

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 519.854.2

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-307-313

For citation: Lifar' A. S. Interpretation of ant algorithm for solving the problem of the technical impact program calendar planning. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 3, P. 307–313. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-307-313

Для цитирования: Лифарь А. С. Интерпретация муравьиного алгоритма для решения задачи календарного планирования программы технического воздействия // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 3. С. 307–313. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-307-313

INTERPRETATION OF ANT ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEM OF THE TECHNICAL IMPACT PROGRAM CALENDAR PLANNING

A. S. Lifar'

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Alifar15@mail.ru

Many strategically important sectors of the domestic industry are at the stage of transition to an investment approach to asset management. One of these industries is hydropower, where the current maintenance planning system needs new methods to deliver more efficient results. In general, the planning system for the main equipment (technical impact system) maintenance and repair can be formulated as a scheduling problem. The ant algorithm is of great interest from the point of view of solving the scheduling technical impact problem. Based on the specifics of planning, implementation and factors affecting the maintenance process, a modification of the ant algorithm is proposed. The mathematical description is a methodology for calculating parameters, basic elements of the graph, optimization criteria and constraints. A preparatory stage was also introduced into the solution algorithm, which determines the initial state of the equipment at the vertex K0. The functional model of the technical impact planning process presented in the article can be used to develop a software package within the framework of an innovative approach to asset management for hydropower companies.

Keywords: technical impact system, ant algorithm, scheduling.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. С. Лифарь

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Alifar15@mail.ru

Многие стратегически значимые отрасли отечественной промышленности находятся на этапе перехода к инвестиционному подходу к управлению активами. Одной из таких отраслей является гидроэнергетика, где на текущий момент система планирования технического обслуживания и ремонта нуждаются в применении новых методов, дающих более эффективные результаты. В общем виде система планирования

технического обслуживания и ремонта основного оборудования (система технического воздействия) может быть сформулирована в виде задачи календарного планирования. Большой интерес с точки зрения решения задачи календарного планирования технического воздействия представляет муравьиный алгоритм. На основе специфики планирования, реализации и факторов, влияющих на процесс технического обслуживания, предложена модификация муравьиного алгоритма. Математическое описание представляет собой методику расчета параметров, основных элементов графа, критериев оптимизации и ограничений. В алгоритм решения также был введен подготовительный этап, который определяет начальное состояние оборудования в вершине K0. Функциональная модель процесса планирования технического воздействия, представленная в статье, может быть использована для разработки программного комплекса в рамках инновационного подхода управления активами гидроэнергетических компаний.

Ключевые слова: система технического воздействия, муравьиный алгоритм, календарное планирование.

Общая постановка проблемы. Многие стратегически значимые отрасли отечественной промышленности находятся на этапе технического обновления основных производственных фондов, что влечет за собой переход к инвестиционному подходу к управлению активами [1]. В первую очередь, такой подход ориентирован на повышение точности оценки технического состояния оборудования, однако не исключает разработку эффективных систем планирования технического воздействия – технического обслуживания и ремонтов основного оборудования (далее – ТОиР).

Одной из таких отраслей является гидроэнергетика, где на текущий момент разработана и принята индексная система оценки состояния основного гидроэнергетического оборудования [2–4]. При этом система планирования ТОиР остается на уровне нормативного управления, то есть проведение планово-предупредительных ремонтов с фиксированным межремонтным интервалом.

Таким образом, существующие принципы формирования системы планирования ТОиР, основанные на данных о средней наработке в часах за один календарный год, нормативном межремонтном ресурсе между капитальными ремонтами и календарной продолжительности ремонтного цикла [5; 6], являются недостаточными и нуждаются в применении новых методов, дающих более эффективные результаты.

Постановка задачи исследования. К особенностям планирования ТОиР в гидроэнергетики можно отнести:

- планирование ремонта оборудования должно включать в себя разработку перспективных (от 5 лет), годовых и месячных планов ремонта основного оборудования;
- система технического обслуживания и ремонта должна предусматривать три этапа функционирования оборудования: этап поддержание работоспособного состояния (техническое обслуживание), этап планового текущего ремонта и этап планового капитального ремонта;
- высокие требования к регламентации ремонтных работ и сроков, в том числе по причине согласования планов ремонтных работ с АО «СО ЕЭС» и его филиалами [7; 8];
- учет всех ресурсов эксплуатации, в том числе материальных, трудовых и финансовых;
- обеспечение эффективного планирования ремонтных работ, с одной стороны, для устаревающего гидроэнергетического оборудования, находящегося в эксплуатации, с другой стороны – для вновь введенных гидроагрегатов.

В общем виде система планирования технического обслуживания и ремонта основного оборудования гидроэлектростанций сводится к решению задачи календарного планирования ремонтов технологического оборудования предприятия. В настоящее время задача является

достаточно известной, и для ее решения используются разные методы: математическое программирование, комбинаторные методы, статистические и эвристические методы [9].

В данной работе необходимо было исследовать возможность адаптации метода муравьиного алгоритма для автоматизации планирования ТООР с учетом специфики гидроэнергетики и разработать функциональную модель процесса планирования, включающую принципы инвестиционного подхода к управлению активами и автоматизацию системы планирования ТООР.

Математическая модель. Сформулируем математическую постановку задачи календарного планирования технического обслуживания и ремонтов для основного оборудования гидроэлектростанций (далее – ГЭС).

В общем виде муравьиный алгоритм (алгоритм оптимизации подражанием муравьиной колонии, англ. ant colony optimization, АСО) – это эвристика, использующая идею агентов имитирующих реальное поведение муравьев. Муравьи решают проблемы поиска путей к пище с помощью химической регуляции – феромонов, оставляемых ими на пути передвижения. Чем больше по одному пути прошло муравьев, тем феромона больше, тем скорее муравей предпочтет этот путь другим.

Анализа литературы [9–15], посвященной методам решения задачи календарного планирования позволил заключить, что муравьиный алгоритм является наиболее оптимальным, поскольку:

- является достаточно эффективным при небольшом количестве узлов;
- менее подвержен неоптимальным начальным решениям;
- позволяет анализировать перестановки одних и тех же задач в рамках одного процесса.

В контексте рассматриваемой задачи по адаптации муравьиного алгоритма были определены следующие параметры, от которых зависит качество решения:

1. Коэффициент ρ влияет на испаряемость феромона. Коэффициент принимает значения от 0 (нет испарения) до 1 (испаряется до минимального уровня).

2. Коэффициенты α и β влияют на работу алгоритма, где α – зависимость от уровня феромона, β – зависимость от «качества» дуги (вес дуги), при этом: если $\alpha > \beta$, то на выбор пути муравьем большее влияние оказывает частота использования пути; если $\alpha < \beta$, то наибольшее влияние оказывает качество следующего шага (вес дуги); если $\alpha = \beta$, существует сбалансированная зависимость между качеством пути и степенью его эксплуатации; если $\alpha = 0$, то существует эвристика, основанная только на качестве прохождения между последовательными точками (незнание уровня феромона на пути); если $\beta = 0$, то существует эвристика, основанная только на количестве феромона (это фактор посещаемости пути); если $\alpha = \beta = 0$, то решение принимается равномерно и независимо от количества феромона или качества следующего шага [10].

Таким образом, задав количество феромона (τ) и вес дуги (V) для k – ой дуги, вероятность перехода по дуге k примет вид:

$$P_k = \frac{[\tau_k]^\alpha V_k}{\sum_i [\tau_k]^\alpha V_k}$$

где i –ый шаг, $i=1,2,3,\dots,K$

Согласно [5] объектами ремонта на ГЭС могут быть: оборудование (гидротурбина, гидрогенератор, трансформатор, насос, электродвигатель, дизель, задвижка, прибор и т.п.); установки (гидротурбинная, гидрогенераторная, трансформаторная). Однако, концепция инвестиционного управления активами, в качестве ключевого объекта управления выделяет – гидроагрегат, как единицу оборудования. Введем описание множества гидроагрегатов на ГЭС:

$$G = \{G_c\}, c = \overline{1, C}$$

где G_c – с-ый гидроагрегат на ГЭС, c – количество гидроагрегатов.

Период планирования в среднем составляет 1 год, 5 или 10 лет и примет вид:

$$t \in \{1, T\}$$

где T – длительность периода планирования. Примем, что минимальный шаг планирования равен одному году.

Как отмечалось ранее, основное оборудование ГЭС может находиться в трех состояниях: на техническом обслуживании (ТО), на текущем ремонте (ТР) или на капитальном ремонте (КР); следовательно, вершина графа (K) будет характеризоваться одним из трех состояний (см. рис.1).

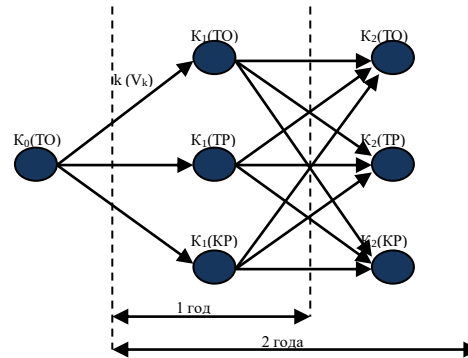


Рис. 1 Пример графа поиска решения

Fig. 1. Example of a solution search graph

Вес дуги определяется совокупным показателем гидроагрегата, характеризующий состояние оборудование при прохождении вершины $K+1$:

$$V_k = (AI_{K+1})^\beta$$

где AI_k – совокупный показатель с-ого гидроагрегата на текущем шаге.

Совокупный показатель гидроагрегата определяется произведением функциональных показателей, характеризующих разные стороны ремонтного процесса (табл. 1) с учетом веса, определенного методом экспертных оценок.

$$AI = W_{III} (RR * RPN) * W_{ЭП} (Z_r + Z_{lp})$$

где W_i – вес функционального показателя.

Таблица 1

Показатели ремонтного процесса

Функциональные показатели	Частные функциональные показатели	Единица измерения	Условное обозначение	Формула расчета
Технические показатели (ТП)	Остаточный ресурс		RR	Сумма остаточного ресурса основных узлов гидроагрегата после проведения ремонта (технического обслуживания) в вершине $K+1$
	Индекса критичности		RPN	$RPN = SOD$, где S – тяжесть последствий отказа единицы оборудования, O – вероятность отказа оборудования в течение определенного периода времени, D – вероятность, что отказ не будет обнаружен до проявления его последствий [16].
Экономические	Нормативные	Тыс. руб.	Z_r	Сумма расходов на выполнение

показатели (ЭП)	расходы на ремонт (техническое обслуживание)			ремонтных работ
	Недополученная прибыль	Тыс. руб.	Z_{lr}	Количество дней простоя оборудования по причине ремонта *Объем средств недополученных по причине недопоставки электроэнергии в день

Исходя из возможных направлений технической политики компании, для решения задачи календарного планирования могут быть использованы следующие критерии оптимизации. Первым критерием оптимизации будет минимизация экономических показателей на всем пути:

$$\mathcal{EП} = \sum_{k=1}^N \mathcal{EП}_k \rightarrow \min$$

Вторым критерием оптимизации будет достижение максимальных технических показателей гидроагрегата ГЭС:

$$\mathcal{TП} = \sum_{k=1}^N \mathcal{TП}_k \rightarrow \max$$

В классической модели, после того, как муравей успешно проходит маршрут, он оставляет на всех пройденных ребрах след, обратно пропорциональный длине пройденного пути, в нашей реализации значение феромона будет увеличиваться на заданные значения в двух случаях – если муравей выбрал состав, удовлетворяющий ограничениям (к примеру, при оптимизации по экономическим показателям – ограничения на минимально допустимый остаточный ресурс) и в случае, когда состав заменяет оптимальное решение. Это изменение внесено по причинам одинакового количества пройденных ребер всеми муравьями (по количеству модулей, каждая дуга – конкретное сочетание версий в модуле) и отсутствия показателя длины, который заменен на показатель веса. Таким образом, ограничениями являются:

- минимально допустимый остаточный ресурс в конечной вершине графа ($K+n$)

$$RR_{K+n} \geq RR_{\min};$$

- максимально допустимые суммарные затраты на проведение ремонтных работ

$$\sum_{k=1}^N \mathcal{EП}_k \leq \mathcal{EП}_{\max}.$$

В алгоритм решения также был введен подготовительный этап, который определяет начальное состояние оборудование в вершине K_0 и рассчитывается на основе индекса технического состояния [2]:

$$ИТС_G = \frac{\sum_i (P_i * ИТС_i)}{\sum_i P_i}$$

где $ИТС_i$ – индекс технического состояния i -ого функционального узла входящего в состав гидроагрегата; P_i – показатель приведения (для гидротурбины/ гидрогенераторы – активная электрическая мощность)

Функциональная модель. Для повышения эффективности процессов планирования ТОиР необходимо решить задачу их автоматизации и разработать программу, учитывающую параметры, критерии и ограничения. Ее функциональность должна обеспечивать ввод исходных данных (технических и финансовых показателей), моделирование процесса ремонтного обслуживания как одного агрегата, так и группы

агрегатов, возможность внесения изменений в исходную модель для проведения имитационных экспериментов и наличие инструментов для анализа и оценки полученных результатов экспериментов. Функциональная схема системы планирования технического обслуживания и ремонтов представлена на рис. 2.

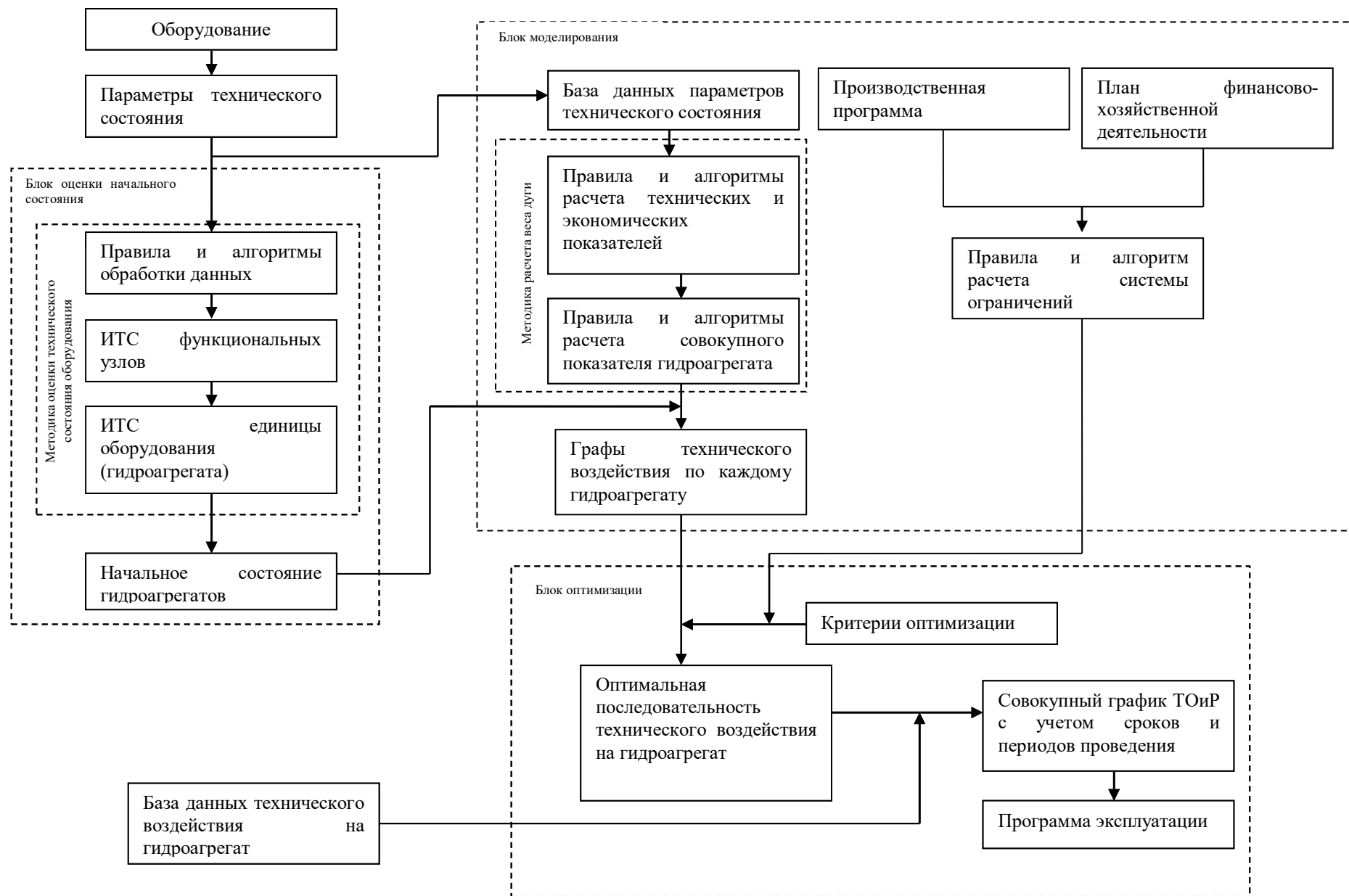


Рис. 2 Функциональная схема системы планирования технического обслуживания и ремонтов

Fig. 2. The functional scheme of maintenance planning system

Важно отметить, что первый этап оптимизации реализуется для каждого гидроагрегата в отдельности, с определением последовательности выполнения видов ремонтов по годам, на всем коридоре планирования.

Второй этап предполагает построение совокупного графика ТОиР гидроагрегатов (в среднем на ГЭС функционирует около 12 гидроагрегатов) с разбивкой по месяцам и учитывающий паводковые и пиковые периоды работы гидроагрегатов.

Параметры технического состояния оборудования, выбранные для оценки технического состояния, поступают в блок оценки технического состояния, где происходит их математическая обработка в соответствии с [2–4]. Полученные результаты в виде индекса технического состояния позволяют определить начальные точки графа для каждого гидроагрегата.

Блок моделирования включает в себя методику расчета веса звеньев графа и системы ограничений. Результатом моделирования является граф, где вершины – это состояние оборудования (вид технического воздействия на него), а звенья характеризуются совокупным показателем гидроагрегата.

В соответствии с принятой в компании технической политикой (обеспечение максимальных технических показателей оборудования или минимизации стоимости жизненного цикла оборудования) выбирается необходимый вариант, который является наиболее оптимальным с учетом всех поставленных условий и критериев. По результатам оптимизационных расчетов, в основе которых заложен муравьиный алгоритм, формируется совокупный график ТОиР, содержащий сроки и виды технических воздействий по всем гидроагрегатам на любой период планирования.

Экспериментальные исследования. Программная реализация метода была использована при планировании ремонтного цикла на период с 2021 по 2025 год для гидроагрегата станции, входящей в состав крупнейшей российской частной энергетической компании АО «ЕвроСибЭнерго».

Входными параметрами выступили следующие показатели: перечень возможных звеньев графа (возможные переходы из одного состояния объекта в другое); вес звена, который рассчитывается из таких параметров оборудования как затраты на проведение ремонтных работ, недополученная прибыль по причине простоя оборудования, индекса критичности оборудования и остаточный ресурс.

Важно отметить, что в качестве критерия была принята минимизация экономических показателей, при этом в качестве ограничением является минимально допустимый остаточный ресурс в конечной вершине графа.

Выходными данными является программа технического воздействия на пять лет, представленный в виде графика Ганта (по видам технического воздействия) (см. рис.3).

Вид технического воздействия	ПЕРИОДЫ				
	2021	2022	2023	2024	2025
Техническое обслуживание (ТО)					
Текущий ремонт (ТР)					
Капитальный ремонт (КР)					

Рис. 3. График Ганта по видам технического воздействия

Fig. 3. Gantt chart by type of technical impact

В сравнении с принятым на гидроэлектростанции плановым графиком ремонтных работ (см. рис. 4), программа технического воздействия, полученная на основе муравьиного алгоритма, обеспечила сокращение суммарных экономических показателей (затраты на

проведение ремонтных работ и недополученной прибыли по причине простоя оборудования) на 5%. Экономия по группе затрат на проведение ремонтных работ составила 1 175,8 тыс. руб. при соблюдении условия $RR_{2025} > 0.9$.

Вид технического обслуживания	ПЕРИОДЫ				
	2021	2022	2023	2024	2025
Техническое обслуживание (ТО)					
Текущий ремонт (ТР)					
Капитальный ремонт (КР)					

Рис. 4 Плановый график по видам технического воздействия

Fig. 4. Planned schedule by type of technical impact

Заключение. Муравьиный алгоритм позволяет успешно решать задачи календарного планирования, в том числе планирование программы технического обслуживания и ремонтов основного гидроэнергетического оборудования. В статье сформулирована математическая постановка задачи календарного планирования ремонтов и разработана функциональная модель процесса планирования ТОиР. Результаты, представленные в статье, могут быть использованы для разработки программного комплекса в рамках инновационного подхода управления активами гидроэнергетических компаний.

References

1. Technical policy of RusHydro Group (Annex to protocol of the Board of Directors dated 10.04.2020 (date of 09.04.2020) No. 307 (In Russ.). Available at: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/5d0/Tekhnicheskaya-politika.pdf> (accessed: 20.06.2020).
2. About complex determination of indicators of technical and economic condition of electric power facilities, including indicators of physical wear and energy efficiency of electric grid facilities, and on monitoring of such indicators: decree of the Government of the Russian Federation of December 19, 2016 no. 1401 (In Russ.). Available at: <https://russrules.ru/news/osnovnye-pravilaoformleniya-bibliog.html> (accessed: 20.07.2020).
3. Indicator of the technical condition of electric power facilities (In Russ.). Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/11201> (accessed: 25.07.2020).
4. *STO 17330282.27.140.001–2006. Gidroelektrostantsii. Metodiki otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo oborudovaniya* [Hydroelectric power Stations. Methods for evaluating the technical condition of the main equipment]. Available at: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/83a/001_STO-17330282.27.140.001-2006.pdf (accessed: 25.07.2020).
5. *STO RusHydro 02.01.62–2012 Gidroelektstantsii. Remont i tekhnicheskoe obsluzhivanie oborudovaniya, zdaniy i sooruzheniy. Organizatsiya proizvodstvennykh protsessov. Normy i trebovaniya* [Hydroelectric power Station. Repair and maintenance of equipment, buildings and structures. Organization of production processes. Standards and requirements]. Available at: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/15c/062_STORusGidro-02.01.062-2012_Remont-i-TO-daniy-i-sooruzhenij-GES.pdf (accessed: 01.08.2020).
6. *GOST 27.310–95 Nadezhnost' v tekhnike. Analiz vidov, posledstviy i kritichnosti otkazov. Osnovnye polozheniya* [Reliability in technology. Analysis of the types, consequences, and criticality of failures. Basic provisions]. Available at: http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/29/29151/index.php (accessed: 22.05.2020).

7. RF Federal “Law about safety of hydraulic structures” from 21.07.1997 № 117-FZ (the last edition) (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/ (accessed: 02.06.2020).
8. Strategy of development of the RusHydro group for the period up to 2020 with a perspective up to 2025 (In Russ.). Available at: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/206/Strategiya-RusGidro.pdf> (accessed: 16.05.2020).
9. Sekaev V. G., Matryonin P. V. [Using the ant colony method to solve calendar planning tasks]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*. 2011, P. 109–118 (In Russ.).
10. Mieczysław Drabowski, Edward Wantuch Ant Colony Optimization – Techniques and Applications. Available at: <https://www.intechopen.com/books/antcolony-optimization-techniques-and-applications/scheduling-in-manufacturing-systems-ant-colony-approach> (accessed: 27.06.2020).
11. Shtovba S. D. [Ant algorithm]. *Matematika v prilozheniyakh*. 2003, No. 4(4), P. 70–75 (In Russ.).
12. Myshenkov K. S., Romanov A. Yu. [Method for solving the problem of scheduling repairs of technological equipment of an enterprise using a genetic algorithm]. *Nauka i obrazovanie*. 2011, No. 9, P. 1–10 (In Russ.).
13. Andriyan K. E., Kursin D. A. [Analysis and planning of maintenance and repair of a complex object based on its functional state]. *Nauka i obrazovanie*. 2011, No. 8, P. 1–5 (In Russ.).
14. Artyomov I. I., Simonov A. S., Denisov N. E. [Predicting the reliability and running-in time of process equipment based on the function of the failure flow parameter] (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/prognozirovanie-nadyozhnosti-i-dlitelnosti-prirabotki-tehnologicheskogo-oborudovaniya-po-funktsii-parametra-potoka-otkazov> (accessed: 5.07.2020).
15. Rodionova V. N., YAgolkovskaya E. N. [Organization of operation and maintenance of equipment at the enterprise]. *Ekonominfo*. 2017, No. 4, P. 9–13 (In Russ.).
16. GOST R 5190.12–2007. *Menedzhment riska. Metod analiza vidov i posledstviy otkazov*. [State Standard R 5190.12-2007. Risk management. Failure modes and consequences analysis method]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 35 p.

Библиографические ссылки

1. Техническая политика Группы РусГидро (Приложение к Протоколу СД от 10.04.2020 (дата проведения 09.04.2020) № 307 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/5d0/Tekhnicheskaya-politika.pdf> (дата обращения: 20.06.2020).
2. «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей»: постановление Правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401 [Электронный ресурс]. URL: <https://russrules.ru/news/osnovnyepравила-oformleniya-bibliog.html> (дата обращения: 20.07.2020).
3. Показатель технического состояния объектов электроэнергетики (физический износ) [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/11201> (дата обращения: 25.07.2020).
4. СТО 17330282.27.140.001–2006 «Гидроэлектростанции. Методики оценки технического состояния основного оборудования» [Электронный ресурс]. URL: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/83a/001_STO-17330282.27.140.001-2006.pdf (дата обращения: 25.07.2020).
5. СТО РусГидро 02.01.62–2012 «Гидроэлектростанции. Ремонт и техническое обслуживание оборудования, зданий и сооружений. Организация производственных процессов. Нормы и требования» [Электронный ресурс]. URL:

http://www.rushydro.ru/upload/iblock/15c/062_STO-RusGidro-02.01.062-2012_Remonti-TO-danij-i-sooruzhenij-GES.pdf (дата обращения: 01.08.2020).

6. ГОСТ 27.310–95 «Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения» [Электронный ресурс]. URL: http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/29/29151/index.php (дата обращения: 22.05.2020).

7. ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997 № 117-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/ (дата обращения: 02.06.2020).

8. Стратегия развития группы РусГидро на период до 2020 г. с перспективой до 2025 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/206/Strategiya-RusGidro.pdf> (дата обращения: 16.05.2020).

9. Секаев В. Г., Матренин П. В. Использование метода колонии муравьев для решения задач календарного планирования // Сб. науч. тр. НГТУ. 2011. С 109–118.

10. Mieczysław Drabowski, Edward Wantuch Ant Colony Optimization – Techniques and Applications [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intechopen.com/books/ant-colony-optimization-techniques-and-applications/scheduling-in-manufacturing-systems-ant-colonyapproach> (дата обращения: 27.06.2020).

11. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы // Математика в приложениях. 2003. № 4(4). С. 70–75.

12. Мышенков К. С., Романов А. Ю. Метод решения задачи календарного планирования ремонтов технологического оборудования предприятия с использованием генетического алгоритма // Наука и образование. 2011. № 9. С. 1–10.

13. Андриян К. Э., Курсин Д. А. Анализ и планирование технического обслуживания и ремонта сложного объекта на основе его функционального состояния // Наука и образование. 2011. № 8. С. 1–5.

14. Артемов И. И., Симонов А. С., Денисов Н. Е. Прогнозирование надежности и длительности приработки технологического оборудования по функции параметра потока отказов [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/prognozirovanienadyozhnosti-i-dlitelnosti-prirabotki-ehnologicheskogooborudovaniya-po-funktsii-parametra-potoka-otkazov> (дата обращения: 05.07.2020).

15. Родионова В. Н., Яголковская Е. Н. Организация эксплуатации и технического обслуживания оборудования на предприятии // Экономинфо. 2017. № 4. С. 9–13.

16. ГОСТ Р 51901.12–2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. М. : Стандартинформ, 2008. 35 с.

© Лифарь А. С., 2020

Lifar' Aleksandra Stanislavovna – applicant, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alifar15@mail.ru.

Лифарь Александра Станиславовна – соискатель, Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alifar15@mail.ru.