. Erickson R. W. Fundamentals of Power Electronics. N. Y. : Chapman and Hall, 1997.

6. Мизрах Е. А., Сидоров А. С. Моделирование имитатора солнечных батарей с каскадным включением импульсного и непрерывного усилителей мощности // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 1 (14). С. 7–12.

E. A. Mizrakh, A. S. Sidorov, S. B. Tkachev

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF SWITCHED VOLTAGE REGULATORS ON ADMITTANCE AND STABILITY OF SOLAR ARRAY SIMULATORS WITH CASCADE CONNECTION OF POWER AMPLIFIERS

The paper presents the results of the investigation of the influence of dynamic characteristics of switched voltage regulator on admittance and stability of solar array simulator with cascade connection of continuous and switched power amplifiers. The limitations on LC-filter parameters of switched voltage regulator are stated.

Key words: switched voltage regulator, solar array simulator, stability, admittance.

© Мизрах Е. А., Сидоров А. С., Ткачев С. Б., 2011

УДК 62-529

Р. А. Мирзаев, Н. А. Смирнов

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Рассмотрены аспекты управления устройствами параллельной кинематики. Создана система управления шаговыми двигателями. При её разработке усовершенствован контроллер шаговых двигателей, написана программа управления для биполярных и униполярных двигателей.

Ключевые слова: устройства параллельной кинематики, контроллер, система управления, шаговые двигатели, мехатроника.

Применение шаговых двигателей и устройств параллельной кинематики в робототехнике, автоматизированной технике и ракетно-космической технике открывает новые функциональные возможности в этих областях. Шаговые двигатели позволяют осуществлять перемещение с большой точностью без использования обратной связи. В случае, когда нагрузка меняется плавно, требуется хорошая точность позиционирования инструмента или детали, шаговые двигатели являются оптимальным выбором с точки зрения цены и функциональности.

Если нужен привод для перемещения по заданному алгоритму (переместить в определенную позицию, выполнить реверс, приостановить работу, продолжить работу с другой скоростью), предпочтительно использовать шаговый двигатель. Он способен осуществлять точное позиционирование и регулировку скорости без датчика обратной связи [1]. Однако это утверждение верно только для систем, которые работают при малом ускорении и с относительно постоянной нагрузкой. Если нагрузка шагового двигателя превысит его момент, то информация о положении ротора теряется и система требует базирования с помощью концевого выключателя или любого датчика положения [2].

В ходе анализа литературы по автоматизированной технике [1–3] выявлена некоторая последовательность обработки информации. К примеру, преобразование информации и генерация управляющих сигналов для шаговых двигателей станка ЧПУ часто осуществляется по схеме, приведенной на рис. 1. Причем вариант с использованием порта USB встречается редко. Большое значение в данной схеме имеет совместимость устройств, форматов передачи данных и связанная с ней унификация сигналов, разъемов, протоколов. В ходе работы контроллер, несовместимый с сигналом шаг/направление, был усовершенствован.

Применение шаговых двигателей требует сложной системы управления, которая создана в ходе работы. Система управления состоит из персонального компьютера с работающей на нем программой и контроллеров шаговых двигателей, преобразующих сигналы. Компьютерная программа управления считывает данные о траектории, рассчитывает шаги и генерирует управляющие сигналы на контроллер. Контроллер шаговых двигателей преобразует эти сигналы в импульсы, усиливает их мощность и подает на шаговые двигатели.

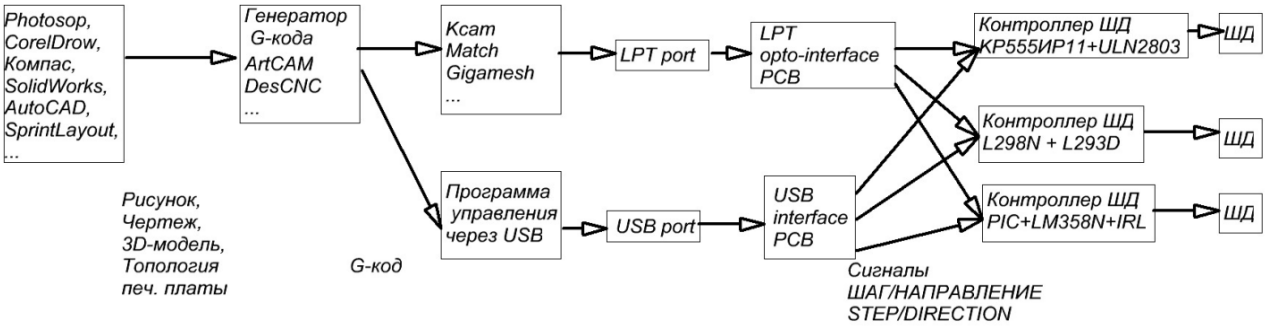


Рис. 1. Генерация, вывод и преобразование управляющих сигналов [4]

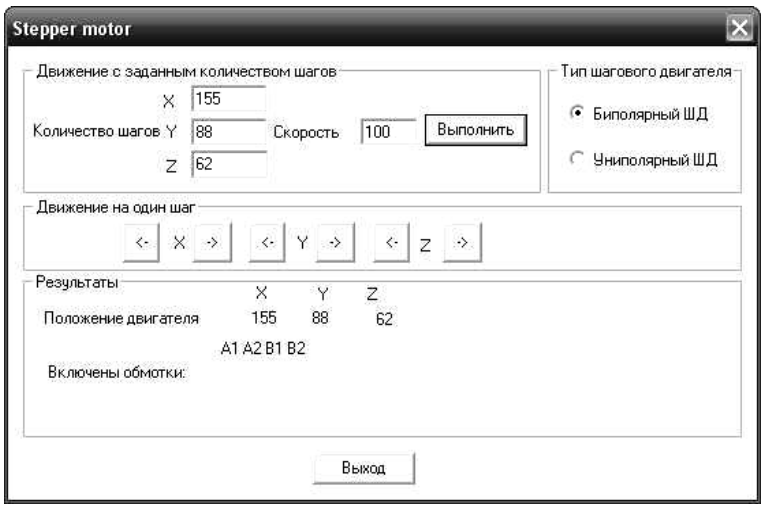


Рис. 2. Диалоговое окно программы Stepper motor

Программирование. Управляющая программа способна управлять тремя шаговыми двигателями.

Методики расчета перемещения по каждой оси приведены в работах [1; 5], в программу поступают уже готовые данные о требуемом перемещении. Требуемое перемещение по каждой оси в миллиметрах делится на величину шага, в разработанной системе параллельной кинематики один шаг равен 0,223 мм. В результате получается заданное количество шагов для каждого двигателя. В текстовом поле диалогового окна задается число шагов, которые шаговый двигатель должен выполнить по каждой оси, также задается время каждого шага в миллисекундах (рис. 2).

Управляющая программа написана в среде Microsoft Visual C++ и состоит из двух процедур: GetData и Steps. В процедуре GetData считываются данные о требуемом перемещении ротора двигателя в шагах, определяется, по какому направлению нужно выполнить максимальное количество шагов (MaxReal). В этой же процедуре рассчитываются коэффициенты перемещений по каждой оси делением количества шагов по оси на максимальное количество шагов (рис. 3). Например, при перемещении 500, 250, 100, максимальное число шагов будет равно 500, а коэффициенты kx = 500/500 = 1, ky = 250/500 = 0,5, kz = 100/500 = 0,2.

Далее эти данные используются в процедуре Steps (рис. 4), которая запускает таймер процедурой OnStartTimer и при каждом его срабатывании совершает один шаг. Программа вычисляет требуемую координату Xpr умножением коэффициента на максимальное число шагов Xpr = MaxPr·kx. Необходимость совершить шаг определяется программой из условия (max (Xpr, Xreal) – min (Xpr, Xreal)) > 0,5, где Xpr – программируемая координата положения; Xreal – реальная координата положения. Если отклонение реальной и вычисленной координат превышает половину шага, программа делает шаг, сокращая расхождение. При управлении униполярным шаговым двигателем в режиме одиночного шага существует последовательность из четырех сигналов, отправляемых на четыре вывода шагового двигателя: 1000; 0100; 0010; 0001. Для вращения ротора двигателя последовательно подаются эти сигналы. Если требуется совершить шаг, оператор switch определяет, какой сигнал подается на двигатель, и заменяет его следующим.

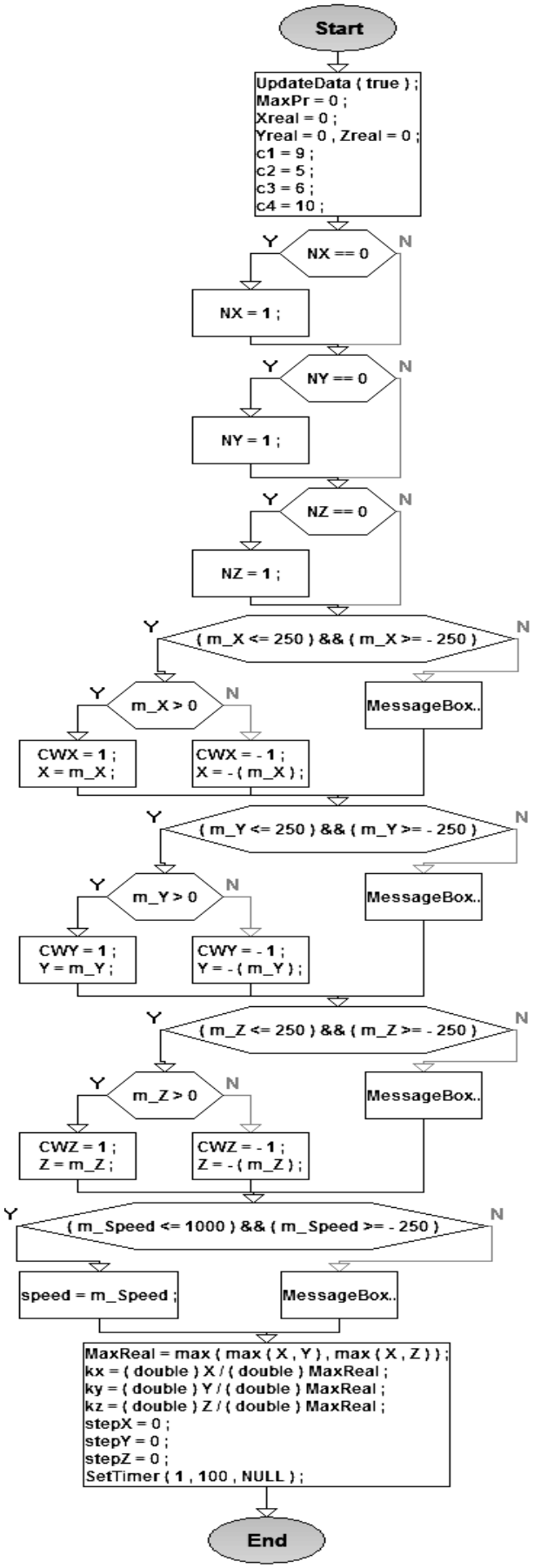


Рис. 3. Блок-схема процедуры GetData

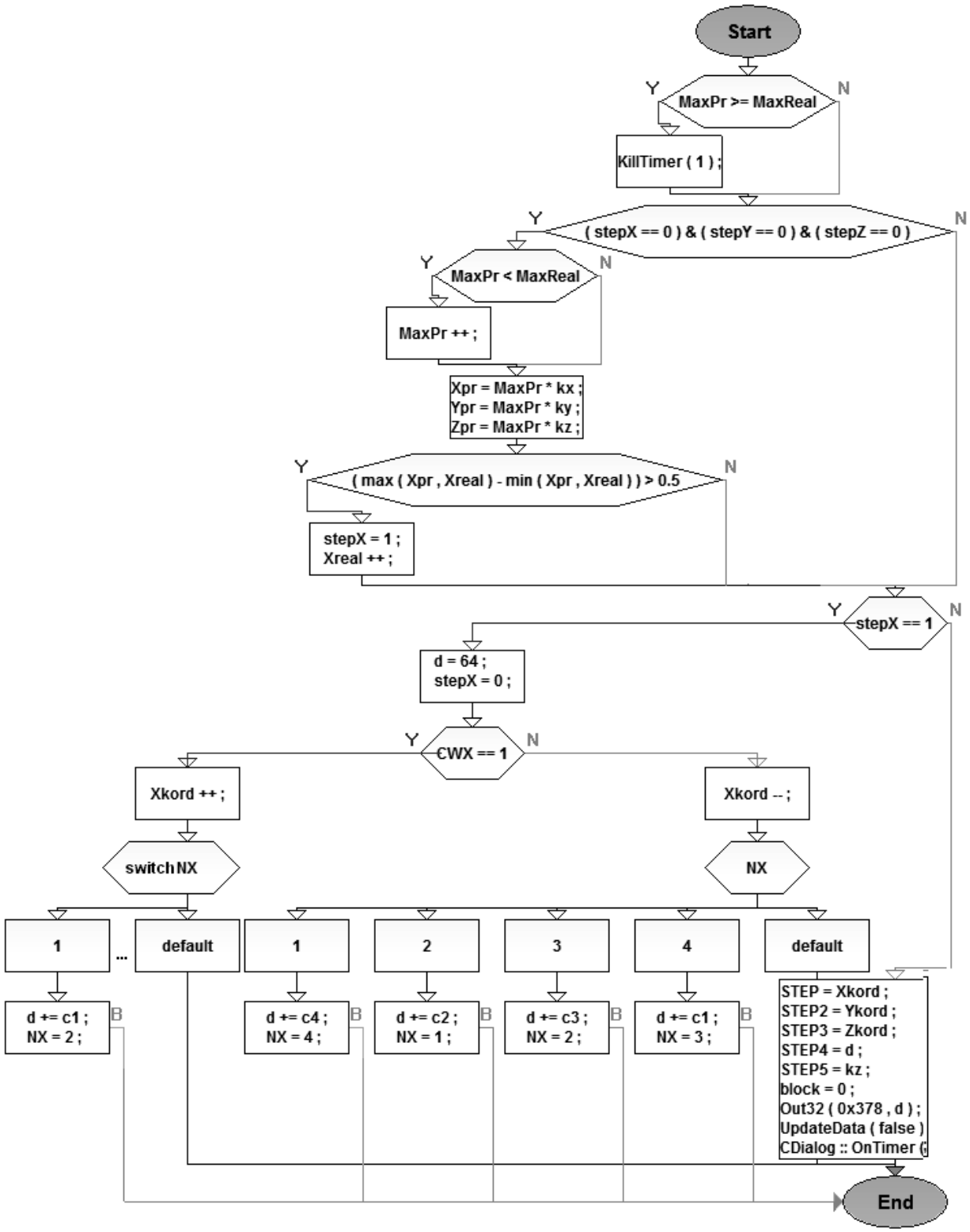


Рис. 4. Блок-схема процедуры Steps

Электроника. По имеющимся схемотехническим решениям [6] была разработана топология контроллера, драйвером подобрана элементная база и изготовлен контроллер [7]. Первоначальное схемотехническое решение состояло из двунаправленных четырехбитных регистров сдвига КР1561ИР151 (SN74LS194) и драйверов униполярного шагового двигателя ULN2803A. Эта схемы была усовершенствована путем добавления микросхемы логики «НЕ» MC14069UB для того, чтобы она могла работать с форматом сигналов «шаг и направление» [4]. Усовершенствование сократило число управляющих сигналов с избыточных трех до минимально необходимых двух: шаг и направление. Таким образом, кон-

троллер стал совместим с распространенными программами управления шаговыми двигателями, а также с его помощью стало возможно управление четырьмя двигателями, управляемыми восемью сигналами (рис. 5).

Стоит отметить, что во многих случаях остается открытым вопрос о генерации управляющих сигналов, поступающих на контроллер. Если для управления в режиме реального времени используется компьютер, то на нем должна быть установлена программа, например, одна из программ для ЧПУ станка: Match, Kcam, VRI-cnc. Эти программы выводят через порт LPT компьютера управляющие сигналы в форме «направление», «шаг» для каждой оси. В них обязательно учитывается дискретность перемещения привода с шаговыми двигателями. Недостаток многих схемотехнических решений в том, что им нужны другие управляющие сигналы, следовательно, под них нужно разрабатывать собственное программное обеспечение [8].

Механика. С целью отработки процессов управления механизмами параллельной кинематики разработана модель трипода (рис. 6) и техническая документация на его изготовление.

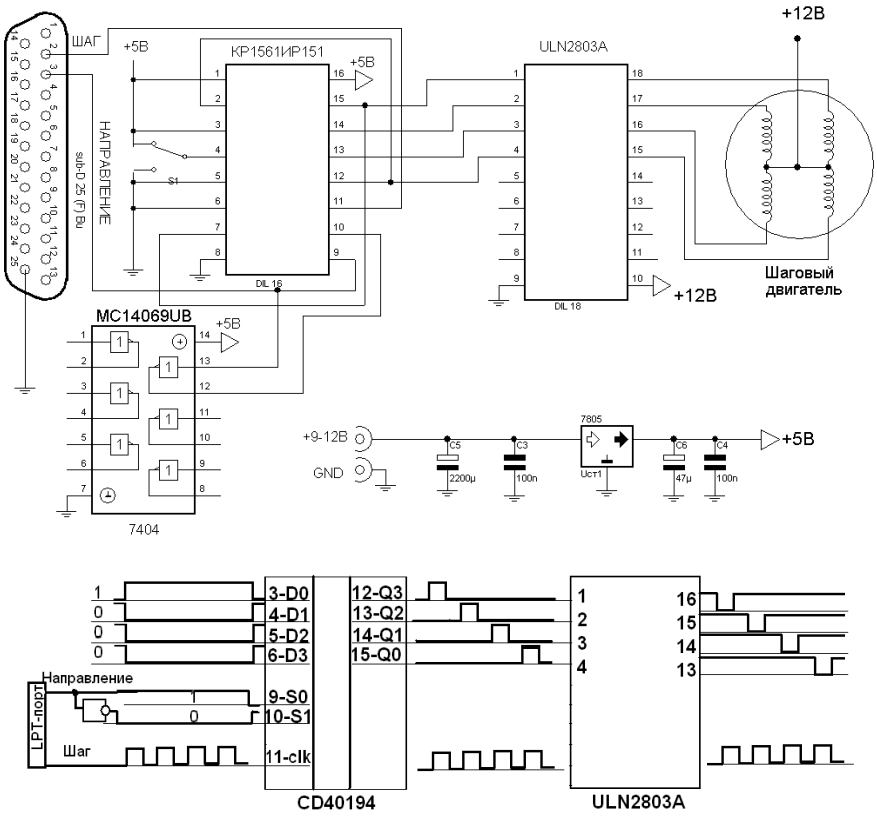


Рис. 5. Электрическая схема и диаграмма сигналов усовершенствованного контроллера

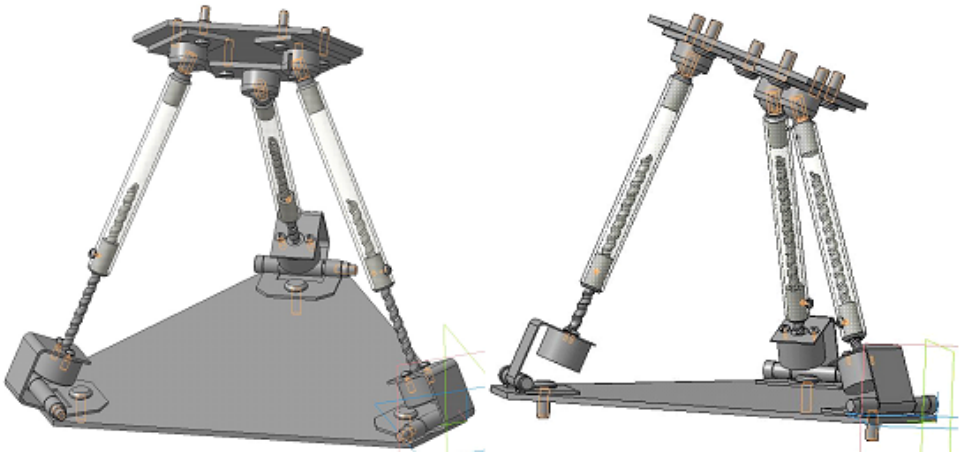


Рис. 6. Модель трипода

При проектировании трипода, была поставлена задача обеспечить его функциональность и технологичность. В триподе применены три биполярных двигателя PL15S-020. Для предотвращения проворачивания цилиндрической направляющей в шаровом шарнире необходимо обеспечить требуемую силу трения через регулируемый натяг в шарнире [4].

В ходе работы были выявлены определяющие параметры работы привода: 1 шаг = 0,223 мм; 1 мм = 4,483 шага, погрешность позиционирования из-за дискретности шагов равна половине шага – 0,111 мм.

Таким образом, разработана система управления шаговыми двигателями. В ходе работы усовершенствован контроллер униполярных шаговых двигателей. Он стал совместим с унифицированным форматом передачи сигналов шаг/направление. Также разработана программа управления шаговыми двигателями с компьютера. Она способна управлять тремя и менее униполярными или биполярными двигателями. Для отработки процессов управления создана модель трипода с приводами линейного перемещения на биполярных шаговых двигателях.

Библиографические ссылки

1. Крайнев А. Ф. Идеология конструирования. М. : Машиностроение, 2003.

2. Пестериков А. А. Устройство ориентации лепестков рефлектора космического телескопа «Миллитрон» // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем : материалы науч.-техн. конф. / ОАО «ИСС». Железногорск, 2011. С. 211–212.

3. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления : пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1987.

4. Мирзаев Р. А. Разработка системы управления для механизмов параллельной кинематики // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем : материалы науч.-техн. конф. / ОАО «ИСС». Железногорск, 2011. С. 258–260.

5. Махов А. А. Моделирование механических систем с помощью пакета расширения SimMechanics [Электронный ресурс] // Экспонента.ру : сайт. 2009. URL: http://exponenta.ru/educat/systemat/mahov/simmechanics.asp (дата обращения 18.12.2010).

6. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. М. : Машиностроение, 2007.

7. Авраменко Д. С. Печатные платы контроллера VRI-CNC [Электронный ресурс] // Самодельный станок ЧПУ : сайт. 2008. URL: http://www.vri-cnc.ru/ modules.php?name=News&file=article&sid=9 (дата обращения 15.11.2009).

8. Мирзаев Р. А. Разработка управляющей программы для униполярного шагового двигателя // Молодежь, техника, космос : сб. тез. докл. II Общерос. молодежной науч.-техн. конф. / Балтийский гос. техн. ун-т. СПб., 2010. С. 249–250.

R. A. Mirzaev, N. A. Smirnov

DEVELOPMENT OF ELEMENTS OF CONTROL OF MECHANISMS OF PARALLEL STRUCTURES

Aspects of control of devices of parallel kinematics are considered. The control system of stepper motors is created. The controller of stepper motors is improved, the program of control for bipolar and unipolar motors is developed.

Keywords: devices of parallel kinematics, the controller, a control system, stepper motors, mechatronics.

© Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А., 2011

УДК 629.78.023

М. М. Михнев, Н. Н. Ишенина, В. Н. Наговицин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЛЕЕВОГО ШВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ

Представлены критерии прочности клеевого соединения «обшивка – сотовый заполнитель». Проведен расчет теоретической высоты клеевой галтели, необходимой для обеспечения требуемой прочности клеевого соединения с учетом особенностей конструкции изготавливаемых сотовых панелей.

Ключевые слова: сотовая панель, клеевой шов, критерии прочности.

Создание рациональных конструкций, обладающих комплексом требуемых свойств, низкой материалоемкостью, высокой жесткостью и геометрической стабильностью связано с поиском и реализацией новых конструктивно-технических решений. Увеличение длительного срока активного существования современных КА (не менее 10 лет) потребовало изменений традиционной-герметичной схемы компоновки КА на негерметичную схему. В связи с этим и с учетом необходимости сокращения сроков создания КА и уменьшения риска актуальным и целесообразным является разработка и запуск модификации космических аппаратов на базе, создаваемых в рамках Федеральной космической программы, унифицированной космической платформы негерметичного исполнения, обеспечивающей ресурс КА до 10…15 лет.

В качестве примера можно привести единую термостатированную силовую платформу модуля полезной нагрузки (МПН), представленную на рис. 1. Основная часть приёмо-передающей аппаратуры: ретранслятор, антенны, механические блоки поворота антенн, волноводы, кабели МПН монтируются на платформе, которая воспринимает все факторы силовых воздействий от элементов ретранслятора и обслуживающих его систем, принимая на себя всё тепло, выделяемое приборами КА, а также факторы космического пространства.

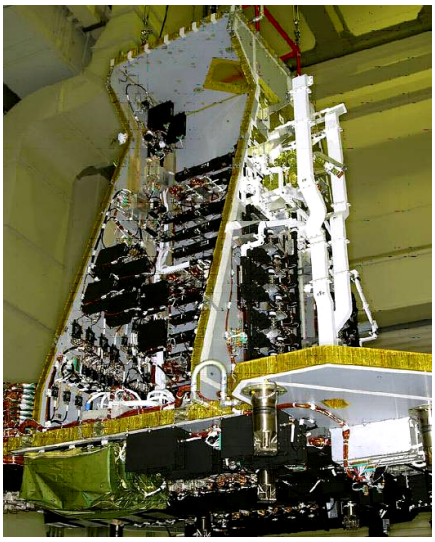


Рис. 1. Общий вид модуля полезной нагрузки современного КА безконтейнерного типа

Описанию методов расчета трехслойных конструкций на прочность и устойчивость посвящено достаточно большое количество научных работ, не менее подробно рассмотрены и вопросы производства, однако получение стабильной прочности клеевого соединения сотовой панели (СП) с обеспечением высоких точностных параметров (плоскостность панели не более 0,1/200×200 мм) является сложной технологической задачей, на практике зависящей от ряда факторов. Фактически для получения прочного клеевого соединения необходимо получить оптимальную величину приливов клея к торцам сотового заполнителя в виде галтелей.

Практика изготовления СП в ОАО «ИСС» показала достаточно большой диапазон прочностных характеристик испытуемых образцов-свидетелей. Выявление и исследование существующих факторов, влияющих на прочность клеевого соединения, позволит более точно управлять процессом полимеризации клеевого соединения, а следовательно, повысить качество изготовления СП.

Получение стабильных прочностных характеристик клеевого соединения является сложной задачей, которая может быть решена при обеспечении факторов, влияющих на качество клеевых соединений сотовых панелей:

– подготовка поверхности входящих деталей и сборочных единиц;

– качество клеевых материалов;

– размерная точность входящих элементов;

– материал оснастки для склеивания и её геометрическая точность;

– режимы полимеризации (температура, давление, скорость изменения температуры, продолжительность полимеризации).

Схема основных факторов, влияющих на качество клеевого соединения, представлена на рис. 2.

Образование клеевых галтелей объясняется поверхностным натяжением клея после его перехода в жидкое состояние и подъемом, основанным на явлении смачивания твердого тела жидкостью.

При склеивании многослойной сотовой конструкции необходимо обеспечить высокую прочность и надежность при не значительной площади контакта склеиваемых поверхностей. Основной задачей при разработке режимов склеивания сотового заполнителя с обшивками является получение у стенок ячеек приливов клея в виде плавных галтелей, прочно связывающих соты с обшивками (рис. 3). В процессе склеивания происходит перетекание части клея в пределах каждой ячейки от центра к стенкам, в результате чего у стенок образуются клеевые галтели.

Проведены замеры геометрических размеров клеевых галтелей на верхней и нижней обшивках образцов – свидетелей, изготовленных совместно со штатными сборочными единицами (табл. 1). Замеры проводились с целью проверки влияния силы тяжести на размеры клеевых галтелей при одновременной полимеризации клея на верхней и нижней обшивках сотопанели.

Таблица 1

Экспериментальные данные по геометрическим размерам клеевых галтелей для клея ВК-36РТ

Номер образца	Место проведения замеров	Размеры в мм		
		a	*b*	*h*
№ 1	На верхней обшивке На нижней обшивке	0,50 0,60	0,75 0,60	0,75 0,50
№ 2	На верхней обшивке На нижней обшивке	0,75 0,50	1,25 0,60	1,0 0,50
№ 3	На верхней обшивке На нижней обшивке	0,75 0,60	1,0 0,65	1,0 0,5
№ 4	На верхней обшивке На нижней обшивке	0,75 0,75	0,75 0,1	0,1 0,75

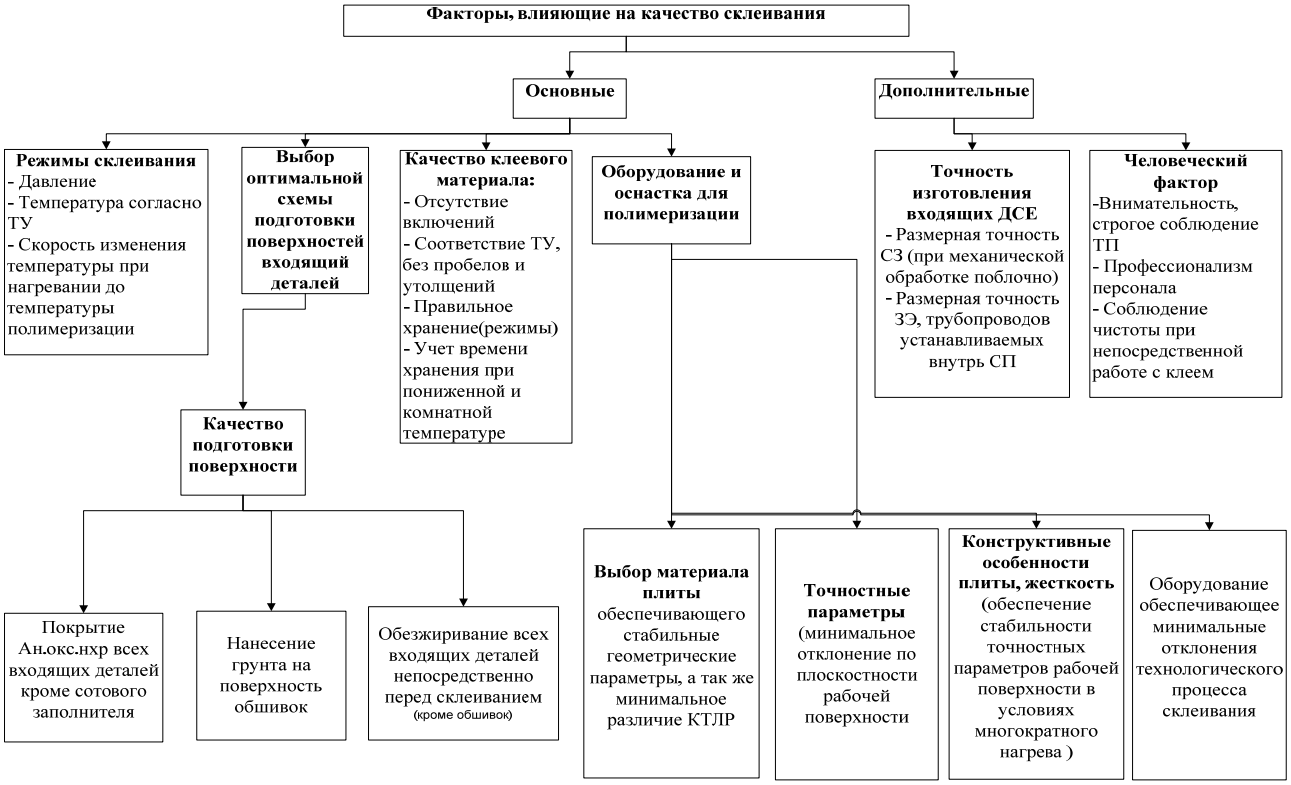


Рис. 2. Схема классификации факторов, влияющих на качество изготовления сотопанелей

На практике геометрические размеры галтелей отличаются от расчетных и в значительной степени зависят от толщины применяемой клеевой пленки, а также от погрешностей, связанных с некоторыми операциями технологического процесса.

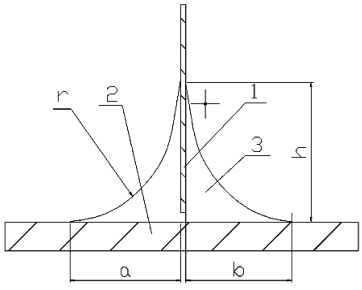


Рис. 3. Схема клеевой галтели:
1 – стенка ячейки сотового заполнителя; 2 – обшивка сотопанели; 3 – клеевая галтель; *h* – высота поднятия галтели; *a, b* – ширина основания клеевой галтели; *r* – радиус клеевой галтели

Прочность соединения сот с обшивкой в клеевом шве обеспечивается на трех основных участках, по которым действуют различные виды напряжений. В месте стыка сотового заполнителя с обшивкой по периметру ячейки наблюдаются напряжения неравномерного отрыва, в минимальном сечении клеевой галтели действуют нормальные и касательные напряжения. По линии контакта стенки сот с клеевым швом происходит нагружение, аналогичное нагружению при испытаниях клеевых соединений на сдвиг [1].

Сотовый заполнитель соединяется с несущими слоями склеиванием, поэтому должна быть обеспечена равнопрочность сотового заполнителя и клеевого соединения:

$$\sigma^{\text{пр}}_{\text{отр.н.с}} = \sigma_{\text{кл}} \geq \sigma^{\text{пр}}_{\text{рас.з}}.$$

Прочность сотовой панели при испытании на равномерный отрыв характеризуется величиной напряжений, приведенных к единице площади обшивки σ_p. Учитывая, что площадь обшивки, занимаемой одной ячейки сот, равна:

$$F_{\text{яч}} = 2{,}1a^2, \quad (1)$$

где a – размер стороны шестигранника.

Усилие равномерного отрыва, приходящееся на одну ячейку, составляет [1]:

$$Q_p = 2{,}1\sigma_p a^2, \quad (2)$$

где σ_p – напряжение отрыва, приведенное к единице площади обшивки.

Усилие равномерного отрыва, приходящееся на торец ячейки сотового заполнителя с учетом двойных ячеек сот (рис. 4), имеет вид:

$$Q_з = \sigma_p a \delta_c 8. \quad (3)$$

Следовательно, усилие равномерного отрыва в соединении «обшивка – сотовый заполнитель», учитывая выражение (3), будет иметь вид:

$$Q_{\text{отр}} = 2{,}1\sigma_p a^2 + \sigma_p a \delta_c 8. \quad (4)$$

Сдвиговое напряжение, действующие в клеевом шве, определяется следующим образом:

$$\tau_{\text{сд.кл.ш}} = \frac{Q_{\text{отр}}}{h \cdot L_{\text{к.ш}}} = \frac{2{,}1\sigma_p \cdot a^2 + \sigma_p \cdot a \cdot \delta_c \cdot 8}{h \cdot L_{\text{к.ш}}}, \qquad (5)$$

где h – размер клеевой галтели; $L_{\text{к.ш}}$ – периметр клеевого шва, приходящийся на одну ячейку.

Таким образом, расчетное значение размера клеевой галтели рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{2{,}1\sigma_p \cdot a^2 + \sigma_p \cdot a \cdot \delta_c \cdot 8}{\tau_{\text{сд.к.ш}} \cdot L_{\text{к.ш}}}. \qquad (6)$$

Расчетное значение высоты клеевой галтели для клеевого соединения «обшивка – сотовый заполнитель» для ячейки размером 2,5–1,23 мм, для ячейки размером 3,5–1,7 мм, для ячейки размером 6–2,86 мм.

Проведен анализ результатов прочности склеивания образцов клеевых соединений на сдвиг с применением клеевой пленки ВК-36РТ-260; ВК-36РТ-170; ВК-51; ВК-41 (табл. 2).

Результаты проведения сравнительного анализа средних значений прочности образцов – свидетелей склейки штатных сборочных единиц в количестве более 750 штук для пленочного клея ВК-36РТ на равномерный отрыв представлены в табл. 3.

Проведенные исследования процесса склеивания позволили уточнить технологические режимы полимеризации клеевого соединения «обшивка – сотовый заполнитель» с применением универсального оборудования, что обеспечило повышение качества клеевого соединения, увеличение стабильности получения высоких прочностных характеристик клеевого соединения на 15 %.

Результаты исследований реализованы при изготовлении сотовых панелей корпусов космических аппаратов безконтейнерного варианта серии Экспресс; Экспресс-1000; Экспресс-2000; AMOS; Телком; Ямал; Гланасс-К и др.

Библиографическая ссылка

1. Огурек О. Н., Стариков Л. М., Бондарь В. Г. О выборе параметров клея для сотовых конструкций // Вопросы оптимизации тонкостенных силовых конструкций. Харьков, 1977. Вып. 3. С. 74–79.

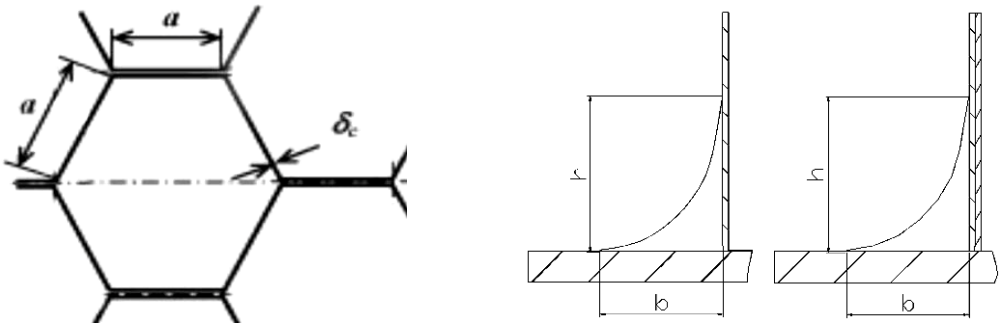


Рис. 4. Геометрические размеры клеевой галтели для сотового заполнителя с шестигранной формой ячейки

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на сдвиг

Марка клея	ВК-36РТ-260	ВК-36РТ-170	ВК-41	ВК-51
Предел прочности при сдвиге при температуре испытания 20 °С (МПа)	среднее значение – 39,55	среднее значение – 38,58	среднее значение – 35,04	среднее значение – 38,43

Таблица 3

Результаты испытаний образцов на отрыв

Обшивка	Размер ячейки сотового заполнителя a_c, мм	Толщина фольги δ_c, мм	ρ_o, кг/м^3	Предел прочности на отрыв $\sigma_{\text{отр.экс}}$, МПа
В95п.ч.АТ1-0,5	2,5	23	40	5,32
В95п.ч.АТ1-0,5	6	23	17	2,43
В95п.ч.АТ1-0,8	2,5	40	70	5,84
В95п.ч.АТ1-0,5	2,5	40	70	5,15
В95п.ч.АТ1-0,8	2,5	23	40	3,5
В95п.ч.АТ1-0,8	3,5	30	39	3,47
В95п.ч.АТ1-0,5	3,5	30	39	3,53

M. M. Mikhnev, N. N. Ishenina, V. N. Nagovitsin

DETERMINATION OF THE ADHESIVE-BONDED JOINT PARAMETERS DURING HOHEYCOMB PANELS MANUFACTURING

The paper covers the strength criteria of adhesive joint skin jacket – honeycomb filler.

The calculation of the theoretical height of the adhesive fillet which is necessary for the required strength of adhesive joint,based on structural peculiarities of manufactured honeycomb panels, is presented.

Keywords: honeycomb panel, adhesive-bonded joint, strength criteria.

© Михнев М. М., Ишенина Н. Н., Наговицин В. Н., 2011

УДК 66.097.5

М. М. Симунин, С. В. Хартов, И. В. Немцев, А. В. Шиверский, А. С. Воронин

МОРФОЛОГИЯ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ*

В качестве средства формирования субстрата для синтеза углеродных нанотрубок разработана экспериментальная технология модификации анодного оксида алюминия углеродными нанотрубками. Рассмотрена морфология пористого анодного оксида алюминия на промежуточном этапе формирования активного нановорсистого материала.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, пористый оксид алюминия, каталитические субстраты, наномембраны.

Углеродные нанотрубки (УНТ) является весьма распространённым материалом в электронной технике [1]. Наибольших успехов в этом вопросе удалось достичь в эмиссионной технике [2]. К сожалению, плотный «лес» углеродных нанотрубок представляет собой однородную эмитирующую поверхность уже на сравнительно небольших расстояниях от концов нанотрубок, поэтому синтез направленных, удалённо отстоящих нанотрубок является актуальной научной задачей. Кроме того, получение направленных углеродных нанотрубок связано с рядом технологических затруднений, например, введения направляющего поля или прецизионного контроля скорости и однородности потока парогазовой смеси в процессе роста УНТ. Следует отметить, что получение массива раздельных вертикальных углеродных нанотрубок важно также для создания мембран нового типа – активных наномембран, в частности, НЭМС-мембран, в которых каждая нанопора содержит 2 независимых электрода (в случае НЭМС-мембран один из электродов способен контролируемо изменять своё механическое состояние). Данный подход является одним из приложений активного нановорсистого материала, концепция и технология которого развивается авторами [3].

Перспективным способом получения массива нанотрубок, удовлетворяющего выдвигаемым требованиям, является синтез направленных нанотрубок в порах анодного оксида алюминия. В этом случае одновременно разрешаются обе вышеупомянутые проблемы. Таким образом, исследование морфологии пористого анодного оксида алюминия (ПАОА), модифицированного нанотрубками, представляется актуальной научной задачей.

Методика получения образцов. Образцы 1-го типа представляют собой ПАОА с углеродными нанотрубками в порах и на поверхности. Их формирование производилось следующим методом. Фольга алюминия марки А0 подвергалась анодированию в щавелевом электролите в течение 40 мин, в гальваностатическом режиме при токе 70 мА. Анодирование приводило к образованию 15 мкм слоя пористого анодного оксида. Полученный ПАОА напитывался прекурсором катализатора роста углеродных нанотрубок [4], после чего производился их синтез методом каталитического пиролиза этанола [5].

Образцы 2-го типа представляют собой ПАОА только с углеродными нанотрубками в порах, которые были подтравлены жидкостным методом с целью обнажить УНТ. Образец получался методом, аналогичным 1 типу, однако после синтеза УНТ с поверхности ПАОА механически удалялись нанотрубки, таким образом, оставлялись только нанотрубки в порах, и затем проводилось травление ПАОА в CrO_3–H_3PO_4–травителе.

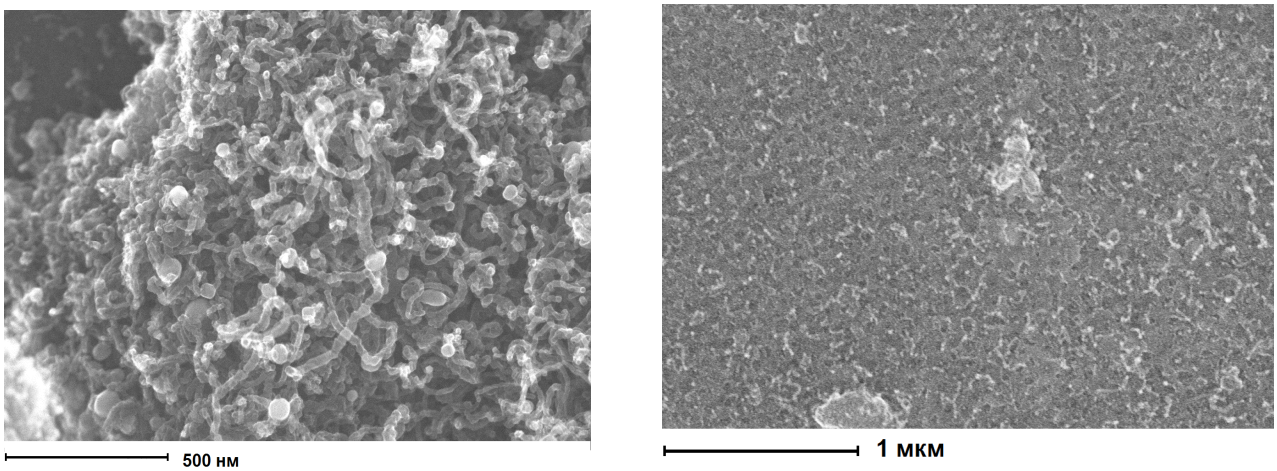
*Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Методика исследования образцов. Морфология поверхности исследовалась методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) в режиме вторичных электронов на микроскопе Hitachi S5500 по методике [6]. В процессе пробоподготовки образцы проявили высокую механическую прочность и триботехническую стойкость, в связи с этим образцы готовились стандартными для электронной микроскопии методами механической обработки материалов.

Результаты исследования. РЭМ-исследования показали, что поверхность образцов 1 типа (рис. 1) представляет собой плотный сплетенный слой углеродных нанотрубок (рис. 1, *а*), который обусловлен остаточным катализатором, образовавшимся из прекурсора на поверхности ПАОА, но не попавшем в поры. На поверхности образца были найдены участки разрыва слоя углеродных нанотрубок (рис. 1, *б*), под которыми видны поры ПАОА с углеродными нанотрубками внутри.

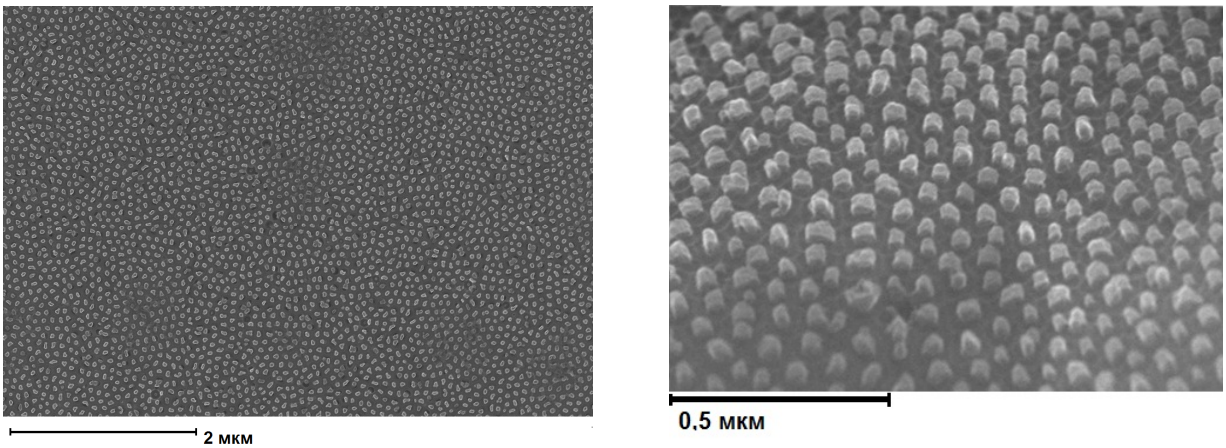
Диаметр ячеек пор оксида алюминия составляет величину порядка 100 нм, в то же время диаметр самих пор в ячейках оксида алюминия составляет 30–50 нм. Диаметры пор в оксиде алюминия коррелируют с диаметрами углеродных нанотрубок, которые также находятся в диапазоне 30–50 нм. Очевидно, что диаметр пор определяет диаметр частицы катализатора, которая в ней формируется из прекурсора. В свою очередь, известно, что диаметра частиц катализатора определяет диаметр нанотрубок [7], таким образом, диаметр пор анодного оксида алюминия определяет диаметр нанотрубок.

Образцы 2 типа (рис. 2) представляют собой массив отдельностоящих углеродных нанотрубок, изолированных друг от друга стенками ячеек ПАОА (рис. 2, *а*). РЭМ-изображение хорошо указывает на то, что диаметр углеродных нанотрубок строго совпадает с диаметром пор, в которых они находятся и полностью их заполняют.



а *б*

Рис. 1. Вид поверхности образца нановорсистого материала на промежуточном этапе формирования, РЭМ-изображения: *а* – сплетенный слой углеродных нанотрубок; *б* – углеродные нанотрубки с ячейками пор



а *б*

Рис. 2. Вид поверхности образца нановорсистого материала на промежуточном этапе формирования, РЭМ-изображения: *а* – вид сверху; *б* – под углом 30°

Жидкостное травление ПАОА привело к оголению УНТ, которые находились в порах (рис. 2, *б*). Аспектное соотношение полученных остриёв можно оценить величиной порядка единицы.

Дальнейшее травление с целью удлинения торчащих остриёв УНТ приводит к появлению каверн в материале ПАОА, что лишает его однородности, продемонстрированной на рис. 2.

Модификация ПАОА углеродными нанотрубками приводит к появлению их в каждой поре, что может быть использовано для формирования отдельностоящих одноострийных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок. Касательно создания в рамках данного подхода мембран нового типа – активных наномембран, можно отметить следующее. Достигнутые результаты позволяют приступить к следующему этапу, предполагающему переход от несквозных НЭМС-пор к монослою сквозных НЭМС-пор.

Планируемые работы включают разработку технологической операции локального растрава диэлектрической матрицы вдоль углеродных нанотрубок, реализацию метода саморегуляции диаметра выходных отверстий сквозных пор, разработку техпроцесса формирования несущей мембраны с микрометровыми порами, обеспечивающей механическую прочность монослоя НЭМС-пор. К настоящему моменту реализуемость эффектов, лежащих в основе указанных операций, подтверждена авторами экспериментально.

Библиографические ссылки

1. Anantram M. P. Leonard F. Physics of carbon nanotube electronic devices // Reports on progress in physics / Institute of Physics Publishing. 2006. № 69. P. 507–561.

2. Field deployment of a portable X-ray diffraction / X-ray flourescence instrument on Mars analog terrain / P. Sarrazin [et al.] // Powder Diffraction. 2005. Vol. 20. P. 128–133.

3. Хартов С. В. Активный метаматериал на основе интегральных НЭМС-структур // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 49–53.

4. Комаров И. А., Симунин М. М. Формирование наночастиц катализатора для роста углеродных нанотрубок в задачах электроники // Микроэлектроника и Информатика : тез. докл. М. : МИЭТ, 2008. С. 11.

5. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М. Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза из газовой фазы этанола // Химическая технология. 2007. № 2. С. 58–62.

6. Исследование углеродного наноматериала методами атомно-силовой и электронной микроскопии / И. И. Бобринецкий [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2007. № 4. С. 3–6.

7. Microscopic mechanisms for the catalyst assisted growth of single-wall carbon nanotubes / J. Gavillet [et al.] // Carbon. 2002. № 40. P. 1649–1663.

M. M. Simunin, S. V. Khartov, I. V. Nemtsev, A. V. Shiverskiy, A. S. Voronin

MORPHOLOGY OF POROUS ANODIC ALUMINUM OXIDE MODIFIED BY CARBON NANO-TUBES

The experimental technology of modification of anode oxide of aluminum by carbon nano-tubes is developed. The morphology of porous anode of aluminum oxide at the intermediate stage of formation of active nano-fiber material is considered.

Keywords: carbon nanotubes, porous aluminum oxide, catalytic substrates, nanomembranes.

© Симунин М. М., Хартов С. В., Немцев И. В., Шиверский А. В., Воронин А. С., 2011

УДК 532.5.032

П. Н. Смирнов, А. А. Кишкин, Д. А. Жуйков

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОЛОСТИ ДИСКОВОГО НАСОСА*

Рассматривается подход к построению математической модели дискового насоса трения путем разложения его гидравлического тракта на отдельные структурно-функциональные участки. На основе выражений для напряжений трения, полученных из уравнений импульсов турбулентного пространственно-пограничного слоя, приведены решения уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости в каждом из участков.

Ключевые слова: дисковый насос, напряжения трения, уравнения движения, математическое моделирование.

Дисковые насосы представляют собой простейшие турбомашины, в которых рабочему телу сообщается энергия за счет работы кориолисовых сил в форме сил терния. Основным элементом дискового насоса является расположенное в корпусе колесо, состоящее из нескольких дисков, скрепленных между собой. Дисковые насосы имеют ряд преимуществ по сравнению с лопастными машинами, а в некоторых областях они являются единственными работоспособными [1]. Учитывая, что дисковые насосы обладают исключительными антикавитационными свойствами, что позволяет более эффективно перекачивать двух- и трехфазные среды, имеют низкий уровень шума, они получили широкое применение в нефте- и горнодобывающей, химической, пищевой промышленностях, медицине. Кроме того, дисковые насосы эффективно работают в области малых коэффициентов быстроходности (при малых объемных расходах и высоких напорах), что в сочетании с антикавитационными качествами определяет их применение в энергосистемах малой мощности (< 100 кВт), использующих фазовый переход рабочего тела: паротурбинные генераторы на низкокипящем рабочем теле, системы терморегулирования различного назначения и т. п.

Для моделирования течения в рабочей полости дискового насоса целесообразно выделить структурно-функциональные участки гидравлического тракта, на которых реализованы различные типы течения. Причем течение на каждом участке условно делится на течение в ядре и пространственном пограничном слое (ППС) [2]. Решение задачи о течении в ППС сводится к определению напряжений трения на непроницаемых границах. Результатом решения задачи о течении в ядре потока являются поля угловой скорости вращения ядра потока и статического давления. Согласно принципиальной схеме дискового насоса (рис. 1), нами были рассмотрены два следующих участка: с течением между вращающимся диском и неподвижной стенкой (рис. 1, полость В) и с течением межу двумя вращающимися дисками (рис. 1, полость А). Рассмотрим каждый из этих участков по отдельности.

Рассмотрим элементарный объем жидкости в зазоре между двумя вращающимися дисками (рис. 2). На рисунке $\tau_{0\alpha}^{д1}, \tau_{0\alpha}^{д2}$ – окружные напряжения трения на первом и втором диске соответственно; $\tau_{0R\alpha}^{д1}, \tau_{0R\alpha}^{д2}$ – радиальные напряжения трения от окружной составляющей скорости на первом и втором диске соответственно; $\tau_{0Rp}^{д1}, \tau_{0Rp}^{д2}$ – радиальные напряжения трения от расходной составляющей скорости на первом и втором диске соответственно. Элементарный объем представляет собой кольцо на текущем радиусе высотой $dR \to 0$ и толщиной z_1 – нормальный зазор полости.

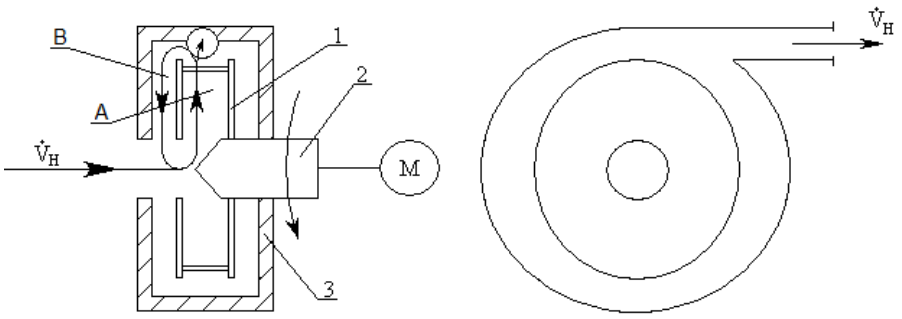


Рис. 1. Принципиальная схема дискового насоса:
1 – рабочее колесо; 2 – приводной вал; 3 – корпус; 4 – радиальное отводящее устройство; А – рабочая полость между двумя вращающимися дисками; В – полость между вращающимся диском и неподвижной стенкой

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (ГК № П657 от 15.09.09 г.).

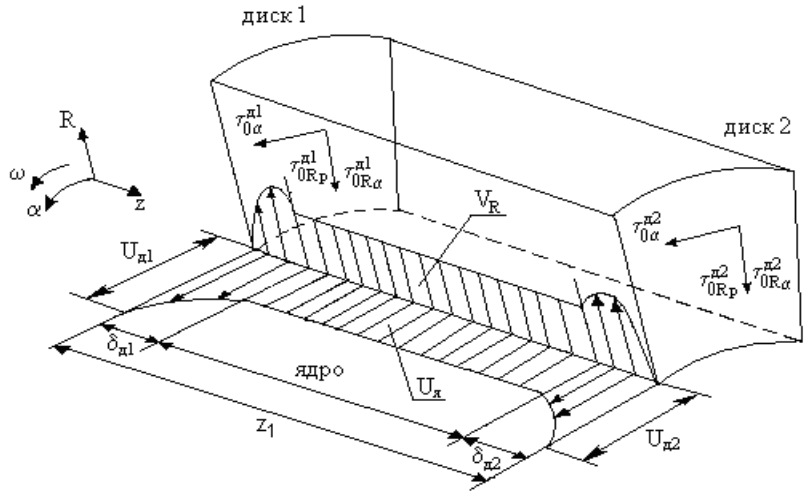


Рис. 2. Расчетная схема для полости между двумя вращающимися дисками

Бесконечно малый элементарный объем делится на три участка: течение в ППС около двух вращающихся дисков и течение ядра потока. Течение на первом диске происходит в толщине пограничного слоя $\delta_{д1}$, где окружная скорость жидкости изменяется от $U_{д1}$ – скорость вращения первого диска, до $U_я$ – скорость вращения ядра потока. Течение на втором диске происходит в толщине пограничного слоя $\delta_{д2}$, где окружная скорость жидкости изменяется от $U_я$ до $U_{д2}$ – скорость вращения второго диска.

Интегрированием системы уравнений импульсов турбулентного ППС в работе [3] получены составляющие напряжений трения на дисках в окружном и радиальном направлениях от окружной составляющей скорости:

– окружные напряжения трения на диске:

$$\tau_{0\alpha}^{дi} = 0,01256\rho\left(\omega_{дi} - \omega_я\right)^2 \times \times R^2\left(\frac{\left(\omega_{дi} - \omega_я\right)R\delta_{\alpha\,дi}^{**}}{\nu}\right)^{-0,25}, \quad (1)$$

где $\omega_{дi}$, $\delta_{\alpha дi}^{**}$, $i = \overline{1,2}$ – угловые скорости вращения и толщины вытеснения пограничного слоя для первого и второго дисков соответственно; $\omega_я$ – угловая скорость вращения ядра потока.

Поскольку радиальная составляющая напряжения трения формируется как окружным, так и расходным (радиальным) течением, выражение для радиального напряжения на диске имеет вид:

$$\tau_{0R}^{дi} = \tau_{0Rp}^{дi} + \tau_{0R\alpha}^{дi}, \quad (2)$$

где $\tau_{0R}^{дi}$, $i = \overline{1,2}$ – радиальная составляющая напряжения трения на первом и втором диске соответственно;

– радиальные напряжения трения от окружной составляющей скорости на диске:

$$\tau_{0R\alpha}^{дi} = \varepsilon_{дi}\tau_{0\alpha}^{дi}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{дi}$, $i = \overline{1,2}$ – тангенс угла скоса донной линии тока на первом и втором дисках соответственно;

– радиальные напряжения трения от расходной составляющей скорости (определяются классическими выражениями [4]) на диске:

$$\tau_{0Rp}^{дi} = 0,01256\rho V_R^2\left(\frac{V_R\delta_{\alpha\,дi}^{**}}{\nu}\right)^{-0,25}. \quad (4)$$

Полученные напряжения трения позволяют интегрировать уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрических координатах [5] в граничных условиях полости между двумя вращающимися дисками:

$$V_R\frac{\partial V_R}{\partial R} + \frac{U_я}{R}\frac{\partial V_R}{\partial\alpha} + V_z\frac{\partial V_R}{\partial z} - \frac{U_я^2}{R} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial R} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_R}{\partial z};$$
$$V_R\frac{\partial U_я}{\partial R} + \frac{U_я}{R}\frac{\partial U_я}{\partial\alpha} + V_z\frac{\partial U_я}{\partial z} + \frac{V_R U_я}{R} = -\frac{1}{\rho R}\frac{\partial p}{\partial\alpha} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_\alpha}{\partial z};$$
$$V_R\frac{\partial V_z}{\partial R} + \frac{U_я}{R}\frac{\partial V_z}{\partial\alpha} + V_z\frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_z}{\partial z}; \quad (5)$$
$$\frac{\partial V_R}{\partial R} + \frac{1}{R}\frac{\partial U_я}{\partial\alpha} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_R}{R} = 0,$$

где $U_я$, V_R, V_z, τ_α, τ_R, τ_z – проекции скорости и напряжения трения на оси цилиндрической системы координат α, R, z соответственно.

Преобразуем систему (5) с учетом следующих допущений:

– течение в осевой щели осесимметрично, члены с $\frac{\partial}{\partial\alpha}$ равны нулю;

– в осевом направлении (в направлении z) течение отсутствует, следовательно $\frac{\partial V_z}{\partial z}=0$, $\frac{\partial p}{\partial z}=0$, $V_z=0$; третье уравнение системы (5) обнуляется;

– свойства жидкости постоянны;

– жидкость течет по гидравлически гладким поверхностям;

– течение происходит при турбулентном режиме.

Получаем следующие выражения:

$$\begin{gathered} V_R\frac{dV_R}{dR}-\frac{U_{\text{я}}^2}{R}=-\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dR}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_R}{\partial z};\\ V_R\frac{dU_{\text{я}}}{dR}+\frac{V_RU_{\text{я}}}{R}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_\alpha}{\partial z};\\ \frac{dV_R}{dR}+\frac{V_R}{R}=0. \end{gathered} \tag{6}$$

Третье уравнение системы (6) – уравнение неразрывности – интегрируется как уравнение с разделяющимися переменными:

$$\int\frac{dV_R}{V_R}=-\int\frac{dR}{R}.$$

В результате получаем:

$$V_RR=\text{const}=V_{R_0}R_0=C_R, \tag{7}$$

где V_R – радиальная составляющая скорости в ядре потока; C_R – определяется граничными условиями на входе.

Сделанные допущения формулируют задачу в следующей постановке: поток разделяется на невязкое ядро, в котором члены не зависят от координаты z и тонкий пограничный слой, в котором $\tau=\int\frac{\partial\tau}{\partial z}dz=\tau\big|_{\tau_0}^{\tau_\delta}=\tau_\delta-\tau_0=-\tau_0$. Проинтегрируем первые два уравнения системы (6) по z в пределах от 0 до z_1 (причем в первом приближении не учитываем толщину вытеснения пограничных слоев). Подставив в полученную систему выражение (7), получаем:

$$\begin{gathered} z_1\left(\frac{C_R}{R}\frac{dU_{\text{я}}}{dR}+\frac{C_RU_{\text{я}}}{R^2}\right)=-\frac{\tau_{0\alpha}}{\rho};\\ z_1\left(-\frac{C_R^2}{R^3}+\frac{U_{\text{я}}^2}{R}\right)=\frac{z_1}{\rho}\frac{dp}{dR}+\frac{\tau_{0R}}{\rho}. \end{gathered} \tag{8}$$

Перепишем систему (8) с учетом касательных напряжений трения, при этом учтем $U=\omega_{\text{я}}R$, где $\omega_{\text{я}}$ – угловая скорость вращения ядра потока:

$$\begin{gathered} \left(\frac{C_R}{R}\frac{d\left(\omega_{\text{я}}R\right)}{dR}+\frac{C_R\omega_{\text{я}}}{R}\right)z_1=-\frac{1}{\rho}\left(-\tau_{0\alpha}^{\text{д1}}-\tau_{0\alpha}^{\text{д2}}\right);\\ \left(-\frac{C_R^2}{R^3}+\omega_{\text{я}}^2R\right)z_1=\frac{z_1}{\rho}\frac{dp}{dR}+\\ +\frac{1}{\rho}\left(\tau_{0R(\alpha)}^{\text{д1}}+\tau_{0R(\alpha)}^{\text{д2}}-\tau_{0R(p)}^{\text{д1}}-\tau_{0R(p)}^{\text{д2}}\right). \end{gathered} \tag{9}$$

Заменим постоянный параметр C_R на более употребительный параметр $\dot V$, учитывая (7):

$$V_{R_0}R_0=C_R;\ V_{R_0}=\frac{\dot V}{2\pi R_0z_1}.$$

Тогда

$$C_R=\frac{\dot V}{2\pi z_1}. \tag{10}$$

Выразим производную по $\omega_{\text{я}}$ из первого уравнения системы (9) с учетом (10). Согласно расчетной схеме при течении от центра к периферии получим:

$$\frac{d\omega_{\text{я}}}{dR}=\frac{2\pi}{\rho\dot V}\left(\tau_{0\alpha}^{\text{д1}}+\tau_{0\alpha}^{\text{д2}}\right)-\frac{2\omega_{\text{я}}}{R}. \tag{11}$$

Аналогично изложенному выше, выразим из второго уравнения системы (9) производную по p:

$$\begin{gathered} \frac{dp}{dR}=\rho\omega_{\text{я}}^2R+\frac{\rho\dot V^2}{4\pi^2n_0^2R^3}+\\ +\frac{1}{n_0}\left(\tau_{0R(\alpha)}^{\text{д1}}+\tau_{0R(\alpha)}^{\text{д2}}-\tau_{0R(p)}^{\text{д1}}-\tau_{0R(p)}^{\text{д2}}\right). \end{gathered} \tag{12}$$

Полученные выражения позволяют провести численное интегрирование и получить поле угловой скорости в ядре потока и поле статического давления, которые в достаточной мере позволяют оценить характер движения рабочего тела в полости между двумя вращающимися дисками.

Приращение по радиусу выбираем в зависимости от количества шагов расчетного алгоритма (требуемой точности):

$$\Delta R=\frac{R}{N},$$

где R – радиус диска; N – число шагов алгоритма.

Тогда радиус на i-м шаге: $R_i=R_{i-1}+\Delta R$, $i=\overline{1...N}$.

Далее для определения напряжений трения необходимо вычислить толщины потери импульса на дисках.

Толщина потери импульса на первом диске:

$$\begin{gathered} \left(\delta_{\text{д1}}^{**}\right)_i=\left(\delta_{\text{ид1}}^{**}\right)_i\frac{\left|\omega_{\text{д1}}-\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}\right|^2R_i^2}{\left|\omega_{\text{д1}}-\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}\right|^2R_i^2+\left(C_R/R_i\right)^2}+\\ +\left(\delta_p^{**}\right)_i\frac{\left(C_R/R_i\right)^2}{\left|\omega_{\text{д1}}-\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}\right|^2R_i^2+\left(C_R/R_i\right)^2}, \end{gathered} \tag{13}$$

где

$$\left(\delta_p^{**}\right)_i=0{,}036\left(\frac{C_R}{R_i\nu}\right)^{-0{,}2}\left|R_i-R_0\right|^{0{,}8}; \tag{14}$$

$\left(\delta_{\text{ид1}}^{**}\right)_i=k\left(\frac{\left|\omega_{\text{д1}}-\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}\right|}{\nu}\right)^{-0{,}2}R_i^{0{,}6}$, $k=0{,}362$ при $\omega_{\text{д1}}<\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}$, $k=0{,}3018$ при $\omega_{\text{д1}}>\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}$.

Толщина потери импульса на втором диске:

$$\left(\delta^{**}_{д2}\right)_i = \left(\delta^{**}_{ид2}\right)_i \frac{\left|\omega_{д2} - \left(\omega_я\right)_{i-1}\right|^2 R_i^2}{\left|\omega_{д2} - \left(\omega_я\right)_{i-1}\right|^2 R_i^2 + \left(C_R/R_i\right)^2} + \left(\delta^{**}_p\right)_i \frac{\left(C_R/R_i\right)^2}{\left|\omega_{д2} - \left(\omega_я\right)_{i-1}\right|^2 R_i^2 + \left(C_R/R_i\right)^2}, \quad (15)$$

$$\left(\delta^{**}_{ид2}\right)_i = k\left(\frac{\left|\omega_{д2} - \left(\omega_я\right)_{i-1}\right|}{\nu}\right)^{-0,2} R_i^{0,6},$$ k = 0,362 при $\omega_{д2} < (\omega_я)_{i-1}$, k = 0,3018 при $\omega_{д2} > (\omega_я)_{i-1}$.

Окружные напряжения трения и суммарные радиальные напряжения трения на дисках определяем по выражениям (1)–(4).

Новые значения на шаге интегрирования для угловой скорости ядра потока и статического давления в узлах R_i получим из выражений (11) и (12) соответственно при помощи модифицированного метода Эйлера с пересчетом.

Следующий структурно-функциональный участок, который необходимо рассмотреть – торцевой зазор между вращающимся диском и неподвижной стенкой (рис. 1, полость В). Фактически, характер течения в этой полости определяет утечки из основного гидравлического тракта дискового насоса терния. Рассмотрим элементарный объем жидкости в торцевом зазоре между неподвижной стенкой и вращающимся диском (рис. 3). На рисунке $\tau^{ст}_{0\alpha}, \tau^{д}_{0\alpha}$ – окружные напряжения трения на стенке и на диске соответственно; $\tau^{ст}_{0R\alpha}, \tau^{д}_{0R\alpha}$ – радиальные напряжения трения от окружной составляющей скорости на стенке и на диске соответственно; $\tau^{ст}_{0Rp}, \tau^{д}_{0Rp}$ – радиальные напряжения трения от расходной составляющей скорости на стенке и на диске соответственно. Элементарный объем представляет собой кольцо на текущем радиусе высотой $dR \to 0$ и толщиной z_1 – нормальный зазор полости. Бесконечно малый элементарный объем делится на три участка: течение в ППС около неподвижной стенки, течение в ППС у вращающегося диска и течение в ядре потока. Течение на неподвижной стенке происходит в толщине пограничного слоя $\delta_{ст}$, где окружная скорость жидкости изменяется от 0 до $U_я$. Течение на вращающемся диске происходит в толщине пограничного слоя $\delta_д$, где окружная скорость жидкости изменяется от $U_я$ до $U_д$ – скорость вращения диска.

Для решения системы уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости необходимо определить напряжения от расходного и вращательного течения жидкости [6].

Для полости между вращающимся диском и неподвижной стенкой проведем аналогичную процедуру, как и для полости между двумя вращающимися дисками. Путем интегрирования системы уравнений импульсов турбулентного (ППС), определяем окружные и радиальные напряжения трения от окружной и расходной составляющих скорости на диске и на стенке:

– окружные напряжения трения на стенке [6]:

$$\tau^{ст}_{0\alpha} = 0,01256\rho\omega_я^2 R^2 \left(\frac{\omega_я R\delta^{**}_{\alpha\,ст}}{\nu}\right)^{-0,25}; \quad (16)$$

– окружные напряжения трения на диске [3]:

$$\tau^{д}_{0\alpha} = 0,01256\rho\left(\omega_д - \omega_я\right)^2 \times R^2 \left(\frac{\left(\omega_д - \omega_я\right) R\delta^{**}_{\alpha\,д}}{\nu}\right)^{-0,25}. \quad (17)$$

Поскольку радиальная составляющая напряжения трения формируется как окружным, так и расходным (радиальным) течением, то выражение для радиального напряжения на стенке имеет вид:

$$\tau^{ст}_{0R} = \tau^{ст}_{0Rp} + \tau^{ст}_{0R\alpha}; \quad (18)$$

– радиальное напряжение трения на диске:

$$\tau^{д}_{0R} = \tau^{д}_{0Rp} + \tau^{д}_{0R\alpha}; \quad (19)$$

– радиальные напряжения трения от окружной составляющей скорости на стенке:

$$\tau^{ст}_{0R\alpha} = \varepsilon_{ст}\tau^{ст}_{0\alpha}; \quad (20)$$

– радиальные напряжения трения от окружной составляющей скорости на диске:

$$\tau^{д}_{0R\alpha} = \varepsilon_{д}\tau^{д}_{0\alpha}; \quad (21)$$

– радиальные напряжения трения от расходной составляющей скорости (определяются классическими соотношениями [4]) на стенке:

$$\tau^{ст}_{0Rp} = 0,01256\rho V_R^2 \left(\frac{V_R\delta^{**}_{\alpha\,ст}}{\nu}\right)^{-0,25}; \quad (22)$$

– радиальные напряжения трения от расходной составляющей скорости на диске:

$$\tau^{д}_{0Rp} = 0,01256\rho V_R^2 \left(\frac{V_R\delta^{**}_{\alpha\,д}}{\nu}\right)^{-0,25}. \quad (23)$$

Полученные напряжения трения позволяют интегрировать уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в заданных граничных условиях. При помощи этой системы дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в проекциях на цилиндрические оси координат и уравнения неразрывности, можно решить задачу о течении в ядре потока. Для этого введем допущения, аналогичные принятым при решении системы (5):

$$V_R\frac{dV_R}{dR} - \frac{U_я^2}{R} = -\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dR} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_R}{\partial z};$$
$$V_R\frac{dU_я}{dR} + \frac{V_R U_я}{R} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_\alpha}{\partial z}; \quad (24)$$
$$\frac{dV_R}{dR} + \frac{V_R}{R} = 0.$$

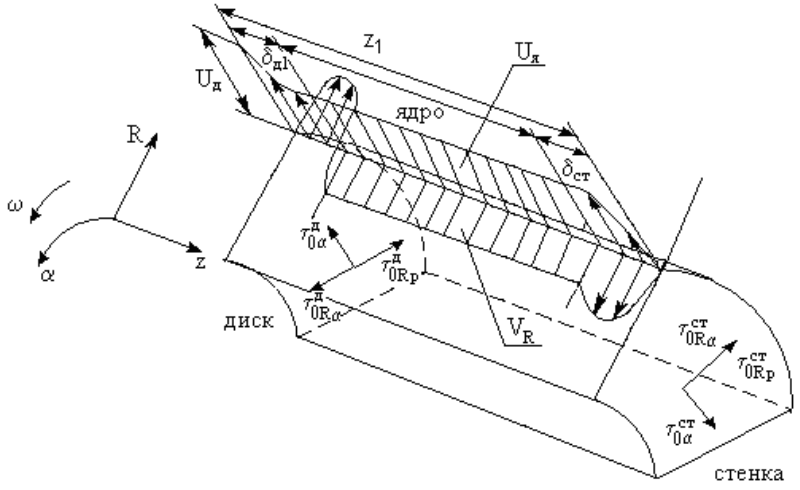


Рис. 3. Расчетная схема для полости между неподвижной стенкой и вращающимся диском

Проинтегрировав уравнения движения методами, аналогичными использованным при решении задачи течения между двумя вращающимися дисками, рассмотренными выше, и проведя соответствующие преобразования, получим (согласно расчетной схеме при течении от периферии к центру) дифференциальные уравнения для угловой скорости в ядре потока:

$$\frac{d\omega_{\text{я}}}{dR}=\frac{2\pi}{\rho\dot{V}}\left(\tau_{0\alpha}^{\text{д}}-\tau_{0\alpha}^{\text{ст}}\right)-\frac{2\omega_{\text{я}}}{R}. \qquad (25)$$

Статического давления:

$$\frac{dp}{dR}=\rho\omega_{\text{я}}^2R+\frac{\rho\dot{V}^2}{4\pi^2n_0^2R^3}+ \\ +\frac{1}{n_0}\left(-\tau_{0R(\alpha)}^{\text{д}}+\tau_{0R(\alpha)}^{\text{ст}}+\tau_{0R(p)}^{\text{д}}+\tau_{0R(p)}^{\text{ст}}\right). \qquad (26)$$

Полученные выражения позволяют вести численное интегрирование и получить поле угловой скорости в ядре потока и поле статического давления, необходимые для оценки характера движения рабочего тела в полости между неподвижной стенкой и вращающимся диском.

Далее для определения напряжений трения необходимо вычислить толщины потери импульса на диске и неподвижной стенке. Толщина потери импульса на диске определяется аналогично выражению (13). Определим толщину потери импульса на стенке:

$$\left(\delta_{\text{ст}}^{**}\right)_i=\left(\delta_{\text{ист}}^{**}\right)_i\frac{\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}^2R_i^2}{\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}^2R_i^2+\left(C_R/R_i\right)^2}+ \\ +\left(\delta_p^{**}\right)_i\frac{\left(C_R/R_i\right)^2}{\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}^2R_i^2+\left(C_R/R_i\right)^2}, \qquad (27)$$

где $\left(\delta_{\text{ист}}^{**}\right)_i=0,3018\left(\frac{\left(\omega_{\text{я}}\right)_{i-1}}{\nu}\right)^{-0,2}R_i^{0,6}$.

Компонента толщины потери импульса от расходной составляющей течения определяется по выражению (14).

Новые значения на шаге интегрирования для угловой скорости ядра потока и статического давления в узлах R_i получим из выражений (25) и (26) соответственно при помощи модифицированного метода Эйлера с пересчетом.

Таким образом, на основе выражений для напряжений трения выполнено интегрирование уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости в граничных условиях торцевой щели и полости между двумя вращающимися дисками, которые являются основными участками гидравлического тракта дискового насоса трения, что позволяет при необходимой экспериментальной верификации разработать расчетную математическую модель дискового насоса.

Библиографические ссылки

1. Мисюра В. И., Овсянников Б. В., Присняков В. Ф. Дисковые насосы. М. : Машиностроение, 1986.

2. Кишкин А. А., Черненко Д. В., Черненко Е. В. Уравнения импульсов трехмерного пограничного слоя // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2007. № 4. С. 35–41.

3. Краев М. В., Кишкин А. А., Майдуков А. В. Вращение диска в потоке, закрученном по закону твердого тела // Известия вузов. Авиационная техника. 1996. № 4. С. 42–47.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1969.

5. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. М. : Физматлит, 1963. Т. 2.

6. Вращение жидкости над неподвижным основанием по закону твердого тела / А. А. Кишкин, А. А. Зуев, Е. В. Черненко, П. Н. Смирнов // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2011. № 1. С. 126–131.

P. N. Smirnov, A. A. Kishkin, D. A. Zhuykov

MATHEMATICAL MODELING OF FLOW IN THE WORKING CAVITY OF THE DISC PUMP

An approach to constructing a mathematical model of the friction disk pump by means of expansion of its hydraulic path into individual structural-functional areas is considered. On the basis of the friction pressure obtained from the momentum equations of turbulent three-dimensional boundary layer, the solutions of the motion equations of viscous incompressible fluid in each of the sites are made and presented in the article.

Keywords: disc pump, pressure of friction, motion equations, mathematical model.

© Смирнов П. Н., Кишкин А. А., Жуйков Д. А., 2011

УДК 66.095.262-911.48; 539.25

О. В. Шабанова, А. В. Шабанов, И. В. Немцев

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ МОНОДИСПЕРСНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

Исследуются условия синтеза водных дисперсий сферических частиц полиметилметакрилата с узким распределением по размерам. Морфология частиц анализируется методом растровой электронной микроскопии.

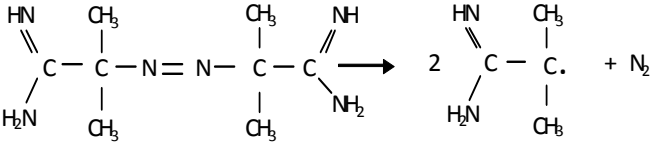
Ключевые слова: полимеризация метилметакрилата, сферические частицы полиметилметакрилата, монодисперсность, инициатор полимеризации, растровая электронная микроскопия.

Анализ научных публикаций показывает все возрастающий интерес к созданию технологий, основанных на способности монодисперсных сферических частиц к самосборке с формированием новых материалов с иерархической структурой, в частности, искусственных опалоподобных структур [1; 2]. Теоретические и экспериментальные работы позволяют утверждать, что трехмерные периодические опалоподобные структуры, проявляющие свойства фотонных кристаллов, составят основу микрофотоники и оптоэлектроники. Соответственно технологии получения монодисперсных сферических частиц, а также заполнения межсферических пустот различными материалами будут одним из важнейших направлений в нанотехнологии [3]. Перспективным достижением в этой области является получение молекулярных кристаллов на основе полимерных монодисперсных сфер, синтезированных путем полимеризации стиролов, акрилатов и метакрилатов и др.

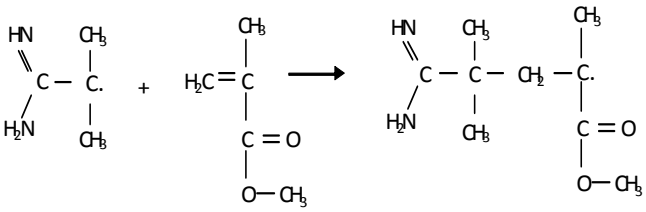
Целью данной работы было исследование методом растровой электронной микроскопии зависимости размеров и монодисперсности органических частиц полиметилметакрилата (ПММА) от условий их получения путем полимеризации метилметакрилата (ММА), эмульгированного в водной среде в присутствии инициатора (2,2’-азобис-2-метилпропионамидин).

Необходимое условие формирования макромолекул с узким молекулярно-массовым распределением (в том числе и блок-сополимеров) – это короткая фаза интенсивного множественного зародышеобразования, сменяющаяся медленным контролируемым ростом частиц с сохранением их числа [4].

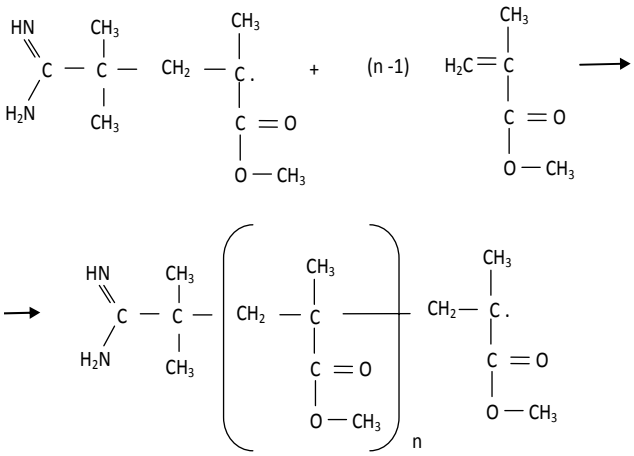
Процесс цепной радикальной полимеризации метилметакрилата можно условно разделить на три этапа: активация инициатора, реакция мономера с радикалом инициатора и рост молекулы, обрыв цепи полимера [5]. При нагревании инициатор разлагается с образованием активных радикалов, являющихся инициаторами реакции полимеризации ММА:



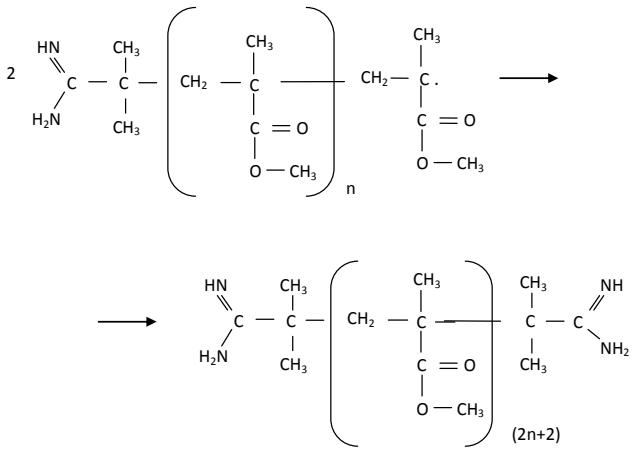
Радикал присоединяется к молекуле ММА и активирует ее, образуя начальное звено цепи полимера:



Затем к начальному звену присоединяются следующие молекулы ММА, идет рост цепи:



Обрыв цепи происходит при взаимодействии двух радикалов:



При проведении экспериментов по получению наноразмерной дисперсии ПММА в воде, после стабилизации температуры в реакторе с помощью термостата, проводились измерения колебаний температуры реакционной смеси в режиме динамического наблюдения (рис. 1).

После введения инициатора в реактор температура термостатирования не изменялась, реакция полимеризации идет с длительным медленным разогревом реакционной смеси по мере роста полимера и резким повышением температуры в конце реакции, когда идет обрыв цепи.

Полученные водные дисперсии ПММА исследовались с помощью электронного микроскопа S5500 фирмы Hitachi (имеет следующие основные характеристики: разрешение 0,4 нм, при ускоряющем напряжении 30 кВ; максимальное увеличение 2 000 000×; возможность изменять ускоряющее напряжение от 0,5 до 30 кВ с шагом 1 кВ и ток зонда от 1 до 10 мА).

Было установлено, что изменения концентрации ММА, количества вводимого инициатора, скорости перемешивания реакционной смеси и температурного режима в реакторе позволяют управлять размерами получаемых частиц. Так, в случае полностью идентичных условий проведения реакции, размеры сферических частиц ПММА из разных партий образцов практически одинаковы (рис. 2–3).

Их размер зависит только от концентрации мономера и от количества образующихся в результате распада инициатора активных радикалов.

Изменение температуры термостатирования реактора на 1…2 °С при прочих идентичных условиях приводит к существенному изменению размера частиц ПММА (рис. 4–5).

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана методика синтеза стабильных водных дисперсий сферических частиц ПММА с узким распределением по размерам. Получены образцы дисперсий с диаметром сфер от 100 до 500 нм (рис. 6.).

Узкое распределение по размерам сферических частиц в образце повышает воспроизводимость структуры наноматериалов на их основе и позволяет избежать образования дефектов при их самосборке, например, в коллоидные монокристаллы с регулярной гексагональной упаковкой сфер ПММА (рис. 7).

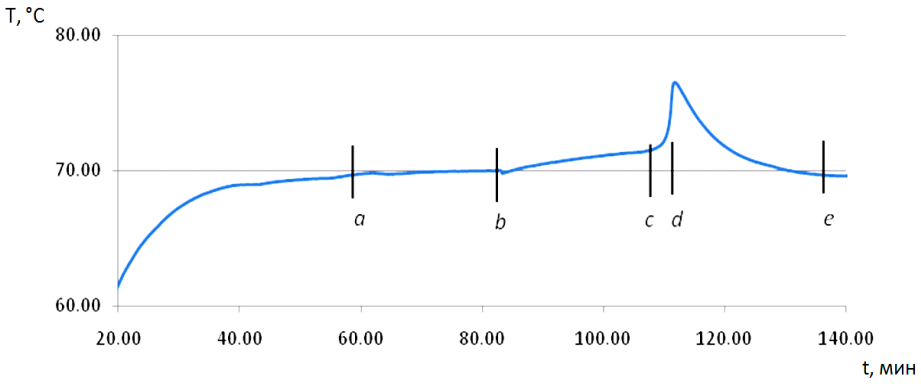


Рис. 1. Изменения температуры реакционной смеси в процессе полимеризации ММА:
ось абсцисс – время от начала эксперимента; ось ординат – температура реакционной смеси; *ab* – время установления в реакторе заданной температуры; *b* – момент введения инициатора полимеризации; *bc* – активация и рост цепи; *cd* – обрыв цепи; *de* – время остывания реакционной смеси до температуры реактора

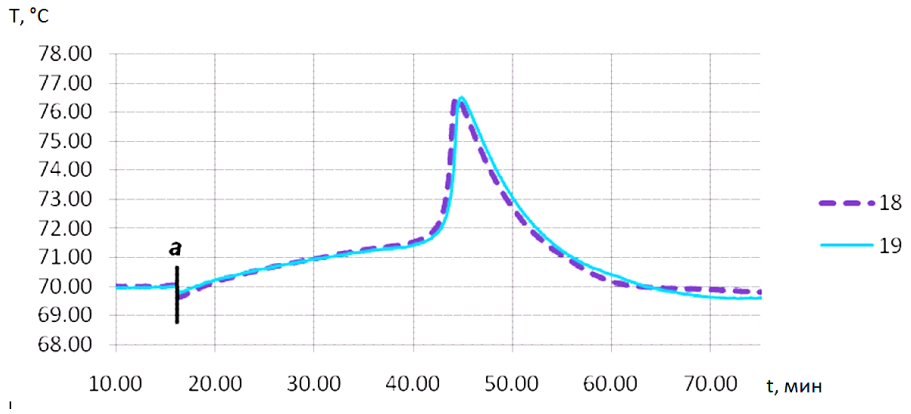
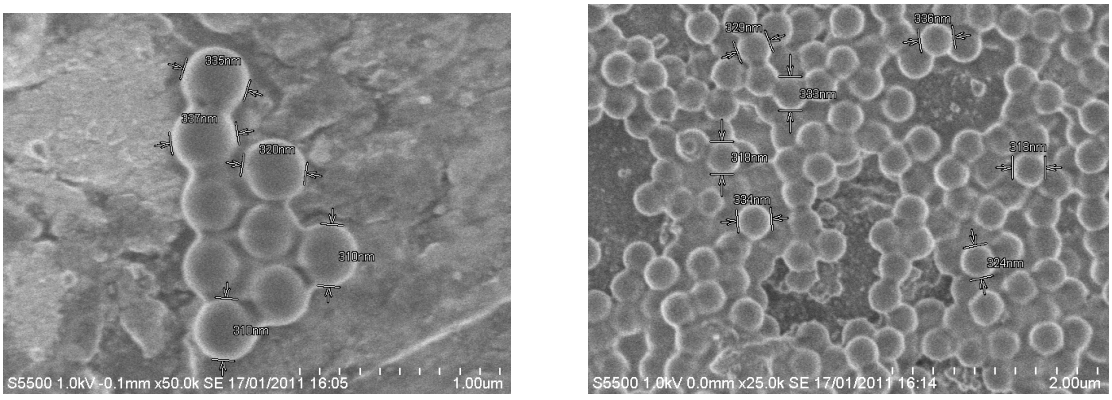


Рис. 2. Термограммы образцов № 18 и 19, полученных в идентичных условиях:
а – момент введения инициатора полимеризации



а *б*

Рис. 3. Размеры частиц ПММА:
а – образец № 18; *б* – образец № 19

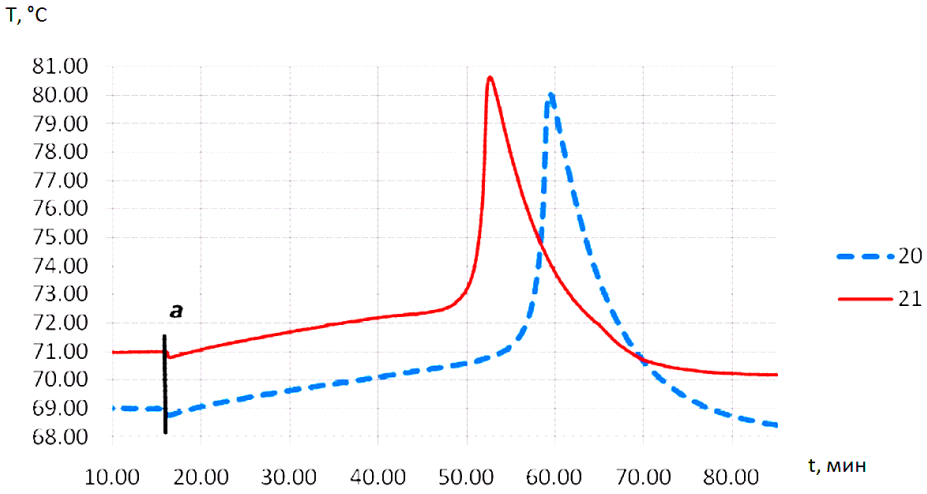
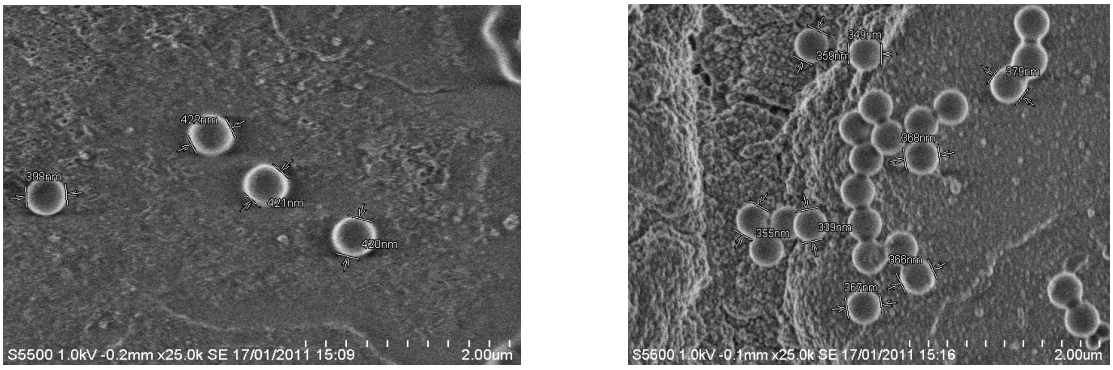


Рис. 4. Термограммы реакции полимеризации ПММА:
точка а – момент введения инициатора; --------- – полимеризация при температуре 69 °С;
——— – полимеризация при температуре 71 °С



а *б*

Рис. 5. Образцы частиц ПММА:
а – образец № 20; *б* – образец № 21

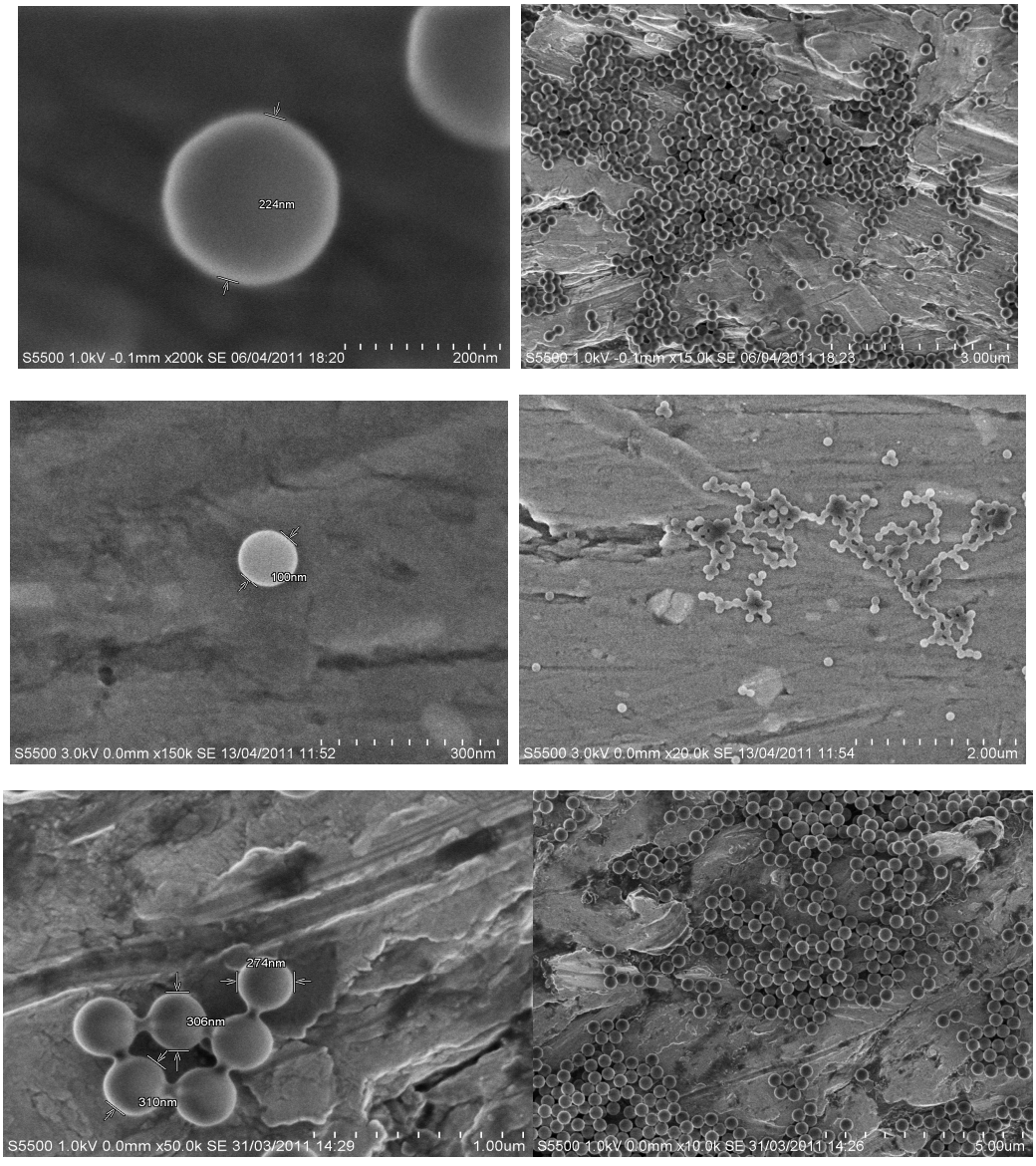


Рис. 6. Некоторые образцы полученных сферических частиц ПММА:
справа – общий вид; слева – отдельные сферы с указанием размера

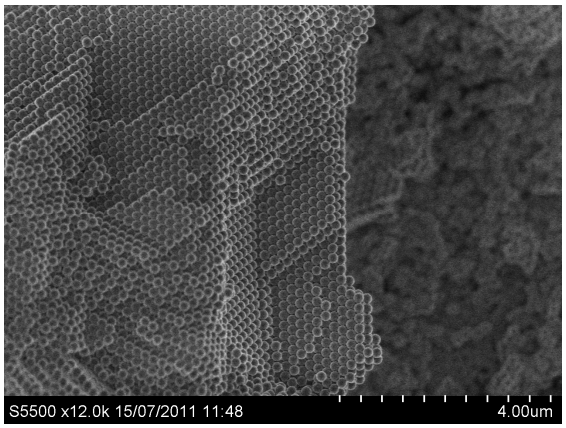


Рис. 7. Коллоидный монокристалл из сфер ПММА диаметром ~200 нм

Библиографические ссылки

1. The chemistry of nanostructured materials / Ed. Peidong Yang. World Scientific Co. New Jersey–London–Singapore, 2003.

2. Nanomaterials and supramolecular structures. Phisics. chemistry, and applications / Eds A. P. Shpar, G. V. Kurduimov, P. P. Gorbyk. Springer, Heidelberg–London–New York. 2009.

3. Высокомолекулярные соединения / А. Ю. Меньшикова и др. А 48. 2009.

4. Рамбиди Н. Г., Берёзкин А. В. Физические и химические основы нанотехнологии. М. : Физматлит, 2008.

5. Schroden R., Balakrishan N. Inverse opal photonic crystals. A laboratory guide / University of Minnesota. 2008.

O. V. Shabanova, A. V. Shabanov, I. V. Nemtsev

RESEARCH OF CONDITIONS OF SYNTHESIS OF NANOSCALE MONODISPERSE SPHERICAL PARTICLES OF POLY-METHYLMETHACRYLATE

Conditions of the synthesis of poly-methylmethacrylate nanoscale spherical particles with narrow distribution in the sizes dispersed in water have been investigated. The morphology of particles was analyzed with the help of a method of scanning electron microscopy (SEM).

Keywords: polymerization of methylmethacrylate, poly-methylmethacrylate spherical particles, monodispersion, the initiator of polymerization, scanning electron microscopy.

© Шабанова О. В., Шабанов А. В., Немцев И. В., 2011

Раздел
4

ЭКОНОМИКА

УДК 338.124.4(470)

Ю. Л. Александров, О. С. Демченко

РЕЙТИНГОВАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ ГОСУДАРСТВА

Проведена рейтинговая оценка эффективности стабилизационной политики России в период мирового финансово-экономического кризиса 2008–2009 гг. в сравнении с другими странами. Проанализированы особенности и проблемы отечественной экономической политики. Ориентируясь на успешно прошедший кризис страны, России необходимо подчинить свою стабилизационную политику целям роста и развития экономики.

Ключевые слова: кризис, экономика России, экономическая политика.

Для оценки эффективности стабилизационной политики государства разумно использовать обобщенное понятие экономической эффективности как отношения результата к затратам. В качестве результата можно рассматривать достигнутый уровень стабилизации динамики валового внутреннего продукта (ВВП), а в качестве затрат – расходы бюджета на противоциклические мероприятия. Кроме того, стабилизационную политику характеризует такой качественный параметр, как активность государства при ее реализации. Наилучшим моментом для проверки эффективности стабилизационных мероприятий является выраженный экономический кризис, так как неблагоприятная конъюнктура обнаруживает скрытые диспропорции и экономические проблемы. Мировой финансово-экономический кризис 2008–2009 гг. дает ценный материал для оценки и сравнения результатов стабилизационных мероприятий в различных странах.

Проведем оценку эффективности стабилизационной политики различных стран по следующим показателям:

– масштабы падения ВВП (прирост ВВП (отрицательный) в процентах на 2009 г.);

– темпы восстановления (прирост ВВП в процентах на 2010 г.);

– отношение затрат государственного бюджета на антикризисные меры к ВВП (в процентах на 2009 г.);

– активность государства при проведении стабилизационной политики.

Оценку проведем по пятибалльной шкале. Затем вычислим средний балл по четырем анализируемым параметрам, который и будет являться комплексной оценкой эффективности стабилизационной политики.

Для параметров, измеряемых в процентах, определим размах вариации имеющихся статистических данных и разделим его на пять равновеликих интервалов. «Наилучшему» интервалу присвоим балл «5» (для масштабов падения ВВП и затрат государственного бюджета – наименьшим значениям, для темпов восстановления – наибольшим), «наихудшему» – балл «1». Для качественного показателя воспользуемся шкалой оценивания (табл. 1).

Исходя из приведенной методики, полученная оценка носит относительный характер, т. е. стабилизационная политика страны, получившей наибольший балл, является лучшей по сравнению с другими рассмотренными странами. Методика не рекомендуется для использования на материале большого количества стран (более 25), так как в этом случае пяти интервалов группировки данных может оказаться недостаточно.

Данные по количественным показателям и значения коэффициентов вариации приведены в табл. 2, 3 [1].

Из приведенных данных следует, что страны целесообразно разделить на две группы: группа 1 – быстрорастущие страны и страны с переходной экономикой и группа 2 – развитые страны. Вариация значений показателей в каждой из групп значимо ниже, чем в целом по совокупности, хотя группа развитых стран является более однородной.

Таким образом, значения рассматриваемых показателей связаны с типом экономики, и для присвоения рейтинговых баллов интервалы оценивания необходимо разрабатывать отдельно для каждой из групп. В силу специфики их экономик, различных масштабов ВВП, в процентах от которого определяются показатели, оценивание по группам более корректно. При этом сам рейтинговый балл можно считать сопоставимым по странам из различных групп.

Необходимо отметить, что из расчетов исключено аномальное значение – затраты на антикризисные меры в процентах от ВВП США, равные 73,3 %.

Значение также является резко нетипичным для стран группы 2 и всей анализируемой совокупности. Сверхвысокие затраты на антикризисные меры в США вызваны необходимостью стабилизации ипотечного рынка данной страны, проблемы которого стали толчком для мирового финансово-экономического кризиса 2008–2009 гг.

Аномальное значение в дальнейшем не принимает участия в расчетах, ему присваивается рейтинг 0.

Таким образом, по количественным показателям странам присвоены рейтинговые баллы (табл. 4, 5).

Для анализа активности государства при проведении стабилизационной политики рассмотрим данные о темпах прироста бюджетных и монетарных показателей и ВВП России (табл. 6) [2; 3].

Таблица 1

Шкала оценивания параметра «активность государства при проведении стабилизационной политики»

Балл	Характеристика
5	Проводится активная и согласованная фискальная и монетарная политика
4	Проводится активная только фискальная или только монетарная политика
3	Государство реагирует только на глубокий кризис или значительный «перегрев» экономики
2	Противоциклическая политика не проводится
1	Государство не имеет возможности проводить противоциклическую политику из-за неуправляемости экономической системы, вызванной глубочайшим кризисом, неразвитостью экономики, стихийными бедствиями, техногенными катастрофами и т. п.

Таблица 2

Количественные параметры оценки эффективности стабилизационной политики стран группы 1, коэффициенты вариации

Показатель	Страны					
	Бразилия	Индия	Китай	Польша	Россия	Коэффициентт вариации (группа 1)
Кризисный спад реального ВВП, 2009 г. в % к 2008 г.	–0,64	9,10	9,10	1,70	–7,89	3,15
Темп восстановления реального ВВП, 2010 г. в % к 2009 г.	7,6	8,6	10,3	4,7	3,8	0,39
Антикризис / ВВП, в % 2009 г.	1,5	5,6	0,5	3,6	7,1	0,75

Таблица 3

Количественные параметры оценки эффективности стабилизационной политики стран группы 2, коэффициенты вариации

Показатель	Страны						Коэффициент вариации (общий)
	Германия	Франция	Канада	США	Япония	Коэф-т вариации (группа 2)	
Кризисный спад реального ВВП, 2009 г. в % к 2008 г.	–4,72	–2,63	–2,46	–2,63	–5,23	–0,38	–9,12
Темп восстановления реального ВВП, 2010 г. в % к 2009 г.	4	1,4	3,1	2,8	2,6	0,34	0,60
Антикризис / ВВП, в % 2009 г.	21,7	19,0	22	73,3	12,9	0,22	0,83

Таблица 4

Рейтинг стран группы 1

Показатель	Страны				
	Бразилия	Индия	Китай	Польша	Россия
Кризисный спад реального ВВП, 2009 г. в % к 2008 г.	–0,64	9,10	9,10	1,70	–7,89
Балл	3	5	5	3	1
Темп восстановления реального ВВП, 2010 г. в % к 2009 г.	7,6	8,6	10,3	4,7	3,8
Балл	3	4	5	1	1
Антикризис / ВВП, в % 2009 г.	1,5	5,6	0,5	3,6	7,1
Балл	5	2	5	3	1
Активность государства при проведении стабилизационной политики	3	3	3	3	3
Средний балл	**3,50**	**3,50**	**4,50**	**2,50**	**1,50**

Таблица 5

Рейтинг стран группы 2

Показатель	Страны				
	Германия	Франция	Канада	США	Япония
Кризисный спад реального ВВП, 2009 г. в % к 2008 г.	–4,72	–2,63	–2,46	–2,63	–5,23
Балл	1	4	5	4	1
Темп восстановления реального ВВП, 2010 г. в % к 2009 г.	4	1,4	3,1	2,8	2,6
Балл	5	1	4	3	3
Антикризис / ВВП, в % 2009 г.	21,7	19	22	73,3	12,9
Балл	1	2	1	0	5
Активность государства при проведении стабилизационной политики	5	5	4	4	3
Средний балл	**3,00**	**3,00**	**3,50**	**2,75**	**3,00**

Таблица 6

Темпы прироста бюджетных и монетарных показателей и ВВП России, в %

Темп прироста, %	Год			
	2006	2007	2008	2009
Реального ВВП	8,2	8,5	5,2	–7,8
Номинального ВВП	24,6	23,5	24,2	–6,0
Доходов консолидированного бюджета в ценах 2005 г.	14,6	11,7	8,0	–25,9
Расходов консолидированного бюджета в ценах 2005 г.	–8,6	21,4	9,8	4,2
Денежной массы М2	48,7	43,5	0,8	17,7

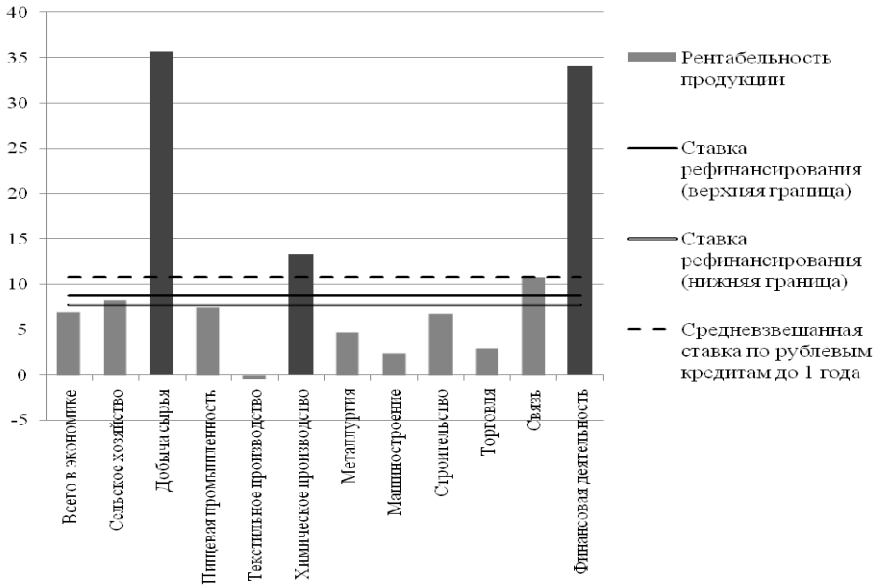


Рис. 1. Рентабельность продукции российских предприятий (2010 г.), %

Из приведенных данных видно, что динамика реальных доходов консолидированного бюджета повторяет динамику реального ВВП благодаря механизму встроенных стабилизаторов (коэффициент корреляции 0,99). Динамика реальных расходов консолидированного бюджета, напротив, не связана с динамикой реального ВВП (коэффициент корреляции 0,13). Таким образом, государство не использует бюджет как механизм стабилизационной политики. Действия государства носят скорее проциклический характер, так как в периоды роста расходы увеличиваются, и наоборот.

Динамика денежной массы также слабо связана с динамикой как номинального, так и реального ВВП, стабилизационная монетарная политика не проводится. Близкий к нулю (0,8 %) темп прироста денежной массы в 2008 г. был дополнительным фактором снижения доступности кредита и усугубления кризисной ситуации в экономике.

Для российской монетарной политики характерно постоянное превышение процентных ставок над уровнем рентабельности в реальном секторе, что способствует закреплению сырьевой структуры отечественной экономики (рис. 1). Кредит как источник финансирования капитальных вложений доступен лишь предприятиям топливно-энергетического и химического комплексов, а также финансовой сферы. И даже быстроразвивающаяся высокотехнологичная отрасль

связи по доходности едва достигает уровня банковских ставок (рис. 1) [2; 3]. Таким образом, степень монетизации экономики России необходимо признать недостаточной.

При этом существуют источники повышения денежного предложения, не используемые государством. Проанализируем структуру денежной программы Банка России. На 1 января 2011 г. Центробанк на каждый рубль денежной базы аккумулировал 1,6 руб. валютных резервов (рис. 2) [3]. Таким образом, государство искусственно занижало объем денежного предложения даже в сравнении с имеющимися валютными резервами.

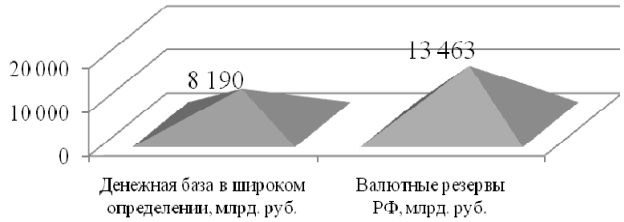


Рис. 2. Соотношение денежной базы и валютных резервов Банка России, данные на 01.01.2011

Анализируя приведенные статистические показатели, можно сделать вывод, что государство стремится к сбалансированности бюджета и количественному ограничению денежной массы в экономике и не проводит активную стабилизационную политику, за исключением случаев глубокого спада ВВП. Таким образом, активность государства при проведении стабилизационной политики, в соответствии со шкалой (см. табл. 1), оценивается в 3 балла.

Для сравнения рассмотрим некоторые аналогичные статистические данные по экономике США (табл. 7) [4].

Динамика реальных доходов консолидированного бюджета так же, как и для российских данных, повторяет динамику реального ВВП (коэффициент корреляции 0,99). Динамика реальных расходов также сильно связана с динамикой реального ВВП, однако эта связь отрицательная (коэффициент корреляции –0,92). Всё это говорит о проведении государством активной стабилизационной фискальной политики – повышении налогов и сокращении бюджетных расходов в фазе экономического роста и обратных действиях при спаде. Однако динамика денежной массы М2 значимо не связана с динамикой реального ВВП, т. е. противоциклической монетарной политики не проводится. В соответствии с разработанной шкалой (см. табл. 1), активность государства при проведении противоциклической политики оценивается в 4 балла.

Аналогично по базе статистических данных Всемирного банка оценивается активность властей других стран при проведении стабилизационных мероприятий. Для большинства рассматриваемых государств характерно отсутствие систематической стабилизационной политики, специальные мероприятия проводятся только в случае выраженного кризиса или «перегрева» экономики, что соответствует рейтинговому баллу 3.

По результатам расчетов, значимая связь управляемых государством макроэкономических показателей с динамикой реального ВВП отмечается только для Канады, Франции и Германии (табл. 8, 9) [1].

Для данных Канады характерна значимая прямая статистическая связь динамики налоговых доходов бюджета с динамикой реального ВВП (коэффициент корреляции 0,985) и значимая обратная связь динамики бюджетных расходов и реального ВВП (коэффициент корреляции –0,829), т. е. проводится противоциклическая фискальная политика. При этом в динамике денежной массы М2 не отмечается связи с динамикой реального ВВП ни в краткосрочном, ни в долгосрочном периоде, т. е. монетарной политики, направленной на стабилизацию, не проводится. Активность государства при проведении стабилизационной политики оценивается в 4 балла.

Таблица 7

Темпы прироста бюджетных и монетарных показателей и ВВП США, в %

Темп прироста, %	Год			
	2006	2007	2008	2009
Реального ВВП	2,7	1,9	0,0	–2,6
Номинального ВВП	6,0	5,4	2,2	–1,7
Доходов консолидированного бюджета в ценах 2005 г.	7,9	3,9	–5,2	–16,7
Расходов консолидированного бюджета в ценах 2005 г.	3,7	0,1	5,4	17,8
Денежной массы М2	6,0	6,1	9,8	3,4

Таблица 8

Темпы прироста бюджетных и монетарных показателей и ВВП Канады, в %

Темп прироста, %	Год			
	2006	2007	2008	2009
Реального ВВП	2,8	2,2	0,5	–2,5
Номинального ВВП	5,6	5,5	4,6	–4,5
Налоговых доходов бюджета в ценах 2005 г.	2,8	3,0	–4,9	–12,1
Реальных расходов бюджета на конечное потребление (без военных)	3,0	2,7	3,9	3,5
Денежной массы М2	12,6	–25,3	15,1	н/д

Таблица 9

Темпы прироста бюджетных и монетарных показателей и ВВП Германии, в %

Темп прироста, %	Год			
	2006	2007	2008	2009
Реального ВВП	3,4	2,7	1,0	–4,7
Номинального ВВП	3,8	4,6	2,0	–3,4
Налоговых доходов бюджета в ценах 2005 г.	4,3	6,7	–0,3	–1,9
Реальных расходов бюджета на конечное потребление (без военных)	1,0	1,6	2,3	2,9
Денежной массы М2	4,1	5,4	4,7	–1,3

Рис. 3. Алгоритм формирования и реализации стабилизационной политики

Для данных Германии характерна значимая прямая связь динамики денежной массы М2 (коэффициент корреляции 0,935) и налоговых доходов бюджета (коэффициент корреляции 0,822) с динамикой реального ВВП, а также обратная связь динамики бюджетных расходов и реального ВВП (коэффициент корреляции –0,891). То есть в стране проводится стабилизационная фискальная и монетарная политика, активность государства оценивается высшим рейтинговым баллом 5. Такой же вывод можно сделать по данным Франции.

Таким образом, получим сводный рейтинг стран по эффективности стабилизационной политики государства (табл. 10).

Рейтинг позволяет сделать следующие выводы:

1. Мировой финансово-экономический кризис 2008–2009 гг. лучше прошли развивающиеся страны. Наивысший балл присвоен Китаю. Кризис позволил данной стране укрепить свои позиции в мировой экономике.

2. Среди стран группы 1 лучшие результаты у тех, приоритетами экономической политики которых избраны рост и развитие экономики, а не стабилизация (Китай, Бразилия, Индия).

3. Развитые страны, кроме США, показали неплохие результаты (баллы 3,00–3,50), вероятно, за счет систематического проведения стабилизационной политики и принятых антикризисных мер.

4. Российская стабилизационная политика неэффективна, рейтинг нашей страны самый низкий из рассматриваемых – 1,50 баллов.

Таблица 10

Рейтинг стран по эффективности стабилизационной политики государства

Страны	Рейтинговые баллы
Китай	4,50
Бразилия, Индия, Канада	3,50
Германия, Франция, Япония	3,00
США	2,75
Польша	2,50
Россия	1,50

Ориентируясь на наиболее успешно прошедшие кризис страны своей группы, России необходимо подчинить цели стабилизации целям роста и развития

экономики (рис. 3). Для этого следует, в частности, отказаться от приоритетов ежегодного балансирования государственного бюджета и борьбы с инфляцией в пользу роста, развития и диверсификации экономики. Необходим программно-целевой подход к управлению экономическим развитием. В нашей стране должны быть разработаны программы роста, в которые стабилизационные мероприятия будут включены как подчиненный элемент.

Библиографические ссылки

1. База данных Всемирного банка [Электронный ресурс]. URL: http://www.data.worldbank.org.

2. Росстат – официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru.

3. Банк России – официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: http://www.cbr.ru.

4. U. S. Census Bureau [Электронный ресурс]. URL: http://www.census.gov.

Yu. L. Aleksandrov, O. S. Demchenko

THE RATING OF THE STATE STABILIZATION POLICY EFFECTIVENESS

The rating of the state stabilization policy effectiveness during the period of the world financial and economic crisis in Russia is presented, in comparison with other countries. The peculiarities and problems of domestic economic policy are analyzed. Geared to the experience of countries, which have passed the crisis successfully, Russia should dedicate its stabilization policy to the goals of growth and development of its economy.

Keywords: crisis, Russian economy, economic policy.

© Александров Ю. Л., Демченко О. С., 2011

УДК 330.322.3

Е. Ю. Алексеева

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРТФЕЛЯ СОЦИАЛЬНЫХ ИНВЕСТИЦИЙ

Сложившаяся экономическая система, современное состояние социальной сферы, обусловленное переходом к рыночным отношениям, и связанные с этим закономерности и тенденции развития социальной инфраструктуры требуют пересмотра принципов оценки эффективности социальных инвестиций.

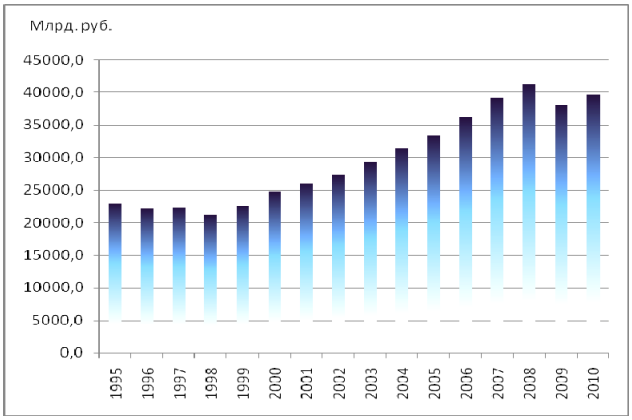
Ключевые слова: инструменты стратегического планирования, социальная сфера, инвестиционная деятельность, факторы, стратегии, показатели.

Экономические реформы, прошедшие в 1990-х гг., были направленны, в первую очередь, на формирование рыночного сектора, основой которого стали три элемента: либерализация, стабилизация и приватизация экономики. При этом изменения не коснулись социального сектора, все преобразования осуществлялись без должной оценки социальных последствий. В связи с этим все большую актуальность приобретает проблема снижения уровня обеспеченности социальными объектами. За последние десятилетия объекты социальной сферы практически не строились. Выделяемых средств для финансирования социальной сферы едва хватало на поддержание ее текущей деятельности. В результате происходило устаревание имеющейся социальной инфраструктуры. В связи с миграцией населения и демографическим спадом происходило изменение структуры потребителей социальных услуг, что вызвало несоответствие социальной инфраструктуры сложившейся структуре народонаселения.

Подтверждением вышесказанного может служить оценка состояния социальной сферы, основанная на таких показателях, как уровень обеспеченности, объемы капитального строительства в социальной отрасли, уровень износа основных фондов и динамика демографических изменений. Результаты анализа показали, что изменения структуры населения, связанные с внутренними миграционными процессами и демографическим спадом, привели к нерациональному использованию социальных объектов: в одних районах наблюдается недостаток в объектах социальной инфраструктуры, а в других – их избыток. Как уже отмечалась, происходящие изменения в стране, прежде всего, были направлены на экономические преобразования в области формирования рыночного сектора, средства на финансирование капитального строительства объектов социальной отрасли практически не выделялись. На развитие производственного сектора экономики было использовано 62 % всех видов инвестиций. Доля производственных инвестиций возрастала ежегодно, на эту величину, соответственно, сокращались капитальные вложения в развитие социальной сферы. Таким образом, минимальный уровень капитального строительства, наблюдающийся из года в год, привел нарастающим темпом к увеличению износа объектов социальной сферы. Вместе с тем, рост объема валового внутреннего продукта (ВВП) (см. рисунок), отражает положительную динамику экономического роста.

На графике виден рост объема ВВП, что свидетельствует о накоплении финансовой возможности государства в решении социальных задач. Таким об-

разом, уровень прироста ВВП указывает на необходимость управления финансами, выделяемыми на цели социального развития. При этом изменившиеся экономические условия требуют нового подхода к распределению средств между социальными отраслями. Это обусловливается тем, что выделяемых средств на развитие социальной отрасли по-прежнему недостаточно для покрытия дефицита в обеспеченности объектами социальной сферы.



Динамика производства ВВП

Таким образом, наиболее остро стоит задача более эффективного распределения ограниченных бюджетных средств между объектами социальной инфраструктуры. Для определения направлений инвестирования была проведена классификация объектов социальной инфраструктуры, характеризующихся одинаковыми условиями функционирования и развития. А также были определены факторы, определяющие развитие социальной сферы в регионе. В частности, были выявлены такие параметры, как динамика народонаселения, уровень объема финансирования, уровень износа объектов социальной сферы и др. В результате классификации были выделены объекты исследования, к числу которых относятся социальные отрасли, обеспечивающие деятельность в сфере образования, здравоохранения, культуры, спорта и предоставляющие социальные услуги. Данная классификация основана на признаках ОКВЭД и дополнена признаком наличия государственных гарантий по обеспечению.

Рыночная экономическая система определяет свои правила и принципы, регламентирующие хозяйственную деятельность субъектов и формирующие определенные нормы к экономическим сферам жизнедеятельности людей. Сложившаяся экономическая формация, современное состояние социальной сферы, обусловленное переходом к рыночным отношениям, и связанные с этим закономерности и тенденции развития социальной инфраструктуры требуют пересмотра принципов оценки эффективности социальных инвестиций.

Таким образом, ограниченность финансовых ресурсов, направляемых на цели социального развития, при имеющихся финансовых возможностях делает актуальным решение проблемы, связанной с необходимостью эффективного распределения бюджетных средств. А новые экономические условия и вызванные в связи с этим закономерности и тенденции развития социальной сферы формулируют задачу определения иных принципов, отвечающих особенностям инвестирования в социальную отрасль.

Изучение методологических основ оценки эффективности инвестиций в социальную сферу проводилось на основе анализа современных принципов оценки эффективности инвестиций. Изучение их содержания, безусловно, представляет теоретический и практический интерес, однако вряд ли может быть исчерпывающим с точки зрения формирования принципов оценки эффективности инвестирования социальной сферы в современных условиях. Вне всяких сомнений, существующие методологические разработки должны быть учтены, но состав принципов и их содержание, в первую очередь, определялся на основе учета существующих особенностей, выявленных закономерностей и поставленных целей развития социальной сферы [1].

С учетом специфики выделенных объектов были сформулированы принципы инвестирования в объекты социальной сферы, отражающие особенности и условия инвестирования в данную область. Содержание отдельных принципов конкретизировано с учетом выявленных закономерностей развития социальных отраслей, а также форм их проявления. В частности, были сформулированы следующие принципы:

1. Равенство субъектов региона – заключается в необходимости равноправного распределения объектов социальной сферы между населением различных территорий.

2. Эффективность использования – заключается в оптимальном (критерий представлен ниже) распределении выделяемых средств регионального бюджета для решения задач выравнивания и/или доведения до нормативного уровня обеспеченности объектами социальной сферы.

3. Прозрачность процедуры – предполагает использование единых методов и критериев оценки эффективности социальных инвестиций при решении задач распределения капитальных вложений.

4. Достоверность исходных данных – предполагает корректность предоставления исходных данных, имеющих количественное выражение, а также единые методы и стандарты оценки параметров состояния объектов социальной сферы.

5. Системность оценки – заключается в комплексном учете всей совокупности факторов, оказывающих влияние на эффективность осуществляемых капитальных вложений в объекты социальной сферы.

6. Адаптация – заключается в возможности использования имеющейся информации для решения задачи оценки эффективности инвестиций в социальную сферу на основе предполагаемых критериев и методов.

7. Соответствие системы показателей – заключается в возможности использования имеющейся инфор-

мации для решения задачи анализа уровня обеспеченности объектов социальной сферы на основе предполагаемых критериев и методов.

Сформулированные принципы подлежат учету как при решении задачи оценки эффективности социальных инвестиций, так и при распределении финансовых ресурсов между объектами социальной сферы.

Реализация предложенных принципов требует разработки инструментов принятия решения и, в частности, построения математической модели оптимального распределения инвестиций в условиях имеющихся бюджетных ограничений.

Для оценки эффективности распределения бюджетных инвестиционных ресурсов необходимо определить критерий, который бы позволил провести анализ эффективности распределяемых средств. В [2] показано, что традиционно оценка эффективности инвестиций связана с соизмерением затрат и результатов. Критериями при этом могут выступать чистая текущая стоимость, срок окупаемости, внутренняя норма доходности, максимум экономического или социального эффекта и др. Данные показатели разработаны с учетом деятельности коммерческих организаций, что не позволяет оценить эффективность использования инвестиций в социальной сфере.

Бюджетная эффективность как критерий, используемый государством, при финансировании социальной сферы также не позволяет оценить эффективность инвестиций, так как он является комплексным, что не дает выделить инвестиции в социальную сферу и не учитывает социальную эффективность. Экономические результаты социальных инвестиций не столь очевидны в отличие от инвестиций в реальный сектор экономики. Их измерение связано с необходимостью оценки мультипликатора, связывающего затраты в социальную сферу с приростом валового национального продукта.

Оценку эффективности инвестиций в определенный социальный объект можно выполнить исходя из предположения, что результатом может стать изменение показателя обеспеченности населения объектами социальной инфраструктуры. При этом превышение данного показателя над его нормативным значением не следует рассматривать в качестве результата, поскольку нормативный уровень определяет общественно необходимые затраты на обеспечение. Таким образом, в качестве критерия эффективности социальных инвестиций может быть принят показатель объема социальных услуг, необходимого для достижения им нормативного уровня обеспеченности, приходящийся на единицу вложений в объект социальной сферы.

Критерий эффективности инвестиций в социальную сферу может быть определен отношением прироста уровня обеспеченности объектов социальной сферы [3] к объему вложений:

$$K_{\text{соц.эфф.}ij} = \frac{g_{ij}}{S_{ij}}, \qquad (1)$$

где g_{ij} – прирост уровня обеспеченности j-го объекта i-й социальной сферы; S_{ij} – объем дополнительных вложений в j-й объект i-й социальной сферы.

В основе способа расчета критерия эффективности инвестиций лежит матрица выбора стратегии социальных инвестиций. Данная матрица представляет 4 квадранта, отвечающих различным уровням обеспеченности и объему финансирования. В каждом квадранте указаны соответствующие предписания:

– выравнивание;

– доведение до международных стандартов;

– закрытие «узких мест»;

– доведение до нормативного уровня.

С помощью выбранной стратегии социальных инвестиций задается нормативный уровень [3], который необходимо достичь при имеющемся объеме финансирования. Матрица выбора стратегии социальных инвестиций позволяет поэтапно решить задачу доведения объектов социальной сферы до уровня государственных нормативов обеспеченности, поскольку зачастую невозможно сразу достичь данного уровня. После определения норматива с помощью стратегии производится оценка достижения установленного уровня с учетом имеющихся средств. Далее производится сравнение и определяется разница между имеющимися ресурсами и объем недостающих средств для достижения норматива. После чего определяется эффективность инвестиций с помощью разработанного критерия.

Предложенный критерий предлагается использовать для формирования портфеля социальных инвестиций при решении задачи распределения ограниченных бюджетных ресурсов. Метод формирования портфеля социальных инвестиций строится на основе метода динамического программирования, с использованием критерия эффективности социальных инвестиций в качестве критерия оптимизации.

Данный метод предполагает реализацию следующих этапов:

1 этап. В качестве n-го шага примем вложение средств в n социальных объектов. Состав социальных объектов n зависит от значения фактического отклонения уровня обеспеченности по j-му социальному объекту в каждой из социальных отраслей ($\Delta_{\text{ф}ij}$) от нормативного, определяемого, как уже указывалось, в соответствии с выбранной стратегией.

Так, в зависимости от стратегии устанавливаются следующие ограничения:

– для стратегии закрытия «узких мест» выбираются j-е объекты в i-й сфере с минимальным уровнем прогнозной обеспеченности;

– для стратегии выравнивания при определении количества j-х объектов i-й социальной сферы, формирующих допустимое множество, нормативный уровень обеспеченности устанавливается на уровне среднего значения по i-й сфере;

– для стратегии доведения до нормативного значения при определении количества j-х объектов i-й социальной сферы нормативный уровень обеспеченности устанавливается в соответствии со значением, установленным государственными стандартами;

– для стратегии доведения до международных стандартов при определении количества j-х объек-

тов *i*-й социальной сферы, формирующих допустимое множество, нормативный уровень обеспеченности устанавливается в соответствии с международными стандартами.

2 этап. Параметр, характеризующий состояние системы перед каждым шагом – запас еще невложенных бюджетных средств *C*.

Сумма средств C_i, выделяемых для социальных объектов *i*-й сферы, определяется исходя из общей суммы средств, направляемых в социальную инфраструктуру, и коэффициента значимости по формуле

$$C_i = C \cdot W_i , \qquad (2)$$

где *C* – величина средств, выделяемых из регионального бюджета на социальную инфраструктуру; W_i – коэффициент значимости *i*-й сферы.

Расчет коэффициента значимости проводится по формуле:

$$W_i = \frac{\Delta_{\text{н}i}}{\sum_{i=1}^{m} \Delta_{\text{н}i}}, \qquad (3)$$

где *m* – количество выделенных социальных сфер; $\Delta_{\text{н}i}$ – нормализованное значение отклонения уровня обеспеченности по *i*-й социальной сфере.

Нормализация полученных оценок производится по формуле

$$\Delta_{\text{н}i} = \frac{\Delta_{\max i} - \Delta_{\text{ф}i}}{\Delta_{\max i} - \Delta_{\min i}}, \qquad (4)$$

где $\Delta_{\max\, i}$ ($\Delta_{\min\, i}$) – максимальное (минимальное) значение отклонения уровня обеспеченности по *i*-й сфере; $\Delta_{\text{ф}ij}$ – фактическое значение отклонения уровня обеспеченности объектов по *i*-й социальной сфере.

3 этап. Параметры шагового управления – это денежные средства (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, …, X_{in}), направляемые на инвестирование *j*-х объектов *i*-й социальной сферы, необходимые для повышения уровня обеспеченности до величины, определяемой выбранной стратегией.

4 этап. Выигрыш на шаге *n* будет определяться приростом уровня обеспеченности $g_n(x)$ *j*-го объекта социальной сферы в зависимости от вложенных денежных средств *X* (шагового управления). Выигрыш определяется на основе значения критерия эффективности инвестиций в социальную сферу.

5 этап. Под действием шагового управления *X* система переходит в новое состояние $C_n = C_{n-1} + X_n$, где C_n – запас невложенных средств на шаге *n*, которые инвестируются в *j*-е объекты социальной сферы; X_n – те средства из C_n, которые вложили на данном шаге в *j* – объект социальной сферы; C_{n-1} – соответственно, оставшиеся невложенные средства на предыдущем шаге $(n-1)$. Данное шаговое управление будет продолжатся до тех пор, пока величина *C* (размер оставшихся инвестиций) будет положительна.

Обозначим через $f_n(C)$ максимальное значение прироста уровня обеспеченности социальных объектов при распределении суммы *C* между *n* объектами социальной сферы.

6 этап. Рекуррентное соотношение для приведенной модели имеет следующий вид:

$$f_n(C) = \max\,[g_n(x) + f_{n-1}(C - X)], \qquad (5)$$

где $f_{n-1}(C-X)$ – максимальное значение прироста уровня обеспеченности объектов социальной сферы на шаге $(n-1)$, при распределении суммы $C_{n-1} = C_n - X_n$ между $(n-1)$ социальными объектами, $0 \le x \le C$.

Следует отметить, что задача распределения ограниченных бюджетных средств решается отдельно для каждой *i*-й социальной сферы.

Предложенный метод формирования портфеля социальных инвестиций позволяет с использованием несложных программных продуктов достичь максимально эффективного распределения социальных инвестиций, т. е. определить объекты социальной сферы, вложения в которые будут наиболее оптимальными с точки зрения предложенного критерия эффективности.

Библиографические ссылки

1. Фирсова Т. В. Принципы оценки эффективности инвестиций в социальную сферу // Тр. 5 Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 252–254.

2. Жирков С. Ф. Оценка эффективности инвестиций в развитие социальной инфраструктуры // Вестник ассоциации выпускников КГТУ. Вып. 9. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2003. С. 63–66.

3. Жирков С. Ф. Инструменты и методы оценки эффективности и формирования структуры социальных инвестиций : автореф. дис. … канд. экон. наук. Красноярск, 2006.

E. Yu. Alexeeva

MODELS OF FORMATION OF THE PORTFOLIO OF SOCIAL INVESTMENTS

The existing economic system, the current state of social sphere, caused by transition to market relations, and connected with it laws and tendencies of development of a social infrastructure, demand the revision of principles of estimation of efficiency of social investments.

Keywords: tools of strategic planning, social sphere, investment activity, factors, strategies, indicators.

© Алексеева Е. Ю., 2011

УДК 330

Ю. В. Булгаков, О. В. Зинина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ИННОВАЦИЙ

Предложены имитационные системно-динамические модели рыночной диффузии инноваций, реализованные в системе Matlab/Simulink. Кроме фундаментальных моделей теории инноваций, приведены модели диффузии с учетом повторных покупок и рыночной конкуренции. Разработанные модели можно использовать в маркетинговых исследованиях рынка инновационных продуктов.

Ключевые слова: система, динамика, диффузия, имитация, модель, покупатель.

В теории инноваций под диффузией понимается процесс распространения инновационного продукта (нововведения) в среде потенциальных покупателей. Нововведениями могут быть предметы и технологии, которые являются новыми и полезными для соответствующего хозяйствующего субъекта. В естественных науках под диффузией понимают взаимное проникновение соприкасающихся веществ. Известны различные методы, модели и инструменты прогнозирования динамики инноваций [1; 2]. Следует отметить, что методология исследования диффузии инноваций имеет прямые или косвенные аналогии с теорией надежности технических систем и динамикой живых систем, в частности, с демографией и теорией страхования жизни. В предлагаемой статье даны результаты компьютерного моделирования диффузионного процесса в системе Matlab/Simulink, а также обобщенная модель диффузии в среде AnyLogic. Кроме фундаментальных моделей теории инноваций, в работе приведены модели диффузии с учетом повторных покупок и рыночной конкуренции.

Пакет Simulink позволяет выполнять исследование (моделирование) сложных динамических систем. Ввод параметров систем производится в интерактивном режиме путем графической сборки схемы соединений элементарных блоков, в результате чего получается модель исследуемой системы. Блоки, включаемые в модель, связаны друг с другом как по информации, так и по управлению. Тип связи зависит от типа блока и логики работы модели. С помощью Simulink автоматизируется наиболее трудоемкий этап имитационного моделирования – составление и решение систем дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих рассматриваемую модель.

Первая известная модель диффузии инноваций, или модель внешнего влияния, основана на предположении, что скорость распространения инновации *dN/dt* зависит только от числа потенциальных потребителей на данный момент времени (*M–N*) и эффективности стратегии продвижения товара:

$$\frac{dN}{dt} = a(M - N),$$

где M – емкость рынка, т. е. суммарное число потенциальных покупателей (постоянная величина); N – суммарное число реальных покупателей на данный момент времени (переменная величина); a – эмпирический коэффициент внешнего влияния, отражающий эффективность рекламных мероприятий.

Структура модели внешнего влияния, где $M = 100\,000$ и $a = 0{,}1$, показана на рис. 1.

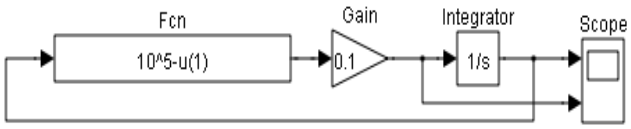


Рис. 1. Блок-схема модели внешнего влияния

На осциллографе Scope в качестве результатов фиксируется зависимость $N(t)$, которая представляет собой модифицированную экспоненту с предельным значением 10^5 и начальным значением $0{,}1 \cdot 10^5 = 10^4$, а также экспоненциально убывающая во времени скорость распространения инновации *dN/dt.*

Основное допущение модели внутреннего влияния заключается в том, что скорость распространения инновации *dN/dt* зависит не только от числа потенциальных покупателей на данный момент времени (*M–N*), но и от достигнутого уровня распространения инновации *N*. При этом предполагается, что официальная информация о новом продукте не оказывает существенного влияния на принятие решений о покупке, а решающее значение имеют межличностные контакты реальных и потенциальных покупателей. Эмпирический коэффициент b в этой модели учитывает интенсивность и результативность межличностных коммуникаций:

$$\frac{dN}{dt} = bN(M - N) / M .$$

Структура модели внутреннего влияния, где $M = 10^5$ и $b = 0{,}25$, показана на рис. 2.

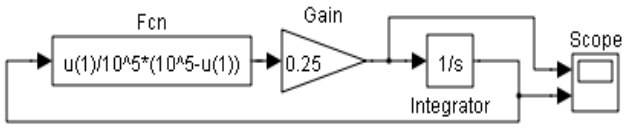


Рис. 2. Блок-схема модели внутреннего влияния

Результатом решения уравнения является *S*-образная логистическая кривая, соответствующая зависимости $N(t)$, а её производная – колоколообразная кривая скорости распространения инновации *dN/dt.*

На практике наибольшее распространение получили различные модификации модели смешанного влияния диффузии инноваций, в которых используются оба коэффициента a и b, т. е. на процесс принятия решения о покупке влияют и внешние источники из средств массовой информации, и личные контакты пользователей инновации с потенциальными покупателями. Научная гипотеза в данном случае состоит в том, что реклама не оказывает заметного влияния на большинство населения, но достигает ограниченной социальной группы, которая впоследствии на основе опыта владения продуктом положительно влияет на родственников, знакомых и сослуживцев:

$$\frac{dN}{dt} = (a + \frac{b}{M} N)(M - N).$$

Дискретная модель смешанного влияния показана на рис. 3, где в качестве констант заданы значения коэффициентов a = 0,01, b = 0,25 и емкость рынка $M = 10^5$.

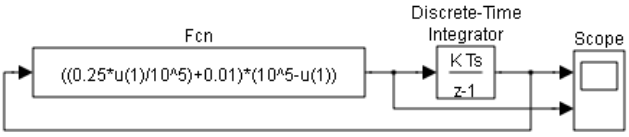


Рис. 3. Блок-схема модели смешанного влияния

Зависимость, полученная с осциллографа Scope, роста числа покупателей от времени (верхний график) и скорость этого роста, т. е. изменение числа покупок по периодам (нижний график), показаны на рис. 4.

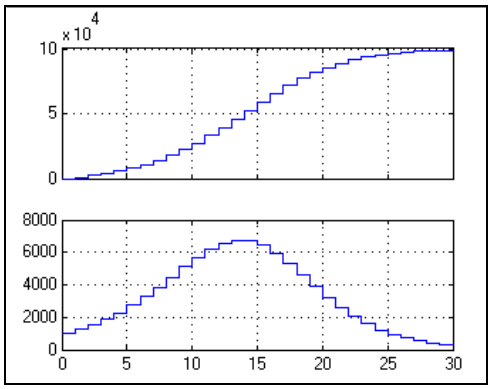


Рис. 4. Динамика модели смешанного влияния

Видно, что скорость продаж сначала растет, а затем по мере насыщения рынка падает.

В известной литературе проблема определения коэффициентов внешнего и внутреннего влияния практически не обсуждается. Коэффициенты a и b считаются заранее заданными величинами, хотя именно они определяют результаты прогнозирования. Более того, величина коэффициента внутреннего влияния никак не связывается с уровнем удовлетворения ожиданий потребителей. Понятно, что чем выше этот уровень для конкретного инновационного продукта, тем выше результативность межличностных коммуникаций, тем больше скорость спроса и величина коэффициента внутреннего влияния.

Найти численные значений коэффициентов можно только по результатам продаж за пять-шесть периодов (недель или месяцев) в зависимости от типа инновации. По данным статистики определяются следующие показатели: количество реальных покупателей по числу проданных товаров за каждый период $\Delta n(t)$; кумулятивное число реальных покупателей нарастающим итогом на конец каждого периода; количество оставшихся потенциальных покупателей последовательным вычитанием из емкости рынка числа проданных товаров за каждый период. Делением $\Delta n(t)$ на последний показатель получается ряд интенсивностей продаж.

Используя в качестве аргумента отношение накопленного числа реальных покупателей N к емкости рынка M, а интенсивность продаж – в качестве результативного признака, находим уравнение линейной регрессии вида 0,01 + 0,25 · N/M. Из уравнения следует, что a = 0,01, b = 0,25. В данном случае в качестве статистики использованы результаты моделирования за первые шесть периодов, поэтому коэффициент детерминации равен единице.

Системно-динамическое представление рассмотренной модели, известной как модель диффузии Басса [3], в среде имитационного моделирования AnyLogic представлено на рис. 5.

При создании модели в AnyLogic необходимо классифицировать переменные на накопители, потоки и вспомогательные переменные. Накопители (уровни, фонды) представляют собой объекты реального мира, где накапливаются определенные ресурсы, значения которых непрерывно изменяются. Потоки – активные компоненты системы, которые изменяют значения накопителей. В свою очередь, накопители системы определяют значения потоков. Вспомогательные переменные служат для преобразования одних числовых значений в другие и могут произвольно изменять свои значения или быть константами. В данной модели (рис. 5) число потребителей и потенциальных потребителей продукта являются накопителями, а процесс приобретения продукта – потоком. Накопители обозначаются прямоугольниками, поток – вентилем, а вспомогательные переменные – кружками. Стрелки обозначают причинно-следственные связи.

Рассмотренные модели не учитывают повторные покупки, так как со временем продукт может быть израсходован или прийти в негодность. Для моделирования вначале надо определить константу, задающую долговечность продукта. Пусть средняя продолжительность использования продукта равна одному году. Поскольку потребители продукта снова становятся потенциальными потребителями, то поток прекращения использования продукта является потоком приобретения, задержанным на среднее время жизни продукта, равное двенадцати месяцам (рис. 6).

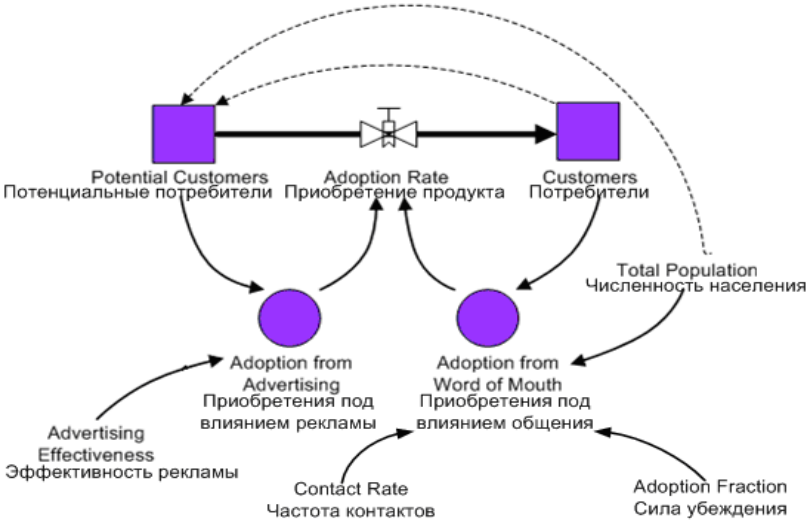


Рис. 5. Имитационная модель диффузии инноваций в AnyLogic

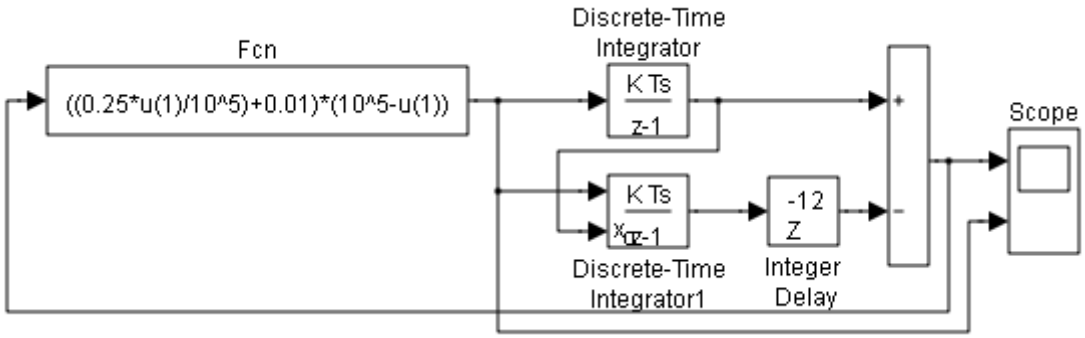


Рис. 6. Блок-схема модели с повторными покупками

Приведенная схема отличается от базовой модели (см. рис. 3) наличием блока задержки Integer Delay и интегратора Discrete-Time Integrator1, начальное значение которого соответствует оставшемуся числу потенциальных покупателей. Результаты моделирования показаны на рис. 7 (Scope), где верхний график показывает рост числа покупателей в зависимости от времени, а нижний график – скорость этого роста.

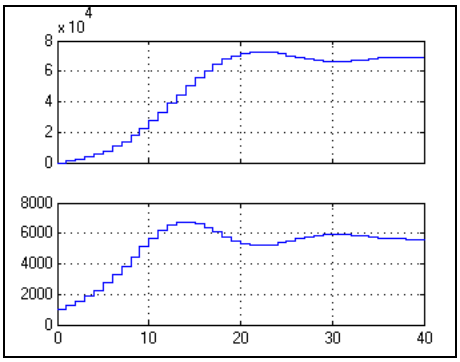


Рис. 7. Динамика модели с повторными покупками

Теперь численность потенциальных потребителей не уменьшается до нуля, а постоянно пополняется за счет того, что потребители снова покупают товары взамен непригодных. Скорость приобретений растет, падает, и в итоге принимает стабильное значение, зависящее от долговечности продукта и параметров, определяющих интенсивность этого потока. Наличие в модели прекращения использования продукта означает, что определенная доля населения всегда будет оставаться потенциальными потребителями.

Практический интерес представляет моделирование ситуации двух или нескольких конкурирующих продуктов. Система уравнений для этого случая приведена ниже:

$$\frac{dN_1}{dt} = (a_1 + b_1 \frac{N_1}{M})(M - N),$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (a_2 + b_2 \frac{N_2}{M})(M - N),$$

$$N = N_1 + N_2,$$

где $a_1 = 0{,}01$, $b_1 = 0{,}25$, $a_2 = 0{,}02$, $b_2 = 0{,}35$ – эмпирические коэффициенты внешнего и внутреннего влияния для первого и второго продуктов соответственно; M – емкость рынка; N_1, N_2 – суммарное число покупателей первого и второго продуктов соответственно на данный момент времени; N – суммарное текущее число покупателей.

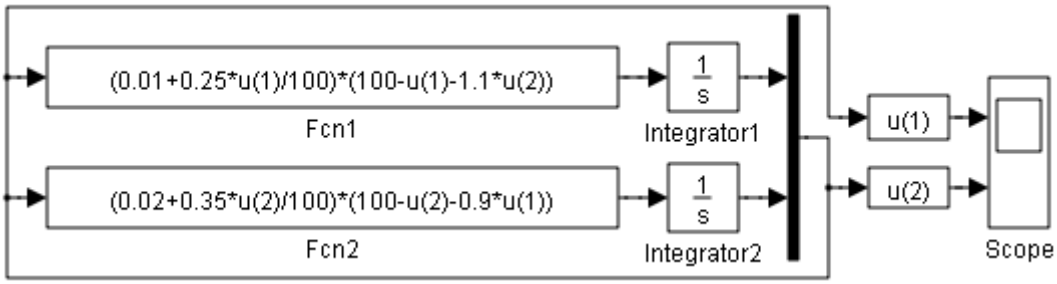


Рис. 8. Блок-схема модели конкурирующих инноваций.

По результатам моделирования рынок приходит в состояние насыщения примерно через 20 периодов, причем верхний предел продаж, зависящий от коэффициентов внешнего и внутреннего влияния, для первого продукта составляет около 20 тыс., а для второго – около 80 тыс.

В предыдущей модели результаты зависят только от коэффициентов внешнего и внутреннего влияния. Более реальную ситуацию отображает модель, система уравнений для которой следующая:

$$\frac{dN_1}{dt} = (a_1 + b_1 \frac{N_1}{M})(M - N_1 - cN_2),$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (a_1 + b_1 \frac{N_2}{M})(M - N_2 - fN_1).$$

Здесь, в принципе, ничего не меняется за исключением коэффициентов взаимного влияния c и f. Коэффициент c показывает, во сколько раз рентабельность продукта второго вида больше соответствующего показателя для первого вида. Коэффициент f показывает, во сколько раз рентабельность продукта первого вида больше соответствующего показателя для второго вида. Блок-схема для двух конкурирующих инноваций показана на рис. 8, где в функциональных блоках записаны правые части приведенной системы уравнений при $c = 1{,}1$ и $f = 0{,}9$, причем число продаж выражено в сотнях тысяч.

Динамика изменения продаж обоих продуктов показана на рис. 9 (осциллограф Scope). Верхний график относится к первому продукту, а нижний – ко второму. На горизонтальной оси, как и ранее, даны номера периодов, а на вертикальной – изменение численности реальных покупателей в сотнях тысяч.

Видно, что при заданных соотношениях первый продукт не выдерживает конкуренции и уходит с рынка. Если коэффициенты c и f равны единице, то получим те же результаты, что и в предыдущем примере.

В этих примерах рассмотрен лишь один из возможных видов конкуренции на рынке инновационных продуктов. Если использовать принятую в экологии классификацию, которая практически без изменений справедлива и для социально-технологических систем, то существует три типа межвидовых отношений: (+ +), (– –), (+ –) [4]. При этом знак «+» означает положительное, благоприятное воздействие одного вида на другой, а знак «–» – неблагоприятное. Соответствующие типы межвидовых отношений получили наименования симбиоза, конкурентного подавления или борьбы за общий ресурс, отношений типа «хищник–жертва». Кроме того, принято выделять два типа отношений, при которых один вид, оказывая положительное или отрицательное воздействие на другой, сам не испытывает с его стороны никакого влияния (отношения типа ± 0). Знаки в этой символике имеют конкретный математический смысл, поскольку определяют знаки производных и результаты решения дифференциальных уравнений, т. е. характер взаимоотношений конкурентов.

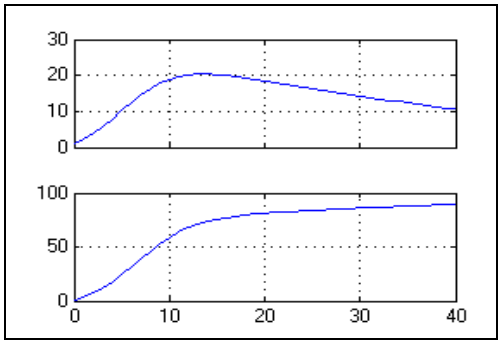


Рис. 9. Динамика модели с конкуренцией

Реализация принципа симбиоза на рынке инноваций возможна в случае эффективной кластерной политики управления региональной экономикой. Модель второго типа конкуренции показана в последнем примере. Моделирование третьего типа конкуренции осуществляется с помощью различных модификаций системы уравнений Лотки–Вольтерра, в результате чего получают фазовый портрет взаимодействия конкурентов.

Разработанные модели можно использовать в качестве инструментов прогнозирования для поддержки принятия управленческих решений на различных стадиях создания и реализации инновационного продукта

Библиографические ссылки

1. Цисарь И. Ф. Matlab/Simulink. Компьютерное моделирование экономики. М. : СОЛОН-Пресс, 2008.

2. Боев В. Д, Сыпченко Р. П. Компьютерное моделирование. Элементы теории и практики : учеб. пособие. СПб. : Военная академия связи. 2009.

3. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб. : БХВ-Петербург, 2006.

4. Одум Ю. Основы экологии. М. : Мир, 1975.

Yu. V. Bulgakov, O. V. Zinina

COMPUTER SIMULATION OF DIFFUSION INNOVATIONS

The authors offer simulated system-dynamic models of market diffusion innovations, realized in system of Matlab/Simulink. Besides fundamental models of the theory of innovations, the work contains the models of diffusion, with the account of recurring purchases and market competition. The developed models can be used in the market researches for the market of innovation products.

Keywords: system, dynamics, diffusion, simulation, model, customer.

© Булгаков Ю. В., Зинина О. В., 2011

УДК 339.1

О. Ф. Демченко

СИСТЕМНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМ ОРГАНИЗАЦИОННОГО СТРУКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РОССИЙСКОГО АВИАЦИОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Выявлена последовательная системная позиция системы организационного структурного проектирования организационных обособлений современного российского авиационно-промышленного комплекса – корпораций, предприятий и подразделений – в общих системах соответствующего самоуправления.

Ключевые слова: организационное проектирование, адаптация, контур управления, иерархическое управление, моделирование, организационная структура, авиационно-промышленный комплекс, обоснование управленческих решений.

Разработка и применение процедуры моделирования организационной структуры некоторого организационного обособления (как микроуровневого, так и мезоуровневого) российского авиационно-промышленного комплекса в совокупности с соответствующей моделью с неизбежностью предусматривают их соотнесение, а далее – позиционно корректное встраивание в управляющие системы и, соответственно, в системы управления, причем с учетом видового характера организационного обособления.

Поэтому следует в общем случае последовательно определиться со следующими системными позициями:

1. Системы адаптации (адаптационного управления) в общей системе управления организационного обособления авиационно-промышленного комплекса (тут допустимо указать и иначе – организационным обособлением). Естественно, что система управления включает объект управления и управляющую систему, а адаптация представляет собой приспособительную трансформацию системы управления. Здесь и далее подразумевается охват и первоначального создания, и последующих (при их наличии) трансформаций организационного обособления в управленческом аспекте, охватывающих в общем случае его и как объект управления, и как управляющую систему. В самом деле, при первом срабатывании этой системы осуществляется формирование первоначального управленческого облика организационного обособления в части его объекта управления и его управляющей системы, реализующей в некотором смысле «повседневное» управление организационным обособлением, а затем, при последующих срабатываниях, – трансформация этого облика. Поэтому для краткости в основном будем ограничиваться упоминанием системы адаптации, которая распространяется на первоначальное формирование управленческого облика системы управления и на ее последующие изменения. В общем случае первоначальное формирование управленческого облика организационного обособления неизбежно, а последующие его трансформации возможны.

2. Системы организационной адаптации рассматриваемых организационных обособлений в общей системе их адаптации.

3. Системы организационной структурной (организационно-структурной) адаптации в рамках системы организационной адаптации рассматриваемых организационных обособлений.

4. Системы организационного проектирования в рамках системы организационной адаптации.

5. Системы организационно-структурного проектирования в системе организационно-структурной адаптации.

Рассмотрим *первое* из указанных позиционирований. Как канонически определено мировым научным сообществом, адаптация системы управления (адаптационное управление) может быть обусловлена целесообразностью приспособительной трансформа-

ции системы управления к изменившимся внешним и(или) внутренним условиям ее функционирования и развития.

Система адаптации в общем случае может затрагивать как варианты:

– обособленную трансформацию объекта управления;

– обособленную трансформацию управляющей системы;

– комплексную трансформацию системы управления, включая и объект управления, и управляющую систему.

Несомненно, что наиболее общим вариантом является третий из рассмотренных вариантов, который также абсолютно преобладает в организационно-экономической среде, включая российский авиационно-промышленный комплекс. В некоторых случаях, конечно, не исключено, что реализуемы обособленные адаптационные новации в отношении управляющей системы, однако применительно к организационным обособлениям обособленная трансформация объекта управления представляется неосуществимой.

Рассмотрим *второе* предусмотренное позиционирование. Адаптация системы управления может быть достаточно разнообразной, в том числе ресурсной, концептуальной, легитимностной и т. д. Однако широко распространенным видом адаптации системы управления, ее частным случаем, является организационная адаптация, которая подразумевает изменение организационного построения организационного обоснования посредством проведения его организационной декомпозиции – выделения определенных структурных обособлений более низкого иерархического уровня.

Перейдем к *третьему* позиционированию, соотнесем организационно-структурную адаптацию с организационной адаптацией. Проведенный анализ научной и учебной литературы, а также позиций практикующих управленцев показал, что ныне имеется достаточно много трактовок организационной адаптации, различающихся как в формулировках, так и содержательно. Разумеется, главным является содержательное представление, и именно оно главным образом и анализировалось.

Имелись следующие принципиальные возможные варианты введения трактовки организационного проектирования:

– предложить собственную, совершенно оригинальную трактовку, не соотносясь с известными трактовками;

– проанализировать многообразие существующих понятий и, безусловно, солидаризоваться с одним из них;

– проанализировать известные трактовки, выбрать среди них прототипную и трансформировать ее;

– проанализировать позиции специалистов, признать их неприемлемыми и синтезировать собственную трактовку.

Соответственно, из выделенных выше вариантов представления был выбран вариант обоснованной солидаризации с известной трактовкой.

Было установлено, что известны достаточно многочисленные и во многом крайние трактовки, среди которых можно выделить три базовые категории представлений о характере организационной адаптации:

1. Представление, предусматривающее признание организационной адаптации как области знаний, охватывающей синтез и анализ всех управляющих систем организаций, в которых имеется участие человеческих индивидуумов. Предприятия как юридические лица и их структурные подразделения, рассматриваемые в финансово-экономическом аспекте, при этом интерпретируются всего лишь как частные случаи организаций, управленчески упорядочиваемых при их организационной адаптации.

2. Представление, ориентированное на определение предметной области организационной адаптации исключительно выделением локальных организационных подобособлений в рамках управляемого организационного обособления. При этом, например, применительно к предприятию предусматриваются выделения организационных обособлений в виде структурных подразделений, дефинирование их штатов по численности и административному рангу руководителя (начальника) с возможной детализацией до уровня распределения должностных категорий персонала, установления их административной подчиненности, назначения служебных обязанностей и, посредством последнего, – множества внутрифирменных и внефирменных служебных связей, а также реализуемых операторов управленческой, производственной или смешанной деятельности.

3. Представление, рассматривающее организационную адаптацию как особенный вид внутрифирменного управления в части выработки внутрифирменных организационных управленческих решений, назначающего организационную декомпозицию организации микроуровня (например, предприятия, структурного подразделения), административное соподчинение и сферу управленческой компетенции организационных обособлений [1; 2].

Отметим, что первое представление позиционирует очевидную необоснованную понятийную экспансию, сводящую все внутрифирменное управление к организационной адаптации, второе – видится явно суженным и не позволяет полноценно, в требуемых аспектах организационно упорядочивать организационное обособление. Третья же трактовка представляется достаточно рациональной и вполне приемлемой для того, чтобы ее принять без доработки.

Определимся с учетом произведенных выборов с основными разрезами организационной адаптации.

Вслед за [1; 2] выделим следующие составляющие организационной адаптации:

– организационная сре́довая (организационно-средовая) адаптация, ориентированная на введение характера управленческой среды – характера связей некоторых, определяемых категориально, но пока еще не дефинируемых личностно субъектов или псевдосубъектов внутри организации между собой и с вне-

организационными субъектами; в качестве внеорганизационных субъектов выступают, например, субъекты вне рамок предприятия, не осуществляющие на нем производственно-хозяйственную деятельность, основную часть которых, разумеется, составляют лица – физические лица (люди, не являющиеся работниками предприятия), юридические лица и лица с особенным статусом;

– организационно-структурная адаптация, определяющая множество организационных обособлений и их организационных свойств, включая административную соподчиненность и сферу управленческой компетенции; при этом следует исходить из того, что не могут существовать производственные или иные обособления, не являющиеся управленчески обособленными;

– организационная процедурная (организационно-процедурная) адаптация, вводящая процедуры выработки и принятия управленческих решений, осуществляемые в рамках выделенных организационных обособлений;

– организационная кадровая (организационно-кадровая) адаптация, в рамках которой производится соотнесение персоналий организационного обособления со структурными организационными обособлениями, возможно, с должностной конкретизацией.

Таким образом, организационно-структурная адаптация – один из четырех непременных видов организационной адаптации.

Соответственно, с учетом содержательного наполнения организационного структурного проектирования и реализации контура обратной связи, предусматривающей комплексное технико-экономическое обоснование организационно-структурных управленческих решений, общесистемная структура системы организационного структурного управления должна иметь вид, показанный на рис. 1, применительно к авиационно-промышленному предприятию и его структурным подразделениям.

Рассмотрим *четвертое* позиционирование, связанное с выявлением системного места организационного проектирования в системе организационной адаптации. Организационное проектирование представляет собой первую фазу управления наряду со следующими после него фазами принятия решений по организационной адаптации и их реализации в виде управленческих воздействий.

Определимся в части *пятого* позиционирования из числа выделенных позиционирований. Как уже было указано, организационно-структурная адаптация – частный случай организационной адаптации и далее – адаптации в целом. Фазирование же управления является универсальным. Поэтому система организационно-структурного проектирования является частным случаем или подсистемой системы организационно-структурной адаптации в части подготовки соответствующих организационно-структурных управленческих решений.

С учетом изложенного, система организационно-структурного проектирования применительно к организационному обособлению как микро-, так и мезоуровневая представляется как двухуровневая иерархическая система (рис. 2), причем управляющая система первого (верхнего) уровня адаптирует систему управления второго (нижнего) уровня в определенном (структурном) аспекте.

Соответственно, возникает возможность унифицирования для микроуровня и макроуровня проблем организационного проектирования и перепроектирования.

При выявлении субъектного позиционирования было выявлено следующее:

– целесообразно рассматривать микроуровневое организационное проектирование и перепроектирование как распространяющееся на группу структурных подразделений предприятия, в которую могут входить от одного до всех его структурных подразделений, тем самым выделить внутрифирменное организационное проектирование российского авиационно-промышленного предприятия – локальное или глобальное, подготавливаемое в случае локального организационного проектирования или перепроектирования дирекцией предприятия или администрацией подразделения, а в случае глобального организационного проектирования или перепроектирования – дирекцией предприятия;

– целесообразно рассматривать мезоуровневое организационное проектирование и перепроектирование как распространяющееся на группу предприятий – членов корпоративной группировки, в которую могут входить от одного до всех ее предприятий-членов; это управление может осуществляться субъектами трех категориальных уровней – государством в виде синдицированного или единоличного уполномоченного федерального органа исполнительной власти, группой участников предприятий и группой дирекций предприятий – членов корпорации.

Из изложенного вытекает следующее:

– организационно-структурное проектирование представляет собой фазу, соответствующую технико-экономическому обоснованию организационных структурных управленческих решений;

– организационно-структурное управление (адаптация) – одна из непременных компонент организационного управления, являющегося иерархически первичным при управлении организационными обособлениями современного российского авиационно-промышленного комплекса.

Библиографические ссылки

1. Организация самоуправления финансово-экономическим потенциалом корпоративной структуры : монография / А. И. Канащенков О. Н. Дмитриев, С. Х. Екшембиев и др. М. : МАИ : Доброе слово, 2004.

2. Базадзе Н. Г. Организационное проектирование и развитие управленческого потенциала наукоемкого производства. М. : АМИ, 2002.

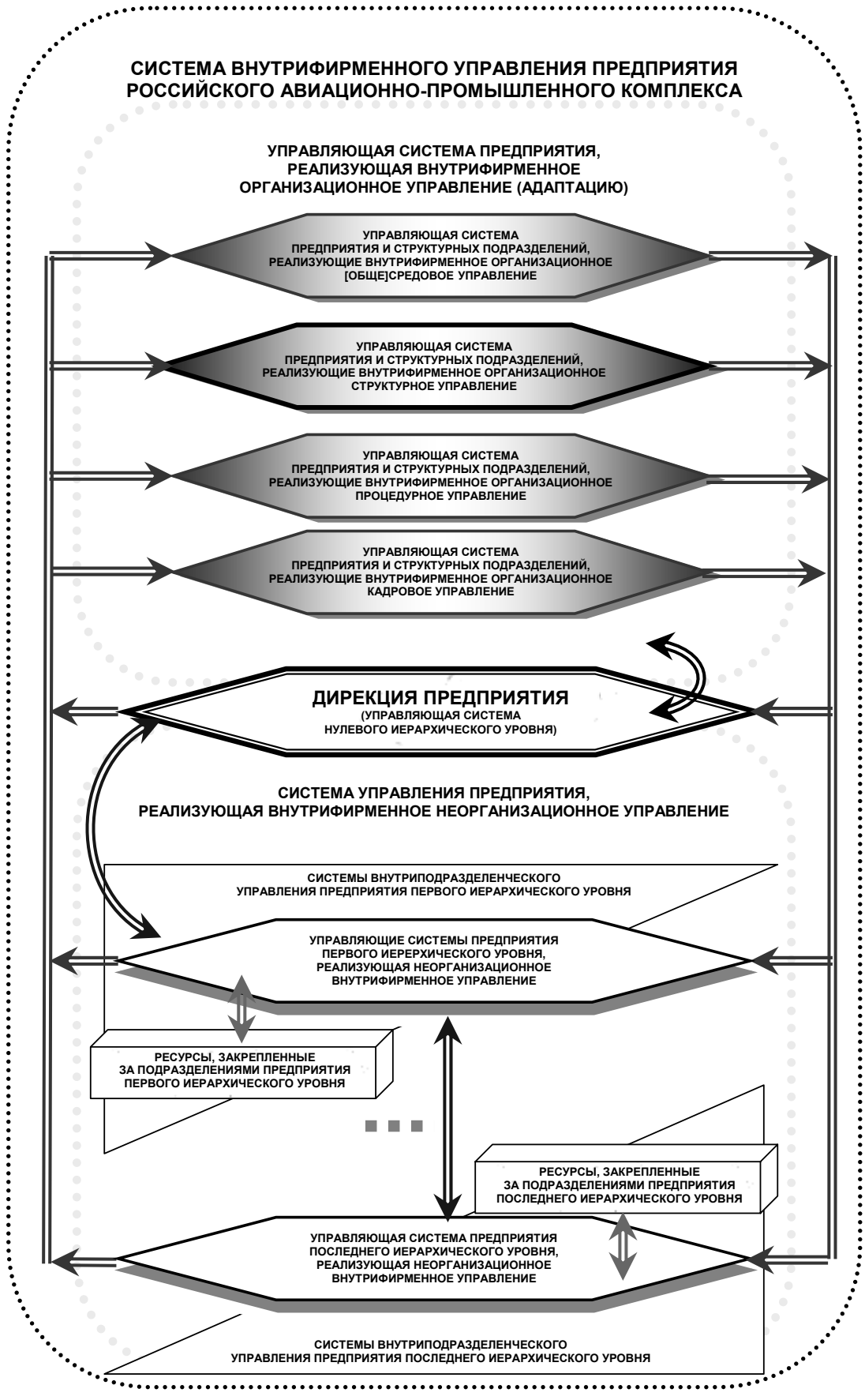


Рис. 1. Общесистемная структура системы внутрифирменного организационно-структурного управления (адаптации)

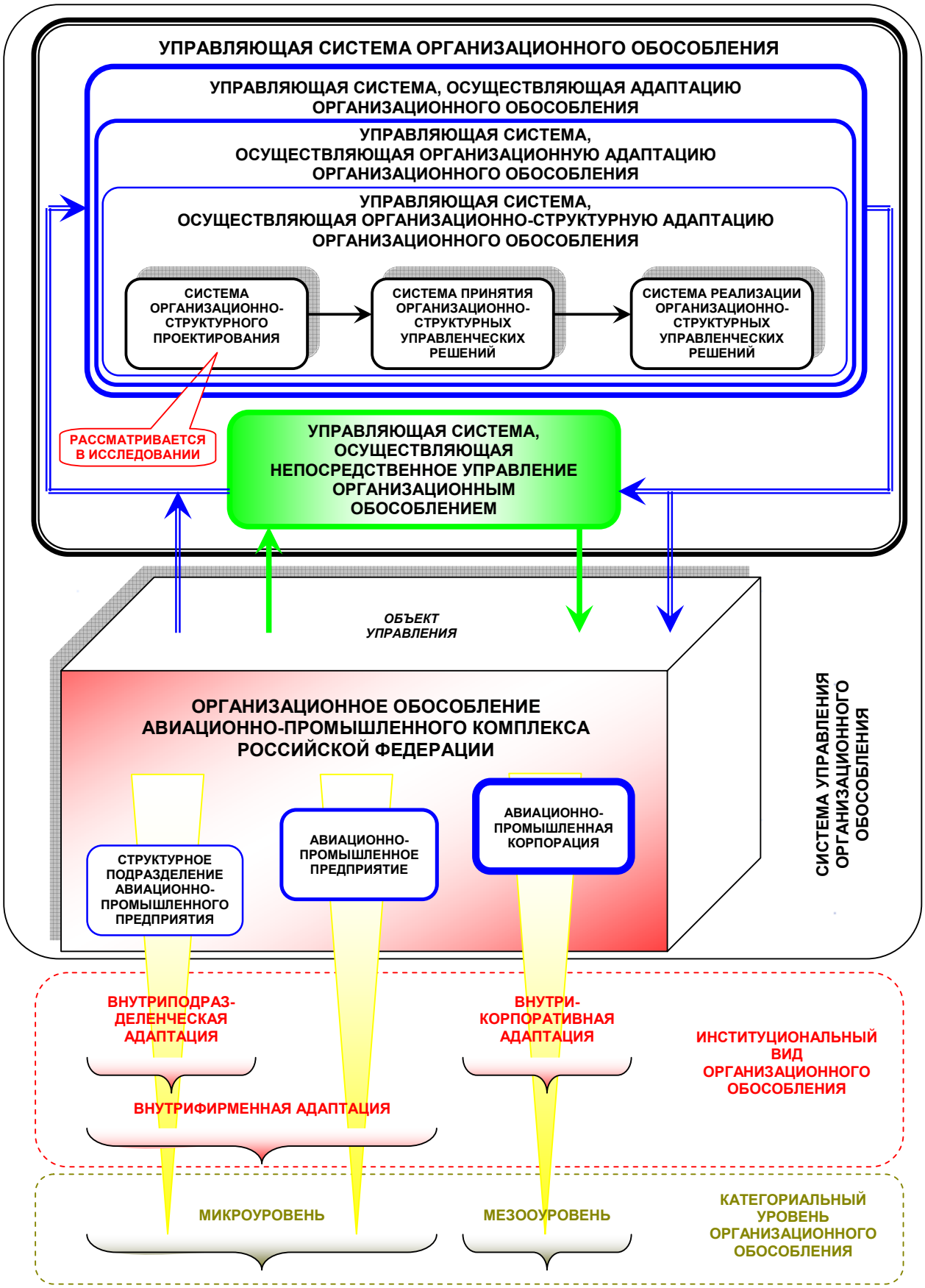


Рис. 2. Позиционирование системы организационного проектирования
в управляющей системе организационного обособления

O. F. Demchenko

SYSTEM POSITIONING OF SYSTEMS OF ORGANIZATIONAL STRUCTURAL DESIGN OF FACILITIES OF RUSSIAN AVIATION-INDUSTRIAL COMPLEX

The consequent system position of a system of organizational structural designing of organizational segregations of the modern Russian aviation-industrial complex – corporations, enterprises and divisions – in the general systems of the corresponding self-management is revealed in the article.

Keywords: organizational design, adaptation, contour of management, hierarchical management, modeling, organizational structure, aviation-industrial complex, background of management decisions.

© Демченко О. Ф., 2011

УДК 338.245.001.76

Ю. В. Ерыгин, А. М. Саакян

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИНЦИПОВ СТИМУЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрена роль предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) в осуществлении инновационного развития экономики. Определены принципы государственного стимулирования их инновационной деятельности.

Ключевые слова: инвестиции в инновационную деятельность, принципы, стимулирование инновационной деятельности, предприятия оборонно-промышленного комплекса.

Роль и значение ОПК определяются не только его основным целевым назначением – созданием вооружения и военной техники. ОПК играет важную роль в развитии ряда отраслей и подотраслей, оказывающих значительное влияние на социально-экономическое развитие страны в целом и во многом определяющих общий промышленно-технологический уровень России, ее статус среди промышленно развитых государств мира. ОПК отводится ключевая роль в осуществлении инновационного развития экономики, что, в свою очередь, требует на современном этапе усиления государственного стимулирования данной сферы.

Создание благоприятных условий для развития и повышения эффективности инновационной деятельности, обеспечения конкурентоспособности экономики и устойчивого роста является одной из приоритетных задач государственной политики. Для эффективной реализации программ инновационного развития необходима соответствующая государственная поддержка. Государство формирует концепции и стратегии, реализует конкретные мероприятия через систему стимулов. С помощью государства через формы и методы финансового стимулирования инновационной деятельности ОПК возможно решить проблемы обеспечения производства конкурентоспособной гражданской и оборонной продукции [1; 2].

Инновационная деятельность является важным условием обеспечения устойчивого роста и конкурентоспособности предприятий. Переход на инновационную модель промышленного развития может содействовать насыщению рынка конкурентоспособной продукцией, которую практически невозможно создать без применения инноваций.

Современное состояние ОПК в определенной степени является следствием его реформирования, которое было инициировано в начале 1990-х гг. На протяжении 10–15 лет, пока шли эти преобразования, на каждом из этапов ставились и решались различные задачи с учетом состояния и развития экономики страны. Со стороны государства в переходный период развития экономики посредством ряда программ и других мер оказывалась поддержка развитию сферы коммерциализации инновационного потенциала, направленной на инновационное развитие экономики страны. Предприятия и организации ОПК находятся в критическом состоянии. Одной из проблем является невосприимчивость большинства предприятий к инновациям. Отсутствует механизм применения высоких технологий, используемых при производстве военной продукции, для гражданского производства, повышения его технологического уровня. Разрыв в научно-технологическом развитии оборонного и гражданского секторов экономики проявляется в том, что высокие технологии оборонных предприятий, высокий интеллектуальный потенциал ОПК крайне слабо используются в создании конкурентной наукоемкой продукции, в повышении технологического уровня, усилении инновационной активности промышленных предприятий [1]. Возможности инновационной деятельности практически полностью определяются объемами и структурой инвестиций. Один из важных вопросов преобразований ОПК – финансирование.

Процесс финансирования инновационной деятельности достаточно капиталоемкий. Основная роль в финансировании инновационной деятельности предприятий должна принадлежать государству, поскольку система финансирования является одним из основных инструментов реализации государственной политики в области инновационной деятельности.

Важнейшим инструментом реализации государственного финансирования инновационной деятельности являются программы инновационного развития, реализуемые посредством форм и методов финансового стимулирования. Предоставляя льготы в осуществлении инновационной деятельности, государство оказывает финансовую поддержку в развитии инновационной сферы. Вместе с тем, в настоящее время существует проблема недостаточности объемов государственного финансирования [3]. Бюджетные средства носят ограниченный характер, поэтому, зачастую, суммы, предоставляемые отдельными уровнями бюджета, являются недостаточными для успешной реализации проектов. Кроме того, в результате реформирования предприятий ОПК, перехода к рыночным отношениям, меняются условия и цели развития предприятий.

В связи с наметившимися тенденциями снижения инновационного потенциала, а также необходимостью его коммерциализации, в том числе в рамках региональных инвестиционных программ, должны быть изменены и принципы финансирования и стимулирования инновационной деятельности предприятий ОПК.

К таким принципам относятся:

1) принцип достаточности объемов финансирования;

2) принцип финансирования инновационной деятельности различными уровнями бюджета;

3) принцип зависимости использования форм и методов стимулирования от стадий инновационного процесса;

4) принцип оптимального соотношения форм и методов стимулирования на возвратной и безвозвратной основе.

Принцип достаточности объемов финансирования. Проведенный анализ современного состояния инновационной деятельности предприятий позволил сделать вывод о том, что многие предприятия, нацеленные на осуществление инновационной деятельности, не имеют достаточного объема финансовых ресурсов.

Данный принцип предполагает решение следующих задач:

1) обеспечение дополнительного объема денежных средств, необходимых для осуществления инновационной деятельности;

2) облегчение механизма получения денежных средств;

3) снижение стоимости предоставляемых средств.

Для того чтобы обеспечивать непрерывность и систематичность инновационной деятельности, нужны значительные объемы вложений. Процесс финансирования инновационной деятельности достаточно капиталоемкий. Из-за нехватки собственных средств предприятий, осуществляющих инновационную деятельность, нередко возникает вопрос о дополнительном объеме финансовых ресурсов. Однако инновационная деятельность характеризуется трудностью привлечения средств на финансовом рынке. Неразвитость финансового рынка, с одной стороны, усложняет процесс размещения акций и облигаций. С другой стороны, несмотря на то, что предприятия в результате реформирования стали акционерными обществами, основным акционером предприятий ОПК остается государство. Все предприятия включены в реестр ОПК. Из них 58 % являются федеральными государственными унитарными предприятиями, 19 % – акционерными обществами (АО) с госпакетом акций не менее 59 %; 23 % – АО – с долей государства менее 50 % [4]. Государство, как основной держатель акций, определяет деятельность предприятий, тем самым способствуя снижению инвестиционной привлекательности, сложности привлечения частных инвестиций. Данная ситуация на сегодняшний день усиливает роль государства в финансировании инновационной деятельности предприятий ОПК.

Система финансирования является одним из основных инструментов реализации государственной политики в области инновационной деятельности. Государство должно решать задачу предоставления достаточного объема финансирования, необходимого для успешной реализации инновационных проектов. Через совокупность различных форм и методов государство может стимулировать процесс осуществления инновационной деятельности.

Решение задачи предоставления объемов финансирования заключается не в факте предоставления средств, а в том, чтобы сумма была достаточной для успешной реализации инновационного проекта. Государство должно решать задачу как прямого финансирования, так и стимулирования инновационной деятельности.

В настоящее время существует проблема недостаточности объемов государственного финансирования. Далеко не каждое предприятие может получить необходимую сумму. В большинстве случаев средства, выделяемые государством, предоставляются на конкурсной основе. Все это затрудняет получение достаточного объема государственных средств. Таким образом, должна быть решена задача, способствующая облегчению получения необходимого объема финансовых ресурсов.

В связи с тем, что прямое финансирование характеризуется ограниченными возможностями бюджета, финансовое стимулирование приобретает более значимую роль. Государство должно создавать такие условия осуществления инновационной деятельности, которые бы сделали предприятия инвестиционно привлекательными для других инвесторов. Через прямое финансирование и стимулирование должна быть решена задача получения объемов финансирования, достаточных для покрытия существующих потребностей.

Принцип финансирования инновационной деятельности разными уровнями бюджета. Он вытекает из предыдущего, задачей достижения которого является предоставление суммы, которая была бы достаточной для эффективного результата реализации инновационного проекта. Необходимость привлечения различных уровней бюджета также определяется процессом коммерциализации инновационного потенциала предприятий, осуществляющих инновационную деятельность. Со стороны регионов возникает интерес к развитию инновационного потенциала этих предприятий, задачей которого является вопрос стимулирования их развития. В связи с возникновением задачи стимулирования инновационной деятельности на региональном уровне, возникает и необходимость участия регионов в процессе финансирования.

Задача распределения объемов финансирования между уровнями бюджета может быть решена двумя способами:

– распределение согласно принципу инициативности;

– распределение согласно принципу равной эффективности.

Принцип равной эффективности. Эффективность вложения средств для каждого уровня бюджета определяется соотношением результата к инвестиционным затратам.

Согласно предлагаемому принципу эффективности различных уровней бюджета должны быть равны между собой.

Доход может быть получен в виде дивидендов, процентов, налоговых поступлений. Инвестиционные вложения осуществляются всеми уровнями бюджета в различных формах: приобретение акций, облигаций; капитальные вложения; целевое финансирование; субсидирование; налоговые льготы и другие формы.

Общая сумма инвестиционных вложений, предоставляемая всеми уровнями бюджета, необходимая для эффективной реализации инновационного проекта, может быть определена следующим образом:

$$И = И_р + И_ф,$$

где И – общая сумма инвестиционных вложений; $И_р$ – объем инвестиций, предоставляемый региональным уровнем бюджета; $И_ф$ – объем инвестиций, предоставляемый федеральным уровнем бюджета.

Тогда сумма инвестиций, предоставляемая федеральным уровнем бюджета, равна

$$И_ф = И – И_р.$$

Инвестиционные ресурсы, предоставляемые каждым уровнем бюджета в различных формах, определяются как

$$\frac{Д_р}{И_р} = \frac{Д_ф}{И_ф},$$

где $Д_ф$ – доходы, поступающие в федеральный бюджет; $Д_р$ – доходы, поступающие в региональный бюджет.

Принцип инициативности. При осуществлении инновационной деятельности инвесторы могут вкладывать средства не в один, а в несколько объектов. Средства, выделяемые на разработку и реализацию инновационных проектов, носят ограниченный характер. Одним из важных вопросов, возникающих при рассмотрении источников финансирования инновационной деятельности, является распределение инвестиций между центром и регионами.

В регионах реализуется большинство инновационных программ, но не все из них в состоянии самостоятельно покрыть расходы, связанные с инновационной деятельностью. В данном случае между региональными проектами возникает конкуренция за финансовые ресурсы федерального бюджета. Именно регион, выступая инициатором, может взять на себя большую часть вложений. Конкурируя с проектами других регионов, инициатор берет на себя также и большую степень риска вложений, тем самым повышая эффективность федерального уровня бюджета, становясь для него инвестиционно привлекательным. При этом уровень доходности инвестируемого проекта должен оставаться выше альтернативных вариантов вложений, т. е. проект должен оставаться рентабельным и инвестиционно привлекательным для инвестора.

Распределение объемов финансирования инновационной деятельности согласно рассмотренным принципам инициативности и равной эффективности позволяет достичь экономически обоснованного распределения инвестиционных потоков между уровнями бюджета. Также указанные принципы позволяют повысить эффективность и учесть нагрузку каждого уровня бюджета.

Зависимость использования форм и методов стимулирования от стадий инновационного процесса. Этот принцип может быть реализован посредством решения задачи соотношения государственных денег, предоставляемых в форме стимулирования, в зависимости от стадий инновационного процесса.

Традиционно инновационный процесс принято делить на следующие стадии: фундаментальные исследования, прикладные НИР, опытно-конструкторские и проектно-конструкторские разработки, процесс коммерциализации инновационного продукта (от запуска в производство и выхода на рынок и далее – по основным фазам жизненного цикла продукта).

С точки зрения задачи стимулирования, инновационный процесс можно разделить на две стадии: первая стадия включает в себя научные исследования и конструкторские разработки (фундаментальные исследования, прикладные научные исследования, опытно-конструкторские работы), вторая стадия представляет собой процесс коммерциализации инновационного продукта (от запуска в производство и выхода на рынок и далее – по основным фазам жизненного цикла продукта) [5; 6].

Разные этапы инновационной деятельности могут быть профинансированы из разных источников.

Начальные стадии инновационного процесса должны быть финансово обеспечены государством. Это связано с тем, что в этой области невозможен прямой возврат вложений, что делает их непривлекательными для инвесторов. Не все результаты таких

исследований реализуются в новые продукты. Первые стадии инновационного процесса характеризуются высоким риском вложений.

Таким образом, соотношение государственных вложений, собственных средств предприятия или заемных должно быть определено для каждой стадии инновационного процесса в зависимости от величины риска. Чем больше риск, тем больше должна быть доля государственных финансовых средств, предоставляемых в виде прямого финансирования. Государство, как основной собственник ОПК, должно рисковать и предоставлять большую часть необходимых денежных средств. Причем предоставление должно осуществляться на безвозвратной основе.

По мере осуществления инновационного процесса и перехода к опытному производству и промышленному освоению, суммы, предоставляемые государством, должны уменьшаться. На данных стадиях возрастает роль стимулирования, причем оно должно осуществляться посредством форм и методов на возвратной основе. Это связано с тем, что на конечных стадиях инновационного процесса появляется возможность коммерциализации разрабатываемого инновационного продукта, тогда как фундаментальная наука ни продавать, ни патентовать результаты исследований не может. Для предприятий становится возможным получение дохода, поэтому на данном этапе возможно финансирование предприятий, осуществляющих инновационную деятельность, в форме косвенного стимулирования на возвратной основе.

Принцип оптимального соотношения форм и методов стимулирования на возвратной и безвозвратной основе. Организация финансирования должна быть направлена на сочетание источников финансирования и предполагать быстрое и эффективное внедрение инноваций с их коммерциализацией, обеспечивающей рост финансовой отдачи от вложений.

Финансирование инновационной деятельности может осуществляться как за счет собственных, так и за счет заемных финансовых ресурсов.

В связи с тем, что инновационная деятельность характеризуется непредсказуемостью результатов, в качестве оптимизационного критерия соотношения собственных и заемных денежных средств рекомендуется использовать показатель риска.

Риск зависит от стадий инновационного процесса. В зависимости от определенной величины риска и устанавливается оптимальное соотношение собственных и заемных средств для каждой стадии инновационного процесса. Чем выше риск, тем больше должна быть доля собственного капитала по сравнению с заемным, чтобы закрыть оборотные активы предприятия без возникновения риска [7].

Определение соотношения собственных и заемных источников финансирования инновационной деятельности используется в качестве инструмента, который позволяет определить необходимость наращивания собственного и (или) заемного капитала. Далее определяется форма предоставления денежных средств, их оптимальное соотношение, т. е. какими средствами финансировать активы предприятия, предоставляемые на возвратной или безвозвратной основе.

Безусловно, в первую очередь, выгодны те источники финансирования, которые предоставляются на безвозмездной и безвозвратной основе. Это государственное финансирование, которое носит ограниченный характер. В условиях ограниченности финансовых ресурсов безвозвратное предоставление бюджетных средств выступает исключением. В большинстве случаев бюджетные средства предоставляются на возвратной основе. Как следствие, возможными источниками финансирования инновационной деятельности предприятий становятся заемные источники.

Использование заемных источников затрудняет деятельность предприятия. Возникает риск снижения финансовой устойчивости, платежеспособности. Использование средств на возвратной основе предполагает принцип возвратности, платности, срочности. Высокая степень риска невозврата предоставляемых денежных средств приводит к их выдаче под какое-либо материальное обеспечение. Устанавливаются сроки возврата, определенная плата за предоставленные денежные средства в виде процента. Средства предприятия, образованные за счет заемных источников, приносят меньшую прибыль за счет выплаты процента во всех его формах. Но, вместе с тем, использование заемных источников может привести к повышению эффективности выделяемых бюджетных средств. В связи с этим возникает необходимость решения задачи установления оптимального соотношения денежных средств на возвратной и безвозвратной основе. Решение задачи установления оптимального соотношения позволит повысить эффективность инновационной деятельности предприятий.

Сформулированные принципы учитывают особенности инновационной деятельности предприятий ОПК и способствуют решению задач эффективного развития инновационной деятельности, ее финансирования и стимулирования.

Библиографические ссылки

1. Ерыгин Ю. В., Саакян А. М. Оборонно-промышленный комплекс России: тенденции развития. ЭКО. 2010. № 8.

2. Официальный сайт Министерства экономического развития РФ [Электронный ресурс]. URL: http://fcp.vpk.ru.

3. Официальный сайт Министерства финансов РФ [Электронный ресурс]. URL: www. minfin.ru.

4. ТС ВПК Информационное агентство. [Электронный ресурс]. URL: www.vpk.ru.

5. Основные этапы инновационных процессов и источники их финансирования. Конспект экономиста [Электронный ресурс]. URL: http://konspekts.ru.

6. Евграфова И. Ю., Красникова Е. О. Инновационный менеджмент // Библиотека Либрусек [Электронный ресурс]. URL: http://lib.rus.ec.

7. Базилевич А. И. Инновационный менеджмент предприятия : учеб. пособие / под ред. В. Я. Горфинкеля. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2009.

Yu. V. Erygin, A. M. Saakyan

DETERMINATION OF THE PRINCIPLES OF INNOVATION MOTIVATION IN DEFENSE COMPANIES

The authors consider the role of defense-industrial complex (DIC) in the implementation of innovative economic development. And determine the principles of the state motivation of innovation activity of enterprises of DIC.

Keywords: investment in innovation activity, principles, motivation of innovation activity, companies of defense-industrial complex.

© Ерыгин Ю. В., Саакян А. М., 2011

УДК 911.3(470)

А. А. Кисуркин

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ ПО ХАРАКТЕРУ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Устойчивый социально-экономический рост обеспечивается эффективностью управления региональной экономикой, поэтому основным моментом является построение системы критериальных показателей по характеру управляющего воздействия со стороны федеральных, региональных и муниципальных органов управления.

Ключевые слова: критерии регионального развития, эффективность управления.

Достижение долгосрочного устойчивого социально-экономического роста России требует разработки и реализации эффективных программ. В решении поставленного вопроса необходимо учитывать роль и место государственного регионального управления экономическими ресурсами, что воплощается в жизнь через программные механизмы модернизации регионального хозяйственного комплекса, а также повышения прозрачности и грамотности управления процессом социально-экономического развития со стороны законодательных и исполнительных органов федеральной, региональной и муниципальной власти. От успешности совместных действий субъектов управления (федеральных, региональных, муниципальных) напрямую зависит эффективность принимаемых решений и, соответственно, динамика развития каждого конкретного территориального образования.

Основными проблемами управления территориальным образованием любого масштаба являются отсутствие оперативной достоверной информации о его социально-экономическом состоянии, недостаточность единой комплексной методики и подходов к управлению территориальными ресурсами в соответствии с уровнем, статусом и спецификой субъекта управления; отсутствие комплексного механизма перераспределения уровней ответственности между управляющими структурами при изменении внутренних и внешних условий развития региона; недостаточность исследований по эффективности управления региональными ресурсами в зависимости от полномочий субъектов управления и учёта глобальных и локальных региональных и муниципальных социально-экономических факторов развития; отсутствие методики устойчивого развития территории при разграничении, распределении и перераспределении полномочий субъектов управления [1].

Для решения перечисленных проблем необходимо исследовать теоретические и практические аспекты управления региональным развитием с позиции реализации возможностей в сфере хозяйственного воспроизводства субъектов управления при распределении полномочий управления региональными ресурсами. Вопрос о распределении полномочий по управлению экономическими ресурсами между федеральными, региональными органами государственной власти и органами местного самоуправления закреплён в Федеральном законе № 199 (в ред. от 18.07.11 г.). Изменения, внесённые данным законом, позволяют приобрести относительную независимость в принятии управленческих решений федеральных, региональных и муниципальных субъектов управления, что, несомненно, является генератором возможностей, открывающихся перед ними.

Изучение особенностей влияния существующих полномочий государственного и муниципального управления на показатели эффективности территориального развития позволит выявить наиболее значимые направления управленческого воздействия (экономические ресурсы) и принять такие управленческие решения, которые дают возможность в согласовании действий субъектов управления [2]. Всё это позволяет говорить о необходимости совершенствования инструментов распределения полномочий по уровням государственного и муниципального управления.

Несмотря на то, что исследованию социально-экономических процессов в последнее время уделяется большое внимание, данная проблема по-прежнему остаётся актуальной и недостаточно изученной. До сих пор дискуссионными остаются вопросы, связанные с оценкой степени влияния региональных экономических факторов на социально-экономическое развитие регионов, и практически не изучен вопрос о распределении полномочий субъектов управления по уровням управления.

Сочетание рассмотренных проблем определяет актуальность разработки критериев оценки социально-экономического состояния региона с учётом распределения полномочий субъектов управления.

Общепризнанными показателями, характеризующими уровень социально-экономического развития макросистемы, являются следующие величины: индекс промышленного развития, индекс социального развития, реальные доходы на душу населения, средняя продолжительность жизни, жилищная обеспеченность, уровень образования, депопуляция населения и т. д.

Всё многообразие критериев делает задачу достижения определённых результатов трудноопределимой. Появляется необходимость в чётко сформулированной системе оценочных критериев социально-экономического развития региона, которая позволит не только строить стратегические прогнозы, но и оперативно решать вопросы управления региональными ресурсами.

Оценивать уровень социально-экономического развития следует, опираясь на концепцию распределения полномочий управления. За последние 30 лет разработано достаточно много концепций оценки экономического роста. Основной упор сделан на выявление механизма обеспечения экономического роста и его отдельных факторов [3]. Однако часто эффективность развития регионов рассматривается лишь с позиции тенденций изменения вышеперечисленных показателей. Подход отслеживания и мониторинга только динамики социально-экономических процессов не может служить инструментарием управления региональным развитием.

Основное воздействие на регулируемую экономику оказывает уровень и динамика социально-экономических показателей конкурентоспособности регионального хозяйства. Критерий их оценки должен выражать конечную цель – обеспечение эффективного развития, радикального изменения качества жизни населения, развития человеческого капитала, повышения инновационного и инвестиционного потенциала при соответствующем управлении экономическими ресурсами на государственном и муниципальном уровнях.

Под экономическим развитием можно понимать целенаправленное, прогрессивное изменение состава, взаиморасположения и взаимодействия факторов функционирования социально-экономических систем региона, повышающих их эффективность, поэтому критерием уровня развития и характера изменений в социально-экономических системах должен быть универсальный интегральный показатель, объединяющий в себе влияние всех факторов [4].

Критериальные показатели включают ключевые параметры, используемые для определения объективного состояния социально-экономического развития региона. Критерии оценки должны быть различными. Оценка производится по количественным и качественным параметрам, по территориальным и временным показателям, поэтому необходимо учитывать следующие факторы:

– фактор времени (временной лаг);

– динамичность показателей социально-экономического развития;

– неравноценность результатов;

– сопоставимость показателей регионального развития;

– неопределённость и риски, возникающие вследствие долговременного периода критериальной оценки.

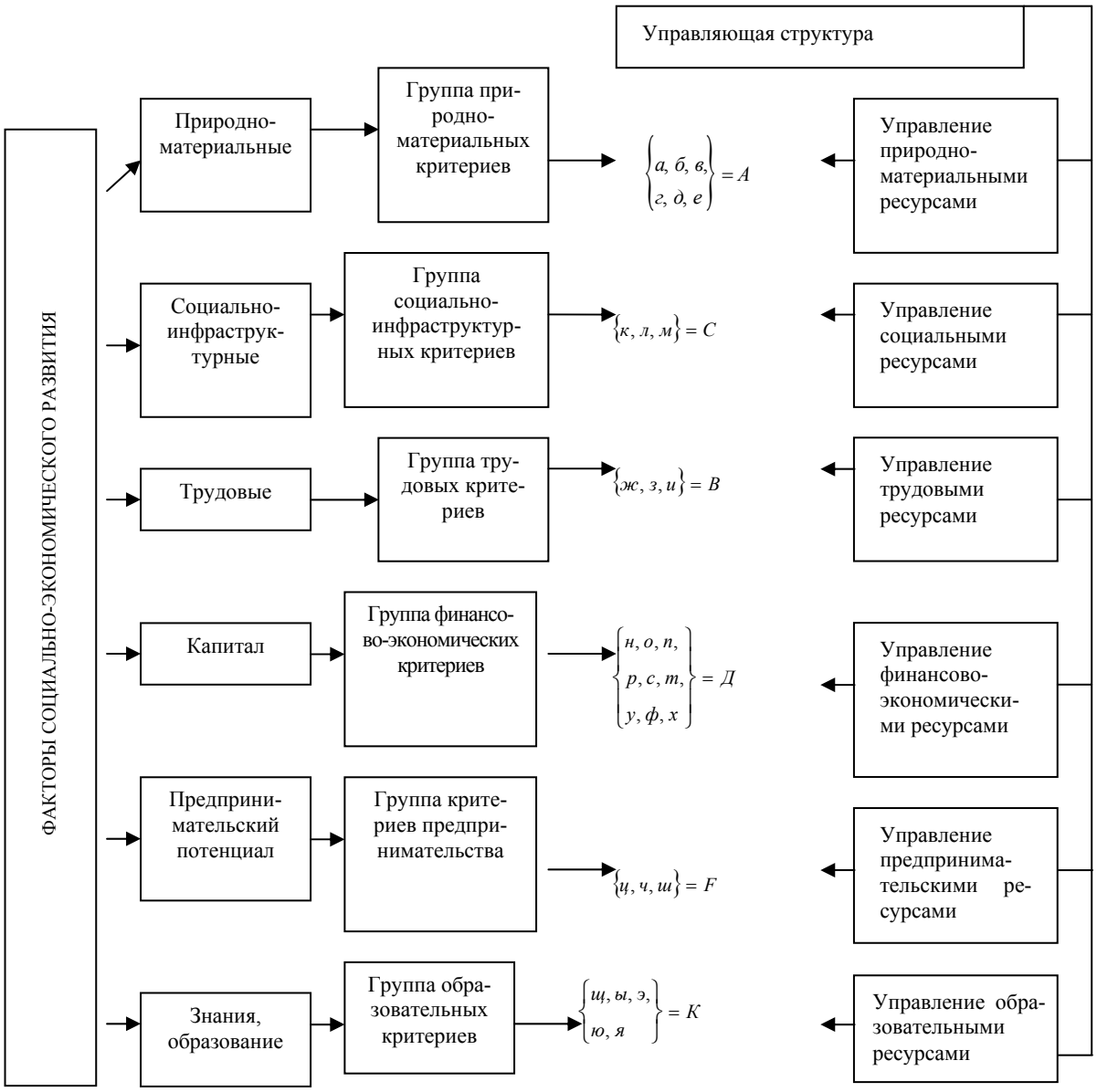
Говоря о критериальных показателях социально-экономического развития, необходимо выделить понятия «эффективность» и «результативность». Под эффективностью развития региона понимается мера соответствия затрат результатам. Результативность можно охарактеризовать как меру соответствия ожидаемых результатов поставленным целям, т. е. прямые позитивные воздействия на социально-экономическую ситуацию в регионе, а также на определяющие её параметры развития [5].

Критериальную оценку регионального развития можно осуществлять, используя два подхода.

Первый подход основывается на оценке отдельных индикаторов, которые численно характеризуют отдельные направления в экономике и социальной сфере.

Второй подход основывается на оценке степени достижения поставленных перед регионом целей развития в виде плановых показателей (среднесрочного и долгосрочного стратегического планирования). Но, учитывая тот факт, что плановые показатели могут отражать общую тенденцию развития региональной экономики либо являться следствием экзогенных факторов, целесообразно проводить компаративный анализ, т. е. сравнение с другими регионами и общероссийскими показателями.

Эффективность деятельности региона и народного хозяйства в целом в значительной степени зависит от эффективности системы управления. На практике всегда стоит задача выбора наиболее эффективного варианта реализации управленческих решений. Поэтому эффективность проектов регионального развития связана с созданием такой системы показателей (критериев), которые наиболее полно отражают результаты и необходимые затраты в виде набора факторов. Следовательно, необходимость построения системы критериев, учитывающей разграничение полномочий субъектов управления по соответствующим уровням (федеральный, региональный, муниципальный), является первостепенной задачей в современном региональном управлении.



Система критериев оценки факторов социально-экономического развития (экономические ресурсы)

На текущий момент в России представленные классификации слишком разнообразны и также не учитывают характер влияния соответствующих полномочий субъектов управления.

При выделении системы критериальных показателей в работе использована концепция теории стадий роста Д. Белла. Согласно данной концепции, каждой стадии развития соответствует своя движущая сила в виде управляющего воздействия, а следовательно, и особый, типичный только для этой стадии, набор критериев. Предлагается выделить систему частных критериев и на их основе построить интегральный критерий оценки социально-экономического развития региональных систем при выборе соответствующих полномочий по уровням управления.

Классификация частных критериев построена в виде индикаторов факторных признаков (см. рисунок):

А – интегральный показатель «природно-материальный критерий», который включает: *а* – уровень ресурсов добывающей промышленности на душу населения; *б* – долю посевных земель в общей площади региона; *в* – основные производственные фонды; *г* – инвестиции в основной капитал на душу населения; *д* – удельный вес природных ископаемых на душу населения; *е* – индекс промышленного производства.

В – интегральный показатель «трудовой критерий», который включает: *ж* – численность экономически активного населения; *з* – коэффициент нагрузки (на 1 000 человек трудоспособного возраста приходится лиц нетрудоспособного возраста); *и* – коэффициент рождаемости.

С – интегральный показатель «информационно-инфраструктурный критерий», который включает: *к* – общую протяжённость автомобильных дорог; *л* – затраты организаций на информационные и коммуникационные технологии; *м* – долю доходов бюджета от информационных услуг.

Д – интегральный показатель «финансово-экономический критерий», который включает: *н* – отношение государственного долга к доходам бюджета; *о* – отношение заёмных средств к доходам бюджета; *п* – валовой региональный продукт (ВРП), приходящийся на душу населения; *р* – денежные доходы населения в расчёте на одного жителя; *с* – долю прибыльных предприятий в общем количестве зарегистрированных на территории региона; *т* – сальдо прибыли и убытков предприятий на одного жителя; *у* – уровень потребления населением материальных благ; *ф* – долю инвестиций в структуре ВРП; *х* – долю инвестиционной продукции в общем объёме производства.

F – интегральный показатель «предпринимательский критерий», который включает: *ц* – число местных предприятий в общей численности предприятий; *ч* – долю объёма продукции малых и средних предприятий в ВРП; *ш* – долю занятых в предпринимательском секторе к общей численности населения.

К – интегральный показатель «образовательный критерий», который включает: *щ* – уровень образования населения; *ы* – число студентов высших учебных заведений на 10 000 человек населения; *э* – долю населения с высшим образованием в общей численности населения; *ю* – численность учащихся дневных образовательных учреждений; *я* – долю кандидатов и докторов наук в общей численности населения.

В качестве интегрального критерия оценки реакции региональных социально-экономических систем на изменение экономических факторов (интегральный критерий ожидаемого уровня развития) предлагается обобщающий измеритель социально-экономического положения региона, рассчитанный как суммарная величина частных критериев при определённом оптимальном сочетании экономических факторов, соответствующих стадии развития регионов (см таблицу).

Экономическая сущность интегрального критерия заключается в комплексной оценке готовности региональных социально-экономических систем реагировать на изменение параметров экономических ресурсов региона в зависимости от полномочий, закреплённых за соответствующими субъектами управления.

Национальные интересы связаны, прежде всего, с решающей ролью регионального развития в преодолении депрессивных явлений. В этих условиях важным является тезис о поиске критериальных показателей социально-экономического развития региона. Признание исключительной роли регионов в развитии экономики стало общепризнанным постулатом современной экономической науки. Однако до превращения региональной идеи в эффективно действующий инструмент и механизм экономической практики необходимо разработать общие принципы и критерии оценки с целью сравнения результатов. В научном отношении можно говорить об отсутствии единых критериев регионального развития по характеру управляющего воздействия со стороны федеральных, региональных и муниципальных органов управления.

Из-за отсутствия ясного механизма оценки управляющего воздействия происходят нескоординированные между собой процессы с высокими издержками. В качестве основных инструментов оптимизации таких процессов могут выступать масштабные преобразования в законодательстве, преобразования в финансовой системе в виде перераспределения полномочий субъектов управления. Сдвиги в отношениях собственности стали главной движущей силой таких преобразований, в результате которых закладывается фундамент регионального развития.

Всё вышеизложенное предполагает необходимость выработки критериальных показателей, схемы и алгоритма действий в рамках концепции регионального социально-экономического развития. Уже при принятии решений по формированию тех или иных программ развития целесообразно знать критерии оценки и механизмы достижения поставленных целей, позволяющих преодолеть финансово-экономическую нестабильность, обеспечить реструктуризацию, диверсификацию, рост и развитие региональной экономики, решение определённых социальных задач, повысить качество жизни людей и т. д.

Отсутствие такого подхода в нынешних концепциях развития существенно тормозит решение многих социально-экономических задач. На основе проведённых исследований можно предложить следующую схему осуществления целенаправленных региональных преобразований.

Компоненты интегрального критерия оценки реакций социально-экономических систем на измерение экономических факторов

Наименование частных критериев	Характеристика с позиции функционирования экономических факторов
Природно-материальный, $К_1$ (группа *А*)	Отражает состояние природных ресурсов, биологических, климатических и репродуктивно-биологических
Трудовой, $К_2$ (группа *В*)	Способность производить товары и услуги
Социально-инфраструктурный, $К_3$ (группа *С*)	Формирование социально-экономического пространства
Финансово-экономический, $К_4$ (группа *Д*)	Движение капитала
Предпринимательский, $К_5$ (группа *F*)	Способность к организации производства товаров и услуг
Образовательный, $К_6$ (группа *К*)	Необходимые знания и потенциальные, необходимые для производства товаров и услуг
Интегральный критерий (ИКР) оценки реакций социально-экономических систем на изменение экономических факторов	$\text{ИКР} = \sum_{i=1}^{6} \text{К}_i d_i$, где d_i – степень важности критерия

С учётом критериальных показателей развития регионов по характеру управляющего воздействия:

1. При осуществлении функций управления региональной экономикой следует изучить особенности влияния существующих полномочий государственного и муниципального управления на показатели эффективности региона.

2. На стадии выбора методов управления региональным развитием необходимо разработать систему критериев оценки факторов социально-экономического развития регионов.

3. С целью повышения эффективности управляющего воздействия следует использовать интегральный критерий оценки реакций социально-экономического развития.

С помощью интегрального критерия необходимо оценивать и эффективность деятельности субъектов управления, и долю их участия в реализации программ регионального развития.

В контексте вышеизложенного можно говорить о необходимости использования критериальных показателей развития. Процесс создания новых институтов оценки должен включать анализ и прогнозирование степени влияния органов управления различного уровня на конечные результаты функционирования региона.

Особое внимание должно быть уделено формированию инструментов распределения полномочий субъектов управления, которые могут изменить принципы организации и работы федеральных, региональных и муниципальных органов управления.

Библиографические ссылки

1. Инвестиционные проекты, финансируемые из федерального бюджета: методы оценки эффективности / А. Водянов [и др.] // Российский экономический журнал. 2006. № 1.

2. Лексин В. Н., Швецов А. Н. Государство и регионы: теория и практика государственного регулирования территориального развития. М. : Изд-во ЛКИ, 2007. С. 357.

3. Пчелинцев О. С. Региональная экономика в системе устойчивого развития. М. : Наука, 2004. С. 89.

4. Регион: проблемы планирования и управления / под ред. А. С. Новоселова. Новосибирск : Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2002. С. 240.

5. Семенова Т. Ю. Оценка эффективности региональных целевых программ и проектов // Проблемы современной экономики. 2007. № 4.

A. A. Kisurkin

CRITERIAL INDICATORS OF REGIONS ACCORDING TO THE NATURE OF THE CONTROLLING ACTION

The sustained expansion of socio-economic growth ensures effective management of the regional economy, so the main point is to construct a system of criteria indicators on the nature of the controlling action pursued by federal, state and municipal governments.

Keywords: criteria for regional development, good governance.

© Кисуркин А. А., 2011

УДК 911.3(470)

Т. Г. Краснова, А. Н. Дулесов

РОЛЬ ЭТНОЭКОНОМИКИ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ РЕГИОНА*

Рассматривается роль этнобизнеса (этнических хозяйств) в региональном развитии. Даётся полное определение этноэкономики и её структуры. Оцениваются возможности этноэкономического развития с позиций экономико-математического моделирования.

Ключевые слова: этноэкономика, этноэкономический потенциал, социально-экономическое развитие региона.

Этноэкономика рассматривается в качестве существенной части экономической системы всех обществ, имеющих сложную политэкономическую структуру. Этноэкономика выполняет ряд важнейших макроэкономических функций: социального воспроизводства, антикризисную, перераспределения природной ренты.

Следовательно, успешной может быть лишь та политика экономической модернизации, которая способна соединить экономику мезоуровня, региональную экономику и малый сектор этноэкономики. Главная задача современности – найти и реализовать механизмы их взаимодействия, соединить легкотоварные формы труда и производства в развивающуюся предпринимательскую деятельность, увеличивая тем самым экономическую плотность региона, дополняя его экономическое пространство предпринимательской производственной сферой.

*Печатается при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (госконтракт № 02.740.11.05.85).

Отличительными особенностями современной социально-экономической политики являются стремление минимизировать использование ресурсов федерального бюджета за счёт роста обязательств региональных и местных администраций. Региональная экономика при этом ориентирует все свои ресурсы на достижение высокого коммерческого результата с целью минимизации социальной нагрузки. В сложившихся условиях настоятельной необходимостью становится модернизация региональной политики, и её основным содержанием должно стать наращивание воспроизводственного потенциала региона методом расширения сфер экономической деятельности. В частности, таким потенциалом является этноэкономика.

К региональным аспектам этноэкономики российские ученые относят территориальные особенности развития экономического сектора предпринимательства. Под *этноэкономикой* подразумевают сегмент хозяйственной деятельности на мезоэкономическом уровне, в значительной мере не наблюдаемый статистическими и налоговыми органами и являющийся типичным хозяйственным укладом традиционной экономики [1]. Этноэкономике этнически выраженных регионов присущи преимущественно аграрные формы хозяйственной деятельности, сочетание натуральных и мелкотоварных форм производства, использование кустарных ремёсел и надомного труда, доминирование неформальных институтов, экстенсивный тип занятости с использованием сырьевой хозяйственной инфраструктуры и др. [2].

Например, в трудах Л. А. Узденовой рассматривается этноэкономика в формате мезоуровневой структуры национального хозяйства как территориально локализованная форма организации предпринимательства в традиционных видах трудовой деятельности населения региона [3]. Основными типологическими признаками этноэкономики являются: органическая связь производственной деятельности, имеющей товарную направленность, с ведением домашнего хозяйства; использование преимущественно сырьевых ресурсов, произведённых в домашних хозяйствах; неиндустриальный характер труда, базирующийся на умениях и навыках, передаваемых из поколения в поколение, накапливаемом трудовом опыте; неформальный характер обмена ресурсами и услугами; регулирование рынка труда преимущественно неформальными институтами [4].

М. О. Шандиров определяет этноэкономику как взаимообусловленное сочетание адекватных конкретным этносам этноэкономических систем, формируемых в процессе развёртывания этноэкономических отношений, объективно складывающихся в процессе производственно-хозяйственного бытия этноса, носящих как эндогенный, так и экзогенный характер и охватывающих широкий спектр экономических аспектов этнического воспроизводства [5].

Учитывая тот факт, что этноэкономика территориально локализована, можно сказать, что трансформируется она в конкретные региональные воспроизводственные циклы (рис. 1).

При этом этнический наследственный механизм является определяющим в развитии региональной экономической системы, так как в нём присутствует эволюционность, способность под воздействием внешних условий к модернизации и трансформации в современную форму конкурентного преимущества региона. Функции этноэкономики в основном заключаются в обеспечении эффективного использования человеческого капитала этносов в условиях поляризованного структурированного общества; сохранении этноэкономического многообразия в целях усиления экономического потенциала хозяйственной системы региона (рис. 2). Это связано с обеспечением эффективного воспроизводственного процесса с учётом точек роста региональной экономики.

Рис. 1. Воспроизводственные циклы этноэкономики

Рис. 2. Функции этноэкономики

Региональная этноэкономика обладает адаптационной способностью и хорошо приспосабливается к экономическим преобразованиям, так как использует разнообразные методы ведения хозяйства. Этноэкономика региона выполняет такие функции, как уменьшение издержек переходного периода, обеспечение социального многообразия регионов, совершенствование местного экономического механизма [4].

Следует отметить, что среди исследователей нет единства мнений в определении этноэкономики региона, различны и толкования её форм, типов, свойств и других параметров. Поэтому основные концепции региональной этноэкономики можно свести к двум вариантам: традиционному и расширенному.

В границах суженного понимания региональная этноэкономика отличается экстенсивностью, аграрно-кустарной направленностью, натуральными и мелкотоварными формами обмена, замкнутостью в рамках домохозяйства и неформальным регулированием труда.

С позиции расширенного подхода региональная этноэкономика обладает не только традиционно-базовыми способами хозяйствования, адекватными региональным природно-климатическим условиям и исторически сложившимся социально-экономическим институтам, но и способностями к модификации, модернизации и трансформации с целью создания дополнительных конкурентных преимуществ региону.

Формы региональной этноэкономики и её структура разнообразны и включают различные подходы – от традиционных до инновационных. Предлагается интегральная структура форм этноэкономики, объединяющая две концепции этноэкономической деятельности (рис. 3).

Рис. 3. Структура форм региональной этноэкономики

Формированию концепции этноэкономики открытого региона способствует представление региона как открытого пространства с межрегиональными взаимодействиями и трансграничным перемещением капиталов и рабочей силы. Эти этноэкономические формы образуют устойчивую этноэкономику полного цикла, которую можно представить в виде кластера, имеющего сложносочинённый характер, поскольку кластерообразующим моментом выступает этнодемографический территориальный фактор. Этноэкономический кластер, кроме свойств дискретности, является симбиозом процессной, творческой и туристической кластерных форм, образуя своеобразную горизонтальную интеграцию [5].

Объектом региональной этноэкономики выступает регион как историческое этнокультурное открытое экономическое пространство, воспроизводственная система и квазидомохозяйство. Поэтому очень важно изучить механизмы этнодемографических и этноэкономических процессов, а также особенности синергической результирующей их взаимодействия, обусловленные определёнными территориальными условиями, причинами и факторами и образующие специфическую подсистему региональной экономики.

Как область практической деятельности этноэкономика региона имеет обеспечивающую функцию устойчивого (а в перспективе и расширенного) экономического воспроизводства этносов в качестве уникальных объектов на основе эффективного функционирования как традиционных для данного региона, индустриальных, так и рыночных и инновационных видов экономической деятельности, направленных на повышение качества жизни населения территории.

Задачи управления этноэкономикой разнообразны и затрагивают все сферы жизнедеятельности регионального хозяйства (рис. 4).

В кризисные периоды этноэкономика региона выполняет функцию амортизатора пиковых негативных явлений, стабилизатора социально-экономических ситуаций. В стабильные периоды этноэкономика региона сохраняет традиционные виды хозяйствования, объединяет этнос, способствует применению и развитию человеческого капитала, создаёт дополнительные социально-экономические преимущества, позиции, усиливая конкурентоспособность региона, а также укрепляет экономическую базу этноса.

К сожалению, в официальных документах и стратегических планах социально-экономического развития субъектов РФ зачастую отсутствует учёт территориального этноэкономического компонента.

Этноэкономические процессы напрямую связаны с естественным и механическим движением населения и рассматриваются в качестве фактора устойчивого социально-экономического развития и основы территориальной самоорганизации и выступают базой региональной экономики, её «каркасом».

Эффективность использования ресурсов этноэкономического потенциала следует рассматривать как систему факторов производства, отражающих прямую связь с объемом производимой этнопродукции. Наиболее объективно эта связь отражается производственными функциями, анализ которых можно взять за основу формирования систем частных показателей эффективности.

Чтобы определить эффективность использования ресурсного потенциала, следует построить производственные функции отдельно по каждой совокупности региональных этнохозяйств.

Рис. 4. Структура задач управления этноэкономикой региона

Результаты кластерного анализа этнокультурных предприятий Республики Хакасия (2010 г.)

Показатели (в среднем на 1 хозяйство)	Кластеры				
	1	2	3	4	5
Число предприятий	19	19	8	1	2
Материальные затраты, тыс. руб.	2 306,2	2 736,1	5 271,5	4 881,5	212,8
Среднегодовая численность работников, чел.	33,9	59,7	148,7	147,4	23,8
Среднегодовая стоимость основных производственных фондов, тыс. руб.	7 697	13 821	31 292	58 260	17 071
Оборотные средства, тыс. руб.	1 591	5 761	14 143	16 748	23 270
Валовая региональная продукция, тыс. руб.	2 840	8 463	21 696	24 953	26 062
Приходится на 1 работника: основных производственных фондов, тыс. руб.	226,8	231,5	210,5	395,3	716,3
Оборотных средств, тыс. руб.	46,89	96,50	95,12	113,65	156,08

С этой целью был проведен кластерный анализ для 39 этнопредприятий Республики Хакасия по данным за 2010 г. В основу классификации положены объемы ресурсов и показатели интенсивности использования ресурсов (вычисления проводились на основе программ STATISTICA 6.0, STATGRAPHICS plus 5.O).

В результате выполнения кластерного анализа исходная совокупность была разбита на 5 групп (см. таблицу).

Информационное описание и прогнозирование процессов развития этноэкономики как системы зависит от состояния этноэкономического потенциала и предполагает преобразование этноресурсов с использованием математических моделей. В исследовании используются методы математико-статистического моделирования, объединенные в следующие блоки:

– формирование системы типообразующих характеристик региональных этноэкономических систем на основе агрегирования показателей статистической отчетности с использованием математико-статистических методов;

– комплексное экономико-статистическое исследование этноэкономического потенциала с использованием агрегированных показателей;

– анализ потребительского спроса на этнопродукцию на региональном рынке с использованием математической формализации функции предпочтений;

– моделирование этноэкономических процессов в регионе и прогнозирование основных этноэкономических параметров.

Результаты расчетов по моделям этнопроизводства и потребления могут быть взяты за основу разработки оптимальной стратегии развития этноэкономических систем региона.

Модели формирования агрегированных типообразующих факторов, классификации и факторного анализа этноэкономики региона характеризуются спецификой множества исследуемых объектов. В число типообразующих показателей включены характеристики отдельных подсистем, отслеживаемые в базах данных (например, подсистемы ресурсного этнопотенциала, объемов и эффективности этнопроизводства и т. д.). Каждая подсистема содержит не менее 5–8 исходных показателей, среди которых имеются взаимообусловленные или скоррелированные. С учетом последней особенности в целях снижения размерности пространства показателей применены приемы статистического агрегирования показателей, основанные на методе главных компонент [6]. Для каждой подсистемы были построены по две агрегированные характеристики, соответствующие первой и второй главным компонентам. Доля объясняемой дисперсии D для каждой подсистемы составляла, как правило, от 60 до 85 %, модули факторных нагрузок – от 0,60 до 0,95, что свидетельствует об удовлетворительном качестве агрегирования.

Главные компоненты представляют линейную комбинацию исходных нормированных показателей с положительными и отрицательными коэффициентами. Это позволяет интерпретировать полученные агрегированные факторы, соответственно, как характеристики масштаба (общего объема, уровня) и структуры (например, специализации).

Уравнения главных компонент, агрегирующих показатели объемов этноэкономического производства в Республике Хакасия в 2008 г., имеют следующий вид:

$$B_1 = 0,195x_1 + 0,141x_2 + 0,193x_3 + \\ + 0,218x_4 + 0,226x_5 + 0,202x_6,$$

$$B_2 = 0,634x_1 + 0,475x_2 + 0,493x_3 - \\ - 0,400x_4 - 0,201x_5 + 0,356x_6,$$

$$D = 90\ \%,$$

где B_1 – суммарный объём от этноэкономики, полученный по традиционной форме развития этноэкономики; B_2 – суммарный объём от этноэкономики, полученный по инновационному пути развития; x_1 – трудовые этноресурсы; x_2 – производственные этноресурсы; x_3 – природно-сырьевые ресурсы; x_4 – демографические этноресурсы; x_5 – инвестиционные этноресурсы; x_6 – инновационные этноресурсы.

Из приведенных уравнений видно, что главные компоненты B_1 и B_2 характеризуют, соответственно,

суммарный объем и специализацию этнопроизводства в регионе.

Уравнения главных компонент для показателей объемов этнопроизводства в 2010 г. имеют следующий вид:

$$B_1 = 0,167x_1 + 0,182x_2 + 0,193x_3 + \\ + 0,215x_4 + 0,225x_5 + 0,202x_6,$$

$$B_2 = 0,167x_1 + 0,182x_2 + 0,193x_3 + \\ + 0,215x_4 + 0,225x_5 + 0,202x_6,$$

$$D = 86\ \%.$$

Проверка показала, что собственные числа, соответствующие главным компонентам для 2008 и 2010 гг. отличаются несущественно: статистическая гипотеза относительно их равенства не отклонялась при уровне значимости 0,1. Это позволило сделать вывод о несущественности изменений структуры производимой этнопродукции в регионе за период 2008–2010 гг. включительно.

Построенные подобным образом для других подсистем этноэкономического потенциала, главные компоненты использовались в качестве типообразующих факторов при решении задач классификации этноэкономики. Классификации этноэкономики строятся отдельно по каждой группе однотипных показателей, характеризующих определенную подсистему. На их основе были получены сводные классификации, а также классификации, учитывающие динамику развития этноэкономических систем в 2008–2010 гг.

В развитие полученных результатов была проведена классификация этноэкономических систем по факторам инвестиционной привлекательности [7]. На основе типологического и факторного анализа было установлено, что основными факторами, определяющими объем инвестиций этноэкономики, являются объемы производства этнопродукции в регионе, техническая оснащенность этнопроизводства и доля этнопродукции, производимая в частных этнохозяйствах. Это объясняется тем, что основной источник инвестирования – собственные средства.

Например, на основе математико-статистического моделирования было установлено, что доведение объемов инвестиций до 1 000 руб. и бюджетных субсидий до 130 руб. на гектар пашни (примерно в 1,5–2 раза выше, чем в среднем по России) приведет к прогнозируемому росту выхода валовой этнопродукции на 25–30 % в этноаграрных системах со среднероссийскими показателями динамики производства и рентабельности. Рекомендованное увеличение инвестиций следует рассматривать в качестве нижней оценки, поскольку переход к инновационным технологиям производства потребует более значительных капиталовложений.

Описанный подход к построению моделей можно применять также в задаче классификации регионов России по показателям этноэкономического потенциала. По результатам расчётов можно выделить две группы регионов. Регионы первой группы характеризуются высоким этнопотенциалом, и на их базе целесообразно отрабатывать технологии совершенствования рыночных отношений в этноэкономических системах. Адаптивный потенциал второй группы значительно ниже. Для них более целесообразна отработка механизмов социальной защиты населения и поддержки этносферы для будущей модернизации.

Таким образом, роль этноэкономического потенциала в развитии региона очевидна и заключается в следующем:

– этноэкономика выполняет антикризисную функцию с позиции воспроизводства;

– социальная направленность этноэкономики позволяет выявить потенциал социокультурной модернизации и интеграции в регионе;

– обоснованность воздействия факторов интеграционных и трансформационных процессов, связанных с вовлечением в экономику внутренних региональных ресурсов;

– выявляется корреляция этноэкономического взаимодействия структурных элементов региональной экономики.

Результаты исследования дают основание полагать, что с помощью экономико-математического моделирования можно выявить оптимальную структуру этноэкономического потенциала и обосновать эффективность финансовых вложений в развитие и поддержку этноэкономических систем.

Библиографические ссылки

1. Баранов С., Скуфьина Т. Анализ межрегиональной дифференциации и построение рейтингов субъектов Российской Федерации // Вопросы экономики. 2005. № 8. С. 54–75.

2. Гранберг А. Г. Основы региональной экономики. 2-е изд. М. : ГУ ВШЭ, 2001.

3. Гутман Г. В., Мироедов А. А., Федин С. В. Управление региональной экономикой. М. : Финансы и статистика, 2002.

4. Иншаков О. Этноэкономика Юга России: стратегические перспективы в координатах модернизации // Проблемы теории и практики управления. 2008. № 4. С. 8–20.

5. Овчинников В. Н., Колесников Ю. С. Этноэкономика как фактор развития // Проблемы прогнозирования. 2006. № 1.С. 118–123.

6. Кузнецова О. В. Экономическое развитие регионов: теоретические и практические аспекты государственного регулирования. 4-е изд. М., 2007.

7. Балабанов А. С. Кумулятивный характер социального неравенства: проблемы измерения // Прикладная статистика в социально-экономических проблемах : материалы Междунар. конф. (14–15 февр. 2003, г. Н. Новгород) : в 2 т. Т. 2. Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2003. С. 99–104.

T. G. Krasnova, A. N. Dulesov

ROLE OF ETHNIC ECONOMY IN SOCIAL AND ECONOMIC DEVELOPMENT OF A REGION

The role ethnic business life (ethnic households) in regional development is considered. A complete definition of ethnic economy and its structure are presented. The possibility of ethnic economic development, in terms of economic and mathematical modeling, is estimated.

Keywords: ethnic economy, ethnic economic potential, socio-economic development.

© Краснова Т. Г., Дулесов А. Н., 2011

УДК 338.22.01

В. А. Кузнецова, С. С. Семенов

ТРЕБОВАНИЯ И ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Рассматриваются концептуальные вопросы формирования экономической политики предприятия. Выявлены требования формирования экономической политики. Сформулированы и систематизированы принципы, обеспечивающие выполнение выявленных требований.

Ключевые слова: экономическая политика, требования к формированию экономической политики, принципы формирования экономической политики, направления экономической политики, финансовая политика.

Под воздействием современных вызовов, неустойчивости внешней среды, усиления конкуренции любое предприятие должно стремиться осуществлять свою деятельность с максимальной эффективностью. Этому, на наш взгляд, во многом может способствовать разработка обоснованной экономической политики. Однако ей уделяется недостаточно внимания не только на практике, но и в теории. Так, изучение научной литературы показало, что даже в понятийном аппарате до сих пор не сложилось единого мнения.

Проведенный терминологический анализ выявил признаки, характеризующие экономическую политику предприятий:

– экономическая политика подразумевает наличие четко сформулированных целей;

– экономическая политика направлена на управление ресурсами хозяйствующего субъекта;

– экономическая политика затрагивает различные сферы управления хозяйством (экономики) фирмы.

Политика всегда подразумевает наличие власти. Каждый субъект власти осуществляет выбор линии поведения, в рамках которого реализует властные отношения с объектом управления. Эффективность политики зависит от того, способна ли она достичь поставленных целей и насколько рационально при этом используются имеющиеся ресурсы. Наличие альтернативных методов управления обусловливают проблему выбора. Задача выбора состоит в том, чтобы политика была наиболее эффективной [1]. Поэтому, на наш взгляд, необходимо ввести еще один признак, присущий экономической политике: экономическая политика подразумевает наличие альтернативных методов управления, обоснованный выбор которых обеспечит наиболее рациональное достижение целей.

В соответствии с вышеизложенным предлагается уточнить понятие экономической политики. Так, под экономической политикой предприятия мы предлагаем понимать целенаправленный выбор линии поведения в области экономики. Результатом формирования экономической политики является пакет документов (приказов, инструкций и т. п.), исполнение которых обеспечивает достижение поставленных целей [1].

Ученые сходятся во мнении, что экономическая политика является сложным и крайне неоднородным явлением. Поэтому в практической деятельности возникает много проблем, решение которых видится в разработке концептуальных положений по формированию политики.

Концептуальный подход заключается в выработке единого определяющего замысла формирования экономической политики, который подразумевает формирование требований, реализующихся посредством соблюдения соответствующих принципов.

По нашему мнению, требования к формированию экономической политики вытекают из сущностной характеристики экономической политики предприятия: в частности, научно обоснованный выбор альтернативной линии поведения и наличие системы четко сформулированных целей предприятия. В свою очередь, цели предприятия диктуют требования к системе критериев и показателей экономической политики, позволяя обосновывать выбор альтернативной линии поведения экономическими расчетами.

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к формированию экономической политики:

– научно обоснованный выбор альтернативной линии поведения;

– наличие системы четко сформулированных целей предприятия;

– наличие системы критериев и показателей экономической политики;

– учет влияния внешних и внутренних факторов;

– учет особенностей предприятия;

– комплексный подход, учитывающий крайне неоднородный состав элементов и направлений экономической политики.

Вышеперечисленные требования реализуют принципы экономической политики.

Слово принцип произошло от латинского *principium* (начало, основа, первопричина). Согласно толковым словарям понятие «принцип» может представлять собой основную особенность устройства какого-либо механизма; внутреннее убеждение человека, определяющее его отношение к действительности [2]; исходное положение какой-либо теории, учения, науки [2; 3]; основание некоторой совокупности фактов или знаний, исходный пункт объяснения или руководства к действиям [4]; установившиеся, укоренившиеся, общепринятые, широко распространенные правила хозяйственных действий и свойства экономических процессов [3].

Проведенное нами исследование направлений и элементов экономической политики, а также связей между ними позволило выявить и систематизировать принципы её формирования: методологические принципы, принципы системного анализа, планирования и стратегического управления.

Рассмотрим эти принципы более подробно с позиции формирования экономической политики предприятия.

Принципы системного анализа включают:

1. Принцип оптимальности, заключающийся в выборе наиболее подходящего варианта, который является лучшим по комплексу показателей для заданных условий [5].

2. Принцип системности, который предполагает исследование объекта, с одной стороны, как единого целого, а с другой стороны, как части более крупной системы, в которой анализируемый объект находится с остальными системами в определенных отношениях [5].

Соблюдение данного принципа, по нашему мнению, необходимо при формировании экономической политики, так как с его помощью экономическая политика, с одной стороны, рассматривается как совокупная система элементов, с другой стороны, как один из элементов в системе управления предприятием и в системе государственной экономической политики.

3. Принцип иерархии, который заключается в построении структурных отношений в сложных многоуровневых системах. Иерархические отношения имеют место во многих системах, для которых характерна как структурная, так и функциональная дифференциация, т. е. способность к реализации определенного круга функций [2]. По нашему мнению, при разработке экономической политики необходимо учитывать этот принцип по причине иерархичности элементов экономической политики. В ее состав входят различные элементы, объединенные в направления экономической политики. В частности, политика управления оборотным капиталом, политика финансирования, инвестиционная, дивидендная, амортизационная, учетная и налоговая политики объединяются в финансовую политику, а в маркетинговую политику объединяются такие элементы, как товарная, ценовая, коммуникативная политики и политика сбыта.

4. Принцип интеграции, направленный на изучение интегративных свойств и закономерностей, которые проявляются в результате совмещения элементов до единого целого за счет эффекта совмещения действий. Применительно к экономической политике, по нашему мнению, этот принцип означает, что при формировании экономической политики необходимо учитывать те эффекты от сочетания элементов экономической политики, которые не проявляются при их индивидуальном исследовании.

Принципы планирования включают:

1. Принцип «скользящего планирования», который состоит в том, что в рамках долговременной программы, рассчитанной на достижение той или иной конечной цели, устанавливаются краткосрочные планы, которые ежегодно сдвигаются. Такой порядок, с нашей точки зрения, необходимо соблюдать и при формировании экономической политики, так как, с одной стороны, предприятие в каждый момент знает свои перспективы на несколько лет вперед, а с другой стороны, открывается возможность постоянно вносить в планы необходимые коррективы, связанные с новыми открытиями, изменениями в экономике и пр. Таким образом, открывается широкая возможность для обратной связи – не только от плана к практике, но и от практики к плану [2].

2. Принцип оперативности, который заключается в быстрой реакции на изменение ситуации. Он обеспечивает своевременное принятие управленческих решений в условиях изменения внешней среды.

3. Принцип непрерывности планов, который заключается в том, что на каждом предприятии процессы планирования, организации и управления производством, как и трудовая деятельность, являются взаимосвязанными между собой и должны осуществляться постоянно, а разработанные планы непрерывно приходить на смену друг другу. Этот принцип позволяет предприятию осуществлять свою деятельность непрерывно, реализуя сформированную экономическую политику.

4. Принцип информационной обеспеченности, означающий, что для разработки экономической политики необходимо информационное обеспечение. Информация должна быть точной, достаточной и достоверной.

Методологические принципы включают:

1. Принцип последовательности, который по нашему мнению, следует применять к разработке экономической политики посредством соблюдения относительного постоянства в использовании приемов и методов ее поэтапного формирования согласно методическим рекомендациям.

2. Принцип развития, который заключается в том, что заранее предусматриваются возможности для развития и совершенства какого-либо объекта. Мы считаем, что данный принцип приобретает важное значение в условиях изменчивости и нестабильности среды функционирования, поэтому экономическая политика должна заблаговременно предусматривать такие изменения.

3. Принцип эффективности, требующий разработки такого варианта экономической политики, который при существующих ограничениях используемых ресурсов обеспечивает получение наибольшего экономического эффекта. Главным показателем планируемого эффекта может служить превышение результатов от формирования экономической политики над затратами, связанными с ее разработкой.

4. Принцип вариантности, который, по нашему мнению, является одним из важнейших принципов формирования экономической политики, так как в процессе принятия тех или иных решений рассматриваются различные способы достижения поставленной цели. При выборе линии поведения необходимо рассматривать различные способы достижения поставленной цели. В итоге предприятие выбирает наиболее рациональное решение.

5. Принцип сопоставимости альтернатив. Н. М. Гусев отмечает, что при выборе оптимальных решений очень часто приходится сталкиваться с несопоставимостью имеющихся альтернатив [6]. Поэтому для обеспечения сопоставимости альтернатив необходимо устранить различия в размерности показателей и определить их важность (значимость). По нашему мнению, такой принцип важен для обоснования экономической политики, так как принятие решения затрагивает различные процессы в деятельности предприятия.

Принципы стратегического управления включают:

1. Принцип ориентации на результат, который заключается в том, что экономическая политика предприятия нацелена на конкретный результат. Этим результатом является достижение заранее поставленных целей. Цели экономической политики могут быть различными (например, максимизация стоимости бизнеса, повышение конкурентоспособности продукции или минимизация рисков). Причем одни цели могут сочетаться друг с другом, а другие – находиться в противоречии. Поэтому руководство должно определить, какие цели являются главными и, ориентируясь на них, формировать экономическую политику предприятия.

2. Принцип ориентации на будущее. Суть принципа состоит в том, чтобы решение текущих проблем осуществлялось с точки зрения будущего фирмы. Применение данного принципа, с нашей точки зрения, позволит согласовать задачи, которые стоят перед организацией в текущем периоде, с перспективными планами. Другими словами, приоритетными при формировании экономической политики должны быть долгосрочные цели предприятия.

3. Принцип комплексности, который означает учет всех факторов, влияющих на формирование экономической политики. Экономическая политика, как отмечалось выше, является сложной и неоднородной системой, состоящей из многих направлений и элементов, на каждый из которых влияет множество внешних и внутренних факторов. Игнорирование этого принципа может привести к серьезным упущениям в экономической политике предприятия.

В таблице показано, реализация каких принципов может обеспечить выполнение требований, предъявляемых к формированию экономической политики предприятия.

Соответствие требований и принципов формирования экономической политики

Требования	Принципы
Научно обоснованный выбор альтернативной линии поведения	Оптимальности; системности; иерархии; интеграции; «скользящего планирования»; оперативности; непрерывности; информационной обеспеченности; последовательности; развития; эффективности; вариантности; сопоставимости альтернатив; ориентации на результат; ориентации на будущее; комплексности
Наличие системы четко сформулированных целей предприятия	Ориентации на результат; ориентации на будущее
Наличие системы критериев и показателей экономической политики	Вариантности; сопоставимости альтернатив; комплексности
Учет влияния внешних и внутренних факторов	Иерархии; интеграции; оперативности; комплексности; информационной обеспеченности
Учет особенностей предприятия	Системности; иерархии; интеграции
Комплексный подход, учитывающий крайне неоднородный состав элементов и направлений экономической политики	Системности; иерархии; интеграции

На основе представленных концептуальных положений авторами разработана математическая модель и предложены рекомендации по формированию одного из направлений экономической политики – финансовой политики.

В качестве объекта исследования было выбрано ОАО «Сибирьтелеком», которое с 1 апреля 2011 г. вошло в ОАО «Ростелеком» в качестве макрорегионального филиала «Сибирь».

В результате анализа деятельности общества и проведенных расчетов на основе разработанной модели сделаны следующие выводы: акционерному обществу «Сибирьтелеком» следует выбрать смешанный тип финансовой политики, в частности:

– выбрать умеренный тип управления оборотным капиталом вместо агрессивного; это позволит снизить риск потери платежеспособности;

– сохранить агрессивный тип политики финансирования, но изменить структуру заемных средств, увеличив в ней долю долгосрочных обязательств;

– выбрать агрессивный тип амортизационной политики вместо консервативного и умеренный тип учетной политики вместо консервативного; это позволит обществу увеличить приток денежных средств и легально снизить сумму налога на прибыль;

– сохранить умеренный тип дивидендной политики, поскольку на протяжении последних 5 лет общество стабильно выплачивало дивиденды;

– выбор типа инвестиционной политики будет зависеть от доходности инвестиционных проектов и связанных с ними рисков; так, приняв решение о реализации высокодоходных проектов, общество проводит агрессивную политику, и наоборот.

Разработанные концептуальные положения, на наш взгляд, будут способствовать формированию обоснованной экономической политики, которая при условии интеграции в систему управления предприятием позволит повысить его эффективность, а также увеличить его конкурентные преимущества.

Библиографические ссылки

1. Сущность и направления экономической политики предприятий // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29).

2. Большая советская энциклопедия : в 30 т. / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е. изд. М. : Советская энциклопедия, 1975. Т. 20.

3. Большой экономический словарь / под ред. А. Н. Азримана. 5-е изд. доп. и перераб. М. : Ин-т новой экономики, 2002.

4. Большой толковый социологический словарь (Collins). Т. 2 (П–Я) : пер. с англ. М. : Вече : АСТ, 1999.

5. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа : учебник // Электронная библиотека Русского гуманитарного интернет-университета [Электронный ресурс]. URL: http://www.i-u.ru/biblio/archive/osnovi_sistemnogo_analisa/01.aspx (дата обращения: 26.02.2011).

6. Гусев Н. М. Классификация бизнес-процессов по принципу ориентации генерируемой ценности // Материалы регион. студ. науч.-практ. конф. / Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева (18 марта 2009). Нижегородск, 2009.

V. A. Kuznetsova, S. S. Semenov

REQUIREMENTS AND PRINCIPLES OF ECONOMIC POLICY OF ENTERPRISES

Conceptual questions of economic policy of enterprises are considered. Requirements of economic policy are identified. Principles, ensuring the implementation of the identified requirements are formulated and systematized

Keywords: economic policy, requirements of economic policy, the principles of economic policy.

© Кузнецова В. А., Семенов С. С., 2011

УДК 378.1

В. А. Курешов

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ФОРМЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗОВ

Представлен анализ результатов развития в последние годы международной деятельности в высших учебных заведениях г. Красноярска в сферах академического и научного обмена и при выполнении совместных образовательных и научно-исследовательских проектов с учебными, научными и иными зарубежными учреждениями. Дан прогноз развития направлений и форм международного сотрудничества на ближайшую перспективу с учетом тенденций глобализации в образовании.

Ключевые слова: высшее образование, международная деятельность, организационно-экономические формы сотрудничества, интеграция, академический и научный обмен, экспорт образовательных услуг.

Развитие международного сотрудничества является одним из наиболее важных направлений совершенствования системы высшего профессионального образования в Красноярском крае. Все красноярские вузы ведут активную работу по установлению и развитию контактов с иностранными партнерами и за последние годы в той или иной степени расширили и развили связи и формы сотрудничества с зарубежными университетами, научными учреждениями и организациями.

В настоящее время вузами края заключено свыше 200 прямых договоров о сотрудничестве с зарубежными вузами и другими организациями в 44 странах мира, расположенных в Западной и Восточной Европе, Юго-Восточной и Средней Азии, Северной Америке. Сотрудничество строится в основном на основе прямых двусторонних договоров между российскими и зарубежными участниками.

Только за 2010 г. силами вузов в Красноярске были организованы и проведены свыше 50 международных научно-практических конференций, симпозиумов и семинаров. Ежегодно по программам академической мобильности вузы командируют за рубеж для продолжения обучения около 200 студентов и аспирантов и для прохождения стажировки, проведения совместных работ с зарубежными партнерами – не менее 150 преподавателей.

Как результат растущего международного межвузовского сотрудничества и расширения программ экспорта образовательных услуг возрастает число иностранных студентов в красноярских вузах, которых на начало 2010–2011 учебного года (сентябрь 2010 г.) было уже свыше 400 человек, что почти вдвое больше, чем на аналогичный период в 2007 г. Наибольшую долю среди иностранных студентов, обучающихся в красноярских вузах (около 38 %), составляют представители Китая. Доля студентов из других стран дальнего зарубежья (в основном, таких как Чехия, Венгрия, Республика Корея, Монголия, Германия, США) составляет не более 7 %. Среди стран СНГ наибольшее число обучающихся приходится на представителей из Армении и Кыргызстана, занимающих примерно по 10–12 %, и Азербайджана, доля которых составляет около 5 % среди всех иностранных студентов в вузах города.

В рамках заключенных соглашений в ряде вузов (в их числе Сибирский федеральный университет (СФУ), Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева (СибГАУ), Красноярский государственный аграрный университет (КрасГАУ), Красноярский государственный торгово-экономический институт (КГТЭИ), Красноярский государственный медицинский университет имени В. Ф. Войно-Ясенецкого (КрасГМУ)) разработаны и реализуются совместные образовательные программы, которые позволяют участвующим российским студентам проходить определенные периоды обучения и (или) стажировки, являющиеся частью их образовательной программы, за рубежом. В ряде случаев реализация таких программ позволяет студентам получать по окончании обучения дипломы обоих вузов, подписавших соглашение, – так называемые программы «двойных дипломов». Среди наиболее успешных совместных проектов можно выделить российско-американский проект сотрудничества СибГАУ с государственным университетом штата Нью-Йорк, колледж в Онеонте, продолжающийся более 15 лет, который позволяет студентам СибГАУ, обучающимся по направлению бакалавриата «Менеджмент», реализовать программу «двух дипломов» по схеме «3+1» (3 года в России и затем 1 год в США).

В последние годы началось формирование совместных международных научно-образовательных структур. Так, в КрасГМУ созданы и успешно работают Российско-японский центр микробиологии, эпидемиологии и инфекционных заболеваний, Российско-германский тренинговый центр анестезиологии и медицины критических состояний, Российско-французская ассоциированная лаборатория «Совместная эволюция человек–среда в Восточной Сибири».

Кроме этого, вузы активно развивают сотрудничество и членство в составе международных профессиональных организаций. На американском континенте два красноярских вуза – СФУ и СибГАУ – являются членами Международного института образования (IIE). Три вуза (СибГАУ, КГТЭИ, СФУ) явля-

ются членами Европейского совета по бизнес-образованию, а СибГАУ, кроме того, является членом американского Аккредитационного совета бизнес-школ и программ (ACBSP). С 2010 г. КрасГМУ является координатором взаимодействия медицинских и фармацевтических вузов РФ с Всемирной федерацией медицинского образования (WFME).

Вместе с тем, возможности расширения международного сотрудничества осложняют как внешние, так и внутренние проблемы. Внешние связаны, в первую очередь, с географическим расположением, поскольку территориальная удаленность Красноярска от границ стран-партнеров порождает ряд дополнительных проблем, с которыми не сталкиваются вузы, расположенные в приграничных или центральных регионах страны. Это относится к сложности и неудобствам внутренней транспортной логистики, значительным потерям времени при перелетах, особенно ощутимым при краткосрочных деловых визитах, а также к дополнительным затратам на организацию мобильности при ограниченных финансовых ресурсах. В определенной степени сдерживают программы мобильности, осложнившиеся в последние годы, процедуры получения въездных виз на территорию ряда государств для российских участников, в том числе для поездок в США, Великобританию, Германию, Чехию. Это обстоятельство также имеет особое значение для красноярских вузов, поскольку на территории края отсутствуют консульские учреждения зарубежных стран, все они расположены в основном на европейской территории России.

Важным фактором, сдерживающим развитие внешнеэкономической деятельности вузов, является отсутствие четкой государственной политики в отношении международной деятельности вузов и, в частности, развития экспорта образовательных услуг.

Что касается внутренних проблем, то среди них одной из важнейших все еще остается низкий уровень владения иностранными языками преподавателями. Кроме того, доля таких преподавателей в составе вузов достаточно велика, что не позволяет обеспечить разработку образовательных программ и методического обеспечения, ориентированных на зарубежных потребителей, чтобы осуществить образовательную программу на иностранном языке в полном объеме, а не отдельными курсами дисциплин.

Сдерживает развитие экспорта также относительно низкий рейтинг вузов и невысокий процент программ, имеющих аккредитацию зарубежных общественно-профессиональных организаций, что сопровождается слабой рекламой и пассивным продвижением образовательных услуг вузов на внешний рынок, в том числе в страны СНГ.

Недостаточно развитая в большинстве вузов материальная база для развития международного сотрудничества и отсутствие необходимой инфраструктуры (общежитий, культурно-спортивных, медицинских учреждений, столовых, обеспечивающих типовой набор услуг в зарубежных кампусах университетов) для отдыха и занятий студентов также сдерживает развитие экспорта образовательных услуг красноярских вузов.

Несмотря на имеющиеся трудности, вузы г. Красноярска заинтересованы и рассматривают в рамках стратегий своего развития различные варианты дальнейшего расширения связей с учебными и научными учреждениями зарубежных стран, учитывая, что международная деятельность становится все более актуальной и одной из важнейших составляющих всей деятельности университетов. При этом она оказывает значительное влияние не только на академическую мобильность студентов и преподавателей, но и на организацию и содержание учебного процесса, проведение научных исследований и другие сферы.

Дальнейшая интеграция вузов в мировую образовательную систему и направления дальнейшего развития их международной деятельности связаны с общими тенденциями в мировом образовательном пространстве высшего образования. В том числе, вузам придется столкнуться с необходимостью противостоять негативным явлениям, порожденным интернационализаций на рынке образовательных услуг, среди которых глобальная конкуренция среди университетов за переманивание наиболее талантливых студентов в целях развития национальных экономик; коммерциализация аккредитаций; вероятность снижения в ряде случаев качества трансграничного образования; перевод образования в категорию товара и коммерциализация международного образования как самостоятельной сферы бизнеса и др.

Применительно к красноярским вузам на перспективу до 2020 г. можно предположить следующие основные направления развития международной деятельности в рамках развития существующих и формирования новых организационно-экономических форм сотрудничества с субъектами международной научно-образовательной среды.

Получит дальнейшее развитие практика по созданию и участию вузов в деятельности международных сетей и консорциумов. Пока эти сети представлены в большей степени двусторонними партнерскими соглашениями, которые и впредь будут одним из наиболее динамичных инструментов реализации международных связей. Одновременно продолжится практика создания многосторонних соглашений и образования крупных консорциумов, формирование которых будет происходить как по инициативе высших органов власти (как, например, Шанхайская организация сотрудничества), так и по инициативе самих вузов (сотрудничество в рамках совместных проектов и программ). Особое значение в развитии международного сотрудничества и внешнеэкономической деятельности вузы планируют уделять формированию дружеских отношений с вузами и научными организациями иностранных государств, спланируют содействовать развитию взаимовыгодного партнерства в области обра-

зования, науки, культуры, одновременно обеспечивая поддержку за рубежом русского языка и культуры народов России.

Возрастет число студентов, преподавателей и исследователей, участвующих в программах академических обменов, основу которых составит практическая реализация подписанных договоров и соглашений с зарубежными вузами и другими организациями. В предстоящий период вузы планируют продолжать сотрудничество с партнерами из СНГ, в других региональных и субрегиональных форматах, развитие партнерских отношений с Европейским союзом, странами Европы и Северной Америки, Азиатско-Тихоокеанского региона, Шанхайской организации сотрудничества. С учетом темпов развития двусторонних связей красноярских вузов можно ожидать, что к 2020 г. вузы будут иметь прямые связи с вузами на всех континентах, а число договоров увеличится в 1,5–2 раза (до 300–400). Вместе с тем, в качестве приоритетов вузы рассматривают расширение сферы сотрудничества с вузами в странах СНГ (в первую очередь, Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Украины, Белоруссии) и Юго-Восточной Азии. Особые интересы связаны с дальнейшим развитием отношений и сотрудничества с вузами Китая, и весьма перспективными, несмотря на очень ограниченные на сегодняшний день контакты, выглядят потенциальные связи с партнерами в Индии и Таиланде. В соответствии с планами стран – участниц Болонского соглашения (в том числе и России) к 2020 г. не менее 20 % выпускников вузов должны будут в процессе обучения принимать участие в академической мобильности и проходить обучение или стажировку за рубежом.

Развитие взаимовыгодных двусторонних связей с вузами и научными организациями и фондами США, Германии, Франции, Испании, Великобритании и некоторых других государств Западной Европы вузы рассматривают как важный ресурс продвижения своих интересов и содействия переводу российского высшего образования на инновационный путь развития. В рамках участия в совместных работах с ведущими западными университетами вузы намерены развивать исследования и разработки по актуальным направлениям развития экономики города и края, в частности, в области космических и информационных технологий, нанотехнологий, энергетики, нефти и газа, а также по ряду других направлений.

Сотрудничество в сфере образования предполагается развивать по различным по форме подготовки и длительности обучения программам. Среди них – программы высшего профессионального образования по широкому спектру инженерной подготовки, включая направления общего и специального (в том числе космического) машиностроения, автоматизации и систем управления, вычислительной техники, геологии и горного дела, нефти и газа, металлургии, радиотехники, тепло- и электроэнергетики, гражданской авиации, гидротехники, промышленного и гражданского строительства, автотранспортной техники и др.

Вместе с тем, с учетом существующих ограничений по материальной базе и отсутствия соответствующего кадрового персонала большинство вузов в ближайшие годы намерено проводить политику реализации программ академической мобильности на основании согласованных двусторонними соглашениями с партнерскими университетами квот, согласно которым основная часть прибывающих иностранных студентов не ставит целью получение диплома российского вуза. Развитие «въездной» академической мобильности будет также связано с продвижением на образовательный рынок коротких летних программ и программ более высокого (индивидуального) уровня подготовки – магистратура и аспирантура. Развитию летних образовательных программ будет способствовать дальнейшее развитие в крае сферы туризма и рекреационных зон отдыха, что позволит создать более привлекательные условия для обучения и отдыха и привлечения потенциальных слушателей к приезду в Красноярск. Одновременно будет продолжаться накопление учебно-методического, кадрового и организационного потенциала для более масштабной организации обучения иностранных граждан в средне- и долгосрочной перспективе.

Академическая мобильность профессорско-преподавательских кадров вузов получит дальнейшее развитие в рамках организации и проведения международных научных и образовательных конференций, участия в работе конференций за рубежом. Вузы активно развивают направление международного научного сотрудничества и планируют ежегодно увеличивать число проводимых в Красноярске на своей базе конференций, конгрессов, семинаров, симпозиумов, различных школ с международным статусом. Общее число мероприятий такого уровня к 2020 г. планируется довести до 50–70 в год.

В планах вузов – расширение практики привлечения иностранных специалистов к работе на кафедрах на долгосрочной основе и для чтения отдельных курсов лекций, в том числе в целях формирования совместных авторских коллективов для подготовки учебников и учебных пособий. Вузы планируют поддерживать научные стажировки своих преподавателей, сотрудников и аспирантов за рубежом, в том числе за счет средств международных фондов и организаций, а также в рамках совместных с зарубежными партнерами программ сотрудничества и участия в осуществлении международных проектов в области образования, науки и культуры.

Увеличение числа участников «выездной» академической мобильности для российских участников связано с развитием во внутренней деятельности университетов курсов по углубленному изучению иностранного языка студентами и преподавателями, увеличением числа курсов, программ и квалификаций, которые сфокусированы на сравнительной и между-

народной тематике, формировании мотивации и повышении интереса к международной тематике и совместным исследованиям. Будет продолжена работа по совершенствованию учебных планов, программ и системы подготовки на основе требований многоуровневой подготовки кадров, соответствующей положениям Болонского соглашения, и опыта реализации в вузах международных проектов, а также с учетом требований стандартов в области образования, разработанных международными профессиональными организациями.

Особое внимание вузы планируют уделить разработке и увеличению числа академических программ, реализуемых с пересечением границ, в числе которых наибольшее значение планируется отводить соглашениям с зарубежными партнерами о реализации совместных образовательных программ и программ двойных дипломов. В связи с этим может получить развитие практика по созданию партнерств на основе франчайзинговых соглашений и формированию на базе красноярских вузов филиалов зарубежных университетов или их программ. Одновременно вузы планируют вести разработку и продвигать собственные курсы (как на русском, так и на иностранных языках) с использованием дистанционных технологий обучения для студентов и преподавателей ближнего и дальнего зарубежья.

Одним из основных направлений в деятельности вузов, которому в предстоящий период планируется уделить особое внимание, является рекрутинг иностранных студентов. Учитывая, что развитие экспорта образовательных услуг напрямую связано со статусом учебных заведений и приоритет отдается признанным (в мире или в регионе) образовательным учреждениям, вузы планируют продолжать работу по улучшению имиджа учебных заведений и формированию конкурентного образовательного продукта. С этой целью предусмотрено дальнейшее формирование актуальных (уникальных) образовательных программ, как на русском, так и на иностранном языке, продолжение практики привлечения к проведению исследований и образовательной деятельности ведущих отечественных и зарубежных ученых и специалистов, повышение уровня прозрачности и информационной доступности предлагаемых услуг для потенциальных потребителей, включая описание технологий обучения и организации учебного процесса. Усилится участие вузов в международных и региональных рейтингах университетов. Продолжится практика аккредитации образовательных программ вузов в общественно-профессиональных организациях. Будет продолжена практика проведения фестиваля «Студенчество без границ», других межвузовских мероприятий.

В предстоящем периоде получит развитие сеть партнерств вузов с различными типами посредников, обеспечивающих коммерческие услуги по программам, реализуемым с пересечением границ. К числу задач подобных структур могут быть отнесены формирование контингента студентов для обучения в красноярских вузах, установление и поддержание в интересах российских вузов прямых связей с зарубежными организациями по месту нахождения посредника, подбор потенциальных слушателей и организация обучения по различным образовательным программам на месте базирования и др.

В значительной мере достижение целей расширения экспорта образовательных услуг будет зависеть от мер государственной поддержки обучения иностранных граждан как на федеральном, так и на региональном уровне. Эти меры во многом определяют решение ключевых вопросов при развитии в вузах программ экспорта: это стоимость обучения, условия проживания, отдыха и быта, безопасность пребывания на территории кампусов и места нахождения и др.

С учетом прогнозируемых темпов развития вузов края и, в первую очередь, планов развития Сибирского федерального университета, предусматривающих укрепление его материально-технической базы и строительство современных общежитий, можно ожидать дальнейшего увеличения численности иностранных студентов в красноярских вузах к 2020 г. ориентировочно до 5–8 % от общего числа студентов дневного обучения, что составит около 3–5 тыс. человек.

Среди инструментов, содействующих развитию темпов интернационализации красноярских вузов, может стать позиционирование города Красноярска как образовательного хаба, образовательного города, предоставляющего возможности широкого доступа к обучению для различных категорий иностранных слушателей. Предпосылки для такого позиционирования и развития возникли с момента создания в Красноярске Сибирского федерального университета, который может выступать в качестве одного из основных элементов разветвленной многопрофильной системы высшего образования. Очевидно, что в целях реализации указанной стратегии целесообразно будет продолжить отработку взаимодействия и координации деятельности в этой сфере всех красноярских вузов. Такое сотрудничество может осуществляться в различных по формам и составу участников объединениях и группах, в основу которых может быть положен принцип проектной организации работ. Решению этой задачи может способствовать также разработка краевой и (или) городской целевой программы развития международной деятельности вузов и расширения экспорта образовательных услуг.

Таким образом, проводя активную политику интернационализации как в своей внешней, так и внутренней деятельности, изучая и активно реагируя на глобальные процессы, происходящие в образовании, вузы планируют укрепить и расширить свое участие в мировом образовательном пространстве, избирая различные организационно-экономические формы сотрудничества как с участниками на локальном рынке, так и совместно с различными зарубежными партнерами.

V. A. Kureshov

INSTITUTIONAL AND ECONOMIC FORMS OF INTERNATIONAL ACTIVITY OF INSTITUTIONS OF HIGHER LEARNING

The article presents the analysis of international activity development of institutions og higher learning in Krasnoyarsk, in spheres of academic and scientific exchanges and joint educational and research projects with educational, scientific and other international establishments, for the last year. The forecast for the nearest future is given for prospective directions and forms of international cooperation development of institutions of higher learning with the account of the tendencies of globalization of higher education.

Keywords: high professional education, international activity, institution-economic forms of cooperation, integration, academic and scientific exchange, export of educational services.

© Курешов В. А., 2011

УДК 330.322.3

А. А. Лукьянова, Н. И. Смородинова, Е. Ю. Алексеева

ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫМИ ИНВЕСТИЦИЯМИ В РЕГИОНЕ

Предложена классификация объектов социальной инфраструктуры в регионе, сформулированы принципы инвестирования в объекты социальной сферы, разработана матрица выбора стратегии социального развития, представлена и построена модель формирования портфеля социальных инвестиций.

Ключевые слова: инструменты стратегического планирования, социальная сфера, инвестиционная деятельность, факторы, стратегии, показатели.

Современное состояние социальной сферы обусловлено процессами, происходящими на протяжении последних лет в России. Финансовые и экономические кризисы, приводящие к снижению темпов экономического роста, уровня объема валового внутреннего продукта (ВВП) и, как следствие, ухудшению макроэкономической стабильности, не могли не сказаться на общем состоянии социальной инфраструктуры. Вместе с тем, отсутствие организационно-экономического механизма, отвечающего требованиям рыночной экономики, приводит к проблемам текущего финансирования социальной сферы и к снижению уровня обеспеченности объектов социальной инфраструктуры. Все вышеизложенное подтверждает необходимость разработки инструментов, позволяющих наиболее эффективно распределять социальные инвестиции в сфере услуг в условиях имеющегося бюджетного дефицита.

Для решения сформулированной задачи была проведена классификация объектов общественного производства, опирающаяся на научно обоснованные признаки, на основании которых и разделяются между собой отраслевые группы. Данная классификация основана на признаках ОКВЭД и дополнена признаком наличия государственных гарантий по обеспечению.

Ряд специалистов, в частности Н. Н. Некрасов, определяют социальную инфраструктуру как комплекс предприятий, сооружений и учреждений, обеспечивающих на определенной территории необходимые материальные и культурно-бытовые условия жизни населения.

Д. И. Правдин делит непроизводственную сферу на пять групп: распределение и обмен, потребительские услуги, охрана здоровья населения, формы общественного сознания, управление и охрана общественного порядка.

В Международной стандартной хозяйственной классификации, утвержденной ООН в 1969 г., все виды экономической деятельности разделены на десять отраслей, в каждой из которых выделяются свои виды – всего 260 видов.

В качестве основных признаков классификации обеспеченности социальной инфраструктуры предложены социальные отрасли и социальные подотрасли. На сегодняшний день социальные нормативы обеспеченности социальными услугами и соответствующие обязательства государства распространяются на следующие отрасли: образование, здравоохранение, культура, социальная защита, физическая культура и спорт.

На основе анализа нормативно-правовых актов, регламентирующих порядок обеспеченности объектов социальной сферы, были выделены подотрасли, структура которых представлена на рис. 1. В качестве дополнительного признака в предлагаемой классификации, исходя из специфики решаемых задач, предлагается ввести территориальное расположение объектов (город, поселок, поселок городского типа, деревня).

Подотрасли социальных сфер		
Сфера образования	Дошкольное образование. Начальное общее образование. Основное общее образование. Среднее (полное) общее образование. Начальное профессиональное образование. Среднее профессиональное образование	Высшее профессиональное образование. Послевузовское профессиональное образование. Обучение на подготовительных курсах для поступления в учебные заведения высшего профессионального образования. Обучение водителей транспортных средств. Обучение летного и мореходного персонала
Здравоохранение	Медицинская деятельность. Хирургическая деятельность. Диагностическая деятельность. Терапевтическая деятельность. Санаторно-курортная деятельность. Медицинские консультации и лечение в области общей и специальной медицины	Деятельность в области стоматологии общего и специального характера. Деятельность скорой медицинской помощи. Деятельность учреждений санитарно-эпидемиологической службы. Деятельность судебно-медицинской экспертизы. Прочая деятельность по охране здоровья
Физическая культура и спорт	Физкультурно-спортивные организации. Спортивные клубы. Детско-юношеские спортивные школы, детско-юношеские клубы физической подготовки, детско-юношеские спортивно-технические школы, специализированные детско-юношеские школы олимпийского резерва, училища олимпийского резерва, школы высшего спортивного мастерства, центры спортивной подготовки, центры олимпийской подготовки	Образовательные учреждения, физкультурно-спортивные учреждения и научные организации в области физической культуры и спорта. Спортивные федерации. Олимпийский, Параолимпийский, Сурдоолимпийский комитеты и специальная Олимпиада россии. Профессиональные союзы в области физической культуры и спорта. Спортивный резерв
Культура	Деятельность, связанная с производством, прокатом и показом фильмов. Деятельность в области радиовещания и телевидения. Деятельность в области искусства. Деятельность в области художественного, литературного и исполнительского творчества. Деятельность актеров, режиссеров, композиторов, художников, скульпторов и прочих представителей творческих профессий, выступающих на индивидуальной основе. Деятельность концертных и театральных залов. Деятельность ярмарок и парков с аттракционами	Деятельность цирков. Деятельность танцплощадок, дискотек, школ танцев. Деятельность информационных агентств. Деятельность библиотек, архивов, учреждений клубного типа. Деятельность музеев и охрана исторических мест и зданий. Деятельность в области спорта. Деятельность по организации азартных игр. Прочая деятельность в области культуры
Социальная защита	Органы опеки и попечительства. Дома инвалидов	Дома престарелых. Дома малютки. Детские дома, интернаты

Рис. 1. Разделение объектов социальной сферы на подотрасли

Введение указанных признаков классификации позволит более точно решить задачу оценки уровня обеспеченности объектами социальной инфраструктуры, определить направления инвестирования и оценить эффективность социальных инвестиций.

С учетом специфики выделенных объектов были сформулированы принципы инвестирования в объекты социальной сферы, отражающие особенности и условия инвестирования в данную область. Содержание отдельных принципов конкретизировано с учетом выявленных закономерностей развития социальных отраслей, а также форм их проявления. Более детально данные принципы описаны в статье Е. Ю. Алексеевой «Модель формирования портфеля социальных инвестиций» [1].

Данные принципы подлежат учету как при решении задачи оценки эффективности социальных инвестиций, так и при распределении финансовых ресурсов между объектами социальной сферы.

Реализация предложенных принципов требует разработки инструментов принятия решения и, в частности, построения математической модели оптимального распределения инвестиций в условиях имеющихся бюджетных ограничений для повышения уровня обеспеченности населения объектами социальной сферы.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо разработать инструменты, удовлетворяющие специфике объектов социальной сферы с учетом разработанных принципов инвестирования в данную сферу. Данные инструменты также должны учитывать факторы, оказывающие влияние на выбор стратегии развития социальной инфраструктуры.

В результате исследования были выявлены два наиболее значимых фактора, определяющих развитие социальной сферы: уровень обеспеченности и объем финансирования. Именно эти факторы были использованы при построении матрицы выбора стратегии социальных инвестиций. Данная матрица включает 4 квадранта, отвечающих различным уровням обеспеченности и объему финансирования (рис. 2). В каждом квадранте указаны соответствующие направления развития – выравнивание, доведение до международных стандартов, закрытие узких мест, доведение до нормативного уровня.

Для оценки уровня обеспеченности на первом этапе необходимо определить уровень обеспеченности по каждому объекту в данной отрасли. Затем выполняется расчет среднего значения уровня обеспеченности по объектам этой же отрасли. Далее нужно рассмотреть, как эти показатели соотносятся между собой. Если фактический уровень обеспеченности ($L_{факт}$) больше среднего значения уровня обеспеченности ($L_{ср}$), т. е. $L_{факт} > L_{ср}$, речь идет о высоком уроне обеспеченности. Если фактический уровень обеспеченности меньше среднего значения уровня обеспеченности, т. е. $L_{факт} < L_{ср}$, речь идет о низком уроне обеспеченности.

Для оценки уровня финансирования следует учитывать объем средств, необходимый для доведения уровня обеспеченности до нормативного значения с учетом прогнозируемого периода, а также реальный объем выделяемых средств. Таким образом, оценка уровня финансирования будет определяться как отношение требуемого объема финансирования ($V_{фин.треб}$) к фактическому объему финансирования ($V_{фин.факт}$).

Полученный таким образом показатель сравнивается с единицей. В случае, когда отношение требуемого объема финансирования к реальному объему инвестиций больше единицы, т. е.:

$$\frac{V_{фин.треб}}{V_{фин.факт}} > 1, \quad (1)$$

показатель следует считать низким.

В случае, когда отношение требуемого объема финансирования к реальному объему инвестиций меньше либо равно единице, т. е.:

$$\frac{V_{фин.треб}}{V_{фин.факт}} \le 1, \quad (2)$$

показатель следует считать высоким.

В четырех квадрантах матрицы содержатся следующие предписания, определяющие стратегии развития.

1. Доведение уровня обеспеченности до международных стандартов или социальных требований. Объекты, относящиеся к данному квадранту матрицы, характеризуются высоким уровнем обеспеченности при высоком объеме финансирования. Данный квадрант матрицы обеспечивается при устойчивой и эффективной социальной политике государства, когда за основу берутся социальные стандарты жизни людей, обеспечивающие им комфортный и качественно высокий уровень жизни.

2. Стратегия выравнивания. Эти объекты характеризуются высоким уровнем обеспеченности при низком объеме финансирования. К ним относятся недавно введенные в эксплуатацию объекты, реализуемые в рамках различных программ, направленных на развитие социальной сферы. Определяющим для них является будущее финансирование, так как при равномерном поступлении средств будут обеспечиваться высокие показатели обеспеченности в будущем.

Рис. 2. Матрица выбора стратегии развития социальной сферы

3. Доведение до нормативного уровня. Эти социальные объекты характеризуются низким уровнем обеспеченности при высоком объеме финансирования. Данная стратегия с учетом значительного объема инвестиций в объекты направлена на то, чтобы выравнять число показателей или довести уровень обеспеченности до нормативного уровня. В связи с тем, что объемы финансирования значительные, не придется ранжировать объекты по приоритетности. Выделяемые средства распределяются между объектами с низким уровнем обеспеченности.

4. Закрытие узких мест. Низкий уровень обеспеченности объектов при низком уровне финансирования. Данная стратегия направлена на оценку эффективности социальных инвестиций при их распределении с учетом ранжирования объектов по степени их приоритетности.

Матрица выбора стратегии социальных инвестиций используется при расчете критерия эффективности инвестиций. С помощью стратегии социальных инвестиций задается нормативный уровень, который необходимо достичь при имеющемся объеме финансирования. Матрица выбора стратегии социальных инвестиций позволяет поэтапно решить задачу доведения объектов социальной сферы до уровня государственных нормативов обеспеченности, поскольку зачастую невозможно сразу достичь данного уровня. После определения норматива с помощью стратегии производится оценка достижения установленного уровня с учетом имеющихся средств. Далее производится сравнение и определяется разница между имеющимися ресурсами и объемом недостающих средств для достижения норматива. После этого определяется эффективность инвестиций с помощью разработанного критерия эффективности инвестиций.

Критерий эффективности инвестиций в социальную сферу может быть определен отношением прироста уровня обеспеченности объектов социальной сферы [2] к объему вложений:

$$K_{\text{соц.эфф}.ij} = \frac{g_{ij}}{S_{ij}}, \qquad (3)$$

где g_{ij} – прирост уровня обеспеченности j-го объекта i-й социальной сферы; S_{ij} – объем дополнительных вложений в j-й объект i-й социальной сферы.

В основе способа расчета критерия эффективности инвестиций лежит матрица выбора стратегии социальных инвестиций. Как уже указывалось, данная матрица представляет 4 квадранта, отвечающих различным уровням обеспеченности и объему финансирования. В каждом квадранте указаны соответствующие предписания:

– выравнивание;

– доведение до международных стандартов;

– закрытие узких мест;

– доведение до нормативного уровня.

Предложенный критерий предлагается использовать для формирования портфеля социальных инвестиций при решении задачи распределения ограниченных бюджетных ресурсов. Метод формирования портфеля социальных инвестиций строится на основе метода динамического программирования, с использованием критерия эффективности социальных инвестиций в качестве критерия оптимизации.

Предложенные инструменты позволяют осуществить выбор эффективной стратегии инвестирования социальной сферы, обеспечивающей поэтапное достижение нормативного уровня обеспеченности объектами социальной инфраструктуры.

Библиографические ссылки

1. Алексеева Е. Ю. Модель формирования портфеля социальных инвестиций // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4 (37).

2. Алексеева Е. Ю., Ерыгин Ю. В. Инструменты стратегического планирования социальных инвестиций // Вестник СибГАУ. 2011., Вып. 3 (36). С. 173–176.

A. A. Lukyanova, N. I. Smorodinova, E. Yu. Alexeeva

SOCIAL INVESTMENT MANAGEMENT TOOLS IN THE REGION

The problem ofefficient allocationof scarce budgetfunds allocatedfor social developmentrequiresthe development of toolsthat wouldefinesocial infrastructure, investmentsthat will bemost suitable.

Keywords: tools of strategic planning, social sphere, investment activity, factors, strategies, indicators.

© Лукьянова А. А., Смородинова Н. И., Алексеева Е. Ю., 2011

УДК 330.322.54

Е. В. Самарин, Г. Я. Белякова

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ВЫБОРА ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ НА ПОВЫШЕНИЕ ИНВЕСТИЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В РОССИИ

Проводится анализ показателей инвестиционной активности России в условиях нестабильной экономической ситуации, выявляются основные проблемы в инвестиционной деятельности страны. Анализируется, каким образом качество оценки эффективности и выбора инвестиционных проектов может повлиять на инвестиционный климат страны и повышение инвестиционной активности.

Ключевые слова: инвестиции, инвестиционный проект, инвестиционная активность, рентабельность, эффективность проектов.

Анализ показателей инвестиционной активности и выявление наиболее важных проблем в инвестиционной деятельности страны необходимы для определения основных направлений развития рынка инвестиций, а также для разработки мер по повышению эффективности подготовки, оценки и реализации инвестиционных проектов. Инвестиционная деятельность является одним из важнейших условий развития экономики страны. Грамотная инвестиционная политика как в финансовом, так и в реальном секторе экономики способствует росту эффективности производства, создает условия для инновационной деятельности, развития технологий и инфраструктуры, способствует повышению конкурентоспособности отраслей экономики и страны в целом.

Однако в период сложной экономической ситуации в нашей стране и во всем мире объемы и масштабы инвестиционной деятельности ограничены жесткими рамками. Одной из основных причин данной ситуации является мировой финансовый кризис, последствия которого уже явно проявляются как в финансовом, так и в реальном секторе экономики. Если проанализировать статистические показатели по инвестициям и объему валового внутреннего продукта (ВВП) в условиях финансового кризиса, то явно видно влияние кризисных явлений на данные показатели (рис. 1). В 2009 г. объем ВВП России составил 38 786,4 млрд руб., что было ниже уровня 2008 г. на 6 %, а инвестиции в основной капитал в 2009 г. составили 7 976 млрд руб., что ниже уровня 2008 г. на 9 %.

При сопоставлении динамики инвестиций и ВВП видно, что в условиях кризиса сокращение инвестиционной активности превышало падение уровня ВВП [1].

По мере улучшения экономической ситуации в стране в 2010–2011 гг. данные показатели возобновили рост. Так, за 2010 г. объем ВВП составил 44 939,2 млрд руб., а объем инвестиций в основной капитал – 9 151,4 млрд руб. Однако доля инвестиций в объеме ВВП составляет всего 20,3 %, что попрежнему не является достаточным для того, чтобы экономику России можно было назвать инвестиционно ориентированной [2]. К тому же не исключена вероятность второй волны кризиса, по словам экспертов обещающей еще более тяжелые экономические и финансовые проблемы.

Проявления данных проблем наблюдаются непосредственно в реальном секторе экономики страны. Основным негативным последствием кризисных явлений для предприятий стало сокращение спроса на их продукцию и услуги, что, в свою очередь, приводит к снижению доходности производства.

Хотя с 2010 г. наблюдается тенденция стабилизации и улучшения финансовых показателей предприятий реального сектора экономики, достигнуть докризисных показателей рентабельности пока не удалось (рис. 2). Показатель рентабельности продаж в 2010 г. остался на уровне 2009 г. и составил 10,3 % (2008 г. – 12,3 %). В промышленности рентабельность продаж в 2010 г. составила 14,3 % (2009 г. – 12,7 %, 2008 г. – 14,7 %) (рис. 3) [3].

В результате, предприятия в основном заботятся о поддержании текущего уровня производственных сил, сохранении масштабов деятельности организации, доли рынка и доходности производства. Недостаточность собственных ресурсов не позволяет многим организациям проводить эффективную инвестиционную и инновационную деятельность своими силами. Многим производителям приходится рассчитывать только на привлечение финансовых ресурсов со стороны.

Основными привлеченными источниками финансирования инвестиционной деятельности организаций, как известно, могут служить средства из бюджетов государственных органов, банковские кредиты, а также средства сторонних инвесторов, заинтересованных во вложениях в определенный проект. Рассмотрим основные проблемы, связанные с возможностью получения займа на реализацию инвестиционного проекта по каждому из вариантов.

Существуют федеральные и региональные программы по выделению бюджетных средств на реализацию инвестиционных проектов. Однако данный способ финансирования инвестиционных проектов в основном распространяется на крупные проекты, имеющие государственную важность и большое значение для экономики страны в целом, а также проекты с участием объектов государственной собственности. К тому же объемы государственных инвестиций сегодня ограничиваются необходимостью выделения средств из бюджета на восстановление и поддержание макроэкономической стабильности, вследствие чего часть перспективных инвестиционных программ остается без источников финансирования.

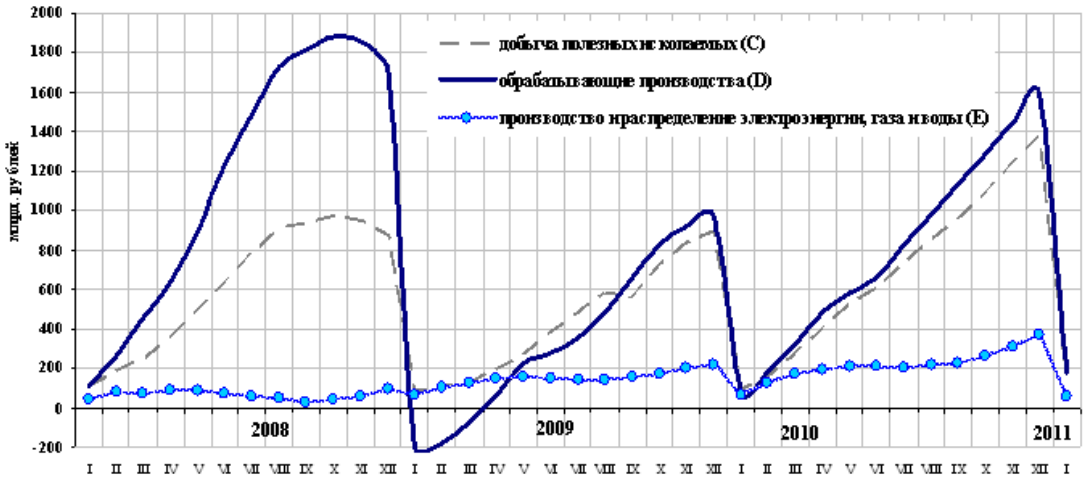


Рис. 1. Финансовые результаты основных видов производства в России в 2008–2011 гг.

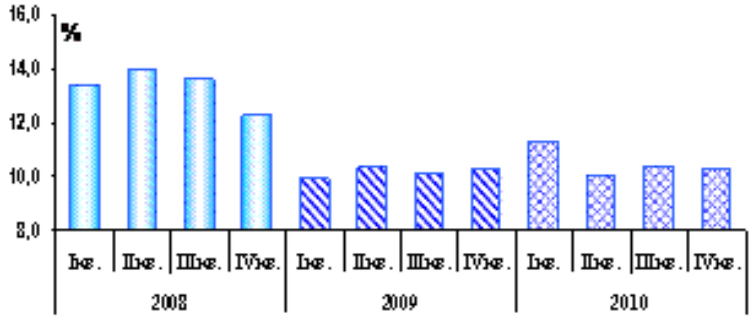


Рис. 2. Динамика уровня рентабельности продаж предприятий реального сектора экономики в 2008–2010 гг.

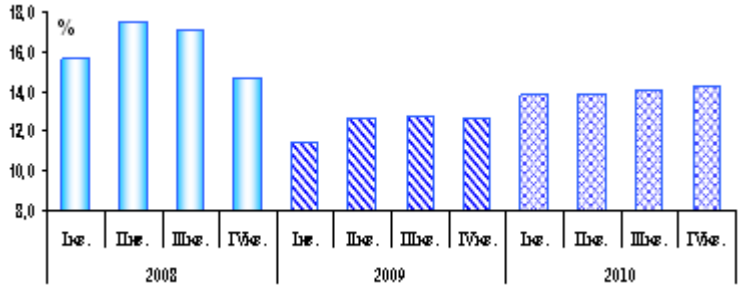


Рис. 3. Динамика уровня рентабельности продаж по промышленности в 2008–2010 гг.

В сфере программ государственно-частного партнерства (ГЧП) по реализации инвестиционных проектов также существуют проблемы. Среди главных причин такой ситуации, как отмечают руководители программ ГЧП, – дефицит высококвалифицированных специалистов в инвестиционной сфере и связанный с этим недостаточно высокий уровень подготовки инвестиционных проектов [4].

Таким образом, можно сказать, что эффективность мер государственной поддержки инвестиционной деятельности остается на низком уровне, многие инвестиционные замыслы не могут быть реализованы из-за недостаточности источников финансирования и слабой проработки проектов.

Непростая ситуация для финансирования инвестиционных проектов сложилась и в сфере кредитования. В связи с кризисными последствиями (падение спроса на недвижимость и продукцию заводов, рост неопределенности экономической ситуации в стране, сокращение масштабов государственной поддержки) падает и интерес кредиторов к участию в финансировании инвестиционных проектов. Объемы финансирования инвестиционной деятельности за счет привлечения кредитных займов в период кризисных явлений со-

кращались (рис. 4). Основной причиной этого явилось ужесточение денежно-кредитной политики Центрального банка. В январе 2009 г. был зафиксирован максимальный уровень ставки рефинансирования – 17,1 %.

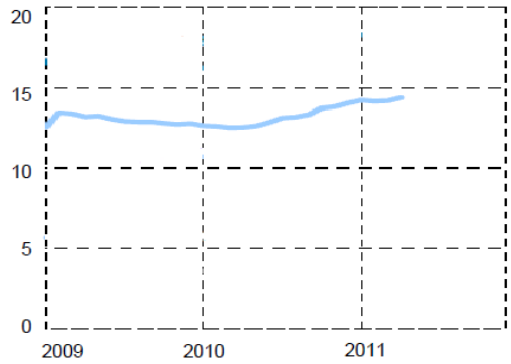


Рис. 4. Объем банковского кредитования предприятий (трлн руб.)

Только с апреля 2010 г. наблюдался рост объемов кредитования в связи со снижением процентных ставок с 13,8 %, зафиксированных в январе 2010 г., до 8,9 % в октябре, что стало соответствовать докризисному уровню [1].

Также одним из немаловажных факторов, ограничивающих объем кредитных операций, как указывают руководители организаций, является сложный механизм получения кредитов для реализации инвестиционных проектов [5]. Вызвано это тем, что банки в нынешней ситуации неопределенности развития экономической ситуации с особой осторожностью относятся к кредитованию инвестиционных проектов. В связи с экономической нестабильностью приоритет банков в основном отдается финансированию не основных, а оборотных средств. На сегодняшний момент большинство банков кредитуют по основным средствам только постоянных и проверенных клиентов, имеющих устойчивое финансовое положение и долгосрочную проработанную бизнес-стратегию.

При этом, как отмечают сами эксперты банков по оценке инвестиционных проектов, среди наиболее типичных ошибок предприятий, которые могут помешать им произвести благоприятное впечатление на инвестора при принятии решений о выдаче кредита на приобретение основных средств, как раз слабая проработка бизнес-плана, отсутствие необходимой документации и наличие всех финансовых, технических, юридических и разрешительных документов, позволяющих иллюстрировать экономическую эффективность и реализуемость проекта [5].

Таким образом, проанализировав ситуацию в инвестиционной деятельности России, можно обозначить следующие проблемы, тормозящие развитие благоприятного инвестиционного климата в стране:

– недостаточность собственных средств организаций для реализации инвестиционной деятельности вследствие низкой рентабельности производства и неустойчивого спроса на рынке;

– сложность получения государственной поддержки инвестиционных проектов вследствие сокращения части государственных программ и низкой эффективности программ государственно-частного партнерства;

– сложность получения кредитных займов под реализацию инвестиционных проектов по причине ужесточения условий банков и сложной процедуры по предоставлению кредитов;

– недостаточная проработка и обоснование инвестиционных проектов, а также дефицит высококвалифицированных специалистов в инвестиционной сфере страны.

Проанализировав ситуацию, можно отметить, что часть проблем в инвестиционной деятельности страны зависит от качества подготовки и выбора инвестиционных проектов. Подготовка и обоснование инвестиционных проектов необходимы как для привлечения государственной поддержки, так и для получения займа от кредитных организаций на реализацию проекта. Поэтому совместная работа участников инвестиционных проектов должна быть направлена на создание необходимых условий, позволяющих получить реальную и полную картину о проекте, его особенностях и преимуществах для всех сторон.

При анализе эффективности проектов с государственным участием немаловажным является оценка того, насколько эффективно можно достичь целей проекта в условиях конкретного региона. Особенно это относится к крупным инвестиционным проектам регионального либо федерального масштаба.

Очевидно, что инвестиционная привлекательность различных регионов страны неодинакова, и реализация одних и тех же проектов в этих регионах приведет к получению весомых отличий в затратах, доходах, условиях и сроках реализации проекта. Каждый регион России обладает уникальными конкурентными преимуществами для привлечения как частных, так и государственных инвестиций, поэтому для каждого региона должны быть определены свои направления совершенствования инвестиционной деятельности, эффективного использования его сильных сторон.

Основными факторами, определяющими конкурентные преимущества региона, являются следующие:

– уровень производственно-финансового потенциала (уровень и темп развития промышленного производства, уровень развития малого предпринимательства, объем внутренних инвестиционных ресурсов предприятий и экспорта продукции, обеспеченность регионов автомобильными и железными дорогами и т. п.);

– социальный потенциал региона (уровень жизни населения, уровень развития розничного товарооборота и сферы платных услуг населению);

– природно-географический потенциал региона (природные запасы минерального сырья и географическое положение по отношению к внешнеторговым выходам России);

– показатели инвестиционного риска, характеризующие долю малоимущего населения, уровень безработицы, экологической загрязненности и неблаго-

приятности климата для проживания, степени угрозы террористических актов и т. д. [6].

Сопоставление факторов, определяющих конкурентные преимущества региона, с целями и задачами инвестиционного предложения уже на первоначальном этапе поможет сформировать мнение об успешности реализации проекта. Так, с помощью данного анализа изначально можно дать предварительную оценку, будут ли потребители у проекта, достаточно ли доступных ресурсов для реализации проекта в данном регионе, как внедрение проекта повлияет на экономическую, социальную сферу и экологическую обстановку в регионе. Анализ поможет выбрать наиболее приоритетные и выгодные варианты инвестирования в конкретных условиях региона.

Правильный выбор наиболее подходящего инвестиционного проекта и условий для его реализации поможет добиться достижения целей проекта с наименьшими затратами ресурсов, потерями и рисками, а также будет способствовать повышению конкурентоспособности и развитию потенциала конкретного региона, а следовательно, и страны в целом.

Как было сказано выше, существенной проблемой инвестиционной деятельности страны является недостаточная проработка и обоснование инвестиционных проектов, что мешает обеспечению финансирования проектов за счет привлечения займов. В том числе и по этой причине остаются низкоэффективными программы государственно-частного партнерства, а банки отказывают в выдаче кредитов [5]. На фоне снижения ставок по кредитам проблема качественной проработки инвестиционного проекта остается одной из главных в процедуре получения займов на реализацию проекта.

Кризисные явления и общий спад экономической активности организаций на рынке, возросшая в связи с этим потребность в финансовых источниках существования, наоборот, должны способствовать возрастанию заинтересованности заемщиков и кредиторов во взаимовыгодном сотрудничестве. В случае если банк выдает долгосрочный кредит, и заемщик на эти средства успешно реализует инвестиционный проект с заданными результатами, то выигрывают обе стороны. Кредитор получает прибыль в виде процентов за предоставленные кредиты и обслуживание счетов, а заемщик удовлетворяет свои производственные и финансовые потребности в ходе реализации проекта. В результате совместной работы обе стороны вносят вклад в улучшение финансовой устойчивости и жизнеспособности не только собственных организаций, но и экономики регионов и всей страны в целом, помогая тем самым преодолеть последствия финансового и экономического кризиса. Успешная реализация инвестиционных проектов дает положительные результаты как инициаторам проектов (в виде реализации инвестиционного замысла) и инвесторам (извлечение прибыли), так и государству в целом в виде отчислений в бюджеты, импортозамещения продукции иностранных предприятий, повышения конкурентоспособности отечественной продукции.

Поэтому основная задача, стоящая при необходимости получения займа на реализацию инвестиционных проектов, – это как раз их детальная проработка, эффективная и достоверная оценка, которая поможет, с одной стороны, найти средства на реализацию проекта, а с другой стороны, доказать безопасность и необходимую доходность инвестирования средств. При разработке обоснования проектов необходимо учитывать все требования кредитных организаций, обосновывать реализуемость и привлекательность проекта для кредиторов.

Менеджерам проектов также следует находить оптимальный баланс между выделением дополнительных средств для анализа неизученных сторон проекта и ценностью данной информации для составления мнения о будущей эффективности проекта. Хотя привлечение высококвалифицированных специалистов является дорогостоящим мероприятием, эти затраты необходимо сопоставлять с возможными рисками потерь и просчетов в случае недоработки определенной стороны проекта. При этом аналитики проектов должны вести тесное сотрудничество с технологами, экономистами, юристами и т. д. Главной задачей при сотрудничестве всех участвующих сторон должно быть достижение взаимодоверительных отношений, выработка максимально ясной картины о будущих доходах и расходах проекта, условий его реализации, рисках и иных возможных последствиях.

Подводя итоги, можно сказать, что определение приоритетов и направлений в процессе отбора и оценки инвестиционных проектов является немаловажным фактором, оказывающим влияние на инвестиционный климат в стране. Разработка перспективных направлений, инновационных проектов и проектов, удовлетворяющих специфическим условиям регионов, может послужить стимулом для привлечения частного капитала и существенного роста инвестиционной активности в стране. С другой стороны, лицам, заинтересованным в реализации проектов, необходимы более качественная проработка и обоснование инвестиционных проектов. В условиях недоверия кредитных организаций заемщикам, последним необходимо привлекать дополнительные ресурсы для детальной оценки реализуемости и окупаемости инвестиционных проектов. Данные меры должны способствовать более обоснованному принятию решений, а значит, и увеличению числа эффективных проектов, одобренных кредиторами. Только при совместных усилиях государства, кредитных организаций и инициаторов проектов по разработке единых стандартов и качества оценки инвестиционных проектов возможно создание более благоприятного инвестиционного климата и роста инвестиционной активности в стране. Эффективность инвестиционной деятельности, в свою очередь, прямым образом влияет на рост всех сфер экономики и укрепление конкурентоспособности страны.

Библиографические ссылки

1. Промышленность и инвестиции на 01.07.2011. Валовой внутренний продукт на 01.07.2011 : доклад Министерства финансов РФ [Электронный ресурс] // Министерство финансов Российской Федерации : сайт. 01.07.2011. URL: http://info.minfin.ru/

2. Инвестиции в основной капитал выросли в 2010 г. на 6 % / Росстат [Электронный ресурс] // РосБизнесКонсалтинг : сайт. 27.01.2011. URL: http://www.rbc.ru.

3. О текущей ситуации в экономике Российской Федерации в январе – феврале 2011 г. : доклад Минэкономразвития России [Электронный ресурс] // Минэкономразвития России : сайт. Март, 2011. URL: http://www.economy.gov.ru.

4. Макроэкономические тенденции [Электронный ресурс] // Внешэкономбанк : сайт. Апрель, 2011. URL: http://veb.ru.

5. Чернобылец А. Естественный отбор // Эксперт-Сибирь. 2009. № 28–29.

6. Гришина И. Оценка эффективности использования региональных конкурентных преимуществ для привлечения частных инвестиций // Инвестиции в России. 2008. № 5.

E. V. Samarin, G. Ya. Belyakova

THE EFFECT OF THE QUALITY OF ASSESSMENT OF EFFECTIVE STRENGTH AND SELECTION OF INVESTNMENT PROJECTS ON IMPROVEMENT OF INVESTMENT ACTIVITY IN RUSSIA

The article contains the analysis of investment activity indicators in Russia in the context of unstable conditions of economy and reveals the main problems in investment activity of the country. The analysis made shows how the quality of estimation of effective strength and selection of investment projects can effect on investment situation in Russia.

Keywords: investments, investment project, investment activity, project efficiency, profitability.

© Самарин Е. В., Белякова Г. Я., 2011

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Юрий Леонидович – доктор экономических наук, ректор Красноярского торгово-экономического института. Окончил Ленинградский институт советской торговли имени Ф. Энгельса (ЛИСТ) в 1973 г. Область научных интересов – экономика. E-mail: info@kgtei.ru.

Алексеева Евгения Юрьевна – старший преподаватель кафедры финансов и кредита Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2007 г. Область научных интересов – управление социальными инвестициями. E-mail: alexseeva_85@mail.ru.

Антамошкин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Томский государственный университет в 1973 г. Область научных интересов – моделирование и оптимизация сложных систем. E-mail: oleslav@mail.ru.

Бакаева Ольга Александровна – ассистент кафедры информатики и вычислительной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарева. Окончила Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева в 2008 г. Область научных интересов – прикладная статистика, нечисловая статистика. E-mail: helga_rm@rambler.ru.

Белозерцев Владимир Семенович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1974 г. Область научных интересов – автоматизация производственных процессов. Т. 8 (391) 262-95-61.

Белякова Галина Яковлевна – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой международного бизнеса Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности в 1969 г. Область научных интересов – региональная экономика. E-mail: belyakova@sibsau.ru.

Бойко Оксана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1985 г. Область научных интересов – техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей, теория автоматического управления, композиционные материалы. E-mail: bouko@sibsau.ru.

Боровик Игорь Николаевич – старший преподаватель кафедры ракетных двигателей Московского авиационного института (государственного технического университета). Окончил Московский авиационный институт (государственный технический университет) в 2005 г. Область научных интересов – жидкостные ракетные двигательные установки межорбитальных транспортных аппаратов и космических разгонных блоков, многокритериальная оптимизация проектных параметров жидкостных ракетных двигательных установок. E-mail: borovik.igor@gmail.com.

Браверман Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1975 г. Область научных интересов – автоматизация производственных процессов. E-mail: bravermanvladimir@rambler.ru.

Буй Мань Кыонг – аспирант Байкальского государственного университета экономики и права. Окончил Университет Ле Куй Дон (Ханой, СВР) в 2004 г. Область научных интересов – математическое моделирование, численные методы, динамика и выносливость машин. E-mail: manhcuongkck@yahoo.com.

Булгаков Юрий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента Красноярского государственного аграрного университета. Окончил Ленинградский механический институт в 1965 г. Область научных интересов – статистическая оптимизация управленческих решений. E-mail: yurii-bulgakov@mail.ru.

Васильцов Артем Сергеевич – аспирант Института нефти и газа Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2008 г. Область научных интересов – топливообеспечение, тепломассообмен. E-mail: artem74990@mail.ru.

Вейсвер Татьяна Владимировна – аспирант кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – автоматизация производственных процессов. E-mail: bravermanvladimir@rambler.ru.

Веселков Сергей Александрович – научный сотрудник обсерватории Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1989 г. Область научных интересов – астрономия, астрономическая оптика. E-mail: pulsar1963@yandex.ru.

Воеводина Марина Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Хакасского технического института – филиала Сибирского федерального университета. Окончила Абаканский филиал Краснояр-

ского политехнического института в 1988 г. Область научных интересов – повышение качества литых изделий. E-mail: v.m.a@list.ru.

Воробьева Мария Витальевна – магистрант кафедры технической физики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Область научных интересов – цифровая обработка изображений, прием и обработка данных дистанционного зондирования метеорологического характера для анализа синоптической обстановки, обработка данных дистанционного зондирования с целью изучения динамики снегового покрова Сибири. Т. 8 (391) 291-91-67.

Воробьев Алексей Геннадьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры ракетных двигателей Московского авиационного института (государственного технического университета). Окончил Московский авиационный институт (государственный технический университет) в 2001 г. Область научных интересов – жидкостные ракетные двигатели. E-mail: formulal_av@mail.com.

Воронин Антон Сергеевич – аспирант Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2011 г. Область научных интересов – функциональные наноструктуры и их математическое моделирование. E-mail: a.voronin1988@mail.ru.

Воронцов Юрий Сергеевич – инженер научно-производственной фирмы «Фаза» Сибирского федерального университета. Окончил Новосибирский государственный университет в 1985 г. Область научных интересов – радиоэлектроника, схемотехническое проектирование. E-mail: voron_yus@mail.ru.

Горбунов Михаил Александрович – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Кемеровский государственный университет в 2008 г. Область научных интересов – методология анализа деятельности предприятия, моделирование инвестиционных процессов. E-mail: michael-gorbunov@mail.ru.

Горяшин Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию имени академика М. Ф. Решетнева в 2002 г. Область научных интересов – силовая электроника, преобразовательная техника, управление в нелинейных системах. E-mail: gorkoya@mail.ru.

Двирный Валерий Васильевич – заместитель начальника отдела ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», доктор технических наук, профессор, академик Международной академии холода, академический советник Российской инженерной академии (РИА), член-корреспондент САН ВШ, лауреат премии правительства РФ. Окончил Московский авиационный институт имени С. Орджоникидзе в 1969 г. Область научных интересов – тепловые трубы, экспериментальная отработка КА. E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru.

Деев Прохор Олегович – аспирант кафедры компьютерного моделирования Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетникова. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет в 2009 г. Область научных интересов – механика композиционных конструкций. E-mail: prokhor777@gmail.com.

Демиш Александра Владимировна – магистрант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский федеральный университет в 2009 г. Область научных интересов – системный анализ. E-mail: davsg@mail.ru.

Демченко Олег Федорович – кандидат экономических наук, генеральный директор – генеральный конструктор ОАО «Опытно-конструкторское бюро имени А. С. Яковлева», старший вице-президент ОАО «Объединённая авиастроительная корпорация». Окончил Куйбышевский авиационный институт в 1961 г. Область научных интересов – разработка новых конкурентоспособных образцов авиационной техники. E-mail: demchenko@yak.ru.

Демченко Ольга Сергеевна – ассистент кафедры экономической теории Сибирского федерального университета. Окончила Сибирский федеральный университет в 2008 г. Область научных интересов – экономическая теория. E-mail: dos236@akadem.ru.

Дулесов Александр Николаевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и маркетинга Хакасского технического института – филиала Сибирского федерального университета. Окончил Хакасский технический институт – филиал Красноярского государственного технического университета в 2003 г. Область научных интересов – региональная экономика. E-mail: babyshkag@mail.ru.

Ереско Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Сибирского федерального университета, заслуженный изобретатель РФ, член-корреспондент Академии наук высшей школы РФ. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1975 г. Область научных интересов – машиноведение, системы приводов, эластогидродинамические задачи обеспечения герметичности гидро-пневмо-вакуумных систем, математическое моделирование и системный анализ. E-mail: eresko07@mail.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор, декан финансово-экономического факультета Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Алтайский политехнический институт имени И. И. Ползунова в 1985 г.; аспирантуру Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина в 1989 г. Область научных интересов – стратегический и инновационный менеджмент. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Жуйков Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 1999 г. Область научных интересов – гидрогазодинамика турбонасосных агрегатов. E-mail: d_zhuikov@sibsau.ru.

Жуков Вадим Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных технологий института информатики и телекоммуникаций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2004 г. Область научных интересов – интеллектуальные технологии анализа данных, биоинспирированные алгоритмы моделирования и оптимизации, методы и средства обнаружения инцидентов информационной безопасности. E-mail: vadimzhukov@mail.ru.

Завьялова Ольга Игоревна – ассистент кафедры информатики Сибирского федерального университета. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2002 г. Область научных интересов – системный анализ, мультиверсонное программное обеспечение, многоатрибутивные методы принятия решений. E-mail: zav.olga888@mail.ru.

Зинина Ольга Вячеславовна – кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента Красноярского государственного аграрного университета. Окончила Красноярский государственный аграрный университет в 1999 г. Область научных интересов – инновационный менеджмент. E-mail: zinnia.olga@bk.ru.

Ишенина Надежда Николаевна – начальник группы ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 1999 г. Область научных интересов – технология изготовления сотовых конструкций космических аппаратов. E-mail: inn@iss-reshetnev.ru.

Капулин Денис Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2001 г. Область научных интересов – электротехника, управление технологическими процессами, космические системы. E-mail: kapulin@gmail.com.

Карасева Маргарита Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярский государственный педагогический институт в 1990 г. и Сибирскую аэрокосмическую академию в 1999 г. Область научных интересов – мультилингвистическая технология обучения иностранным языкам, разработка частотных терминологических словарей. Т. 8902-992-64-12.

Кацура Александр Владимирович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Иркутский политехнический институт в 1982 г. Область научных интересов – техническая эксплуатация авиационной техники. E-mail: katsu60@mail.ru.

Кисуркин Алексей Андреевич – начальник управления главы Республики Хакасия. Окончил Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева в 1985 г., Академию народного хозяйства при Правительстве РФ в 1995 г. Область научных интересов – региональная экономика. E-mail: ka@r-19.ru

Кишкин Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой холодильной, криогенной техники и кондиционирования Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1985 г. Область научных интересов – гидрогазодинамика турбомашин. E-mail: spsp99@mail.ru.

Коловский Алексей Владимирович – ассистент кафедры электроэнергетики Хакасского технического института – филиала Сибирского федерального университета. Окончил Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета в 2006 г. Область научных интересов – системы с переменной структурой, автоматизированный электропривод. E-mail: Aleksey_a_v@list.ru.

Кочетков Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики Хакасского технического института – филиала Сибирского федерального университета. Окончил Уральский политехнический институт в 1964 г. Область научных интересов – оптимизация управления стационарными и нестационарными электромеханическими системами. E-mail: Kochetkov-vp@yandex.ru.

Краев Михаил Васильевич – доктор технических наук, профессор Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, академик Российской Академии естественных наук и Российской академии космонавтики имени К. Э. Циолковского, член-корреспондент академии наук высшей школы, заслуженный деятель науки и техники РФ. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского государственного политехнического института в 1967 г. Область научных интересов – гидродинамика систем подачи энергодвигательных установок. Т. (391)262-95-61.

Краснова Татьяна Григорьевна – доктор экономических наук, доцент, министр экономики Республики Хакасия. Окончила Иркутский институт народного хозяйства в 1985 г. Область научных интересов – региональная экономика. E-mail: admeconom@mail.ru.

Крат Светлана Александровна – ведущий инженер ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Окончила Томский институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники в 1991 г. Область научных интересов – моделирование светооптических схем, системы управления. E-mail: kratsv@iss-reshetnev.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени М. Ф. Решетнева, главный научный сотрудник института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Омский машиностроительный институт в 1955 г. Область научных интересов – повышение качества литых изделий. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кузнецова Вера Альбертовна – кандидат экономических наук, профессор кафедры финансов и кредита Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Хабаровский политехнический институт в 1973 г. Область научных интересов – экономика промышленных предприятий. Т. 8(391)291-92-91.

Курешов Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, профессор, первый проректор – проректор по развитию Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский политехнический институт в 1975 г. Область научных интересов – вопросы организации и управления в сфере международного сотрудничества высших учебных заведений, проблемы международной интеграции университетов, организация и управление внешнеэкономической деятельностью предприятий, вопросы качества в системе международной аккредитации. E-mail: kureshov@sibsau.ru.

Лапко Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Фрунзенский политехнический институт в 1971 г. Область научных интересов – непараметрическая статистика, распознавание образов, моделирование и оптимизация систем при неполной информации. E-mail: lapko@icm.krasn.ru.

Лапко Василий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой космических средств и технологий Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1996 г. Область научных интересов – непараметрическая статистика, моделирование систем, непараметрические коллективы решающих правил, распознавание образов. E-mail: lapko@icm. krasn.ru.

Лапухин Евгений Геннадьевич – инженер обсерватории Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1994 г. Область научных интересов – астрономия, астрономическая оптика. E-mail: slovoktk@mail.ru.

Левко Андрей Анатольевич – старший преподаватель кафедры инженерной графики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1989 г. Область научных интересов – финишная обработка, инженерная графика, технология машиностроения. E-mail: alevko@sibsau.ru.

Левко Валерий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1988 г. Область научных интересов – повышение качества поверхностного слоя деталей летательных аппаратов. E-mail: levko@sibsau.ru.

Лобанов Дмитрий Константинович – инженер НИУ, аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – испытание энергосистем космических аппаратов. E-mail: u649@yandex.ru.

Лубнин Михаил Алексеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры сварки летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Челябинский политехнический институт в 1959 г. Область научных интересов – производство летательных аппаратов. Т. 8(391)264-62-82.

Лукасов Виктор Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей факультета гражданской авиации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Барнаульское высшее военно-авиационное училище летчиков в 1972 г. Область научных интересов – летная и техническая эксплуатация воздушных судов. Т. (391)233-00-10.

Лукьянова Анна Александровна – доктор экономических наук, профессор, проректор по учебной работе Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Новосибирский сельскохозяйственный институт в 1983 г. Область научных интересов – экономика и управление народным хозяйством, региональная экономика. E-mail: lukianovaaa@sibsau.ru; dekanatfef@sibsau.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, заведующий отделением кибернетики и системного анализа института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук при Сибирском государственном аэрокосмическом университете имени

академика М. Ф. Решетнева. Окончил Фрунзенский политехнический институт в 1968 г. Область научных интересов – кибернетика, теория стохастических систем управления. Т. 8(391)290-50-11.

Медведев Алексей Викторович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики Кемеровского государственного университета. Окончил Кемеровский государственный университет в 1985 г. Область научных интересов – математическая экономика, моделирование динамики крупных экономических систем. E-mail: alexm_62@mail.ru.

Мизрах Енис Аврумович – кандидат технических наук, профессор кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1967 г. Область научных интересов – энергетические системы космических аппаратов. Т. 8(391)297-87-29.

Мирзаев Роман Александрович – аспирант кафедры технической механики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2011 г. Область научных интересов – робототехника, мехатроника. E-mail: ramirzaev@mail.ru.

Михнев Михаил Михайлович – кандидат технических наук, первый заместитель главного инженера – главный технолог ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Окончил филиал Красноярского политехнического института в 1978 г. Область научных интересов – технология сборки и испытаний космических аппаратов. E-mail: mix@iss-reshetnev.ru.

Наговицин Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент Сибирского федерального университета, начальник сектора ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Окончил Пермский государственный университет имени М. Горького в 1977 г. Область научных интересов – механика композиционных материалов. E-mail: nvn@iss-reshetnev.ru.

Немцев Иван Васильевич – магистрант кафедры технической физики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, инженер КНЦ СО РАН. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – электронная микроскопия. E-mail: ivan_nemtsev@mail.ru.

Никитин Дмитрий Александрович – старший преподаватель кафедры безопасности информационных технологий Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2004 г. Область научных интересов – компьютерная алгебра, кодирование, сжатие, цифровая обработка сигналов, мобильная связь. E-mail: nikitin.bit@gmail.com.

Никушкин Николай Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей факультета гражданской авиации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1983 г. Область научных интересов – техническая эксплуатация воздушных судов, механика разрушений, разработка летательных аппаратов нетрадиционных схем. Т. (391)233-00-10.

Новожилов Андрей Александрович – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный технологический университет в 2007 г. Область научных интересов – методы и модели анализа технологических процессов и управление. E-mail: masterspu@rambler.ru.

Охоткина Евгения Александровна – программист Центра космического мониторинга Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2006 г. Область научных интересов – анализ и обработка данных дистанционного зондирования, связанных с решением задач послепожарного мониторинга восстановления лесной растительности; изучение синоптической обстановки по данным метеорологического характера. Т. 8 (391) 291-91-67.

Петухов Николай Юрьевич – аспирант кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – фрактальный анализ, статистические характеристики текстурных изображений, распознавание текстур, искусственный интеллект. E-mail: n_petukhov@sibsau.ru.

Подвезенный Валерий Никифорович – доктор технических наук, профессор кафедры топливообеспечения и горюче-смазочных материалов Института нефти и газа Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский технологический институт в 1967 г. Область научных интересов – топливообеспечение, тепломассообмен. E-mail: togsming@mail.ru.

Пьянков Дмитрий Игоревич – аспирант кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – цифровая обработка изображений, стереозрение. E-mail: slicktail87@gmail.com.

Репецкий Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, проректор по МД Байкальского государственного университета экономики и права. Окончил Иркутский политехнический институт

в 1982 г. Область научных интересов – математическое моделирование, численные методы, динамика и прочность машин. E-mail: repetskiy@isea.ru, repetsk@angara.ru.

Рукавицына Татьяна Александровна – аспирант кафедры ЮНЕСКО Сибирского федерального университета. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2005 г. Область научных интересов – математические методы анализа эффективности функционирования сложных организационно-технических систем**.** E-mail: veritas@01rambler.ru.

Саакян Аревик Маисовна – ассистент кафедры финансов и кредита Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2007 г. Область научных интересов – налоги и налогообложение, инновационная деятельность промышленных предприятий, инвестиции. E-mail: revishatka@mail.ru.

Самарин Евгений Валерьевич – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – оценка эффективности инвестиционных проектов. E-mail: samarin.86@inbox.ru.

Самусь Николай Николаевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН (ИНАСАН). Окончил Московский государственный университет в 1949 г. Область научных интересов – астрономия, переменные звезды. E-mail: samus@sai.msu.ru.

Сафонов Константин Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1982 г. Область научных интересов – прикладная математика, комплексный анализ, фундаментальная информатика. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Семенкин Евгений Станиславович – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Кемеровский государственный университет в 1982 г. Область научных интересов – моделирование и оптимизация сложных систем, эволюционные алгоритмы, интеллектуальные информационные технологии. E-mail: eugenesemenkin@sibsau.ru.

Семенов Сергей Сергеевич – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – экономика промышленных предприятий. E-mail: sergey19862@ya.ru.

Сидоров Александр Сергеевич – аспирант кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2006 г. Область научных интересов – системы электропитания космических аппаратов. Т. 8-904-894-58-52.

Симунин Михаил Максимович – кандидат технических наук, доцент кафедры квантовой физики и нанотехнологий Московского института электронной техники. Окончил Московский институт электронной техники в 2007 г. Область научных интересов – химическая технология наноматериалов, физическая химия поверхностей, катализ, углеродные нанотрубки. E-mail: michanel@mail.ru.

Смирнов Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор, директор НИИ ракетно-космической техники, заведующий кафедрой технической механики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1978 г. Область научных интересов – робототехника, мехатроника, механика сложных технических систем. E-mail: smirnov@sibsau.ru.

Смирнов Павел Николаевич – аспирант кафедры холодильной, криогенной техники и кондиционирования Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – гидрогазодинамика турбомашин. E-mail: psmirnov@list.ru.

Смородинова Наталья Ивановна – кандидат экономических наук, доцент Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский технологический институт в 1977 г. Область научных интересов – государственные и муниципальные финансы, бюджетное планирование. E-mail: smr439@yandex.ru.

Соломатова Анна Александровна – ассистент преподавателя кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – автономная энергетика, преобразовательная техника. E-mail: anet_smilk@mail.ru.

Сон Уп Ха – стажер кафедры ракетных двигателей Московского авиационного института (государственного технического университета). Окончил Корейский авиационный институт в 1995 г. Область научных интересов – жидкостные ракетные двигатели. E-mail: mars_hadius@hotmail.com.

Сопов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и

исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2004 г. Область научных интересов – интеллектуальные информационные технологии, оптимизация и моделирование сложных систем, СППР. E-mail: es_gt@mail.ru.

Сопов Сергей Александрович – аспирант кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – многокритериальные технологии извлечения знаний, диалоговые системы, МППР. E-mail: sergey_sopov@mail.ru.

Ступников Александр Иванович – инженер научно-производственной фирмы «Фаза» Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2009 г. Область научных интересов – радиоэлектроника, схемотехническое проектирование. E-mail: stup1984@mail.ru.

Сухинин Анатолий Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории леса института леса имени В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Томский государственный университет в 1967 г. Область научных интересов – теплофизика, газовая динамика, химическая кинетика и горение, дистанционные методы зондирования Земли из космоса. E-mail: boss@ksc.krasn.ru.

Сысоев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 1997 г. Область научных интересов – финишная обработка, технология машиностроения. E-mail: sysoev_as@sibsau.ru.

Сысоев Сергей Константинович – кандидат технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Челябинский политехнический институт в 1959 г. Область научных интересов – финишная обработка, технология машиностроения. E-mail: sysoev_sk@sibsau.ru.

Сысоева Любовь Петровна – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2003 г. Область научных интересов – финишная обработка, технология машиностроения. E-mail: sysoev_as@sibsau.ru.

Ткачев Степан Борисович – инженер кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2005 г. Область научных интересов – преобразовательная техника, силовая электроника. Т. 8-908-201-1075.

Тушко Тамара Алексеевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Окончила Новосибирский государственный университет в 1975 г. Область научных интересов – математические методы решения прямых и обратных задач геофизики, моделирование скоростного строения среды по сейсмологическим данным. E-mail: ttushko@sfu-kras.ru.

Фан Ван Туан – аспирант Байкальского государственного университета экономики и права. Окончил Университет Ле Куй Дон (Ханой, СРВ) в 2003 г. Область научных интересов – математическое моделирование, численные методы и комплекс-программы. E-mail: yeubeconlam@yahoo.com.

Фельк Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 2003 г. Область научных интересов – физика конденсированного состояния, распространение радиоволн в различных средах. E-mail: vlaf@nm.ru.

Филатов Антон Александрович – кандидат технических наук, начальник оптофизической лаборатории ООО НПП «Волоконно-оптическое лазерное оборудование». Окончил Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики в 1999 г. Область научных интересов – расчет и моделирование оптических систем. E-mail: filatov@volo.ru.

Фомин Алексей Николаевич – магистр техники и технологии Сибирского федерального университета, инженер научно-производственной фирмы «Фаза» Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2010 г. Область научных интересов – радиоэлектроника, схемотехническое проектирование. E-mail: anf_2005@mail.ru.

Хартов Станислав Викторович – кандидат технических наук, научный сотрудник Красноярского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Московский институт электронной техники в 2005 г. Область научных интересов – функциональные наноструктуры и их технология, самоорганизация, локальные химические реакции, катализ. E-mail: stas_f1@list.ru.

Хорошко Александр Юрьевич – инженер кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2008 г. Область научных интересов – преобразовательная техника. E-mail: of_silence@mail.ru.

Христич Валерий Васильевич – начальник отдела тепловакуумных испытаний ОАО «Информационные

спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», доцент базовой кафедры космического машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Ленинградский военно-механический институт в 1965 г. Область научных интересов – тепловакуумные испытания космических аппаратов. E-mail: hristich@iss-reshetnev.ru.

Царев Роман Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1999 г. Область научных интересов – информационные технологии, мультиверсонное программное обеспечение, многоатрибутивные методы принятия решений, космические системы. E-mail: rahatamatahata@mail.ru.

Шабанов Александр Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского. Окончил Красноярский государственный университет в 1993 г. Область научных интересов – теоретическая физика, электронная микроскопия, фотонные кристаллы. E-mail: alexch@nikel.akadem.ru.

Шабанова Ольга Вильгельмовна – инженер-технолог СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН. Окончила Красноярский государственный университет в 1995 г. Область научных интересов – органическая химия, органический катализ, синтез инвертированных опаловых структур. E-mail: OllaCh@yandex.ru.

Шаймарданов Лев Гайнулович – доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей института гражданской авиации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, член-корреспондент Международной академии наук высшей школы. Окончил Куйбышевский авиационный институт в 1966 г. Область научных интересов – техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей. Т. (391)94-65-29.

Шатохин Сергей Станиславович – младший научный сотрудник кафедры основ конструирования машин Сибирского государственного аэрокосмического университета имен академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский политехнический институт в 1985 г. Область научных интересов – инженерные и технические науки, машиноведение, системы приводов и детали машин, гидродинамическая теория смазки. E-mail: el_time@mail.ru.

Шатров Александр Константинович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии космонавтики имени Э. К. Циолковского, лауреат Государственной премии в области науки и техники, заместитель директора отраслевого центра трансформируемых механических систем по науке, начальник отдела прочности и нагрузок ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (г. Железногорск). Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1972 г. Область научных интересов – теоретическая механика, экспериментальная отработка КА. Т. (391) 291-91-56.

Шиверский Алексей Валерьевич – аспирант Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2011 г. Область научных интересов – функциональные наноструктуры и их технология. E-mail: shiverskii@mail.ru.

Энгель Екатерина Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем Хакасского государственного университета имени Н. Ф. Катанова, докторант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова в 1997 г. Область научных интересов – нейроинформатика, нечеткая логика. E-mail: ekaterina.en@gmail.com.

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Антамошкин А. Н., Бакаева О. А. Сравнительный анализ «первых» критериев выявления связи между качественными переменными 4
Горбунов М. А., Медведев А. В., Семенкин Е. С. Применение генетических алгоритмов для решения задачи оценки эффективности региональной промышленной политики 8
Горяшин Н. Н., Соломатова А. А. Оценка статических потерь мощности в квазирезонансном преобразователе напряжения 13
Горяшин Н. Н., Хорошко А. Ю. О повышении энергетической эффективности импульсного преобразователя напряжения с резонансным переключением 20
Деев П. О. Определение основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины, закрепленной в центральной точке 25
Ереско С. П., Шатохин С. С. Исследование незамкнутой адаптивной гидростатической опоры с независимым плавающим регулятором 30
Жуков В. Г. Автоматизация процесса построения и оптимизации математических моделей эволюционными алгоритмами на основе экспериментальных данных 34
Карасева М. В., Новожилов А. А., Рукавицына Т. А. К вопросу оценки эффективности функционирования организационно-технических систем 40
Кочетков В. П., Коловский А. В. Оптимизация динамики автоматизированного электропривода с разрывным управлением 42
Лапко А. В., Лапко В. А. Сравнение непараметрических критериев проверки гипотез о распределениях случайных величин 48
Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Активные процессы – I 52
Никитин Д. А., Сафонов К. В. Автоматическое определение интерполянта с наименьшим количеством параметров 58
Петухов Н. Ю. Распознавание текстурных изображений на основе статистических и фрактальных признаков 63
Пьянков Д. И. Алгоритмы пространственно-временной коррекции видеопоследовательностей в задачах стереовидения 69
Репецкий О. В., Буй Мань Кыонг. Разработка математических моделей динамики и оценки усталостной прочности лопаток турбомашин с учетом геометрической нелинейности 74
Репецкий О. В., Фан Ван Туан. О проблеме построения математических моделей для оптимизации параметров фрикционных демпферов на примере лопаток газотурбинных двигателей 79
Сопов Е. А., Сопов С. А. Интеллектуальные информационные технологии выявления и диагностики проблем в задачах анализа сложных систем 84
Сухинин А. И., Воробьева М. В., Охоткина Е. А. Космический мониторинг снегового покрова Сибири по данным радиометра MODIS 90
Тушко Т. А. Алгоритм расчета годографа для среды, содержащей слой с линейной зависимостью скорости от глубины 97
Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Завьялова О. И., Демиш А. В. Модельно-алгоритмическое обеспечение планирования развития кластерной структуры АСУ космических систем 102
Энгель Е. А. Модели и методы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений 106

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Васильцов А. С., Подвезенный В. Н. Теоретические основы удаления загрязнений с внутренней поверхности топливных баков 114
Веселков С. А., Лапухин Е. Г., Самусь Н. Н. Восемь новых затменно-двойных систем в созвездии Кассиопеи 118
Воробьев А. Г., Боровик И. Н., Ха С. Разработка жидкостного ракетного двигателя малой тяги, работающего на перекиси водорода и керосине 121
Краев М. В. Расчет гидродинамических параметров рабочей решетки центробежного насоса 126
Крат С. А. Теоретические основы способа суммирования световых потоков от отдельных источников излучения для наземной отработки космических аппаратов 131
Крат С. А., Филатов А. А., Двирный В. В., Христич В. В., Шатров А. К. Моделирование и параметрическая оптимизация светооптической схемы имитатора Солнца для тепловой отработки негерметичных космических аппаратов 134

Лукасов В. В., Никушкин Н. В. Решение задачи по поддержке принятия решения экипажем воздушного судна в полете при возникновении аварийной ситуации ... 139
Мизрах Е. А., Лобанов Д. К. Динамический синтез нагрузочных устройств с рекуперацией электроэнергии в сеть электропитания испытательного комплекса энергосистем космического аппарата ... 142
Фельк В. А., Воронцов Ю. С., Фомин А. Н., Ступников А. И. Измерение дальности с помощью модифицированного эффекта Доплера ... 148
Шаймарданов Л. Г., Бойко О. Г. Метод решения задачи расчета надежности сложных систем при переменных параметрах потоков отказов агрегатов ... 151

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Браверман В. Я., Белозерцев В. С., Вейсвер Т. Г. Повышение точности позиционирования луча по стыку при электронно-лучевой сварке в условиях действия магнитных полей ... 156
Воеводина М. А., Крушенко Г. Г. К вопросу о «черных пятнах» в чугуне с шаровидным графитом ... 160
Кацура А. В. Исследование воздействия режимов формообразования на прочностные и коррозионные свойства элементов конструкции из алюминиевых сплавов ... 164
Левко В. А., Левко А. А. Исследование процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий ... 169
Левко В. А., Лубнин М. А., Сысоев С. К., Сысоев А. С., Сысоева Л. П. Методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки деталей ... 173
Мизрах Е. А., Сидоров А. С., Ткачев С. Б. Исследование влияния импульсных стабилизаторов напряжения на адмитанс и устойчивость имитаторов солнечных батарей с каскадным включением усилителей мощности ... 178
Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А. Разработка элементов управления механизмами параллельной структуры ... 184
Михнев М. М., Ишенина Н. Н., Наговицин В. Н. Определение параметров клеевого шва при изготовлении сотовых панелей ... 189
Симунин М. М., Хартов С. В., Немцев И. В., Шиверский А. В., Воронин А. С. Морфология пористого анодного оксида алюминия, модифицированного углеродными нанотрубками ... 193
Смирнов П. Н., Кишкин А. А., Жуйков Д. А. Расчетное моделирование течения в рабочей полости дискового насоса ... 196
Шабанова О. В., Шабанов А. В., Немцев И. В. Исследование условий получения наноразмерных монодисперсных сферических частиц полиметилметакрилата ... 201

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Александров Ю. Л. Демченко О. С. Рейтинговая оценка эффективности стабилизационной политики государства ... 208
Алексеева Е. Ю. Модель формирования портфеля социальных инвестиций ... 213
Булгаков Ю. В., Зинина О. В. Компьютерное моделирование диффузии инноваций ... 217
Демченко О. Ф. Системное позиционирование систем организационного структурного проектирования объектов российского авиационно-промышленного комплекса ... 221
Ерыгин Ю. В., Саакян А. М. Определение принципов стимулирования инновационной деятельности предприятий оборонно-промышленного комплекса ... 226
Кисуркин А. А. Критериальные показатели развития регионов по характеру управляющего воздействия ... 230
Краснова Т. Г., Дулесов А. Н. Роль этноэкономики в социально-экономическом развитии региона ... 234
Кузнецова В. А., Семенов С. С. Требования и принципы формирования экономической политики промышленного предприятия ... 240
Курешов В. А. Организационно-экономические формы международной деятельности вузов ... 244
Лукьянова А. А., Смородинова М. И., Алексеева Е. Ю. Инструменты управления социальными инвестициями в регионе ... 248
Самарин Е. В., Белякова Г. Я. Влияние качества оценки эффективности и выбора инвестиционных проектов на повышение инвестиционной активности в России ... 252

Сведения об авторах ... 257

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Antamoshkin A. N., Bakaeva O. A Comparative analysis of «the first» criteria of diagnosis of relation among qualitative variables 4
Gorbunov M. A., Medvedev A. V., Semenkin E. S. Application of genetic algorithms to cope with a task of estimation of regional industrial politics effective strength 8
Goryashin N. N., Solomatova A. A. Estimation of aggregated losses of power in a quasi-resonant converter 13
Goryashin N. N., Khoroshko A. Yu. Upon efficiency of increase of a power-time converter with a resonance switching unit 20
Deev P. O. Determination of fundamental oscillation frequency of the rectangular sandwich plate tightened in the central point 25
Eresko S. P., Shatohin S. S. Reseach of non closed adaptive hydrostatic support with independent floating regulator 30
Zhukov V. G. Automation of construction and optimization of mathematical models evolutionary algorithms based on experimental data 34
Karaseva M. V., Novozhilov A. A., Rukavitsina T. A. To the question of estimation of efficiency of organizational and technical systems functioning 40
Kochetkov V. P., Kolovskiy A. V. Optimization of dynamics of the automated electric drive with explosive control 42
Lapko A. V., Lapko V. A. Comparison of nonparametric testing criteria of hypothesis of distribution of random variables 48
Medvedev A. V. Theory of non-parametric systems. Active processes – I 52
Nikitin D. A., Safonov K. V. Automatic detection of interpolant with the fewest parameters 58
Petukhov N. Yu. Analysis and recognition of textural images on the basis of statistical and fractal features 63
Piankov D. I. Algoritms of spatio-temporal correction of video sequences in tasks of stereo vision 69
Repetskiy O. V., Bui Manh Cuong. Development of mathematical models of dynamics and estimation of fatigue life of turbomachines blades with account of geometric nonlinearity 74
Repetskiy O. V., Phan Van Tuan. The problem of construction of mathematical models for optimization of parameters of friction dampers on the example of blades of gas turbine engines 79
Sopov E. A., Sopov S. A. Intelligent information technologies of diagnosis and diagnostics in complex system analysis 84
Sukhinin A. I., Vorobiova M. V., Okhotkina E. A. Remote sensing of snow cover in Siberia on data of radiometer MODIS 90
Tushko T. A. Algorithm of calculation of the hodograph containing a layer with a linear dependence of velocity on depth 97
Tsarev R. Yu., Kapulin D. V., Zaviaolova O. I., Demish A. V. Model and algorithm conforming of planning the cluster structure of an automated control system of space systems 102
Engel E. A. Models and methods of intellectual support in management decisions for technical systems 106

PART 2. AVIATION AND SPACE-ROCKET ENGINEERING

Vasiltsov A. S., Podvezenny V. N. Theoretical fundamentals of decontamination of the inner surface of the storage tanks 114
Veselkov S. A., Lapukhin E. G., Samus N. N. Eight new eclipsing binary systems in Cassiopeia 118
Vorobiev A. G., Borovik I. N., Ha S. Developing LRE of low thrust using propellants: strong hydrogen peroxide with kerosene 121
Kraev M. V. Calculation of hydrodynamic parameters of the working lattice of centrifugal pump 126
Krat S. A. Theoretical bases of compositing technique of light streams from separate sourses of radiation for SC land working off 131
Krat S. A., Filatov A. A., Dvirnyj V. V., Hristich V. V., Shatrov A. K. Photonic schemes modelling and parametrical optimization of the Sun simulator for thermal working of untight spacecrafts 134
Lukasov V. V., Nikushkin N. V. Solution of a problem of support of the desision to be made by a crew team when an emergency situation occurs wile in flight 139
Mizrakh E. A., Lobanov D. K. Dynamic synthesis of DC load with energy recuperation into power network of spacecraft power supply system test complex 142

Fel'k V. A., Vorontsov Yu. S., Fomin A. N., Stupnikov A. I. Measurement of distance with the help of the modified Doppler effect 148
Shaymardanov L. G., Boyko O. G. Method for solution of a problem of calculation of reliability of complicated systems with variable parameters of breakdown of aggregates 151

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Braverman V. Ya., Belozertcev V. S., Veisver T. G. Accuracy increase of beam positioning relative to joint at electron-beam welding under conditions of magnetic fields action 156
Voevodina M. A., Krushenko G. G. To the question of «black stains» in pig-iron with spherical graphite 160
Katsura A. V. Analysis of effects of regimes of form composition on strength and corrosive properties of elements of aluminum alloy based structures 164
Levko V. A., Levko A. A. Research of abrasive extrusion-type processing of small holes 169
Levko V. A., Lubnin M. A., Sysoev S. K., Sysoev A. S., Sysoeva L. P. Method of assessment of accuracy, quality and efficiency of abrasive flow processing of spair parts 173
Mizrakh E. A., Sidorov A. S., Tkachev S. B. Investigation of influence of switched voltage regulators on admittance and stability of solar array simulators with cascade connection of power amplifiers 178
Mirzaev R. A, Smirnov N. A. Development of elements of control of mechanisms of parallel structures 184
Mikhnev M. M., Ishenina N. N., Nagovitsin V. N. Determination of the adhesive-bonded joint parameters during hoheycomb panels manufacturing 189
Simunin M. M., Khartov S. V., Nemtsev I. V., Shiverskiy A. V., Voronin A. S. Morphology of porous anodic aluminum oxide modified by carbon nano-tubes 193
Smirnov P. N., Kishkin A. A., Zhuykov D. A. Mathematical modeling of flow in the working cavity of the disc pump 196
Shabanova O. V., Shabanov A. V., Nemtsev I. V. Research of conditions of synthesis of nanoscale monodisperse spherical particles of poly-methylmethacrylate 201

PART 4. ECONOMICS

Aleksandrov Yu. L., Demchenko O. S. The rating of the state stabilization policy effectiveness 208
Alexeeva E. Yu. Models of formation of the portfolio of social investments 213
Bulgakov Yu. V., Zinina O. V. Computer simulation of diffusion innovations 217
Demchenko O. F. System positioning of systems of organizational structural design of facilities of Russian aviation-industrial complex 221
Erygin Yu. V., Saakyan A. M. Determination of the principles of innovation motivation in defense companies 226
Kisurkin A. A. Criterial indicators of regions according to the nature of the controlling action 230
Krasnova T. G., Dulesov A. N. Role of ethnic economy in social and economic development of a region 234
Kuznetsova V. A., Semenov S. S. Requirements and principles of economic policy of enterprises 240
Kureshov V. A. Institutional and economic forms of international activity of institutions of higher learning 244
Lukyanova A. A., Smorodinova N. I., Alexeeva E. Yu. Social investment management tools in the region 248
Samarin E. V., Belyakova G. Ya. The effect of the quality of assessment of effective strength and selection of investnment projects on improvement of investment activity in Russia 252

Приложение № 2
к Положению № 63/74 от 15.03.06
о журнале «Вестник СибГАУ»

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК СИБГАУ»

Общие требования. Тексты статей представляются в редакцию журнала в электронном и печатном виде на русском и английском языках. Русскоязычная версия должна сопровождаться английским переводом фамилии автора (авторов); названия статьи; аннотации; ключевых слов (см. пример оформления статьи).

Файл со статьей представляется на любом электронном носителе.

На последней странице ставится подпись автора (авторов) статьи. Количество авторов одной статьи – не более пяти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй раз – в соавторстве.

Индекс УДК предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

Оригинал должен быть чистым, не помятым, без правок, вписанных от руки. Страницы нумеруются карандашом на обороте.

Электронная копия. Статья набирается в программе Microsoft Word.

Содержание. В статье необходимо сформулировать проблемы, отразить объект исследования, достигнутый уровень процесса исследования, новизну результатов, область их применения.

Статья должна заканчиваться выводом. Текст вывода набирается отдельным абзацем (абзацами), в котором акцентируется новизна результатов, эффективность их использования и др.

Объем статьи: 7–8 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки).

Параметры страницы. Формат А4 (210×297 мм). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

Текст. Шрифт – Times New Roman, размер 12 пт.

По центру помещаются инициалы и фамилия автора (авторов).

Не допускается (!) в тексте статьи набирать слова прописными (заглавными) буквами, жирным шрифтом или курсивом, а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформление набора, выполняемого в журнале.

Ниже по центру шрифтом 12 пт печатается название статьи и через строку курсивом – аннотация, ключевые слова (не более 6).

Основной текст статьи размещается через пробел от аннотации. Межстрочный интервал – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается. Заголовки глав должны быть центрированы.

Абзацный отступ равен 0,5 см.

Ссылки на литературные или иные источники оформляются числами, заключенными в квадратные скобки, например [1]. Ссылки должны быть последовательно пронумерованы.

При наличии гранта ссылка на грант помещается внизу полосы под строками основного текста (подстрочное примечание).

Примечания. Смысловые пояснения основного текста или дополнения к нему оформляются в виде внутритекстовых примечаний среди строк основного текста специальной рубрикой, выделенной светлым курсивом: *Примечание.* (одно примечание), *Примечания*: (несколько примечаний). Отделяются от текста *точкой* (если стоят в единственном числе в подбор к тексту примечания). Примечания должны быть последовательно пронумерованы.

Формулы. Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны без использования специальных редакторов – символами (шрифт Symbol). Специальные сложные символы, а также многострочные формулы, которые не могут быть набраны обычным образом, должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Набор математических формул в пределах всего текста должен быть единообразен:

– русские и греческие символы – прямым шрифтом;
– латинские – курсивом;
– размер обычного символа – 12 пт;
– крупный индекс – 10 пт;
– мелкий индекс – 9 пт;
– крупный символ – 11 пт;
– мелкий символ – 10 пт.

Формулы, набранные отдельными строками, располагают по центру.

Не допускается (!) набор в основном тексте статьи простых латинских, греческих или специальных символов в редакторе формул.

Таблицы должны быть последовательно пронумерованы. Слово «таблица» набирается светлым курсивом с выравниванием вправо, шрифтом 11 пт, например *Таблица 1*, ниже – заглавие таблицы (набирается жирным шрифтом по центру). Если таблица имеет большой объем, то она может быть помещена на отдельной странице, а в случае, когда она имеет значительную ширину, – на странице с альбомной ориентацией.

Иллюстрации. Оформляются отдельным файлом с расширением tiff. Последовательно пронумеровываются обычным шрифтом без кавычек с выравниванием по центру, например, Рис. 1. Могут содержать подрисуночную подпись, шрифтом 11 пт. Иллюстрации могут быть сканированы с оригинала (в градациях серого с разрешением 150 dpi) или выполнены средствами компьютерной графики. Не принимаются цветные иллюстрации и иллюстрации с разрешением 300 dpi и более.

Библиографические ссылки составляются в соответствии с действующими требованиями к библиографическому описанию и помещаются после основного текста (ГОСТ 7.0.5–2008).

К печатному варианту статьи необходимо приложить:

1) экспертное заключение о возможности открытой публикации;

2) внешнюю рецензию (рецензент, желательно, не ниже ученой степени доктора наук);

3) сведения об авторе:

– фамилия, имя, отчество (полностью);

– ученая степень, звание, должность;

– вуз, год его окончания;

– область научных интересов;

– место работы, номер телефона;

– адрес для переписки (для иногородних);

– e-mail.

Внимание! Материалы статьи авторы сдают лично секретарю журнала или высылают почтой с указанием обратного адреса. По электронной почте статьи не принимаются.

Статьи рецензируются. Отклоненные материалы не возвращаются.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

УДК 621.396.96.001(07)

И. А. Иванов

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ДВУХКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ*

Рассмотрена децентрализованная обработка информации в двухканальных измерительных системах при косвенном измерении для различных алгоритмов фильтрации оценки вектора состояния в измерительных пунктах и пункте обработки информации. Проведен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования синтезированных алгоритмов.

Ключевые слова (не более 6):

Задача обеспечения высокой точности оценивания координат и параметров траектории движения объекта может быть решена за счет применения многоканальных измерительных систем с оптимальной централизованной обработкой.

(Продолжение текста публикуемого материала).

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00-01-00912).

Библиографические ссылки

1. Гришин Б. П., Казаринов Ю. М. Динамические системы, устойчивые к отказам. М. : Радио и связь, 1985.

2. Медведев А. В. О моделировании организационных процессов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та : сб. науч. тр. Вып. 1. Красноярск, 2000. С. 173–191.

I. A. Ivanov

DECENTRALIZED ALGORITHMS OF INFORMATION PROCESSING IN TWO-CHANNEL MEASURE SYSTEMS

It is covered a decentralized algorithms of information processing in two-channel measure systems in case of an indirect measuring for different filtration algorithms of a condition vector estimation at the reception measure station and the station of information processing. Comparative analysis is carried out with a help of imitation modeling of synthesized algorithms.

Keywords: