

УДК: 007.51

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228>

К вопросу учета опасностей при анализе надежности АСУ ТП опасных производств

П. А. Кузнецов¹, Я. А. Тынченко¹, В. В. Колесник²

¹СибГУ имени М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

²Красноярская ГРЭС-2, Зеленогорск, Россия

Аннотация. В статье обоснована необходимость комплексного подхода к анализу надежности АСУ ТП с учетом стандартов МЭК 61508/МЭК 61511. Предлагается учитывать как опасность, так и уровень важности того или иного отказа компонентов АСУ ТП. Методика учёта показателей надежности АСУ ТП отличается от рассмотренных ранее иной функцией приоритета с учетом возможных дестабилизирующих факторов, воздействующих на систему резервирования. Важно, что для достижения требуемого уровня безопасности системы следует обеспечивать достижение ею показателей, заданных уровнем Safety Integrity Level. Такими показателями является SFF и вероятность опасных отказов, в частности, таким отказом будет считаться отказ модуля, оперирующего опасными энергиями или химическими веществами. В статье рассматривается типичный пример химически опасного производства (участок процесса получения поликарбоната). Приведенные в статье результаты иллюстрируют эффективность разработанного метода и его применимость к анализу и повышению показателей надежности АСУ ТП. Рассмотрен пример химического производства, однако следует отметить, что предложенный метод может быть применен для широкого круга технологических процессов опасных производств.

Ключевые слова: опасность, анализ надежности, автоматизация, система, производство, технологический процесс.

Для цитирования: Кузнецов, П., Тынченко, Я., & Колесник, В. (2022). К вопросу учета опасностей при анализе надежности АСУ ТП опасных производств. Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management, 1(1), 0217–0228. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228>

On the issue of taking into account hazards in the analysis of the reliability of automated process control systems for hazardous industries

P. A. Kuznetsov¹, Ya. A. Tynchenko¹, V. V. Kolesnik²

¹*Reshetnev Siberian State University, Krasnoyarsk, Russia*

²*Krasnoyarskaya GRES-2, Zelenogorsk, Russia*

Abstract. The article substantiates the need for an integrated approach to the analysis of the reliability of automated process control systems, taking into account IEC 61508 / IEC 61511 standards. It is proposed to take into account both the hazard and the level of importance of a particular failure of the components of an automated process control system. The methodology for taking into account the reliability indicators of APCS differs from those considered earlier by a different priority function, taking into account possible destabilizing factors affecting the redundancy system. It is important that in order to achieve the required level of system safety, it should be ensured that it achieves the indicators set by the Safety Integrity Level. Such indicators are SFF and the probability of dangerous failures, in particular, such a failure will be considered a failure of a module operating hazardous energies or chemicals. The article considers a typical example of a chemically hazardous production (a section of the polycarbonate production process). The results presented in the article illustrate the effectiveness of the developed method and its applicability to the analysis and improvement of the APCS reliability indicators. An example of chemical production is considered; however, it should be noted that the proposed method can be applied to a wide range of technological processes in hazardous industry.

Keywords: hazard, reliability analysis, automation, system, production, technological process.

For citation: Kuznetsov P., Tynchenko Ya., & Kolesnik V. (2022). On the issue of taking into account hazards in the analysis of the reliability of automated process control systems for hazardous industries. Informatics. Economics. Management, 1(1), 0217–0228. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228>

ВВЕДЕНИЕ

Многие годы по всему миру непрерывно функционируют технически сложные и опасные производства [1-6], совершенствуются технологии, однако, всегда остается риск возникновения техногенных аварий, последствием которых являются серьезный ущерб для экологии. При этом ужесточаются и сами экологические стандарты. Безопасность и безотказность автоматизированных систем регламентируются современными стандартами МЭК 61508/МЭК 61511 [7-10]. В рамках этих стандартов безопасность систем оценивается как Safety Integrity Level (SIL) [11,12].

Таким образом, возникает необходимость повышения надёжности автоматизированных систем управления, с целью повышения надёжности функционирования технологических процессов.

Примером, технологических процессов, к которым предъявляются повышенные требования надёжности, являются процессы химических производств. В таких

технологических процессах зачастую используются опасные химические вещества, которые вследствие отказа оборудования могут оказать вредное воздействие на персонал и инфраструктуру [13-15].

При расчёте надежности следует учитывать исправность средств, регулирующих и контролирующих параметры эксплуатации. Средства автоматизации функционально связаны с оборудованием, осуществляющим технологический процесс.

Контроль надежности технического состояния опасных производственных систем является неотъемлемой частью процесса их проектирования и разработки, причем анализ характеристик надежности выполняется на различных этапах разработки. Существующие на текущий момент решения [16, 17] не имеют возможности сделать это комплексно с учетом стандартов МЭК 61508/МЭК 61511.

Авторами предлагается осуществлять анализ надежности АСУ ТП комплексно, учитывая как опасность, так и уровень важности того или иного отказа. Рост значения надежности формируемой структуры системы характеризуется целевыми критериями, которые устанавливает разработчик, исходя из различных принципов обеспечения безопасности и безотказности.

В данной работе рассматриваемой системой управления будет АСУ участка процесса получения поликарбоната, описание которой представлено в [18].

На рисунке 1 представлена схема технологического процесса. Технологически участок описывается следующим образом.

Таким образом, рассматриваемый пример является типичным примером химически опасного производства, так как включает все минимально необходимые компоненты, характерные для данного технологического процесса, а именно, водный раствор дифенолята натрия, метиленхлорид и фосген.

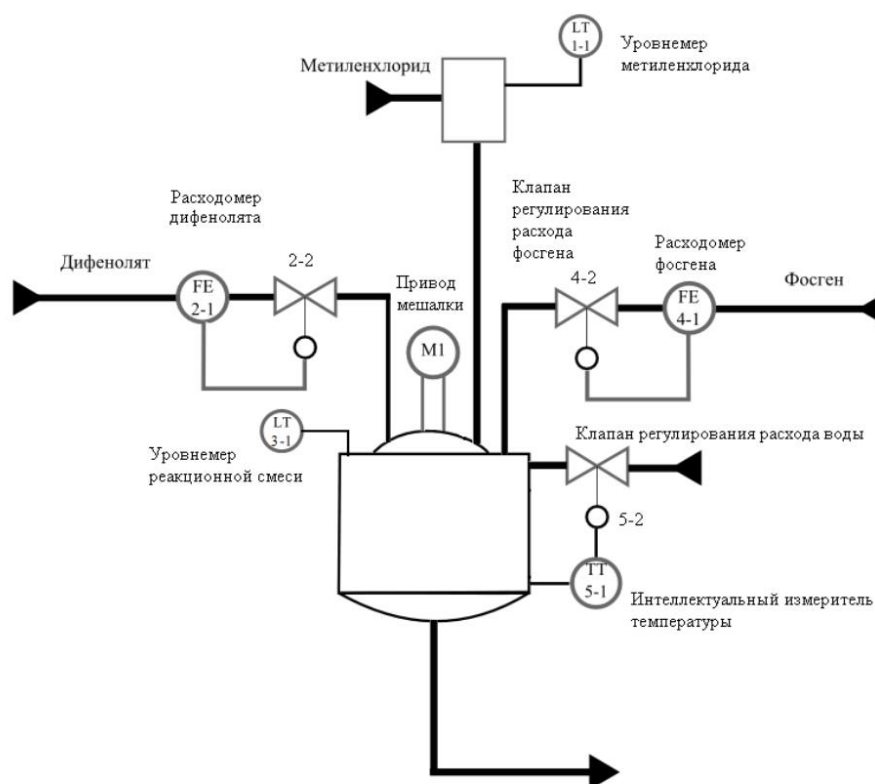


Рисунок 1. Структурная схема участка АСУ ТП опасного производства.

Figure 1. Structural diagram of the APCS section of hazardous production.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для решения задачи повышения надежности существуют различные структурные методы. Основываются они на введении резервных элементов. Такими методами могут быть метод полного дублирования, метод оптимизированного резервирования и предлагаемый метод учёта показателей надежности [16,19].

Метод полного дублирования предполагает включение резервного элемента в каждый функциональный модуль. Он является наименее трудоёмким с точки зрения затрат на проектирование, но одновременно малоэффективным с точки зрения показателей надежности, так как он не учитывает показатели модулей.

Метод оптимизированного резервирования предполагает решение задачи оптимизации показателей надежности проектируемой АСУ ТП с учётом общей надежности системы. Задача оптимизации резервирования решается, например, при помощи метода наискорейшего спуска [11]. При этом на построение резервированной системы отводится определенный набор ресурсов. Следует учесть, что с ростом сложности контролируемых систем, усложняется и анализ надежности компонентов,

составляющих резервированную систему. Известно, что при последовательном соединении элементов системы наибольшее приращение суммарной безотказности обеспечивает резервирование самого ненадежного модуля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как приращение суммарной безотказности обеспечивает резервирование самого ненадежного модуля, то при итерационном процессе, включающем добавление резервного элемента в модуль с наименьшей вероятностью безотказной работы, процедуру на данной итерации будет называться функцией выбора направления или функцией приоритета.

Предлагаемый метод учёта показателей надежности в первую очередь будет отличаться от рассмотренных ранее иной функцией приоритета.

Во-первых, рассматриваемую АСУ ТП следует разделить на подсистемы, выполняющие различные функции и выделить среди них главные функции, чтобы в дальнейшем обеспечить больший приоритет резервирования модулям, выполняющим их.

Для обеспечения безопасности системы следует обеспечивать достижение ею показателей, обеспечивающих заданный SIL. Такими показателями является Safe Failure Fraction (SFF) и вероятность опасных отказов. Таким отказом будет считаться отказ модуля, оперирующего опасными энергиями или химическими веществами.

Исходя из требований целевой вероятности безотказной работы главной функции АСУ ТП, предлагается для каждого функционального модуля, определив его тип, назначить блокирующий отказы модуль соответствующего типа.

Модуль, блокирующий отказ, имеет определенный набор характеристик надежности, включая расход ресурсов на реализацию. В работе [5] аналитически определена зависимость, согласно которой снижается вероятность отказа при использовании блокирующих модулей. Там же представлен анализ возможных дестабилизирующих факторов, действующих на систему резервирования.

С учетом вероятности отказа блокирующего модуля определим безотказность модуля АСУ ТП в следующем виде

$$P = (1 - (1 - P_2) \times (1 - P_b)) \times P_c,$$

где P — вероятность безотказной работы модуля после блокирования; P_2 — вероятность безотказной работы без блокирования; P_b — вероятность блокирования; P_c — вероятность безотказной работы блокирующего модуля.

Функция приоритета для оценки надежности системы с учётом показателей надежности блокируемых модулей при возможных дестабилизирующих факторах будет иметь вид

$$PR_{ti} = (C_{pr} \cdot C_i) / (P_{mi}),$$

где i — индекс модуля, для которого определяется приоритет; C_i — коэффициент приоритета, зависящий от важности и опасности отказа модуля; P_{mi} — вероятность отказа модуля; C_{pr} — коэффициент приоритета, зависящий от опасности отказа элемента модуля.

Таким образом, предложенная методика учёта показателей надежности при резервировании позволяет итерационно формировать структуру АСУ ТП с высокой безотказностью. Методика позволяет учитывать требования стандартов МЭК 61508/МЭК 61511 к безопасности и на основе влияния механизмов блокирования снижать опасности и вероятности отказа.

Реализации предложенной методики осуществлена в рамках анализа надежности технологического процесса, представленного выше. Причем применение авторского метода учёта показателей надежности даёт лучшие результаты по сравнению с классическим подходом. В рамках пошаговой схемы реализации методики для рассмотренной АСУ ТП использовалась целевая вероятность $P = 0,99$ и срок службы $t = 5$ лет. Исходя из срока службы получены вероятности безотказной работы каждого модуля, которые в дальнейшем являются исходными данными для расчёта методики.

Далее выберем SIL для системы, равный 3. SFF для данного уровня будет равен 0,9, а вероятность опасного отказа 0,989. В этом случае для модулей с опасными отказами имеем: клапан регулирования расхода дифенолята - вероятность безотказной работы 0,99; клапан регулирования расхода фосгена – 0,999.

Итеративно вычисляя функцию приоритета и добавляя в структуру системы резервные элементы, строится структура надежности АСУ ТП, представляемая традиционно в виде дерева отказов. Расшифровка узлов дерева отказов представлена в [20]. События $F1-F4$ описывают отказы основного и резервного расходомера и основного и резервного клапана дифенолята; $F5-F8$ - отказы контроллера и шины сбора данных (основных и резервных); $F9-F11$ - отказы расходомера и клапана фосгена

(основного и резервного); $F_{12}-F_{15}$ - отказы термопреобразователя и клапана теплоносителя; $F_{16}-F_{19}$ – отказы привода (основного и резервного) и уровнемера метилхлорида (основного и резервного); F_{20} - отказ уровнемера реакционной смеси, соответственно (см. рисунок 1).

В виде логического выражения структура АСУ ТП будет выражаться следующим образом:

$$T1 = (F_{1\wedge} F_2) \vee (F_{3\wedge} F_4) \vee (F_{5\wedge} F_6) \vee (F_{7\wedge} F_8) \vee F_9 \vee (F_{10\wedge} F_{11}) \vee (F_{12\wedge} F_{13}) \vee (F_{14\wedge} F_{15}) \vee (F_{16\wedge} F_{17}) \vee (F_{18\wedge} F_{19}) \vee F_{20}$$

$$T2 = (F_{1\wedge} F_2) \vee (F_{3\wedge} F_4) \vee (F_{5\wedge} F_6) \vee (F_{7\wedge} F_8) \vee F_9 \vee (F_{10\wedge} F_{11}) \vee (F_{12\wedge} F_{13}) \vee (F_{14\wedge} F_{15}) \vee (F_{16\wedge} F_{17})$$

Здесь T_1 - отказ всей АСУ ТП; T_2 - отказ функции регулирования АСУ ТП.

Модули с опасными отказами — клапаны, регулирующие расход фосгена и дифенолята, будут иметь вероятность безотказной работы, достаточную для достижения требуемого уровня SIL. Также общая их вероятность безотказной работы будет обеспечивать требуемый Safe Failure Fraction.

Сравнение работы метода полного дублирования, оптимизированного резервирования с применением наискорейшего спуска и метода учёта показателей надёжности даёт следующие результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение результатов работы методов.

Table 1. Comparison of the results of the methods.

Вероятность исправности	Метод полного дублирования	Метод оптимизированного резервирования	Метод учета показателей надежности
АСУ ТП опасного производства	0,87	0,91	0,94
Функции регулирования АСУ ТП	0,89	0,916	0,96

Представленные результаты подтверждают, что предложенный метод учёта показателей надёжности позволяет повысить безотказность и безопасность АСУ ТП за счёт снижения вероятности опасных отказов и достичь системе требуемого SIL.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый в статье метод базируется на учете показателей надежности, специфических для АСУ ТП. Он позволяет обеспечить не только высокую безотказность, но и требуемый стандартом МЭК уровень безотказности, что является особенно критичным для опасных производств.

Приведенные в статье результаты иллюстрируют эффективность разработанного метода и его применимость к анализу и повышению показателей надежности АСУ ТП. В статье рассмотрен пример химического производства, однако, предложенный метод применим для широкого круга технологических процессов опасных производств.

Преимуществом метода является то, что он включает в себя не только применение принципов резервирования, но и других структурных принципов. Метод позволяет использовать не только математические расчёты, но и экспертные знания, накапливая и обрабатывая их в перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хисаева Л.И. Промышленная безопасность (опасные производственные объекты). Евразийский Союз Ученых. 2016; 29-2: 42-44.
- [2] Боркин В.С. Особенности системного анализа и моделирования потенциально опасных операций технологических процессов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014; 1: 370-374.
- [3] Майструк А.В. Управление безопасностью эксплуатации сложных технических систем: математические методы и практика их применения. М.: ВА РВСН им. Петра Великого; 2007. 256 с.
- [4] Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S. The efficiency analysis of automated lines of companies based on DEA method. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. 2014; 675: 107-115.
- [5] Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S., Bahmareva K., Denisova E. The efficiency analysis of the automated plants. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015; 70: 012007.
- [6] Kovalev I.V., Zelenkov P.V., Tsarev M.Y. The control of developing a structure of a catastrophe-resistant system of information processing and control. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015; 70: 012008.
- [7] Bell R. IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmed electronic

- safety-related systems: Overview. Computing and Control Engineering. 1999; 11(1): 5/1-5/5.
- [8] Gall H. "Functional safety IEC 61508 /IEC 61511 the impact to certification and the user. "Proceedings of the 2008 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, ser. AICCSA '08. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. 2008; 1027-1031. doi:10.1109/AICCSA.2008.4493673
- [9] Белозеров В.В., Белозеров В.В. Автоматизация создания АСУТП опасных производственных объектов. Электроника и электротехника. 2017; 2: 27-42.
- [10] Шакуров С.А., Мендыбаев С.А. Надежность - как важнейшее качество при проектировании АСУТП. Наука и техника Казахстана. 2015; 1-2: 130-134.
- [11] Lee Y., Kim J., Il. M. A verification of fault tree for safety integrity level evaluation. ICCAS-SICE 2009 - ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Proceedings. 2009.
- [12] Rástočný K., Ždánky J. Influence of redundancy on safety integrity of SRCS with safety PLC. 2014. doi:10.1109/ELEKTRO.2014.6848947:508-512
- [13] Слепова А.Ш. Факторы надежности и эффективности автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами. Наука и современность. 2013; 21: 145-150.
- [14] Bozek A., Anhalt J., Chin J. The use of infrared emission detection and fugitive emission quantification technologies as a basis for hazardous area classification design. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015; 51: 142-147. doi:10.1109/TIA.2014.2348075
- [15] Ilonen J., Kamarainen J.-K., Kalviainen H., Anttalainen O. Automatic detection and recognition of hazardous chemical agents. Digital Signal Processing. 2002 14th International Conference. 2002; 2: 1345-1348.
- [16] Kohlik M., Borecky J., Kubatova H. Miscellaneous Types of Partial Duplication Modifications for Availability Improvements. Proceedings - 15th Euromicro Conference on Digital System Design. 2012; 79-83. doi:10.1109/DSD.2012.86
- [17] Пищик Б.Н. Безопасность АСУ ТП. Вычислительные технологии. 2013; 18: 170-175.
- [18] Лазарева Л.Г., Богословская Н.М. Анализ стадии синтеза производственного процесса получения поликарбоната. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2015; 1: 169-171.
- [19] Будникова И.К., Приймак Е.В. Моделирование показателей качества технологического процесса с применением программы Statistica. Вестник Казанского технологического университета. 2012; 15(15): 247-249.

[20] Кузнецов П.А. Опасные отказы в АСУ ТП. Научные исследования и разработки молодых ученых. 2015; 4: 97-100.

REFERENCES

- [1] Hisaeva L.I. Promyshlennaya bezopasnost' (opasnye proizvodstvennyye ob"ekty). Evrazijskij Soyuz Uchenyh. 2016; 29-2: 42-44.
- [2] Borkin V.S. Osobennosti sistemnogo analiza i modelirovaniya potencial'no opasnyh operacij tekhnologicheskikh processov. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2014; 1: 370-374.
- [3] Majstruk A.B. Upravlenie bezopasnost'yu ekspluatacii slozhnyh tekhnicheskikh sistem: matematicheskie metody i praktika ih primeneniya. M.: VA RVSN im. Petra Velikogo; 2007. 256 s.
- [4] Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S. The efficiency analysis of automated lines of companies based on DEA method. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. 2014; 675: 107-115.
- [5] Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S., Bahmareva K., Denisova E. The efficiency analysis of the automated plants. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015; 70: 012007.
- [6] Kovalev I.V., Zelenkov P.V., Tsarev M.Y. The control of developing a structure of a catastrophe-resistant system of information processing and control. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015; 70: 012008.
- [7] Bell R. IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmed electronic safety-related systems: Overview. Computing and Control Engineering. 1999; 11(1): 5/1-5/5.
- [8] Gall H. "Functional safety IEC 61508 /IEC 61511 the impact to certification and the user. "Proceedings of the 2008 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, ser. AICCSA '08. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. 2008; 1027-1031. doi:10.1109/AICCSA.2008.4493673
- [9] Belozarov V.V., Belozarov V.V. Avtomatizaciya sozdaniya ASUTP opasnyh proizvodstvennyh ob"ektov. Elektronika i elektrotehnika. 2017; 2: 27-42.
- [10] Shakurov S.A., Mendybaev S.A. Nadezhnost' - kak vazhnejshee kachestvo pri proektirovanii ASUTP. Nauka i tekhnika Kazahstana. 2015; 1-2: 130-134.
- [11] Lee Y., Kim J., Il. M. A verification of fault tree for safety integrity level evaluation. ICCAS-SICE 2009 - ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Proceedings. 2009.
- [12] Rástočný K., Ždánsky J. Influence of redundancy on safety integrity of SRCS with safety

PLC. 2014. doi:10.1109/ELEKTRO.2014.6848947:508-512

[13] Slepova A.Sh. Faktory nadezhnosti i effektivnosti avtomatizirovannyh sistem upravleniya tekhnologicheskimi processami i proizvodstvami. Nauka i sovremennost'. 2013; 21: 145-150.

[14] Bozek A., Anhalt J., Chin J. The use of infrared emission detection and fugitive emission quantification technologies as a basis for hazardous area classification design. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015; 51: 142-147. doi:10.1109/TIA.2014.2348075

[15] Ilonen J., Kamarainen J.-K., Kalviainen H., Anttalainen O. Automatic detection and recognition of hazardous chemical agents. Digital Signal Processing. 2002 14th International Conference. 2002; 2: 1345-1348.

[16] Kohlik M., Borecky J., Kubatova H. Miscellaneous Types of Partial Duplication Modifications for Availability Improvements. Proceedings - 15th Euromicro Conference on Digital System Design. 2012; 79-83. doi:10.1109/DSD.2012.86

[17] Pishchik B.N. Bezopasnost' ASU TP. Vychislitel'nye tekhnologii. 2013; 18: 170-175.

[18] Lazareva L.G., Bogoslovskaya N.M. Analiz stadii sinteza proizvodstvennogo processa polucheniya polikarbonata. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova. 2015; 1: 169-171.

[19] Budnikova I.K., Prijmak E.V. Modelirovanie pokazatelej kachestva tekhnologicheskogo processa s primeneniem programmy Statistica. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2012; 15(15): 247-249.

[20] Kuznecov P.A. Opasnye otkazy v ASU TP. Nauchnye issledovaniya i razrabotki molodyh uchenyh. 2015; 4: 97-100.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кузнецов Петр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов СибГУ имени М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: forubox@yandex.ru

Kuznetsov P.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Reshetnev Siberian State University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: forubox@yandex.ru

Тынченко Ядвига Александровна, аспирант кафедры системного анализа и исследования операций СибГУ имени М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
e-mail: t080801@yandex.ru

Tynchenko Ya.A., graduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: t080801@yandex.ru

Колесник Валерий Васильевич,
заместитель начальника цеха, Филиал АО
«Енисейская ТГК (ТГК-13)» -
«Красноярская ГРЭС-2», Зеленогорск,
Россия
e-mail: balans78@inbox.ru

Kolesnik V.V., Deputy Head of Workshop,
Branch of JSC "Yenisei TGC (TGC-13)" -
"Krasnoyarskaya GRES-2", Zelenogorsk,
Russia
e-mail: balans78@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 19.08.2022; принята к публикации 23.08.2022.

The article was submitted 15.07.2022; approved after reviewing 19.08.2022; accepted for publication 23.08.2022.