

УДК 004:658.562

DOI 10.17513/snt.40441

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Тихонов М.Р., Акуленок М.В., Шикула О.С.

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники», Москва,
e-mail: kurotenshi91@yandex.ru*

Цель данного исследования – повышение точности оценки вероятности безотказной работы оборудования с учетом восстановительных операций посредством анализа и разработки алгоритма и способов учета восстановительных операций при расчете вероятности безотказной работы оборудования в технологическом процессе. В статье представлена разработка алгоритма учета восстановительных операций, как одного из методов обеспечения надежности, при расчете вероятности безотказной работы оборудования в технологическом процессе. Алгоритм отвечает следующим требованиям: применение вероятностного подхода; учет операций обслуживания и ремонта оборудования; учет наличия нескольких резервных экземпляров оборудования; учет различных способов использования резервного оборудования; возможность получения входных данных для алгоритма из доступных в процессе источников; программная реализуемость алгоритма; возможность встраивания в автоматизированные системы управления технологическими процессами. В основе алгоритма заложено применение множеств для видов и групп операций, а также различных коэффициентов восстановления безотказной работы оборудования: коэффициент уменьшения вероятности безотказной работы оборудования при простое, коэффициент восстановления вероятности безотказной работы оборудования при обслуживании и ремонте. Рассмотрены и проанализированы частные случаи применения разработанного алгоритма: последовательный, предполагающий использование одного экземпляра оборудования до тех пор, пока вероятность его безотказной работы выше граничного значения, и поочередный, заключающийся в переключении на другой экземпляр после каждого использования. Представленные в работе положения позволят повысить контроль в технологических процессах с применением автоматизированных систем управления и обеспечить их работоспособность на основе расчета априорных и апостериорных вероятностей безотказной работы оборудования в операциях технологического процесса.

Ключевые слова: технологический процесс, алгоритм, безотказная работа, оборудование, восстановительные операции, варианты применения, параметры оборудования

DEVELOPMENT OF A DATA PROCESSING ALGORITHM FOR ASSESSING THE PROBABILITY OF FAULT-FREE OPERATION OF EQUIPMENT TAKING INTO ACCOUNT RECOVERY OPERATIONS

Tikhonov M.R., Akulenok M.V., Shikula O.S.

*National Research University of Electronic Technology, Moscow,
e-mail: kurotenshi91@yandex.ru*

The objective of this study is to improve the accuracy of assessing the probability of equipment failure-free operation taking into account recovery operations by analyzing and developing an algorithm and methods for taking recovery operations into account when calculating the probability of equipment failure-free operation in a technological process. The article presents the development of an algorithm for accounting for recovery operations, as one of the methods for ensuring reliability, when calculating the probability of failure-free operation of equipment in the technological process. The algorithm meets the following requirements: application of a probabilistic approach; accounting for equipment maintenance and repair operations; accounting for the presence of several backup copies of equipment; accounting for various ways of using backup equipment; the ability to obtain input data for the algorithm from sources available in the process; software feasibility of the algorithm; the possibility of embedding into automated process control systems. The algorithm is based on the use of sets for types and groups of operations, as well as various coefficients of recovery of equipment failure-free operation: coefficient of reduction of probability of equipment failure-free operation during downtime, coefficient of recovery of probability of equipment failure-free operation during maintenance and repair. Particular cases of application of the developed algorithm are considered and analyzed: sequential, assuming the use of one copy of equipment until the probability of its failure-free operation is higher than the limit value, and alternate, consisting in switching to another copy after each use. The provisions presented in the work will improve control in technological processes using automated control systems and ensure their operability based on the calculation of a priori and a posteriori probabilities of equipment failure-free operation in technological process operations.

Keywords: technological process, algorithm, failure-free operation, equipment, recovery operations, application options, equipment parameters

Введение

В технологических процессах одной из важных задач управления является обеспечение его надежности и безотказности. Она связана с повышением стабильности выходов процесса, уменьшением его вариабельности, а также с обеспечением запланированных результатов. Для этого применяется множество методов, в частности следующие:

- причинно-следственный анализ [1, 2]. Анализ, предполагающий построение диаграммы взаимосвязи события и причин его возникновения;

- статистическое управление процессами. Анализ данных контрольно-измерительного оборудования и расчет возможностей процесса [3, 4];

- метод анализа сценариев [5, 6]. Предиктивный анализ, в различных интерпретациях основанный на рассмотрении возможных путей развития возникающих событий и их последствий;

- «дерево решений» [7, 8]. Метод, заключающийся в построении диаграммы последующих событий на основе принимаемых решений с оценкой вероятностей и тяжести последствий при необходимости;

- метод анализа уровней защиты [9, 10]. Парный анализ причин и последствий, а также защитных мер, предотвращающих переход первых во вторые;

- методы технического обслуживания [11, 12]. Набор организационных и обеспечительных процедур по поддержанию работоспособности и обслуживанию оборудования;

- временное резервирование [13–15]. Способ построения системы функционирования, предполагающий разграничение эксплуатации элементов системы по времени.

Основные элементы, являющиеся неотъемлемыми атрибутами технологических процессов, могут быть разделены на следующие группы, в соответствии с методом 5М:

- оборудование;
- персонал;
- методы;
- материалы.

Основной вклад в безотказность технологических процессов вносит применяемое оборудование и его характеристики. При этом важно помнить и учитывать, что оборудование является физическим объектом и может терять свою работоспособность вследствие его эксплуатации или устаревания.

Такая проблема решается путем внедрения в технологический или обеспечи-

тельный процесс операций, в ходе которых частично или полностью восстанавливается работоспособность оборудования, в зависимости от его ремонтпригодности и вероятности восстановления.

Разработка соответствующих алгоритмов, учитывающих восстановительные операции при расчете безотказности технологических процессов, является актуальной задачей. Немаловажным является их согласованность с алгоритмом расчета апостериорной вероятности безотказной работы оборудования в технологическом процессе, что позволит повысить его точность и обеспечить учет дополнительных операций [16].

Цель исследования – повышение точности оценки вероятности безотказной работы оборудования с учетом восстановительных операций посредством анализа и разработки алгоритма и способов учета восстановительных операций при расчете вероятности безотказной работы оборудования в технологическом процессе.

Материалы и методы исследования

Для практической применимости алгоритма необходимо выполнение ряда условий:

- вероятностный подход. В целях предиктивного анализа безотказности технологического процесса значения применяемых параметров должны быть вероятностными;

- учет операций обслуживания и ремонта оборудования. Разрабатываемый алгоритм должен предполагать разные виды восстановительных операций;

- учет наличия резервных единиц оборудования. Так как в технологических процессах для повышения безотказности применяются резервные экземпляры оборудования, алгоритм должен учитывать их множественность;

- учет различных способов использования резервного оборудования. В зависимости от технологического процесса и его особенностей резервирование может быть реализовано разными способами, чему не должен противоречить алгоритм;

- возможность получения входных данных для алгоритма из доступных в процессе источников. Применяемые параметры должны быть рассчитываемыми на основе известных в технологическом процессе данных;

- программная реализуемость алгоритма. Разрабатываемый алгоритм должен быть реализуем базовыми средствами языка программирования для обеспечения его настройки и масштабируемости;

- возможность встраивания в автоматизированные системы управления техноло-

гическими процессами. Алгоритм должен согласовываться с основными элементами и функциями автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Для решения поставленной задачи необходимо установить, какие восстановительные операции в технологическом процессе применяются. В соответствии с ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» они могут быть разделены на следующие:

- техническое обслуживание, как комплекс мероприятий, направленных на поддержание работоспособности. Оно подразделяется на плановое и внеплановое;

- ремонт, или совокупность операций, направленных на восстановление работоспособности. Он также подразделяется на плановый и внеплановый.

В соответствии с ГОСТ 33272-2015 «Безопасность машин и оборудования. Порядок установления и продления назначенных ресурса, срока службы и срока хранения. Основные положения» необходимыми составляющими исследования являются:

- анализ видов, последствий и критичности отказов, который позволит выявить и оценить возможные риски работоспособности оборудования;

- анализ статистических данных и результатов контрольно-измерительных операций, как количественных, так и качественных, с помощью которых возможно получение данных о работоспособности оборудования, сроках его эксплуатации и особенностях выполнения технологического процесса.

Представленные методы являются основой для выбора и обработки параметров, которые применяются для оценки вероятности безотказной работы оборудования с учетом восстановительных операций и могут быть использованы при формировании их значений.

Результаты исследования и их обсуждение

При расчете вероятности безотказной работы оборудования с учетом операций, относящихся к обслуживанию и/или ремонту, необходимыми параметрами являются:

- x_{0j} – априорная вероятность безотказной работы оборудования j . Представляет собой независимую от сторонних факторов вероятность;

- x_{ij} – апостериорная вероятность безотказной работы оборудования j в операции i . Вероятность, зависящая от применения оборудования в предыдущих операциях;

- I_j – множество операций использования оборудования j ;

- O_j – множество операций обслуживания оборудования j ;

- R_j – множество операций ремонта оборудования j ;

- $P_{min,j}$ – минимальное граничное значение вероятности безотказной работы оборудования j . Зависит от технологического процесса и устанавливает допуск оборудования по параметру вероятности его безотказной работы;

- P_i – вероятность безотказности операции i . Параметр, значение которого рассчитывается по формуле:

$$P_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - x_{ij});$$

- k_{ij} – коэффициент уменьшения вероятности безотказной работы оборудования j при простое. Зависит от оборудования и его срока амортизации;

- k_{oj} – коэффициент восстановления вероятности безотказной работы оборудования j при обслуживании. Зависит от оборудования и может быть рассчитан на основе статистики или данных производителя;

- k_{rj} – коэффициент восстановления вероятности безотказной работы оборудования j при ремонте. Зависит от оборудования и может быть рассчитан на основе статистики или данных производителя.

Значения этих параметров зависят от множества факторов. К наиболее распространенным могут относиться следующие:

- особенности технологического процесса. Количество и последовательность операций, вид деятельности и особенности применяемых процедур влияют на вероятности безотказной работы и граничные значения;

- особенности применяемого оборудования. Они влияют на коэффициенты уменьшения и восстановления вероятностей безотказной работы, а также на количество возможных экземпляров;

- ремонтпригодность и возможности обслуживания оборудования. Выражаются в представленных выше коэффициентах и в целом в изменениях вероятностей безотказной работы оборудования в восстановительных операциях;

- согласованность элементов технологического процесса. Определяет значения апостериорных вероятностей безотказной работы оборудования и влияет на коэффициенты.

На основе представленных выше параметров возможна разработка алгоритма расчета вероятности безотказной работы оборудования в операциях технологического процесса. Такой алгоритм должен содержать в себе как набор операций, так и набор оборудования.

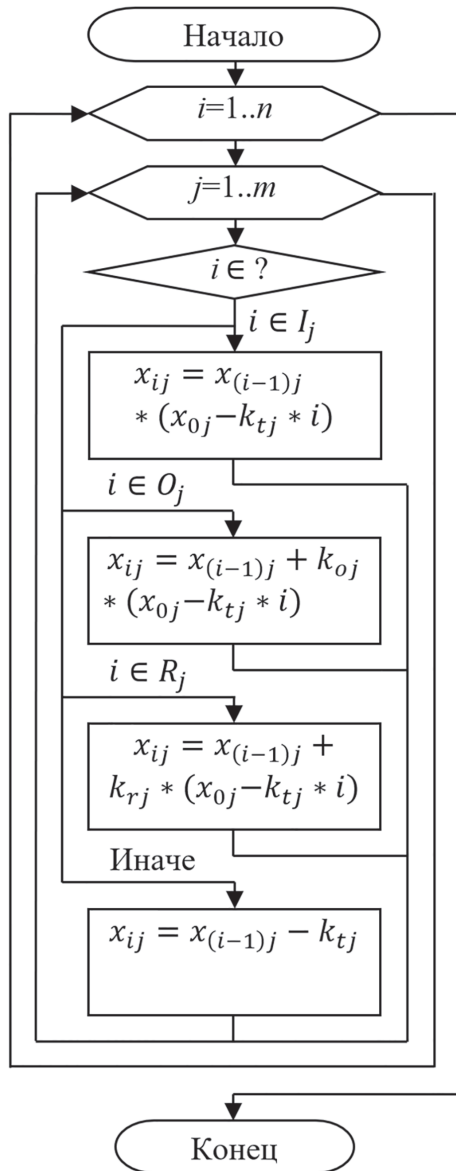


Рис. 1. Схема алгоритма обработки данных для оценки вероятности безотказной работы оборудования с учетом восстановительных операций
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Значение апостериорной вероятности безотказной работы оборудования j в операции i зависит от типа, к которому относится операция:

– множество операций использования оборудования j ($i \in I_j$):

$$x_{ij} = x_{(i-1)j} \times (x_{0j} - k_{ij} \times i);$$

– множество операций обслуживания оборудования j ($i \in O_j$):

$$x_{ij} = x_{(i-1)j} + k_{oj} \times (x_{0j} - k_{ij} \times i);$$

– множество операций ремонта оборудования j ($i \in R_j$):

$$x_{ij} = x_{(i-1)j} + k_{rj} \times (x_{0j} - k_{ij} \times i);$$

– прочие операции (в том числе их отсутствие) оборудования j ($i \notin R_j \cup I_j \cup O_j$):

$$x_{ij} = x_{(i-1)j} - k_{ij}.$$

Схема разработанного алгоритма представлена на рис. 1.

Разработанный алгоритм позволяет рассматривать и учитывать восстановительные операции в виде множеств, что, в свою очередь, ускоряет процесс обработки, добавления и масштабирования как технологического процесса, так и его информационного сопровождения. Частными случаями применения разработанного алгоритма могут являться два варианта эксплуатации оборудования в операциях технологического процесса: последовательный и поочередный.

Последовательный способ заключается в использовании одного экземпляра оборудования до тех пор, пока вероятность его безотказной работы выше граничного значения. При его достижении оборудование замещается на резервное, а с основным проводятся ремонтные работы.

Основными преимуществами данного способа являются:

– высокий уровень вероятности безотказности операции. Расчетная вероятность для операции основана на оценке безотказной работы каждого оборудования в ней и имеет высокий уровень, так как резервное оборудование находится в состоянии готовности;

– малый разброс вероятности безотказности операции. От операции к операции значения их безотказности в данном способе близки друг к другу, что позволяет повысить управляемость технологическим процессом в целом;

– готовность резервного оборудования. В связи с применением только одного экземпляра оборудования до момента достижения граничного значения вероятности его безотказной работы, остальные экземпляры оборудования имеют высокую вероятность работоспособности, позволяющую применить их в случае необходимости или отказа основного оборудования.

Основными недостатками данного способа являются:

– большое время простоя резервного оборудования. До тех пор, пока используется один экземпляр оборудования, все остальные экземпляры находятся в состоянии простоя, что уменьшает эффективность технологического процесса;

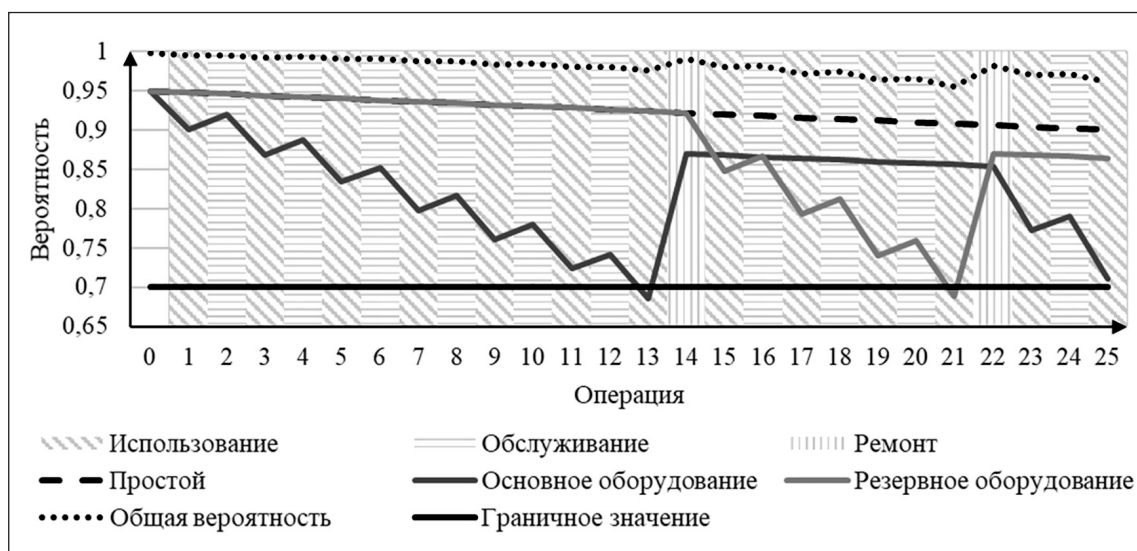


Рис. 2. Изменение вероятности безотказной работы оборудования в операциях при последовательной эксплуатации
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

– высокая нагрузка основного оборудования. Основной экземпляр оборудования используется до момента, когда вероятность его безотказной работы не достигает установленного минимального граничного значения.

При программной реализации данного способа необходимо:

– добавить условие достижения граничного значения вероятности безотказной работы оборудования после его использования;

– добавить изменение используемого оборудования на его резервные экземпляры при выполнении указанного выше условия.

Графическое представление изменения вероятности безотказной работы оборудования в операциях технологического процесса при этом способе представлено на рис. 2.

Поочередный способ эксплуатации оборудования заключается в переключении на другой экземпляр после каждого использования. При достижении граничного значения, так же как и в первом варианте, проводятся ремонтные работы.

Основными преимуществами данного способа являются:

– минимальное время простоя резервного оборудования. Чередуя использование оборудования позволяет уменьшить срок временного простоя резервных экземпляров до моментов применения основного экземпляра;

– большие сроки достижения минимального значения вероятности безотказной работы. Распределение нагрузки между

экземплярами используемого оборудования позволяет увеличить время достижения граничного значения вероятности безотказной работы.

Основными недостатками данного способа являются:

– возможна ситуация отсутствия резервного оборудования с достаточной вероятностью безотказной работы. При одинаковой исходной вероятности безотказной работы оборудования и одинаковых характеристиках поочередное применение оборудования приводит к тому, что переход граничного значения наступает у нескольких или всех экземпляров;

– большой разброс вероятности безотказности операций. В момент ремонтных работ возможно резкое увеличение значения вероятности безотказности последовательных операций в технологическом процессе, связанное с поочередным достижением граничного значения экземплярами оборудования.

При программной реализации данного способа необходимо:

– добавить условие завершения операции при применении каждого экземпляра оборудования;

– добавить изменение используемого оборудования на его резервные экземпляры при выполнении указанного выше условия.

Графическое представление изменения вероятности безотказной работы оборудования в операциях технологического процесса при этом способе представлено на рис. 3.

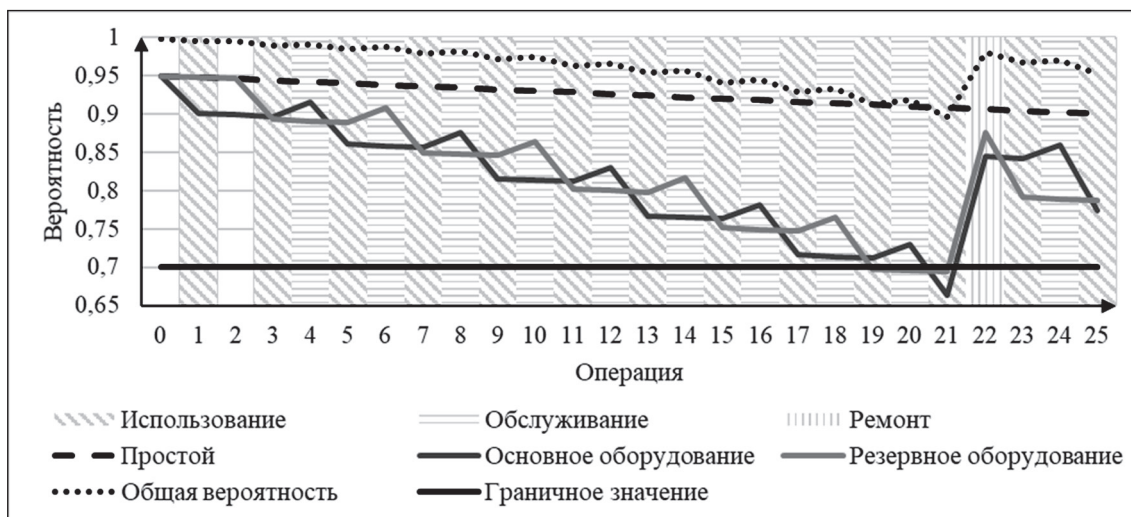


Рис. 3. Изменение вероятности безотказной работы оборудования в операциях при поочередной эксплуатации
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Возможны и другие варианты эксплуатации оборудования в операциях технологического процесса. Каждый из них будет иметь свои преимущества и недостатки, позволяющие применять их в различных ситуациях и организационных особенностях.

При достаточном количестве резервных экземпляров оборудования возможно комбинирование вариантов для достижения большей эффективности применения и резервирования.

Заключение

В рамках данного исследования были достигнуты следующие результаты:

- проанализированы методы повышения стабильности выходов технологического процесса и уменьшения его вариативности: причинно-следственный анализ, статистическое управление процессами, метод анализа сценариев, «дерево решений», метод анализа уровней защиты, методы технического обслуживания и временное резервирование;

- выбран набор параметров для расчета вероятности безотказной работы оборудования с учетом операций, относящихся к обслуживанию и/или ремонту. Основными являются: множество операций использования оборудования, множество операций обслуживания оборудования, множество операций ремонта оборудования, минимальное граничное значение вероятности безотказной работы оборудования, вероятность безотказности операции, коэффициент уменьшения вероятности безотказной

работы оборудования при простое, коэффициент восстановления вероятности безотказной работы оборудования при обслуживании и коэффициент восстановления вероятности безотказной работы оборудования при ремонте;

- проанализированы факторы, влияющие на значения выбранных параметров: особенности технологического процесса, особенности применяемого оборудования, ремонтпригодность и возможности обслуживания оборудования, согласованность элементов технологического процесса;

- сформированы возможные способы расчета значения апостериорной вероятности безотказной работы оборудования в операциях технологического процесса в зависимости от их типа: последовательный и поочередный;

- разработан алгоритм обработки данных о вероятности безотказной работы оборудования с учетом восстановительных операций;

- проанализированы частные случаи применения разработанного алгоритма, их преимущества и недостатки.

Полученные результаты могут быть применены при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами, в которых учет восстановительных операций является важной задачей. Разработанный алгоритм применим для последующей его реализации в виде программного модуля либо части программной системы расчета безотказности операции или технологического процесса в целом.

Список литературы

1. Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 13–20. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-4-13-20.
2. Hu W. Analysis of time-varying cause-effect relations based on qualitative trends and change amplitudes // Computers & Chemical Engineering. 2022. Vol. 162. P. 107813. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107813.
3. Харитонов Д.В., Грошев А.В., Анашкина А.А., Маслова Е.В. Статистическое управление процессом повышения производительности производства наукоемких керамических изделий // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 8. С. 97–102. DOI: 10.17513/snt.39273.
4. Fathiya N. Analysis of Surgical Suture Production Process Control Using Statistical Process Control (SPC) Methods // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 500. P. 03031. DOI: 10.1051/e3sconf/202450003031.
5. Емельянова В.А., Соколова Е.В. Исследование риска аварий на объекте теплоснабжения и разработка комплекса мероприятий по повышению безопасности его функционирования // Проблемы анализа риска. 2020. Т. 17. № 3. С. 44–55. DOI: 10.32686/1812-5220-2020-17-3-44-55.
6. Correa-Jullian C., Groth K.M. Data requirements for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47, Is. 6. P. 4222–4235. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.266.
7. Кузьмин О.В., Голиков В.А. Применение метода «дереве решений» в диагностике неисправности двигателя внутреннего сгорания автомобиля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 2 (70). С. 113–120. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).113-120.
8. Saleh E., Alghossoon A., Tarawneh A. Optimal allocation of material and slenderness limits for the rectangular concrete-filled columns // Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 193. P. 107283. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107283.
9. Драпак К.А., Кадыгрова Т.С., Крылов Е.Г., Капитанов А.В. Оценка уровня надежности защиты регазификационного терминала // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 3 (250). С. 54–56. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-54-56.
10. Ghasempour M., Gholamnia R., Jabbari M., Saeedi R. Reliability assessment and verification of safety instrumented systems with the application of LOPA and FTA in the isomerisation unit of the Isfahan Oil Re-refinery // International Journal of Quality Engineering and Technology. 2021. Vol. 8, Is. 2. P. 151. DOI: 10.1504/ijqet.2021.113711.
11. Григорьев М.В., Демидов В.В. Применение эффективной стратегии технического обслуживания и ремонта автомобилей как способ повышения их эксплуатационной надежности // Инженерные решения. 2020. № 6 (16). С. 9–14. DOI: 10.32743/2658-6479.2020.6.16.317.
12. Guo J., Wang L., Wang X. A Group Maintenance Method of Drone Swarm Considering System Mission Reliability // Drones. 2022. Vol. 6, Is. 10. P. 269. DOI: 10.3390/drones6100269.
13. Астраханцева И.А., Горев С.В., Астраханцев Р.Г. Фрактальный анализ в оценке эффективности и надежности сложных технических систем // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2023. № 4 (76). С. 60–68. DOI: 10.6060/snt.20237604.0008.
14. Khyzhnyak S. Recovery and reservation in the formation of ecosystem // Eureka: Life Sciences. 2023. № 3. P. 12–19. DOI: 10.21303/2504-5695.2023.002993.
15. Стальнов А.Н., Андреева О.Н., Бергер Е.Г. Аппаратные решения отказоустойчивых стратегий вычислительных систем // Нелинейный мир. 2022. Т. 20. № 4. С. 38–50. DOI: 10.18127/j20700970-202204-04.
16. Тихонов М.Р., Акуленок М.В., Шикун О.С. Разработка алгоритма расчета апостериорной вероятности безотказной работы оборудования в технологическом процессе // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 7. С. 55–59. DOI: 10.17513/snt.40085.