

34.13330.2012. Introd. 01.07.2013. Approved by the Order of the Ministry of regional development of the Russian Federation, No. 266 dated 30.06.2012].

10. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 32-01-95: SP 119.13330.2017. Utv. Prikazom Minstroya Rossii No. 1648/pr ot 12.12.2017 [Railways of a 1520-mm gauge. Updated version of SNiP 32-01-95: SP 119.13330.2017. Approved by the Order of the Ministry of Construction of Russia No. 1648/pr dated 12.12.2017], 41 p.

11. Peresecheniya zheleznodorozhnykh liniy s liniyami transporta i inzhenernymi setyami: SP 227.1326000.2014. Vved. 12.01.2014. Utv. Prikazom Mintransa Rossii No. 333 ot 02.12.2014 [Intersections of railway lines with transport lines and engineering networks: SP 227.1326000.2014. Introd. 12.01.2014. Approved by the Order of the Ministry of Transport of Russia No. 333 dated 02.12.2014].

12. Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta. Obshhie trebovaniya: SP 237.1326000. 2015. Vved. 01.07.2015. Utv. Prikazom Mintransa Rossii No. 208 ot 06.07.2015 [Rail transport infrastructure. General requirements: SP 237.1326000.2015. Introd. 01.07.2015. Approved by the Order of the Ministry of Transport of Russia No. 208 dated 06.07.2015], 58 p.

13. Zheleznodorozhnyi put': SP 238.1326000.2015. Vved. 06.07.2015. Utv. Prikazom Mintransa Rossii No. 209 ot 06.07.2015 [Railway track: SP 238.1326000.2015. Introd. 06.07.2015. Approved by the Order of the Ministry of Transport of Russia No. 209 dated 06.07.2015].

14. Krylov Y.S. Metodika tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya vybora tipa peresechenii avtomobil'nykh dorog s zheleznyimi dorogami [Methodology of technical and economic justification of the choice of the type of cross-sections of highways with Railways]. Moscow: Soyuzdornii Publ., 1989, 46 p.

15. Metodicheskie rekomendatsii po tekhniko-ekonomicheskomu sravneniyu variantov dorozhnykh odezhd: ODM 218.2.028-2012. Prinyat i vveden v deistvie Rasporyazheniem Federal'nogo dorozhnogo agentstva Ministerstva transporta Rossijskoi Federatsii No. 791-r ot 06.06. 2013 [Guidelines for technical and economic comparison of roadway paving options: ODM 218.2.028-2012. Adopted and put into effect by the Order of the Federal Road Agency of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 791-r dated 06.06. 2013], 53 p.

16. Otrasleyve edinichnye rastsenki na stroitel'nye i spetsial'nye stroitel'nye raboty: OERZh 81-02-28-2001 Chast' 28. Zheleznye dorogi. Kniga 2 [Industry unit prices for construction and special construction works: OER 81-02-28-2001 Part 28. Railways. Book 2]. Moscow, 2011, 220 p.

17. Ukpupennyye normativy tseny stroitel'stva. Sbornik No. 08. Avtomobil'nye dorogi: NDS 81-02-08-2017. Utv. Prikazom Minstroya Rossii No. 948/pr ot 03.07.2017 [Enlarged construction price standards. Collection No. 08. Roads: VAT 81-02-08-2017. Approved by the Order of the Ministry of Construction of Russia No. 948/pr dated 03.07.2017].

Информация об авторах

Холодов Петр Николаевич - к. т. н., доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: petruha_yu@mail.ru

Подвербный Вячеслав Анатольевич - д. т. н., профессор кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: vpodverbnyi@mail.ru

Филатов Евгений Валерьевич - к. т. н., декан факультета строительства железных дорог, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: filatov_ev@irgups.ru

Information about the authors

Pyotr N. Kholodov – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Construction of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: petruha_yu@mail.ru

Vyacheslav A. Podverbnyi – Doctor in Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Construction of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vpodverbnyi@mail.ru

Evgenii V. Filatov – Ph.D. in Engineering Science, Dean of the Department of Railway Construction, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: filatov_ev@irgups.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).83-92

УДК 621.331:625.1

Экономическая целесообразность системы многоканального мониторинга силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций

Е. Ю. Пузина^{1,2}, А. Г. Туйгунова³, И. А. Худонов¹ ✉

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

³ Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ hudonogovi@mail.ru

Резюме

Система мониторинга служит для непрерывного контроля всех ключевых параметров трансформатора, диагностики его состояния, формирования заключений о состоянии и прогнозов его работы. Система мониторинга должна быть удобной в использовании, работать как автоматическое и интерактивное средство, обеспечивающее выявление

ние дефектов трансформаторов на ранней стадии. Оценка фактического состояния изоляционной системы трансформатора является важнейшей и актуальной проблемой. Фактическое состояние изоляции энергетического оборудования в процессе эксплуатации практически очень значимо, особенно при организации технического обслуживания и ремонта на этапе перехода на обслуживание по фактическому техническому состоянию от классического плано-предупредительного. В системах мониторинга появляется все больше инструментов, что связано с изменившимися условиями эксплуатации оборудования, повышенными требованиями к работоспособности, переходом на новые формы финансовой и хозяйственной деятельности предприятий, а также с внедрением новой техники и технологий, диагностического и специального оборудования, широким использованием систем информации и вычислительной техники современных комплексов автоматизации и телемеханизации, повышенными требованиями экологической и трудовой безопасности эксплуатации объектов. Для реализации задач повышения надежности и экономичности работы оборудования в этих условиях выбрана новая стратегия технического обслуживания и ремонта оборудования на основе оценки его фактического технического состояния с сохранением основных положений системы плано-предупредительного обслуживания и ремонта по отказу.

Ключевые слова

силовой трансформатор, система мониторинга, изоляционная система трансформатора, фактическое техническое состояние, плано-предупредительный ремонт, срок окупаемости

Для цитирования

Пузина Е. Ю. Экономическая целесообразность системы многоканального мониторинга силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций / Е. Ю. Пузина, А. Г. Туйгунова, И. А. Худоногов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 83–92. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).83-92

Информация о статье

поступила в редакцию: 04.03.2020, поступила после рецензирования: 15.03.2020, принята к публикации: 27.03.2020

The economic feasibility of a multichannel monitoring of oil-filled power transformers of traction substations

E. Yu. Puzina^{1,2}, A. G. Tuigunova³, I. A. Khudonogov¹✉

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

³ Krasnoyarsk State Transport Institute, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉ khudonogovi@mail.ru

Abstract

The monitoring system is used for continuous monitoring of all key parameters of the transformer, diagnostics of its condition, forming conclusions about the state and forecasts of its operation. When used, it should provide convenience in operation, work as an automatic and interactive tool that provides detection of transformer defects at an early stage. Assessment of the actual state of its insulation system is a major and urgent problem. The problem of assessing the actual state of insulation of power equipment during operation is quite significant, especially when organizing maintenance and repair at the stage of transition to service according to the actual technical condition from the classic planned preventive one. More and more tools appear in monitoring systems due to the changed operating conditions of equipment, increased requirements for operability, the transition to new forms of financial and economic activity of enterprises, the introduction of new equipment and technologies, diagnostic and special equipment, the widespread use of information systems and computer technology of modern automation and SCADA systems, increased requirements for environmental and labor operational safety of objects. To implement the tasks of increasing the reliability and efficiency of equipment operation in these conditions, a new strategy for maintenance and repair of equipment was chosen based on an assessment of its actual technical condition, while maintaining the main provisions of the system of planned preventive maintenance and repair for failure.

Keywords

power transformer, monitoring system, transformer insulation system, actual technical condition, planned preventive maintenance, payback period

For citation

Puzina E. Yu., Tuigunova A. G., Khudonogov I. A. Ekonomicheskaya tselesoobraznost' sistemy mnogokanal'nogo monitoringa silovykh maslonapolnennykh transformatorov tyagovykh podstantsiy [The economic feasibility of a multichannel monitoring of oil-filled power transformers of traction substations]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 66, No. 2, pp. 83–92. 10.26731/1813-9108.2020.2(66).83-92

Article info

Received: 04.03.2020, Revised: 15.03.2020, Accepted: 27.03.2020

Введение

Энергетическая стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» на перспективу до 2030 года гласит, что приоритетными задачами на железнодорожном транспорте являются повышение энергоэффективности, внедрение ресурсосберегающих технологий, снижение затрат на период жизненного цикла техники. Модернизация и реконструкция системы тягового электроснабжения являются долгосрочной программой развития и требуют значительных инвестиций. Вследствие существующего минимального финансирования темпы обновления силовых трансформаторов существенно уступают темпам их старения, при этом доля силовых трансформаторов тяговых подстанций (СМТ ТП) на сети железных дорог России, находящихся в эксплуатации сверх нормативного срока службы, составляет существенную часть, поэтому мероприятия, направленные на продление срока эксплуатации силовых трансформаторов подстанций системы тягового электроснабжения железной дороги переменного тока 25 кВ, являются приоритетными и актуальными. Диагностирование технического состояния силового электрооборудования может быть разовым и многократным. При разовом диагностировании довольно сложно обнаружить дефект или неисправности, вероятность объективной оценки технического состояния узлов силового трансформатора повышается только при многократном диагностировании с определенной периодичностью и применением многоуровневых систем мониторинга. Наиболее важным и подверженным разрушению элементом масляного трансформатора является изоляция. Для оценки ее состояния определяют режимы нагрузки трансформатора, контролируют температуру наиболее нагретой точки, влагосодержание в бумажной изоляции, определяют тангенс угла диэлектрических потерь. Дополнительные функции систем мониторинга – измерение коэффициента нагрузки, управление системами охлаждения и др.

Необходимость применения на тяговых подстанциях систем многоканального мониторинга

Осуществление грузоперевозок на электрифицированных железных дорогах поездами повышенной массы с необходимой скоростью требует от устройств системы тягового электроснабжения надежности и безаварийности работы, а также обеспечения необходимой мощности силовых маслянонаполненных трансформаторов тяговых подстанций (СМТ ТП) [1]. Эта задача может быть решена при правильно выбранных параметрах системы электроснабжения [2].

Известно также, что недопустимое для конкретного элемента той же тяговой подстанции значение тока нагрузки может вызвать его отказ. Так, установлено, что существует зависимость количества отказов измерительных трансформаторов тока и напряжения от расхода электроэнергии [3]. Поэтому можно утверждать, что это влияет на надежность их работы [4].

Повреждения СМТ ТП могут вызвать тяжелые последствия, вплоть до выхода их из строя. В свою очередь это может привести к необходимости вывода в ремонт одного из тяговых трансформаторов, следовательно, вся нагрузка придется на оставшийся в работе трансформатор, который будет при пропуске поездов повышенной массы работать в режиме серьезной перегрузки, что вызовет повышенный износ изоляции обмоток данного трансформатора.

Для нагрузки СМТ ТП в целом характерна существенная неравномерность в течение суток, месяца и года [5, 6]. Так, в режиме после «технологического окна» нагрузка при наличии поездов повышенной массы может достигать трехкратного значения в сравнении со среднесуточным значением. Также тяговая обмотка СМТ ТП в связи с частыми короткими замыканиями, особенно в контактной сети станций, испытывает сильное термическое и динамическое воздействие токов короткого замыкания [7]. Перечисленные факты усиливают износ изоляции обмоток силового трансформатора [8].

Не стоит забывать и о том, что при осуществлении грузоперевозок поездами повышенной массы увеличивается однофазная тяговая нагрузка, что усиливает ее влияние на работу устройств автоблокировки [9]. Проведенные исследования указывают на то, что увеличение объемов перевозимых грузов, пропуск двоярных поездов приводит к повышению требований по показателям качества электроэнергии в электрических сетях питания линий СЦБ [10]. Эта проблема особенно остро проявляется при пропуске поездов повышенной массы с высокой скоростью [11].

Кроме того, увеличение нагрузок приводит к необходимости изменения установок релейных защит, типы которых на многих тяговых подстанциях устарели, и требуется их замена на современные микропроцессорные защиты. Так, проведенные авторами исследования позволяют сделать вывод о насущной необходимости модернизации систем защиты и автоматики с целью их замены [12]. При этом необходима разработка комплексов релейной защиты и автоматики с гибкой функциональной структурой [13].

Вместе с тем в настоящее время актуальным считается вопрос о продлении срока службы электрооборудования, в том числе и СМТ ТП, так как в ближайшие годы провести полную замену всех трансформаторов, отработавших срок службы, возможности нет [14]. В настоящее время эта задача решается в основном за счет применения диагностических средств для своевременного обнаружения развивающихся дефектов в трансформаторах [15, 16]. Поскольку диагностика проводится с установленной периодичностью, то остро стоит вопрос оснащения СМТ ТП системами мониторинга их состояния, позволяющих контролировать основные параметры силового трансформатора в режиме реального времени. Системы непрерывного компью-

терного контроля позволяют предотвратить неминуемый отказ оборудования и определить остаточный ресурс силового трансформатора [17–20].

Режим длительной перегрузки ведет к сокращению срока службы СМТ ТП, поэтому крайне желательно с учетом возможных перегрузок, их длительности, воздействия токов короткого замыкания своевременно определять их остаточный ресурс.

Такую возможность предоставляют системы многоканального мониторинга СМТ ТП, способные фиксировать в режиме реального времени нагрузку трансформатора, все необходимые иные его параметры. На их базе в программно-техническом комплексе данной системы выполняется оценка остаточного ресурса трансформатора.

В связи с тем, что на тяговых подстанциях российских железных дорог значительное количество СМТ ТП имеют срок эксплуатации, существенно превышающий нормативный, актуальной задачей является оценка целесообразности внедрения на таких трансформаторах систем многоканального мониторинга [21, 22].

Оценка экономической целесообразности внедрения системы многоканального мониторинга силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций

Систему многоканального мониторинга СМТ ТП можно выполнить на базе действующей системы передачи информации об электропотреблении тяговыми подстанциями – автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) [23], архитектурно внедрив в нее с минимальными капиталовложениями и эксплуатационными затратами (два в одном). При таком исполнении результаты, предоставляемые системой, являются дополнительными анализируемыми параметрами. Однако внедрение новых технологий (системы многоканального мониторинга) в производственный процесс, как и продление назначенного срока службы силовых трансформаторов [24], сопряжено с риском возникновения отказа, который, в свою очередь, может быть связан с нанесением урона окружающей среде, средствам производства – системе тягового электроснабжения, здоровью людей, и, в конечном итоге, может привести к экономическому ущербу. Технический риск, обусловленный техническими факторами, выражается в денежном эквиваленте [25, 26] и определяется по следующей формуле:

$$R = P \cdot Y, \quad (1)$$

где P – вероятность одного отказа трансформатора; Y – количество потерянных денежных средств в результате одного отказа трансформатора (ущерб).

Для решения задачи оценки технического риска требуется накопить многолетнюю статистику о причинах повреждений СМТ ТП и о величине ущерба от каждого повреждения, которое возможно было предотвратить при его своевременном обнаружении.

Система многоканального мониторинга позволяет предвидеть последнюю составляющую риска. Данную систему возможно оценить как экономически целесообразную в том случае, если риск ущерба от повреждений СМТ ТП превышает стоимость системы мониторинга [27].

Вероятность безотказной работы силовых трансформаторов тяговых подстанций с большим сроком эксплуатации, составляющих систему тягового электроснабжения, определяется по экспоненциальному закону по выражению

$$P_{\text{без.отк.}}(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где λ – интенсивность отказов одного силового трансформатора или условная плотность вероятности возникновения отказа, приводящего к ущербу на бесконечно малом интервале времени при условии, что до этого момента отказа трансформатора не было:

$$\lambda = \frac{n}{T * n_{\text{тр}}}, \quad (3)$$

где n – количество отказов силовых трансформаторов за расчетный период, повлекших ущерб, T – расчетный интервал времени, лет; $n_{\text{тр}}$ – количество работающих трансформаторов.

Вероятность отказов трансформатора определяется выражением

$$P_{\text{отк.}}(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Если рассматривать систему тягового электроснабжения как условно-логическую схему с последовательным соединением СМТ ТП, при этом независимым последовательным соединением, то на основе теоремы умножения вероятностей результирующая вероятность определится как произведение безотказной работы каждого трансформатора, входящего в систему:

$$P_i(t) = \prod P_i(t) = e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

где λ – интенсивность отказов системы трансформаторов (время в годах).

Количественная оценка риска определяется на основе анализа повреждаемости трансформаторов. В данной работе она выполнена на примере главного хода одной из железных дорог, который содержит 39 тяговых трансформаторов. На этом участке зафиксировано 10 повреждений за 2013–2019 годы, приведших к ущербу.

Далее приведен анализ интенсивности отказов трансформаторов и результаты расчета вероятности безотказной работы и вероятности отказа, а также результаты расчета риска (табл. 1, 2).

Диаграмма надежности СМТ ТП (рис. 1) показывает, что риск возрастает с увеличением периода эксплуатации СМТ ТП (рис. 2), что объясняет вероятность отказа.

Таблица 1. Результаты расчета интенсивности отказов силовых трансформаторов за 2013–2019 гг.
Table 1. Results of calculating the failure rate of power transformers for 2013–2019

Период	Год	Количество отказов, шт.	Количество отказов нарастающим итогом, шт.	Интенсивность отказа $\lambda = \frac{n}{T * n_{mp}}$
1	2013	2	1	0,025641
2	2014	1	2	0,051282
3	2015	2	4	0,102564
4	2016	1	5	0,128205
5	2017	3	5	0,128205
6	2018	1	5	0,128205
7	2019	0	5	0,128205

Таблица 2. Результаты оценки вероятности отказов силовых трансформаторов и риска за 2013–2019 гг.
Table 2. The results of assessing the probability of failure of power transformers and risk for 2013–2019

Год эксплуатации	Вероятность безотказной работы (убывающая по годам j) $p_{б.отк}(t) = e^{-\lambda t}$	Вероятность отказа (возрастающая по годам j) $p_{отк}(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	Ущерб, млн руб.	Риск по годам j, млн руб. $R = p_{отк} \cdot \sum_1^j Y_j$
2013	0,974685	0,025315	0,800	0,020
2014	0,902520	0,097480	2,500	0,322
2015	0,735141	0,264859	1,700	1,060
2016	0,59880	0,40120	8,000	4,814
2017	0,526752	0,473248	2,300	5,679
2018	0,463369	0,536631	1,900	6,440
2019	0,407613	0,592387	0	7,110

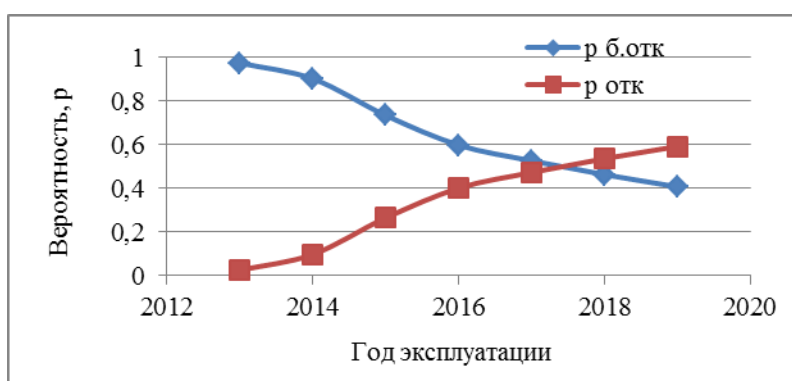


Рис. 1. Графическая интерпретация вероятности отказов силовых трансформаторов
Fig. 1. Graphical interpretation of the probability of failure of power transformers

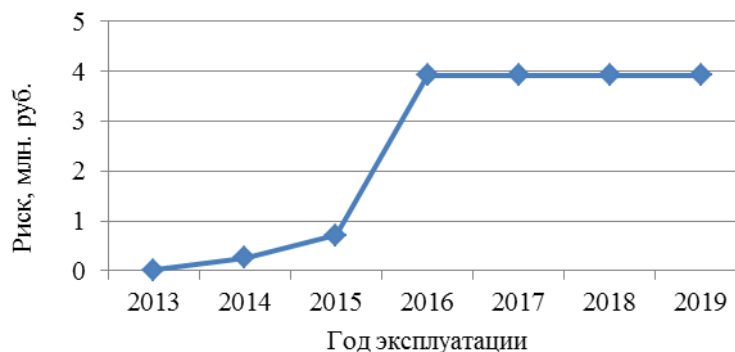


Рис. 2. Графическая интерпретация риска отказа силовых трансформаторов за 2013–2019 гг.
Fig. 2. Graphical interpretation of the risk of failure of power transformers for 2013–2019

Поскольку с каждым годом количество трансформаторов тяговых подстанций со сроком службы сверх нормативного увеличивается (73 % трансформаторов в эксплуатации свыше нормативного срока службы), необходимо выполнить расчет экономической целесообразности предлагаемой системы многоканального мониторинга СМТ ТП.

Предположим, что за период с 2020 по 2024 г. не будет отказа трансформаторов тяговых подстанций, следовательно, интенсивность отказа не изменится, а вероятность отказа и ущерб возрастают (табл. 3).

Оценим риск отказа силовых трансформаторов в 2020–2024 гг. при условии, что не было ни одного отказа:

$$R = 7,697 + 8,215 + 8,670 + 9,071 + 9,424 = 43,08 \text{ млн. руб.}$$

Капитальные затраты K на систему многоканального мониторинга составят:

– стоимость программного обеспечения – 0,500 млн руб.;

– стоимость датчиков (3 датчика влагосодержания «Hudran» и 3 датчика тензометрических по одному на каждую обмотку трехобмоточного силового трансформатора) – 0,600 млн руб.

$$K = 0,500 + 0,600 = 1,100 \text{ млн. руб.}$$

Текущие эксплуатационные затраты составят:

$$C_3 = C_{\text{обсл}} + C_a,$$

где $C_{\text{обсл}}$ – затраты на обслуживание, составляют 2 % от капиталовложений K ; C_a – амортизационные отчисления, составляют 2 % от капиталовложений K .

В результате объем затрат на обслуживание определится как

$$C_{\text{обсл}} = 2\% \cdot K = 0,02 \cdot 1,100 = 0,022 \text{ млн руб. /год.}$$

Объем амортизационных отчислений:

$$C_a = 2\% \cdot K = 0,02 \cdot 1,100 = 0,022 \text{ млн руб. /год.}$$

Текущие эксплуатационные затраты:

$$C_3 = C_{\text{обсл}} + C_a = 0,022 + 0,022 = 0,044 \text{ млн руб. /год.}$$

Приведенные затраты составят:

$$Z = E \cdot K + C_3,$$

где E – ставка рефинансирования Центробанка РФ

$$Z = 0,10 \cdot 1,100 + 0,044 = 0,154 \text{ млн руб. /год.}$$

Так как суммарный риск отказа в результате вероятности отказа трансформатора в 2020 г. составит за 8 лет (с 2013 по 2020 г.) 7,697 млн руб., а приведенные затраты – 0,154 млн руб./год, то экономический эффект \mathcal{E} от внедрения системы многоканального мониторинга составит:

$$\mathcal{E} = \frac{R_{2019}}{8} - Z = \frac{7,697}{8} - 0,154 = 0,962 - 0,154 = 0,805 \text{ млн руб./год.}$$

Однако расчет риска отказа произведен без учета фактора времени, экономический эффект выражен в ценах 2019 г.

Срок окупаемости системы мониторинга составит

$$T = \frac{K_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{1,100}{0,962} = 1,1 \text{ года.}$$

Расчеты показывают, что экономически целесообразен вариант установки системы мониторинга основных подсистем TDM-3F по принципу минимальной достаточности на силовые трансформаторы, находящиеся в эксплуатации сверх нормативного срока, хотя бы со сроком 45 и более лет, а таких на рассматриваемом участке железной дороги 9 (1 трансформатор находится в эксплуатации 50 лет, 8 – 45 лет).

Таблица 3. Результаты расчета вероятностей работы трансформаторов за 2013–2024 гг.

Table 3. The results of calculating the probabilities of the transformers for 2013–2024

Год эксплуатации	Вероятность безотказной работы (убывающая по годам j) $p_{\text{б.отк}}(t) = e^{-\lambda t}$	Вероятность отказа (возрастающая по годам j) $p_{\text{отк}}(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	Ущерб, млн руб./год	Ущерб, млн. руб./год $\sum_1^j Y_j$	Риск по годам j , млн. руб. $R = p_{\text{отк}j} \cdot \sum_1^j Y_j$
1	2	3	4	5	6
2013	0,974685	0,025315	0,800	0,800	0,020
2014	0,902520	0,097480	2,500	3,300	0,322
2015	0,735141	0,264859	1,700	5,000	1,060
2016	0,59880	0,40120	8,000	13,000	4,814
2017	0,526752	0,473248	2,300	13,000	5,679
2018	0,463369	0,536631	1,900	13,000	6,440
2019	0,407613	0,592387	0	13,000	7,110
2020	0,358567	0,641433	0	13,000	7,697
2021	0,315421	0,684579	0	13,000	8,215
2022	0,277468	0,722532	0	13,000	8,670
2023	0,244081	0,755919	0	13,000	9,071
2024	0,214711	0,785289	0	13,000	9,424

Заключение

Самым дорогостоящим элементом в системе тягового электроснабжения являются СМТ ТП, однако они обеспечивают надежность этой системы. В настоящее время в эксплуатации находится большое количество трансформаторов со сроком службы намного больше нормативного, например, на рассматриваемом участке железной дороги – 73 %. Поэтому возникает вероятность отказа таких трансформаторов, что сопряжено с техническим риском отказа. Предлагается применение системы многоканального мониторинга на таких трансформаторах, с

интеграцией этой системы в действующую систему АСКУЭ, что позволит использовать каналы передачи данных для диагностики некоторых важных параметров работы трансформаторов. Выполнен расчет экономического эффекта от внедрения системы мониторинга и срок окупаемости, который составляет чуть больше года. Экономический эффект от внедрения системы многоканального мониторинга будет возрастать с каждым годом, а риск отказа трансформаторов уменьшится.

Список литературы

1. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation // RusAutoCon : International Russian Automation Conference, Sochi, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
2. Пузина Е.Ю. Оценка потенциала повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения Абаканской дистанции электроснабжения // Транспорт: наука, образование, производство : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2017. С. 149–153.
3. Пузина Е.Ю., Алексеенко В.А. Регрессионный анализ повреждаемости измерительных трансформаторов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск, 2010. С. 421–423.
4. Пузина Е.Ю., Алексеенко В.А. Анализ времени наработки до отказа измерительных трансформаторов // Транспорт-2010. Ч. 2. 2010. С. 307–309.
5. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering ; IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018. P. 1–4.
6. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, Shaofeng Xie, Jie Luo. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer // IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115.
7. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers' residual service life // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing ICIEAM-2019. Sochi, 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743069
8. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation // Proceedings – 2019 : International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. Sochi, 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
9. Кузьмич А.П. Снижение несимметрии и несинусоидальности в линиях электропередач, питающих тяговые подстанции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 1. С. 692–696.
10. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А., Пузина Е.Ю. О переводе питания СЦБ с 27,5 кВ на нетяговую обмотку на тяговой подстанции переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 4 (60). С. 93–98.
11. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Ния – Киренга Восточно-Сибирской железной дороги // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте (Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов железнодорожного транспорта) : материалы VI Междунар. симпозиума «ELTRANS-2011». СПб. : Изд-во ПГУПС, 2013. С. 464–468.
12. Татаринов Е.Н., Худоногов И.А. Обоснование применения микропроцессорных систем телемеханики Контур-М для телемеханизации устройств электроснабжения Восточно-Сибирской железной дороги // Актуальные вопросы энергетики. 2016. С. 101–107.
13. Платонов Д.Н., Пузина Е.Ю. Автоматизированная система управления технологическими процессами тяговой подстанции // Транспорт-2015 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2015. С. 77–80.
14. Пузина Е.Ю. Оценка остаточного ресурса тяговых трансформаторов Северного хода ВСЖД // Транспорт-2013 : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2013. С. 176–178.
15. Савченко Е.А., Туйгунова А.Г. Опыт диагностики технического состояния трансформаторов тяговых подстанций для повышения надежности и продления срока службы // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 275–277.
16. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Мониторинг электрооборудования тяговых подстанций // Транспортная инфраструктура сибирского региона : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. В 2 т. Иркутск : Изд-во ИРГУПС, 2016. Т. 1. С. 645–648.
17. Жоглик И.В., Пузина Е.Ю. Автоматизированная интеллектуальная система непрерывного компьютерного контроля и диагностики силового оборудования // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2015. Т. 2. С. 104–109.

18. Туйгунова А.Г. Продление срока службы силовых трансформаторов тяговых подстанций на основе контроля технического содержания изоляционной системы с учетом особенностей климата // Политранспортные системы : материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2009. Ч. 2. С. 291–294.
19. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Применение систем мониторинга на силовых трансформаторах тяговых подстанций ВСЖД // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : тр. Межвуз. науч.-практ. конф. Красноярск : Изд-во КрИЖТ ИРГУПС, 2017. С. 6–11.
20. Пузина Е.Ю. Целесообразность применения системы мониторинга силовых трансформаторов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. Т. 2. С. 167–171.
21. Туйгунова А.Г. Совершенствование содержания изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций с учетом климатических условий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2011. 22 с.
22. Худоногов И.А., Туйгунова А.Г. Математическая модель тепломассообмена изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций с учетом климатических условий // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте : материалы VI Междунар. симпозиума «Элтранс-2011» СПб. : 2011. С.473–476.
23. Туйгунова А.Г. Обеспечение работоспособности системы тягового электроснабжения с учетом влияния климата // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 2. С. 387–390.
24. СТО РЖД 1.09.010-2008. Устройства электрификации и электроснабжения. Порядок продления назначенного срока службы. М. : ПКБ ЭЖД – филиал ОАО «РЖД», 2008. 28 с.
25. Балдин К.В. Риск-менеджмент : учеб. пособие. М. : Эксмо. 2006. 368 с.
26. Горбунова В.С., Пузина Е.Ю. Эффективность внедрения системы энергетического менеджмента в промышленных компаниях России // Транспортные системы и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 119–137.
27. Leibfried Thomas. Online Monitors keep Transformers in Service // IEEE Computer Applications in Power. DOI: 10.1109/67.694934.

References

- Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation. International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018, С. 8501734.
- Puzina E.Yu. Otsenka potentsiala povysheniya energoeffektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya Abakanskoi distantsii elektrosnabzheniya [Assessment of the potential for improving the energy efficiency of the traction power supply system of Abakan power supply distances]. Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Transport: science, education, production: collection of scientific papers of the International scientific and practical conference]. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2017, pp. 149–153.
- Puzina E.Yu., Alekseenko V.A. Regressiionnyi analiz povrezhdaemosti izmeritel'nykh transformatorov [Regression analysis of damage to measuring transformers]. Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia]. Irkutsk, 2010, pp. 421–423.
- Puzina E.Yu., Alekseenko V.A. Analiz vremeni narabotki do otkaza izmeritel'nykh transformatorov [Analysis of the operating time to failure of measuring transformers]. Transport-2010, Part 2, 2010, pp. 307–309.
- Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018, pp. 1–4.
- Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, Shaofeng Xie and Jie Luo “Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer”, 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), Birmingham, 2016, pp. 111–115.
- Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers’ residual service life. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, 2019. С.8743069.
- Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, 2019. С. 8867610.
- Kutsiy A.P. Snizhenie nesimmetrii i nesinusoidal'nosti v liniyakh elektropredach, pitayushchikh tyagovye podstantsii [Reducing asymmetry and non-sinusoidality in power lines. supply of traction substation]. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region], 2018, Vol. 1, pp. 692–696.
- Tuigunova A.G., Khudonogov I.A., Puzina E.Yu. O perevode pitaniya STsB s 27,5 kV na netyagovuyu obmotku na tyagovoi podstantsii peremennogo toka [On the transfer of the power supply of the SCB from 27.5 kV to a non-traction winding at an AC traction substation]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technology. System analysis. Modeling], 2018, No. 4 (60), pp. 93–98.
- Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Niya – Kirenga Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi (Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov zheleznodorozhnogo transporta) [Strengthening the systems of the traction power supply of the section of Nia-Kirenga of the ESR (Electrification, innovative technologies, high-speed and high-speed traffic on railway transport (electrification and development of infrastructure for power supply of railway traction trains)]. Mater. VI Mezhdunarodnogo simpoziuma ELTRANS-2011 (25–28 oktyabrya 2011 g. Sankt-Peterburg) [Proceedings of the Sixth international Symposium ELTRANS-2011 (October 25–28, 2011, Saint Petersburg). St. Petersburg: Emperor Alexander I Saint Petersburg State University of Railway Transport Publ., 2013, pp. 464–468.

12. Tatarinov E.N., Khudonogov I.A. Obosnovanie primeniya mikroprotsessornykh sistem telemehaniki Kontur-M dlya telemehanizatsii ustroystv elektrosnabzheniya Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [Justification of the use of microprocessor systems of telemechanics Kontur-M for telemechanization of power supply devices of the East Siberian railway]. Aktual'nye voprosy energetiki [Current energy issues], 2016, pp. 101–107.

13. Platonov D.N., Puzina E.Yu. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tekhnologicheskimi protsessami tyagovoi podstantsii [Automated control system of technological processes of traction substation]. Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport-2015». [Proceedings Of the international scientific and practical conference “Transport-2015”]. Part 3. Rostov-on-Don: RSUPS Publ., 2015, pp. 77–80.

14. Puzina E.Yu. Otsenka ostatochnogo resursa tyagovykh transformatorov Severnogo khoda VSZhD. [Evaluation of the residual service life of the Northern route traction transformers of the East Siberian Railroad]. Transport-2013: trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport-2013: proceedings of the international scientific and practical conference]. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2013, pp. 176–178.

15. Savchenko E.A., Tuigunova A.G. Opyt diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya transformatorov tyagovykh podstantsii dlya povysheniya nadezhnosti i prodleniya sroka sluzhby [Experience of diagnostics of technical condition of transformers of traction substations for increase of reliability and prolongation of service life]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2009, No. 1, pp. 275–277.

16. Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Monitoring elektrooborudovaniya tyagovykh podstantsii [Monitoring of electric equipment of traction substations]. Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona: mater. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Mai 2016 g. [Transport infrastructure of the Siberian region. Materials Are Still Available. Scientific and practical conferences with international participation (Irkutsk, April 21–25, 2015)]: in Fedchishin V. V. (ed.) Irkutsk: IrGUPS Publ., 2016, Vol. 1, pp. 645–648.

17. Zhoglik I.V., Puzina E.Yu. Avtomatizirovannaya intellektual'naya sistema nepreryvnogo komp'yuternogo kontrol'ya i diagnostiki silovogo oborudovaniya. [Automated smart system for power equipment continuous computer control and diagnostics]. Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia: proceedings of the all-Russian scientific and practical conference with international participation (Irkutsk, April 21–25, 2015)]: in Fedchishin V. V. (ed.) Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2015, Vol. 2, pp. 104–109.

18. Tuigunova A.G. Prodlenie sroka sluzhby silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii na osnove kontrolya tekhnicheskogo soderzhaniya izolyatsionnoi sistemy s uchetom osobennosti klimata [Extending the service life of power transformers of traction substations on the basis of monitoring the technical content of the insulation system taking into account the climate]. [Polytransport systems. Materials of the VI all-Russian scientific and technical conference on April 21–23, 2009]: In 2 parts. Novosibirsk: SSUPS Publ., 2009, Part 2, pp. 291–294.

19. Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Primenenie sistem monitoringa na silovykh transformatorakh tyagovykh podstantsii VSZhD [The use of monitoring systems for power transformers traction substations VSZHD]. Politransportnye sistemy: materialy VI Vseros. nauch.-tekhnich. konf. 21–23 apr. 2009 g. V 2-kh ch. [Proceedings of the XXI Interuniversity scientific and practical conference on November 7, 2017. In 2 parts]. Krasnoyarsk: KrIZhT IrGUPS Publ., 2017, pp. 6–11.

20. Puzina E.Yu. Tselesoobraznost' primeniya sistemy monitoringa silovykh transformatorov [Expediency of employing power transformers monitoring systems. Increasing the efficiency of production and use of energy in the conditions of Siberia]. Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: mater. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (Irkutsk, 22–26 aprelya 2013 g.) [Materials of the all-Russian scientific and practical conference with international participation (Irkutsk, April 22–26, 2013)]: in 2 vols. In Fedchishin V.V. (ed.) Irkutsk: IrSTU Publ., 2013, Vol. 2, pp. 167–171.

21. Tuigunova A.G. Sovershenstvovanie soderzhaniya izolyatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov tyagovykh podstantsii s uchetom klimaticheskikh uslovii: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk [Improving the insulation content of power oil-filled transformers of traction substations taking into account climatic conditions: Ph.D. (Engineering) thesis]. Krasnoyarsk: SFU Publ., 2011, 22 p.

22. Khudonogov I.A., Tuigunova A.G. Matematicheskaya model' teplomassoobmena izolyatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov tyagovykh podstantsii s uchetom klimaticheskikh uslovii. [Mathematical model of heat and mass transfer of insulation of power oil-filled transformers of traction substations taking into account climatic conditions]. Materialy shestogo Mezhdunarodnogo simpoziuma Eltrans-2011 25-28 oktyabrya 2011 g. Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov na zheleznodorozhnom transporte [Proceedings of the sixth International Eltrans-2011 Symposium October 25–28, 2011 Electrification and development of power supply infrastructure for train traction in railway transport], pp. 473–476.

23. Tuigunova A.G. Obespechenie rabotosposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s uchetom vliyaniya klimata [Ensuring efficiency of the traction power system subject to the influence of the climate]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2009, No. 2, pp. 387–390.

24. STO RZhd 1.09.010-2008. Ustroystva elektrifikatsii i elektrosnabzheniya. Poryadok prodleniya naznachennogo sroka sluzhby [STO RZD 1.09.010-2008. Electrification and power supply devices. Procedure for extending the assigned period of services]. Moscow: PKB EZhd, a branch of Russian Railways OAO, 2008, 28 p.

25. Baldin K.V. Risk-menedzhment. Uchebnoe posobie [Risk management. A textbook]. Moscow: Eksmo Publ., 2006, 368 p.

26. Gorbunova V.S., Puzina E.Yu. Effektivnost' vnedreniya sistemy energeticheskogo menedzhmenta v promyshlennykh kompaniyakh Rossii [The effectiveness of the implementation of energy management systems in industrial companies of Russia]. [Transportnye sistemy i tekhnologii] Transport systems and technologies, 2018, Vol. 4, No. 1, pp. 119–137.

27. Leibfried T. Online Monitors Transformers in Service. IEEE Computer Applications in Power, July 1998, pp. 36–42.

Информация об авторах

Пузина Елена Юрьевна – к. т. н., доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: lena-rus05@mail.ru

Туйгунова Альбина Григорьевна – к. т. н., доцент кафедры систем обеспечения движения поездов, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, e-mail: tuigunova@krsk.irgups.ru

Худоногов Игорь Анатольевич – д. т. н., профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: hudonogovi@mail.ru

Information about the authors

Elena Y. Puzina – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: lena-rus05@mail.ru

Al'bina G. Tuigunova – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Train Traffic Management Systems, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, e-mail: tuigunova_ag@krsk.irgups.ru

Igor' A. Khudonogov – Doctor of Technical Science, Professor at the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Hudonogovi@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).92-100

УДК 656.213

Применение визуальных моделей для оценки потребности локомотивов и локомотивных бригад с учетом индивидуальных особенностей железнодорожных полигонов

А. И. Власов¹, А. А. Подорин¹, А. Ю. Малеваный¹, Е. А. Лаханкин² ✉

¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация*

² *Институт экономики и развития транспорта, г. Москва, Российская Федерация*

✉ Lakhankin.e.a@gmail.com

Резюме

В рамках данной статьи рассмотрены особенности формализации работы локомотивных бригад на участках. Выявлена проблема, заключающаяся в способе описания процессов на участках обращения локомотивов. Рассмотрены основные существующие концепции реализации потоковой визуальной модели организации движения локомотивов внутри участков обращения, произведено их описание и приведены примеры их использования. Проанализированы аспекты классической методики, базирующейся на сетевой потоковой модели для формализованного описания технологии работы локомотивов и локомотивных бригад в грузовом движении. Данная методика оперирует схемами участков обращения локомотивов и работы локомотивных бригад, которые учитываются при составлении нормативного графика движения поездов. Показано, как в рамках модернизации системы «Программное обеспечение прогноза показателей работы локомотивов и локомотивных бригад на нормативный график движения грузовых поездов» под особенности полигонов Октябрьской и Западно-Сибирской железных дорог были произведены структурные и алгоритмические изменения. Данные модификации позволяют с большей гибкостью описывать участки работы локомотивных бригад. Продемонстрированы различия существующих моделей работы локомотивных бригад в зависимости от типа участков их оборота. В качестве средства моделирования предлагается использовать нотацию Business Process Model and Notation. Она призвана облегчить понимание процессов, происходящих внутри участков работы локомотивных бригад, и анализ масштаба работы бригад на участках. Предложены альтернативные варианты реализации потоковой визуальной модели перевозочных процессов для оценки потребности локомотивов и локомотивных бригад в нотации Business Process Model and Notation. Произведено сравнение существующей и предложенной концепций, на основании которого сделаны выводы.

Ключевые слова

визуальное моделирование, макро модель, эффективность деятельности, перевозочный процесс, процессное моделирование, Business Process Model and Notation (BPMN)

Для цитирования

Власов А.И. Применение визуальных моделей для оценки потребности локомотивов и локомотивных бригад с учетом индивидуальных особенностей железнодорожных полигонов / А.И. Власов, А.А. Подорин, А.Ю. Малеваный, Е.А. Лаханкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 92–100. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).92-100

Информация о статье

поступила в редакцию: 11.02.2020, поступила после рецензирования: 20.03.2020, принята к публикации: 02.04.2020