

УДК 62-519

Разработка методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена

А. В. Давыдова, А. К. Канаев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Давыдова А. В., Канаев А. К. Разработка методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 56–64. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-56-64

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос развития современных концепций IoT и Smart grid с точки зрения эффективного внедрения на существующие объекты производств, в частности на сеть электроснабжения метрополитена. Показать необходимость разработки научно-методического аппарата по формированию интеллектуальных подсистем мониторинга и управления с учетом внедрения новых разработок в уже существующие комплексы. Определить особенности сети электроснабжения метрополитена и ее подсистем мониторинга и управления с указанием путей развития с учетом существующих новых технологий. Разработать методику формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. **Методы:** анализ структур построения интеллектуальных подсистем мониторинга и управления согласно современным концепциям; анализ существующих подсистем мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. При разработке методики применяются полумарковские модели для проведения моделирования процессов функционирования и восстановления, а также предложен метод эмпирической модовой декомпозиции для обработки данных мониторинга. **Результаты:** разработана методика формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. Предложен модельный и аналитический аппарат для осуществления моделирования процессов функционирования и восстановления и для проведения работ с диагностическими данными. Сформирован перечень параметров методики. **Практическая значимость:** предложенная методика формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения позволяет обосновать необходимый состав, структуру и требования к средствам диагностики и управления. Данная методика может быть применена при разработке новых многопараметрических комплексов метрополитена, при формировании обоснований модернизации и разделов технических заданий и требований.

Ключевые слова: сеть электроснабжения метрополитена, интеллектуальные системы мониторинга IoT и Smart grid, методика формирования подсистемы мониторинга и управления, полумарковская модель, обработка данных, внедрение новых технологий.

Введение. На протяжении последних 20 лет формируются положения новых концепций в области функционирования больших и сложных систем. Концепции интернета вещей и Smart grid предполагают построение новых структур функционирования и контроля рассматриваемых электротехнических комплексов. Построение основывается на охвате областей, начиная с генерации электроэнергии и заканчивая прямым взаимодействием систем с потребителями [1]. Данные концепции переходят в активную фазу развития в последние 5–10 лет за счет применяемых передовых технологий в области обработки данных, искусствен-

ного интеллекта, сетевого взаимодействия, облачных вычислений, работе с большими данными [2–5].

Неотъемлемыми структурами указанных концепций являются интеллектуальные системы мониторинга, управления и обработки данных. Их построение затрагивает разработку четырех условно разграниченных уровней систем: сбора данных, сетевого взаимодействия, хранения и обработки, управления и мониторинга [6]. А развитие входящих в состав технологий создает большой объем решений со значительно высокой скоростью разработки относительно прямого внедрения непосредственно на отдельно взятом производстве [7–9].

С другой стороны, такое непосредственное внедрение затрудняется целесообразностью применения и эффективностью внедрения при наличии зачастую уникальных особенностей самого объекта или производства в целом. К таким особенностям могут быть отнесены: режим работы, электромагнитная совместимость, эксплуатационные климатические условия работы, характер нагрузок, наличие оборудования и подсистем разного поколения, с разным сроком эксплуатации, с индивидуальными технологическими процессами, с частичной реализацией принципов новых технологий.

При этом стоит отметить, что хоть актуальность на данные концепции и растет, но существующие нормативно-правовые акты (НПА) и описание самих концепций носят обобщенный характер, отсутствуют механизмы внедрения на объекты производств, механизмы устранения или прогнозирования рассогласований применяемых новых технологий с существующими, механизмы преодоления барьеров, касающихся топологии построения архитектур, экономических вопросов, вопросов кибербезопасности [10].

Соответственно, исследовательской задачей остается оптимальный выбор технологий для внедрения, повышение эффективности вычислительных ресурсов существующих подсистем, согласованность работы многопараметрических комплексов разных «поколений» в условиях недостаточности разработки НПА в части методического аппарата по внедрению, низкой скорости внедрения относительно скорости разработки новых технологий, индивидуальности и даже уникальности рассматриваемого объекта.

Поэтому необходима методика формирования подсистем мониторинга и управления применительно для сети электроснабжения метрополитена, в рамках разработки которой необходимо охарактеризовать сеть электроснабжения и ее подсистемы мониторинга и управления, определить направления ее развития, разработать алгоритм методики с предложением моделей и методов реализации, сформировать перечень ее параметров.

Краткая характеристика сети электроснабжения метрополитена и ее существующих подсистем мониторинга и управления. Для проведения ана-

лиза необходимо обозначить понятия «сети электроснабжения» и «подсистемы мониторинга и управления». Согласно [11–13] сетью электроснабжения, применительно для метрополитена как части его электрического хозяйства, является совокупность электроустановок для распределения, преобразования и передачи электрической энергии в рамках одной станции, в которую входят совмещенная тяговая понизительная подстанция (СТП) и ее тяговая сеть (положительной и отрицательной полярности). Подсистемами мониторинга и управления являются существующие информационно-измерительные системы и комплексы, системы диспетчерского управления, осуществляющие мониторинг и управление указанной сетью электроснабжения на территории одной станции метрополитена и являющиеся частью общей системы мониторинга и управления системой электроснабжения метрополитена.

Наиболее ресурсоемким и ответственным комплексом СТП является сеть электроснабжения тяги поездов. Путь тягового тока проходит от кабелей вводов на 1 секцию шин и через понижающий трансформатор, кремниевые выпрямительные агрегаты, разъединители, «+» шину 825 В, линейный разъединитель, контактный рельс I и II путей, через токоприемник поезда на электропривод, а уже с подвижного состава через ходовой рельс по кабельным линиям отрицательной полярности на «минус» шину 825 В, завершая построение схемы питания (рис. 1) [14]. На рис. 1 приведены следующие обозначения ВВ — высоковольтный выключатель, ТТ — трансформатор тока, ОПН — ограничитель перенапряжения, ТСК — тяговый трансформатор, КВ — кремниевый выпрямитель, КА — катодный автомат, Р — разъединитель.

В связи с этим на сегодняшний день местами мониторинга являются: ввод, трансформаторы тока и напряжения, кремниевые выпрямительные агрегаты, коммутационное оборудование, параметры которых контролируют следующие подсистемы мониторинга:

- комплексная автоматизированная система диспетчерского управления работой линии метрополитена;
- автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии;
- комплекс регистрации технологических нарушений;
- автоматизированная информационно-измерительная система технического учета энергетических ресурсов и воды.

Данные подсистемы мониторинга представляют собой трехуровневый электротехнический комплекс со средствами сбора, передачи и первичной обработки и анализа информации в рамках заложенных измерительных и вычислительных ресурсов, формируя временные, векторные диаграммы, осциллограммы.

Анализ сети электроснабжения метрополитена и ее четырех основных подсистем мониторинга и управления позволил определить как положительные особенности подсистем, способствующие их развитию и модернизации, к которым отно-

сятся хранение большого количества данных, достаточная накопительная емкость подсистем, а также функциональная и вычислительная недостаточность подсистем относительно развивающихся технологий, которая обозначена направлениями их развития, касающиеся обработки больших данных, моделирования процессов, прогнозирования процессов, состояний и параметров, поддержки принятия решения по управлению, модернизации, планированию ресурсов.

Исходные данные и применяемые методы и модели для методики. В рамках разрабатываемой методики предлагается в части моделирования применить полумарковские модели, которые сочетают в себе свойства марковских процессов и процессов восстановления и позволяют рассмотреть процесс функционирования и восстановления более комплексно, совместно с подсистемой мониторинга и управления и рабочим персоналом [15]. К исходным данным для полумарковской модели будут относиться: эксплуатационная статистика для определения множества состояний системы S_n ; инструкции по операционной работе и характеристика технологического процесса для формирования единой базы возможных переходов из одного состояния в другой S_{ij} ; техническая документация или экспертная оценка специалиста для вероятностной и временной характеристики перехода P_{ij} , T_{ij} ; сформированный перечень технических и технологических отграничивающих и задающих параметров; установка вероятностей возникновения ошибок первого и второго рода p_{o1} и p_{o2} ; задание объемов средств диагностирования X_{ij} .

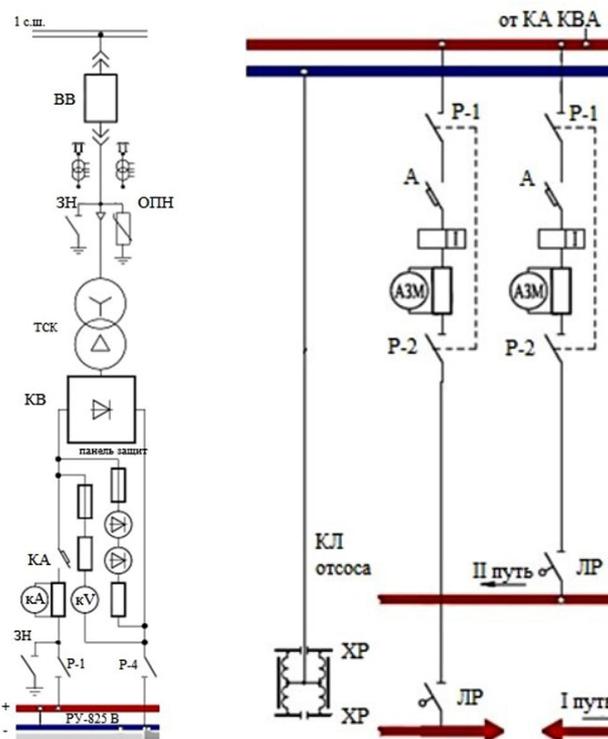


Рис. 1. Часть однолинейной схемы, касающаяся сети электроснабжения тяги поездов метрополитена

Кроме того, для проведения анализа подготовленных и предварительно обработанных данных применяется метод эмпирической модовой декомпозиции [16], отличающийся адаптивностью базиса, оценивания амплитуды, времени и частоты, возможности извлечения составляющей сигнала, а также непрерывное усовершенствование отдельных элементов метода, что позволяет корректировать его под необходимые требования изучаемой модели и комбинировать его с другими методами интеллектуального анализа.

Разработка методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. Выполнение алгоритма методики начинается со сформированной необходимости введения в рассматриваемый комплекс, в данном случае система «сеть электроснабжения — подсистема мониторинга и управления», нового элемента. Методика содержит четыре основных этапа (рис. 2):

1-й этап — формирование перечней исходных данных, требований, ограничений. Результатом 1-го этапа является совокупность исходных параметров моделирования и обработки.

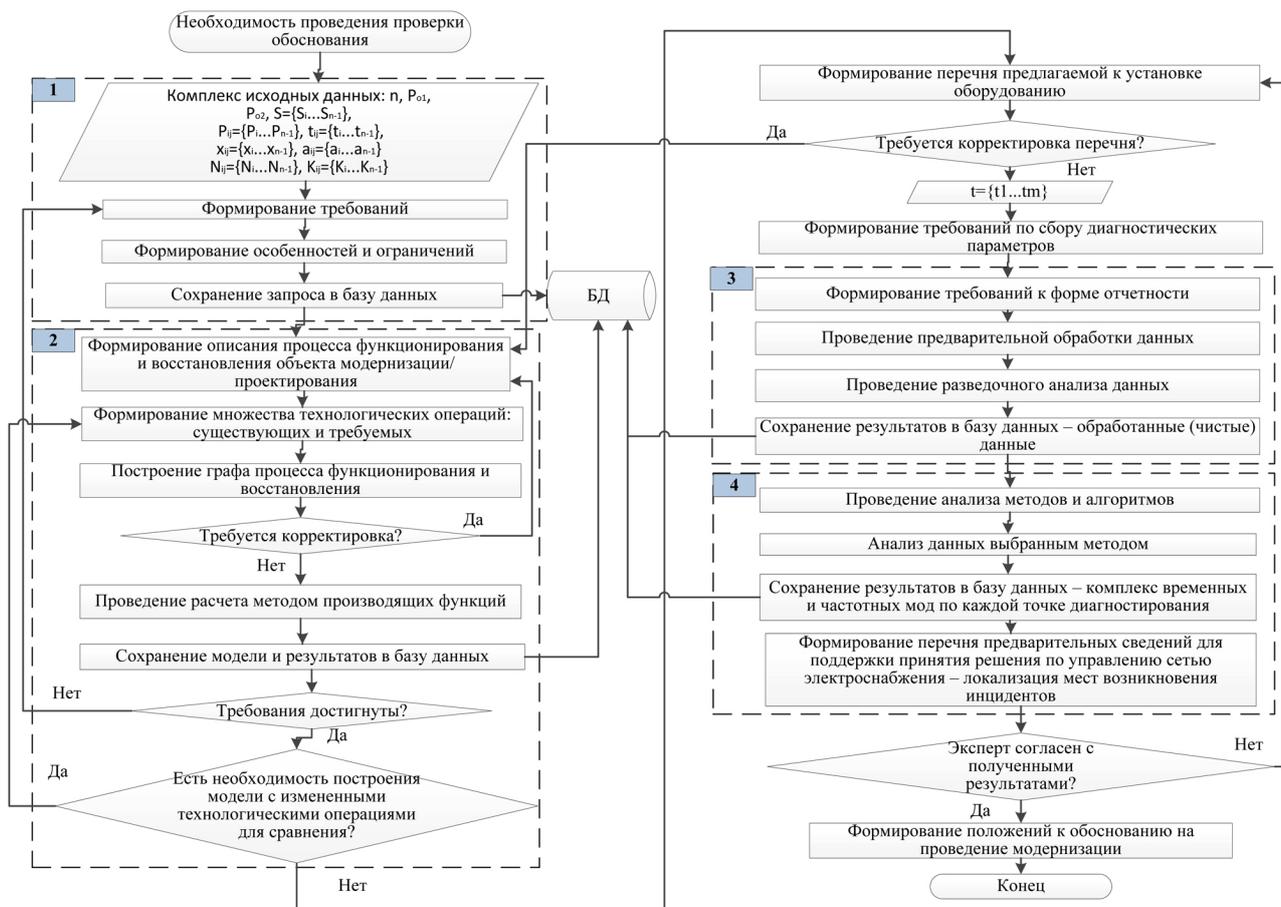


Рис. 2. Блок схема методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена

2-й этап — моделирование процессов функционирования и восстановления с применением аппарата полумарковского процесса. Этап содержит: характеристику системы и проходящих в ней процессов, принимаемых для частного моделирования; формирование множества моделируемых состояний и существующих и требуемых технологических операций; построение графа системы; расчет параметров надежности методом производящих функций. Результат — графоаналитическая модель процесса функционирования и восстановления рассматриваемой системы.

3-й этап — предварительная обработка данных. Предприятия, в частности метрополитен, могут быть оснащены несколькими подсистемами мониторинга и управления от разных разработчиков, затрагивающими формирование единых требований для отчетности; разработку программного кода или ПО для проведения предварительной обработки данных и разведочного анализа данных.

4-й этап — детальный анализ диагностических данных с применением метода или алгоритма анализа, включающий в себя анализ и реализацию существующих интеллектуальных методов и алгоритмов, применение которых позволит расширить знания о процессах в системе, выявить новые закономерности при получении данных и построить прогнозы; формирование перечня предварительных сведений для поддержки принятия решения по управлению системой. По завершении этапа эксперт проводит оценку полученным результатам и имеет возможность внести корректировки.

После проведения всех четырех этапов методика завершается требуемым обоснованием на модернизацию рассматриваемой системы в части внедрения нового элемента. Обоснование включает в себя формализацию всех необходимых изменений, смоделированные процессы функционирования и восстановления системы с новым элементом по сравнению с исходной и оценку степени достижения первоначально заложенных требований при имеющихся ограничениях и ресурсах.

Заключение. В данной статье разработана методика формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. Предлагаемая методика обеспечивает построение обоснованного и подтвержденного результатами моделирования решения на модернизацию. Также она позволяет обосновать необходимый состав, структуру и требования к средствам диагностики и управления. Данная методика может быть применена при разработке новых многопараметрических комплексов, при формировании обоснований на модернизацию и разделов технических требований.

Библиографический список

1. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
2. Рекомендации МСЭ-Т Y.2060 «Обзор Интернета вещей», 2012. 22 с.

3. Шакарян Ю. Г., Фортов В. Е., Бушуев В. В. и др. Концепция интеллектуальной электро-энергетической системы с активно-адаптивной сетью. М., 2012. 238 с.
4. Emmanuel M., Seah W. K. G., Rayudu R. Communication Architecture for Smart Grid Applications. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). 2018. P. 00746–00751. DOI: 10.1109/ISCC.2018.8538472.
5. Титова Т. С., Евстафьев А. М. Инновационные системы управления электрического подвижного состава // Железнодорожный транспорт: Ежемесячный научно-теоретический технико-экономический журнал. 2017. № 11. С. 54–59. ISSN 0044-4448.
6. Папуловская Н. В. Основы интернета вещей: учебно-методическое пособие. М-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. 104 с.
7. Ли П. Архитектура интернета вещей / пер. с англ. М. А. Райтмана. М.: ДМК Пресс, 2019. 454 с.
8. Антти С. Интернет вещей: видео, аудио, коммутация. М.: ДМК Пресс, 2019. 120 с.
9. Мунистер В. Д. IoT. Межмашинное взаимодействие. Программирование в компьютерных сетях. Издательство: СИ Учебно-теоретическое издание, 2020. 375 с.
10. ISO/IEC 30162. Internet of Things (IoT) — Compatibility requirements and model for devices within industrial IoT systems. 2022. P. 6.
11. ПУЭ: 7-е издание.
12. ГОСТ 32895-2014 Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения.
13. ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения.
14. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование. М.: Транспорт, 1977. 431 с.
15. Давыдова А. В., Канаев А. К. Применение обобщенной графоаналитической модели в построении полумарковской модели подсистемы мониторинга и управления системы электроснабжения метрополитена // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 16, № 4. С. 78–88. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-78-88.
16. Kanaev A. K., Davydova A. V. Empirical Mode Decomposition Method for Processing Data Monitoring of the Subway Power Supply Network. 2023 Seminar on Information Systems Theory and Practice (ISTP), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. P. 37–41. DOI: 10.1109/ISTP60767.2023.10427026.

Дата поступления: 27.12.2023

Решение о публикации: 01.02.2024

Контактная информация

ДАВЫДОВА Анастасия Валентиновна — соискатель ученой степени канд. техн. наук; av-davydova-pgups@yandex.ru

КАНАЕВ Андрей Константинович — докт. техн. наук, профессор; kanaev@pgups.ru

Development of a methodology for forming a subsystem for monitoring and controlling the metro power supply network

A. V. Davydova, A. K. Kanaev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Davydova A. V., Kanaev A. K. Development of a Methodology for Forming a Subsystem for Monitoring and Controlling the Metro Power Supply Network // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 56–64. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-56-64*

Abstract

Objective: consider the development of modern concepts of IoT and Smart grid from the point of view of effective implementation on existing production facilities, in particular, on the metro power supply network. Show the need to develop a scientific and methodological apparatus for the formation of intelligent monitoring and control subsystems, taking into account the introduction of new developments into existing complexes. Determine the features of the metro power supply network and its monitoring and control subsystems, indicating development paths taking into account existing new technologies. Develop a methodology for forming a subsystem for monitoring and managing the metro power supply network. **Methods:** analysis of structures for constructing intelligent monitoring and control subsystems according to modern concepts; analysis of existing monitoring and control subsystems of the metro power supply network. When developing the methodology, semi-Markov models are used to simulate the functioning and recovery processes, and an empirical mode decomposition method is proposed for processing monitoring data. **Results:** a methodology has been developed for forming a subsystem for monitoring and controlling the metro power supply network. A model and analytical apparatus is proposed for modeling the processes of functioning and recovery and for carrying out work with diagnostic data. A list of method parameters has been generated. **Practical importance:** the proposed methodology for forming a subsystem for monitoring and controlling the power supply network makes it possible to substantiate the necessary composition, structure and requirements for diagnostic and control tools. This methodology can be applied in the development of new multi-parameter metro complexes, in the formation of justifications for modernization and sections of technical specifications and requirements.

Keywords: metro power supply network, intelligent monitoring systems IoT and Smart grid, methodology for forming a monitoring and control subsystem, semi-Markov model, data processing, introduction of new technologies.

References

1. Kobec B. B., Volkova I. O. Innovacionnoe razvitie jelektrojenergetiki na baze koncepcii Smart Grid. M.: IAC Jenergija, 2010. 208 s. (In Russian)
2. Rekomendacii MSJe-T Y.2060 “Obzor Interneta veshhej”, 2012. 22 s. (In Russian)
3. Shakarjan Ju. G., Fortov V. E., Bushuev V. V. i dr. Koncepcija intellektual’noj jelektrojenergeticheskoj sistemy s aktivno-adaptivnoj set’ju. M., 2012. 238 s. (In Russian)
4. Emmanuel M., Seah W. K. G., Rayudu R. Communication Architecture for Smart Grid Applications. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). 2018. P. 00746–00751. DOI: 10.1109/ISCC.2018.8538472.
5. Titova T. S., Evstaf’ev A. M. Innovacionnye sistemy upravlenija jelektricheskogo podvizhnogo sostava // Zheleznodorozhnyj transport: Ezhemesjachnyj nauchno-teoreticheskij tehniko-jekonomicheskij zhurnal. 2017. № 11. S. 54–59. ISSN 0044-4448. (In Russian)

6. Papulovskaja N. V. *Osnovy interneta veshhej: uchebno-metodicheskoe posobie*. M-vo nauki i vysshego obrazovaniya RF. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2022. 104 s. (In Russian)
7. Li P. *Arhitektura interneta veshhej / per. s ang. M. A. Rajtmana*. M.: DMK Press, 2019. 454 s. (In Russian)
8. Antti S. *Internet veshhej: video, audio, kommutacija*. M.: DMK Press, 2019. 120 s. (In Russian)
9. Munister V. D. *IoT. Mezhmashinnoe vzaimodejstvie. Programmirovaniye v komp'yuternyh setjah* Izdatel'stvo: SI Uchebno-teoreticheskoe izdanie, 2020. 375 s. (In Russian)
10. ISO/IEC 30162. *Internet of Things (IoT) — Compatibility requirements and model for devices within industrial IoT systems*. 2022. P. 6.
11. PUJe: 7-e izdanie. (In Russian)
12. GOST 32895-2014 *Jelektifikacija i jelektrosnabzhenie zheleznih dorog. Terminy i opredelenija*. (In Russian)
13. GOST R 54130-2010. *Kachestvo jelektricheskoy jenerгии. Terminy i opredelenija*. (In Russian)
14. Bykov E. I. *Jelektrosnabzhenie metropolitenov. Ustrojstvo, jekspluatacija i proektirovanie*. M.: Transport, 1977. 431 s. (In Russian)
15. Davydova A. V., Kanaev A. K. *Primenenie obobshhennoj grafoanaliticheskoy modeli v postroenii polumarkovskoj modeli podsistemy monitoringa i upravlenija sistemy jelektrosnabzhenija metropolitena // Izv. SPbGJeTU "LJeTI"*. 2022. T. 16, № 4. S. 78–88. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-78-88. (In Russian)
16. Kanaev A. K., Davydova A. V. *Empirical Mode Decomposition Method for Processing Data Monitoring of the Subway Power Supply Network*. 2023 Seminar on Information Systems Theory and Practice (ISTP), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. P. 37–41. DOI: 10.1109/ISTP60767.2023.10427026.

Received: 27.12.2023

Accepted: 01.02.2024

Author's information

Anastasiya V. DAVYDOVA — applicant for academic degree in engineering; av-davydova-pgups@yandex.ru

Andrey K. KANAEV — D. Sci. in Engineering, Professor; kanaev@pgups.ru