

УДК 621.311.1

DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.011

## Моделирование процессов плавки гололеда в тяговых сетях постоянного тока

Крюков Андрей Васильевич<sup>1,2</sup>, Черепанов Александр Валерьевич<sup>1</sup>, Нгуен Куок Хиеу<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения,

Россия, Иркутск, *smart\_grid@mail.ru*

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск

**Аннотация.** Цель представленных в статье исследований состояла в разработке цифровых моделей для определения режимов плавки гололеда на проводах контактных подвесок железных дорог постоянного тока. Они были реализованы в программном комплексе Fazonord, версия 5.3.4.9 –2024. Алгоритм расчета включал следующие этапы: расчет серии режимов, определяемых графиком движения поездов, на основе подхода, использующего фазные координаты; формирование зависимостей токов, протекающих по проводам, от времени; вычисление температур их нагрева; моделирование процесса плавки гололедной канавки; учет испарения пленки воды, оставшейся после отпадения ледяной муфты; моделирование нагрева токоведущих частей без корки льда при наличии или отсутствии мороси и дождя. Описаны исходные данные, необходимые для проведения расчетов. Они включают следующие группы параметров: геометрические, теплотехнические и электрические. Представлены компьютерные модели, учитывающие основные факторы процессов нагрева и удаления гололедных отложений на проводах контактных подвесок тяговых сетей (ТС) постоянного тока. Моделируемая система электроснабжения включала следующие элементы: три питающих ЛЭП 110 кВ и такое же число тяговых подстанций; два участка ТС 3 кВ протяженностью по 20 км. Показано, что гололед удаляется с несущих тросов за 17 минут, а с контактных проводов за 22 минуты. Температуры нагрева токоведущих частей и наиболее нагретых точек трансформаторов во время плавки не превышают допустимых величин. Методика является универсальной и может применяться для ТС любого конструктивного исполнения, включая перспективные ТС повышенного напряжения.

**Ключевые слова:** удаление гололедных отложений, железные дороги постоянного тока, системы электроснабжения

**Цитирование:** Крюков А.В. Моделирование процессов плавки гололеда в тяговых сетях постоянного тока / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, К.Х. Нгуен // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 2(34). – С. 112-122. – DOI: 10.25729/ESI.2024.34.2.011.

**Введение.** В осенне-зимний период в ряде регионов России на проводах линий электропередачи (ЛЭП) и контактных подвесок тяговых сетей (ТС) возникают отложения гололеда, изморози и мокрого снега. Толщина такой ледяной корки может достигать нескольких десятков миллиметров и приводить к следующим негативным последствиям [1]:

- разрегулировке и сближению токоведущих частей;
- возникновению коротких замыканий, повреждениям линейной арматуры и креплений;
- механической перегрузке и обрыву проводов.

Вопросы, связанные с моделированием процессов плавки гололеда на воздушных ЛЭП и ТС, рассматриваются в большом числе работ. Условия образования льда и изморози на ЛЭП и технические решения по их ликвидации описаны в [1, 2]. Современные средства для раннего обнаружения ледяных образований представлены в [3]. Онлайн-метод расчета плавки гололеда на контактной сети описан в [4]. Исследования способа защиты ЛЭП от обледенения, учитывающего снижение мощности плавки, представлены в [5]. Результаты испытаний методов обработки контактных подвесок высокоскоростных линий для борьбы с гололедом рассмотрены в [6]. Анализ методов удаления льда с воздушных ЛЭП низкого напряжения проведен в [7]. Динамика перемещения проводов при сбросе гололедно-изморозевых отложений рассмотрена в [8]. Система оперативного мониторинга обледенения воздушной ЛЭП предложена в [9]. Проект нового противо-гололедного устройства для ЛЭП представлен в [10]. Модель раннего предупреждения о гололеде на ЛЭП, реализованная на

основе нейронной сети, предложена в [11]. Методика расчета значимости ЛЭП по критерию рисков в условиях ледяной погоды описана в [12]. Высокочастотные диэлектрические свойства линий электропередачи при наличии гололедных отложений рассмотрены в [13]. Новый подход к борьбе с обледенением расщепленных фаз ЛЭП сверхвысокого напряжения описан в [14]. Обзор способов борьбы с гололедом на проводах ЛЭП представлен в [15]. Метод определения вероятности обрыва проводов ЛЭП при ледяной катастрофе разработан в [16]. Новый подход к защите от обледенения линий кольцевой сети предложен в [17]. Практика борьбы с гололедом на линиях распределительных сетей описана в [18]. Результаты исследования методов плавления льда на ЛЭП среднего напряжения представлены в [19]. Система мониторинга обледенения ЛЭП предложена в [20].

При эксплуатации ТС постоянного тока применяются тепловые и механические способы освобождения проводов контактных подвесок от накопившегося на них льда. Наиболее широкое распространение получили методы плавки гололеда повышенными токами. В условиях цифровизации для выбора рациональных схем теплового удаления гололедных образований следует использовать компьютерные технологии, позволяющие адекватно моделировать сложные процессы нагрева и плавки льда на проводах ЛЭП и ТС.

Ниже представлены результаты исследований, направленных на создание цифровых моделей систем электроснабжения железных дорог постоянного тока (СЭЖД ПТ) в режимах плавки гололеда [21]. Методы моделирования СЭЖД ПТ описаны в [22].



Рис. 1. Основные этапы алгоритма

**Методика и результаты моделирования.** Алгоритм моделирования процессов плавки гололеда (рис. 1), подробно описанный в [21] и реализованный в программном комплексе Fazonord, версия 5.3.4.9 – 2024 (рис. 2), включает следующие этапы:

1. Определение серии режимов с дискретностью  $\delta t_k = t_{k+1} - t_k$ .
2. Расчеты зависимостей токов  $I_{ij}$ , протекающих по проводам, от времени  $\tau$ :  $I_{ij} = I_{ij}(t)$ ,  $i, j - 1 \dots n$ , где  $n$  - число узлов сети.
3. Вычисление температур проводов по интервалам времени  $\delta t_k$ .
4. Расчет показателей процесса плавки гололедной канавки.
5. Учет испарения пленки воды, оставшейся после отпадения ледяной муфты.

6. Моделирование нагрева проводов, свободных от гололеда, с учетом возможного увеличения теплоотдачи за счет мороси или дождя при  $\tau_{\text{окр}} < 0$  °С.
- Для моделирования сложных электрических и тепловых процессов плавки гололеда использовались следующие группы исходных данных (рис. 3):
  - общие параметры для многопроводной линии (рис. 4);
  - данные для конкретного провода с возможностью их выбора из базы с корректировкой отдельных значений (рис. 5);
  - информация по стенке гололеда (рис. 6).

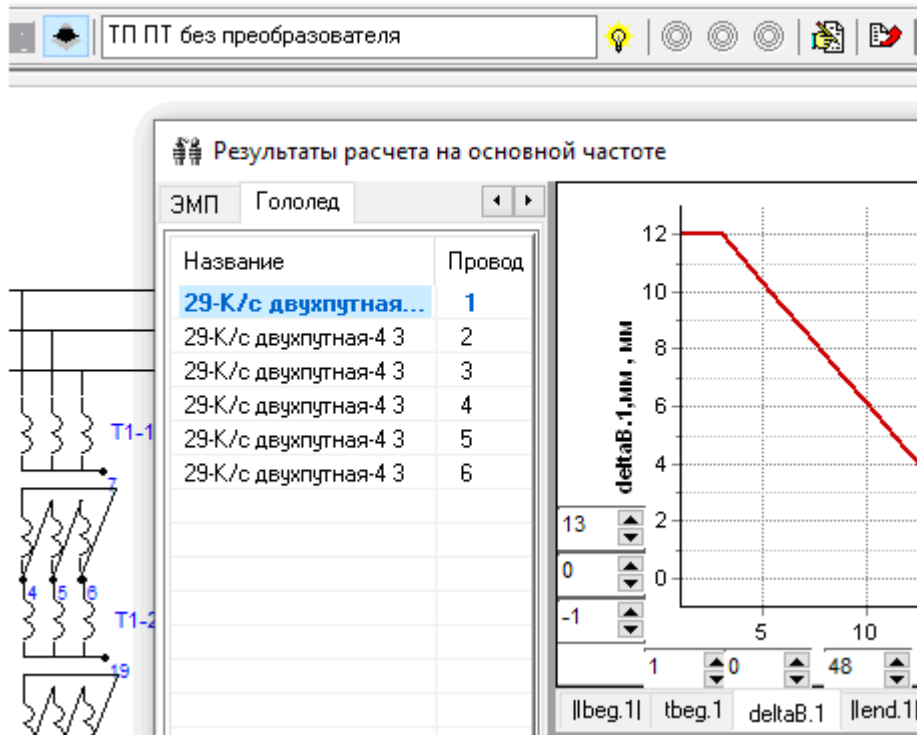


Рис. 2. Окно ПК с результатами моделирования процесса плавки гололеда (б)

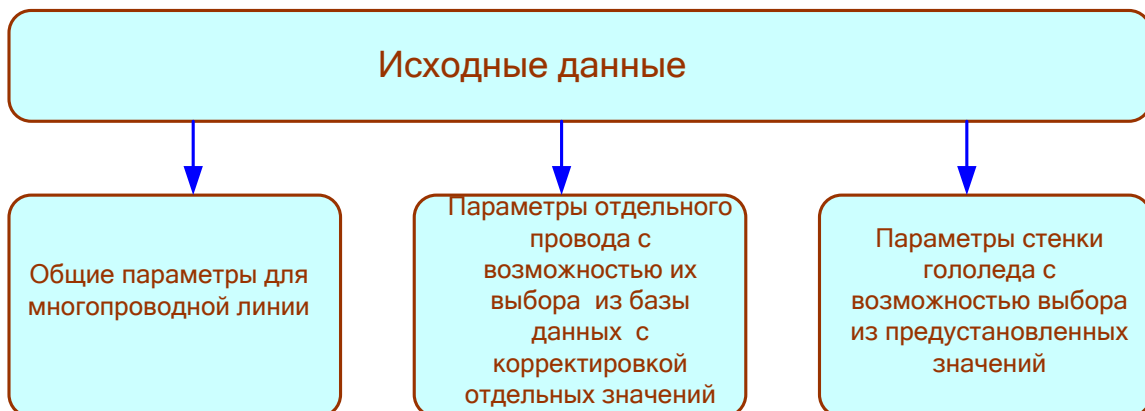


Рис. 3. Группы исходных данных



Рис. 4. Параметры многопроводной линии



Рис. 5. Параметры провода

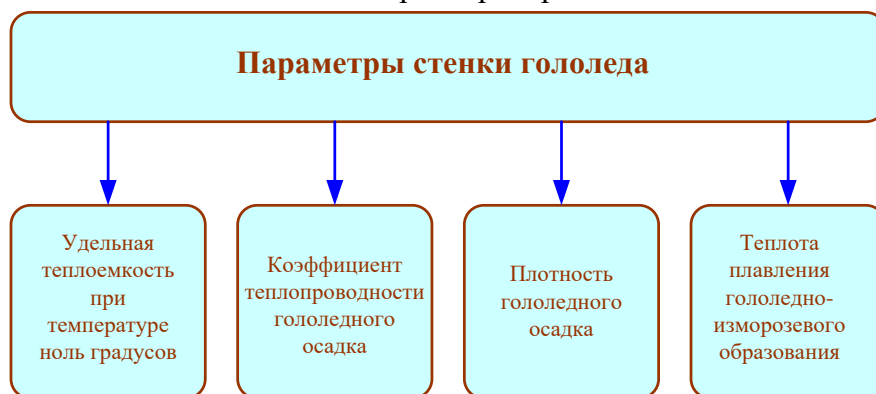
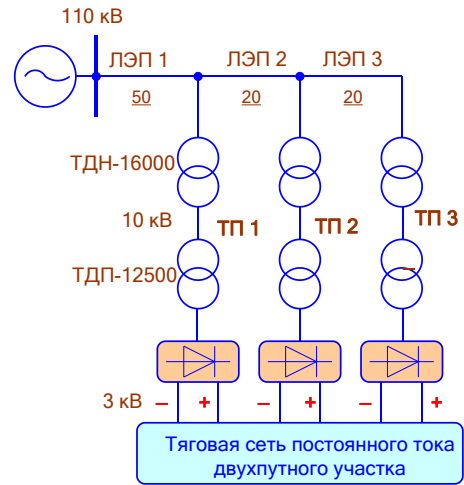


Рис. 6. Параметры стенки гололеда

Расчеты проводились для СЭЖД ПТ, схема которой показана на рис. 7 (б). Плавка гололеда (рис. 7 (а)) выполнялась на левой межподстанционной зоне (МПЗ) путем создания петлевой схемы, приведенной на рис. 8. На правой МПЗ (между ТП 2 и ТП 3) предусматривалось движение поездов.

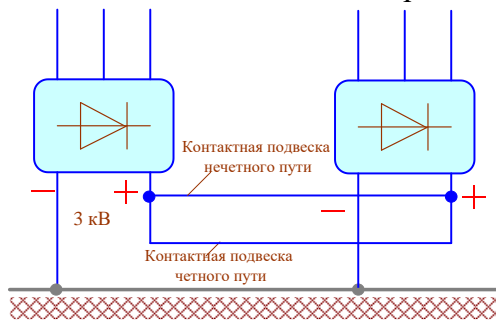
Часть визуального представления разработанной модели показана на рис. 9. Расположение токоведущих частей контактной сети (КС) с четырьмя проводами МФ-100 и двумя тросами ПБСМ-120 представлено на рис. 10. Моделируемая СЭЖД включала три тяговых подстанции и две МПЗ, протяженностью по 20 км. График движения поездов с интервалом в тридцать минут приведен на рис. 11.



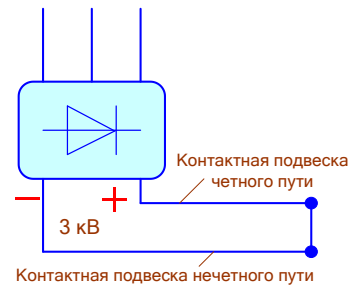
а)

б)

Рис. 7. Гололед на проводах ТС (а) и схема моделируемой сети (б)



а)



б)

Рис. 8. Схемы тяговой сети; а – исходная; б – плавки гололеда

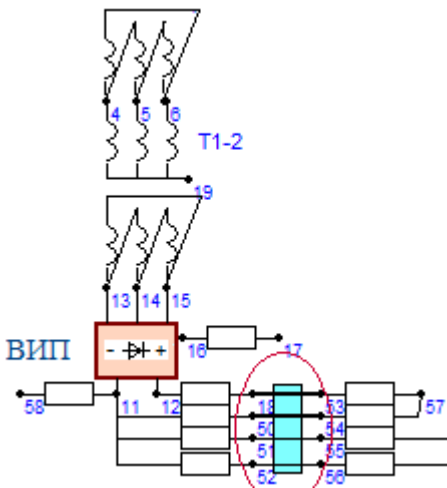


Рис. 9. Фрагмент визуального отображения расчетной модели, отвечающей участку с плавкой гололеда

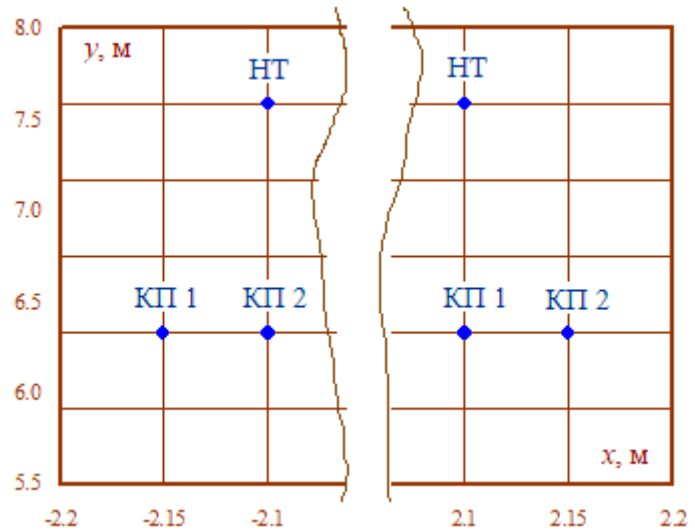


Рис. 10. Расположение токоведущих частей НТ – несущий трос; КП – контактный провод

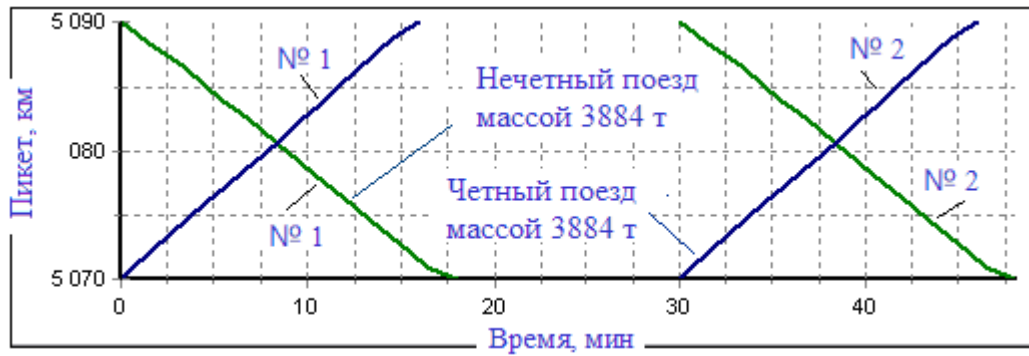


Рис. 11. График движения ЭПС

Результаты моделирования представлены на рис. 12–17. На рис. 12 проиллюстрирована динамика изменений напряжений на пантографах электровозов в двух режимах: исходном по рис. 8 (а); при плавке льда на проводах (рис. 8 (б)). Из представленных на этих рисунках зависимостей  $U = U(t)$  можно сделать вывод о том, что режим устранения гололеда с толщиной стенки в 12 мм на первой МПЗ практически не оказывает влияние на процессы перевозок во второй зоне. Это подтверждает возможность применения петлевой схемы плавки.

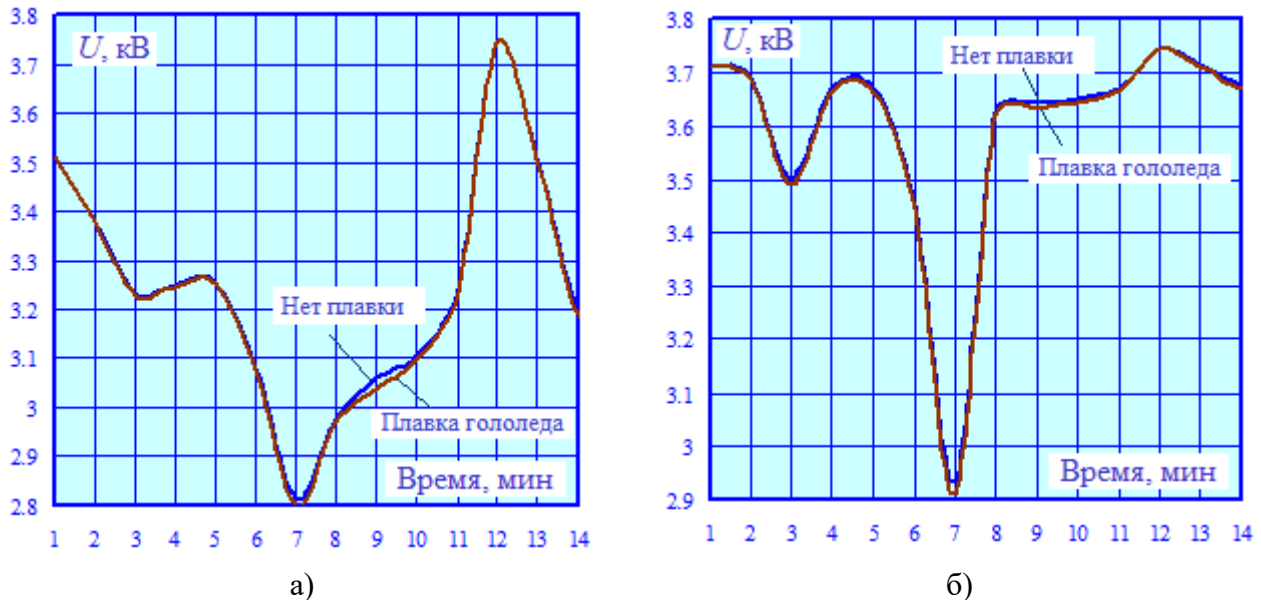


Рис. 12. Напряжения на пантографах электровозов:  
а – нечетный поезд № 1; б – четный поезд № 1

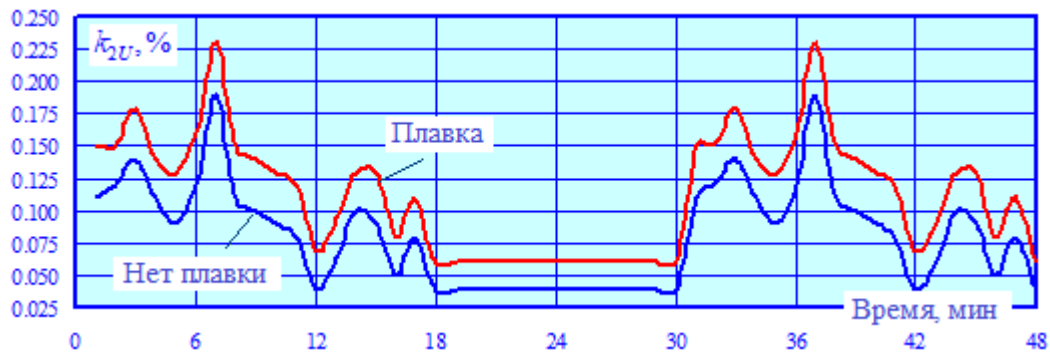


Рис. 13. Вариации коэффициента несимметрии на шинах 110 кВ ТП 3

На рис. 13 показаны графики, характеризующие коэффициенты несимметрии на шинах 110 кВ ТП. Из них видно, что, в отличие от систем тягового электроснабжения переменного тока, в СЭЖД ПТ проблема повышенных уровней  $k_{2U}$  отсутствует. В режимах плавки

гололеда наблюдается незначительный рост максимальных и средних значений этого параметра (рис. 14).

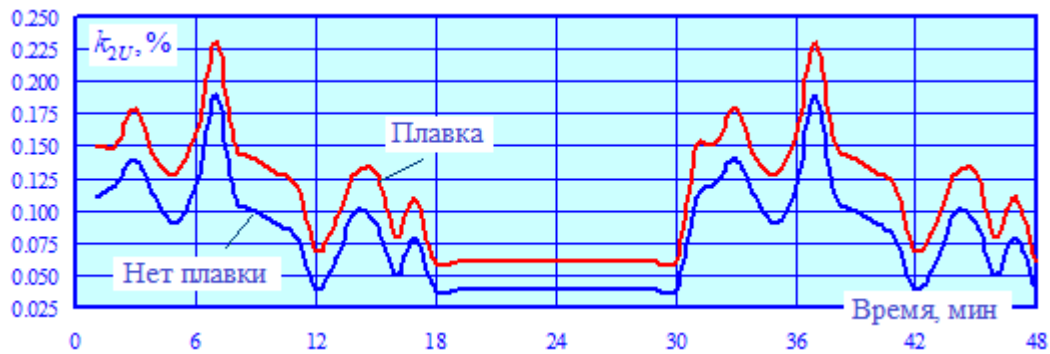


Рис. 14. Вариации коэффициента несимметрии на шинах 110 кВ ТП 3

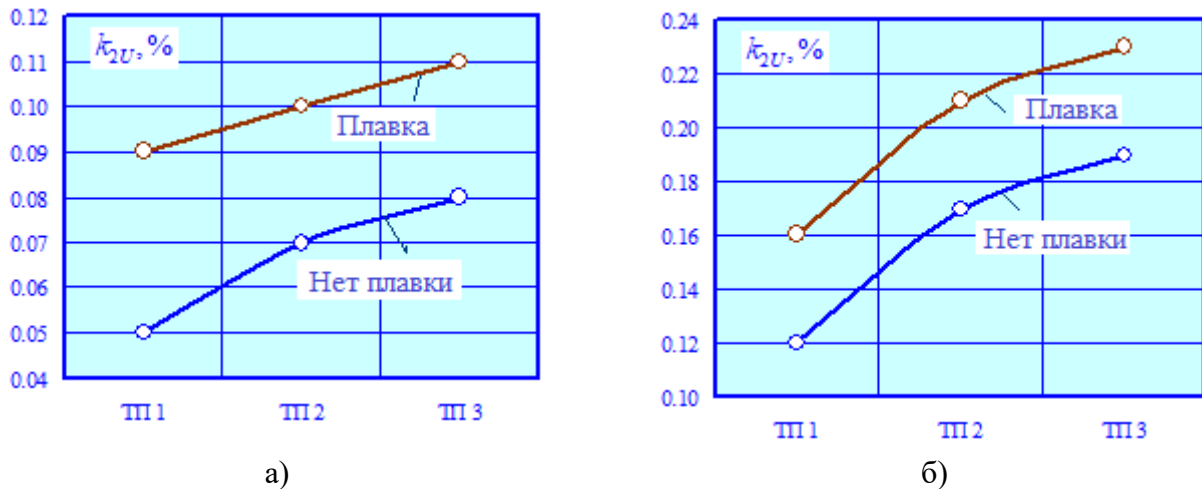


Рис. 15. Коэффициенты несимметрии на вводах 110 кВ тяговых трансформаторов

Преобразовательные агрегаты тяговых подстанций СЭЖД ПТ создают повышенные уровни гармонических искажений на шинах 110 кВ ТП (рис. 16).

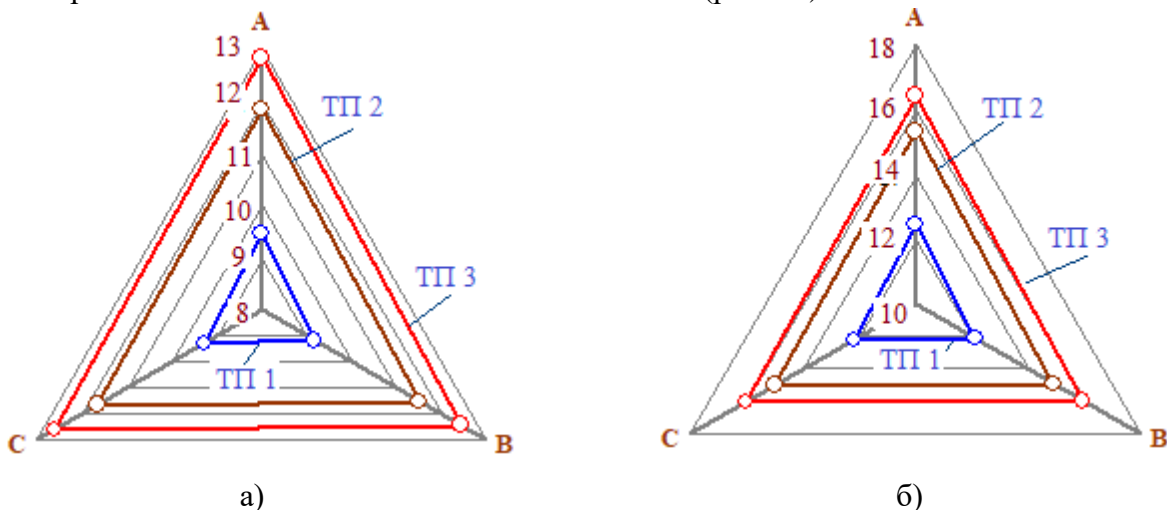


Рис. 16. Коэффициенты гармоник на вводах 110 кВ тяговых трансформаторов

В режиме плавки гололеда максимальные значения  $k_U$  возрастают на 22...23 %. Для снижения гармонических искажений можно эффективно использовать активные фильтры [23], которые не создают опасности возникновения резонансных процессов.

На рис. 17 показаны графики, отвечающие температурам наиболее нагретых точек (ТННТ) трансформаторов ТДН-16000-115/11. Из них видно, что при плавке гололеда максимальное увеличение ТННТ по сравнению с исходным режимом равно 6 °С. Величины



ТННТ не превышают допустимого значения в 98 °С. Это свидетельствует о применимости рассматриваемой схемы плавки гололеда.

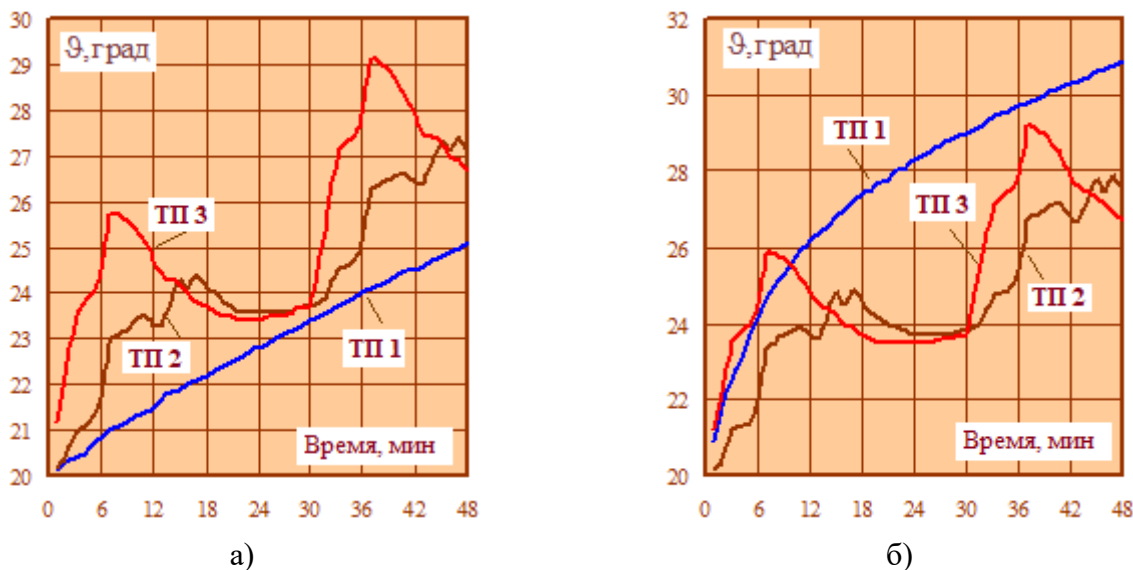


Рис. 17. Температуры наиболее нагретых точек трансформаторов ТДН-16000-115/11: а – исходный режим; б – режим плавки гололеда

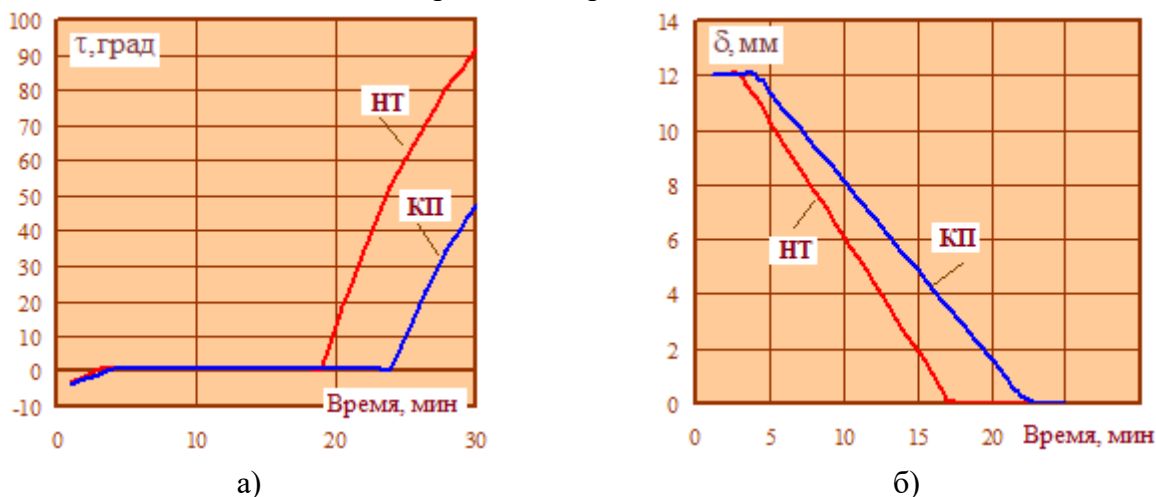


Рис. 18. Динамика процесса плавки гололеда: а – температуры провода; б – толщина стенки гололеда

На рис. 18 приведены результаты расчёта процессов плавки в виде зависимостей:

$$\tau = \tau(t); \delta = \delta(t),$$

где  $\tau$  – температура, град;  $\delta$  – толщина стенки гололедных отложений, мм.

Представленные на рис. 18 зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- гололедные образования удаляются с несущих тросов за 17 минут, а с контактных проводов за 22 минуты;
- температуры токоведущих частей во время плавки не превышают допустимых величин;
- после освобождения ото льда начинается интенсивный рост  $\tau$ , поэтому для исключения перегрева проводов плавку надо завершать через 30 минут.

**Заключение.** Разработаны модели, обеспечивающие определение режимов плавки гололеда в тяговых сетях постоянного тока. Методика их создания является универсальной и может применяться для ТС любого конструктивного исполнения. Алгоритм расчета процессов плавки включал следующие этапы: расчет серии режимов, определяемых графиком движения поездов, на основе подхода, использующего фазные координаты; формирование зависимостей токов, протекающих по проводам, от времени; вычисление



температур их нагрева; расчет показателей процесса плавки гололедной канавки; учет испарения пленки воды, оставшейся после отпадения ледяной муфты; моделирование нагрева проводов, свободных от гололеда, при наличии или отсутствии мороси или дождя.

В результате моделирования подтверждена эффективность применения петлевой схемы подогрева токоведущих частей. Установлено, что гололедные образования удаляются с несущих тросов за 17 минут, а с контактных проводов за 22 минуты. Их температуры во время плавки не превышают допустимых величин. Аналогичный вывод можно сделать и для наиболее нагретых точек трансформаторов ТДН-16000-115/11, что свидетельствует об отсутствии перегрузок.

#### Список источников

1. Дьяков, А.Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем / А. Ф. Дьяков, А. С. Засыпкин, И. И. Левченко. – Пятигорск: РП "Южэнергонадзор", 2000. – 284 с. – EDN YASQMX.
2. Мясоедов Ю.В. Плавка гололеда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация / Ю.В. Мясоедов, О.Н. Коржова // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – № 87. – 2019. – С. 65-66. – EDN LNYWCF.
3. Кольцов А.В. Новые решения в системах плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения 220 и 330 КВ / А.В. Кольцов, Г.Н. Ковтун, Ю.А. Горюшин и др. // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2016. – Т. 12. – № 4. – С. 21-27. – EDN YTXTLT.
4. Yunda W., Gang Z., Zhongbei T. et al. An online thermal deicing method for urban rail transit catenary. IEEE Transactions on transportation electrification, 2021, vol: 7, Iss. 2.
5. Qunwei Jing, Yusheng Zhou, Liang Liu Research on excitation deicing for transmission line with considering the deicing power attenuation. 2015 5th International conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies (DRPT), 2015, DOI:10.1109/DRPT.2015.7432506.
6. Enrico C., Alvaro F. Deicing of the contact lines of the high-speed electric railways: deicing configurations. experimental test results. IEEE Transactions on power delivery, 2014, vol. 29, iss. 6.
7. Kunpeng Ji, Lichun Zhang, Xueping Zhan, Bin Liu, Jialun Yang Analysis of mechanical deicing method for low voltage overhead transmission lines. 2020 IEEE 5th Information technology and mechatronics engineering conference (ITOEC).
8. Luo Yong, Deng Shaoping, Xu Zhengtao, Huang Xianxu. Analysis of deicing jump characteristics of double circuit overhead transmission lines. IEEE 2nd International conference on electrical engineering, Big Data and algorithms (EEBDA), 2023
9. Shiguang Nie, Guangyu Qu, Haifeng Ye, Xiuchen Jiang On-line monitoring system for icing state of overhead transmission line. IEEE, Power engineering and automation conference, 2012.
10. Sarbajit Paul, Sobia Bashir, Junghwan Chang. Design of a novel electromagnetic energy harvester with dual core for deicing device of transmission lines. IEEE Transactions on magnetics, 2019, vol. 55, iss. 2.
11. Mingguan Zhao, Jianlin Hu, Meng Li et al. Early warning model for transmission line deicing jumps based on bp neural network. IEEE Sustainable power and energy conference (iSPEC), 2023.
12. Yushen Hou, Xiuli Wang, Zechen Wu, Zece Zhang Risk-based transmission lines importance calculation under ice storm weather. 5th International conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies (DRPT), 2015.
13. Xiaohong Ma, Zhou Dai, Yusheng Zhou et al. High frequency dielectric property of transmission lines ice. International conference on computer systems, electronics and control (ICCSEC), 2017.
14. Chang Guanghui, Su Sheng, Li Mingming, Chao Daifeng Novel deicing approach of overhead bundled conductors of EHV transmission systems. IEEE Transactions on power delivery, 2009, vol. 24, iss. 3.
15. Sullivan C.R., Petrenko V.F., McCurdy J.D., Kozliouk V. Breaking the ice [transmission line icing]. IEEE Industry applications magazine, 2003, vol. 9, iss. 5.
16. Dong Wang, Min Qi, Qun Zhang et al. Prediction of breaking probability of transmission line galloping under ice storm disaster. IEEE 3rd Conference on energy internet and energy system integration (EI2), 2019,
17. Xiao-Long Luo, Xiang-Jun Zeng, Min Zeng et al. A novel protection method for icing lines of ring network. IEEE PES Innovative smart grid technologies, 2012.
18. Lyuzerui Yuan, Wei Huang, Xinhao Lin et al. Exploration and practice of guarding against icing on distribution network lines in southern region. 7th International conference on smart grid and smart cities (ICSGSC), 2023.
19. Yuan Zhu, Yanjun Tan, Qingjun Huang et al. Research on melting and de-icing methods of lines in distribution Network. IEEE 3rd Conference on energy Internet and energy system integration (EI2), 2019.
20. Jiankun Zhao, Baofeng Yan, Jianli Zhao, Bo Chen. Icing monitoring system of transmission lines based on image and stress. 2nd IEEE Conference on energy Internet and energy system integration (EI2), 2018.

21. Закарюкин, В.П. Моделирование динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // System analysis and mathematical modeling, 2022. – Т. 4. – № 1. – С. 11-37. – DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(1).11-37. – EDN HLXMBJ.
22. Закарюкин В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Москва: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.
23. Крюков А.В. Уменьшение гармонических искажений в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог постоянного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов, К.Х. Нгуен // Промышленная энергетика, 2024. – № 4. – С. 51-57.

**Крюков Андрей Васильевич.** Д.т.н., профессор кафедры Электроэнергетика транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, AuthorID: 1172600, SPIN: 8463-3200, ORCID: 0000-0001-6543-1790, and\_kryukov@mail.ru.

**Черепанов Александр Валерьевич.** К.т.н., доцент кафедры Электроэнергетика транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, AuthorID: 850588, SPIN: 4280-2137, ORCID: 0000-0002-7712-9537, smart\_grid@mail.ru.

**Нгуен Куок Хиеу.** Аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, hieu12829@mail.ru.

UDC 621.311.1

DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.011

## Modeling modes of ice melting in DC traction networks

Andrey V. Kryukov<sup>1,2</sup>, Aleksandr V. Cherepanov<sup>1</sup>, Nguyen Quoc Hieu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Russia Irkutsk, smart\_grid@mail.ru

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

**Abstract.** The purpose of the research presented in this article was to develop digital models for determining the melting modes of ice on the overhead wires of DC railways. The models were implemented in the Fazonord software package, version 5.3.4.9 –2024. The calculation algorithm included the following stages: determination of a series of modes determined by the train schedule, based on an approach using phase coordinates; calculations of the dependences of currents flowing through wires on time; calculation of their heating temperatures over time intervals; calculation of indicators of the process of melting ice-covered grooves; taking into account the evaporation of the water film remaining after the ice sleeve falls off; modeling of heating of wires free from ice, taking into account a possible increase in heat transfer due to drizzle or rain. The initial data necessary for the calculations are described. They include the following groups of parameters: geometric, thermal and electrical. Computer models are presented that take into account the main factors of the processes of heating and removing icing deposits on overhead wires of DC traction networks. The simulated traction power supply system included the following elements: three 110 kV supply power lines; three traction substations; two sections of 3 kV traction network with a length of 20 km. It has been shown that ice is removed from support cables in 17 minutes, and from contact wires in 22 minutes. The heating temperatures of current-carrying parts during melting do not exceed permissible values. The temperatures of the hottest points of traction transformers were determined. It has been shown that melting does not cause unacceptable overheating of transformers. The technique is universal and can be used for traction networks of any design.

**Keywords:** deicing, DC railways, power supply systems

### References

1. Dyakov, A.F., Zasyupkin A.S., Levchenko I.I. Predotvrashcheniye i likvidatsiya gololednykh avariya v elektricheskikh setyakh energosistem [Prevention and elimination of ice accidents in electrical networks of power systems]. Pyatigorsk: RP “Yuzhenergotekhnadzor”, 2000, 284 p.
2. Myasoedov, Yu.V. Korzhova O.N. Plavka gololeda na liniyakh elektroperedachi: metody, innovatsii, ekspluatatsiya [Melting ice on power lines: methods, innovations, operation] Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i ekonomicheskiye nauki [Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and economic sciences], 2019, no. 87, pp. 65-66.
3. Koltsov A.V., Kovtun G.N., Goryushin Yu.A. et al. Novyye resheniya v sistemakh plavki gololeda na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi vysokogo napryazheniya 220 i 330 KV [New solutions in systems for melting ice on overhead power lines of high voltage 220 and 330 kV]. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy [Electrical engineering and information complexes and systems], 2016, vol. 12, no. 4, pp. 21-27.

4. Yunda W., Gang Z., Zhongbei T. et al. An online thermal deicing method for urban rail transit catenary. *IEEE Transactions on transportation electrification*, 2021, vol: 7, Iss. 2.
5. Qunwei Jing, Yusheng Zhou, Liang Liu Research on excitation deicing for transmission line with considering the deicing power attenuation. 2015 5th International conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies (DRPT), 2015, DOI:10.1109/DRPT.2015.7432506.
6. Enrico C., Alvaro F. Deicing of the contact lines of the high-speed electric railways: deicing configurations. experimental test results. *IEEE Transactions on power delivery*, 2014, vol. 29, iss. 6.
7. Kunpeng Ji, Lichun Zhang, Xueping Zhan, Bin Liu, Jialun Yang Analysis of mechanical deicing method for low voltage overhead transmission lines. 2020 IEEE 5th Information technology and mechatronics engineering conference (ITOEC).
8. Luo Yong, Deng Shaoping, Xu Zhengtao, Huang Xianxu. Analysis of deicing jump characteristics of double circuit overhead transmission lines. *IEEE 2nd International conference on electrical engineering, Big Data and algorithms (EEBDA)*, 2023
9. Shiguang Nie, Guangyu Qu, Haifeng Ye, Xiuchen Jiang On-line monitoring system for icing state of overhead transmission line. *IEEE, Power engineering and automation conference*, 2012.
10. Sarbajit Paul, Sobia Bashir, Junghwan Chang. Design of a novel electromagnetic energy harvester with dual core for deicing device of transmission lines. *IEEE Transactions on magnetics*, 2019, vol. 55, iss. 2.
11. Mingguan Zhao, Jianlin Hu, Meng Li et al. Early warning model for transmission line deicing jumps based on bp neural network. *IEEE Sustainable power and energy conference (iSPEC)*, 2023.
12. Yushen Hou, Xiuli Wang, Zechen Wu, Zece Zhang Risk-based transmission lines importance calculation under ice storm weather. 5th International conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies (DRPT), 2015.
13. Xiaohong Ma, Zhou Dai, Yusheng Zhou et al. High frequency dielectric property of transmission lines ice. *International conference on computer systems, electronics and control (ICCSEC)*, 2017.
14. Chang Guanghui, Su Sheng, Li Mingming, Chao Daifeng Novel deicing approach of overhead bundled conductors of EHV transmission systems. *IEEE Transactions on power delivery*, 2009, vol. 24, iss. 3.
15. Sullivan C.R., Petrenko V.F., McCurdy J.D., Kozliouk V. Breaking the ice [transmission line icing]. *IEEE Industry applications magazine*, 2003, vol. 9, iss. 5.
16. Dong Wang, Min Qi, Qun Zhang et al. Prediction of breaking probability of transmission line galloping under ice storm disaster. *IEEE 3rd Conference on energy internet and energy system integration (EI2)*, 2019,
17. Xiao-Long Luo, Xiang-Jun Zeng, Min Zeng et al. A novel protection method for icing lines of ring network. *IEEE PES Innovative smart grid technologies*, 2012.
18. Lyuzerui Yuan, Wei Huang, Xinhao Lin et al. Exploration and practice of guarding against icing on distribution network lines in southern region. 7th International conference on smart grid and smart cities (ICSGSC), 2023.
19. Yuan Zhu, Yanjun Tan, Qingjun Huang et al. Research on melting and de-icing methods of lines in distribution Network. *IEEE 3rd Conference on energy Internet and energy system integration (EI2)*, 2019.
20. Jiankun Zhao, Baofeng Yan, Jianli Zhao, Bo Chen. Icing monitoring system of transmission lines based on image and stress. 2nd IEEE Conference on energy Internet and energy system integration (EI2), 2018.
21. Zakaryukin, V.P., Kryukov A.V. Modelirovaniye dinamiki plavki gololeda na provodakh vozdushnykh liniy elektroperedachi i kontaknykh podvesok tyagovykh setey [Modeling the dynamics of melting ice on the wires of overhead power lines and catenary suspensions of traction networks]. *System analysis and mathematical modeling*, 2022, vol. 4, no.. 1, pp. 11-37, DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(1).11-37.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moscow, Direct-Media, 2023, 156 p.
23. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguyen Q.H. Umen'sheniye garmonicheskikh iskazheniy v elektricheskikh setyakh, pitayushchikh tyagovyve podstantsii zheleznykh dorog postoyannogo toka [Reducing harmonic distortions in electrical networks feeding traction substations of DC railways]. *Promyshlennaya energetika [Industrial energy]*, 2024, no. 4, pp. 51-57.

**Kryukov Andrei Vasilevich.** Doctor of engineering science, professor, Irkutsk state transport university, AuthorID: 1172600, SPIN: 8463-3200, ORCID: 0000-0001-6543-1790, and\_kryukov@mail.ru.

**Cherepanov Aleksandr Valerevich.** Ph.D. of engineering science, associate professor, Irkutsk state transport university, AuthorID: 850588, SPIN: 4280-2137, ORCID: 0000-0002-7712-9537, smart\_grid@mail.ru.

**Nguyen Quoc Hieu.** Postgraduate student, Irkutsk national research technical university, hieu12829@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; одобрена после рецензирования 04.06.2024; принята к публикации 06.06.2024.

The article was submitted 05/28/2024; approved after reviewing 06/04/2024; accepted for publication 06/06/2024.