

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2024-3-38-45

## Моделирование процессов плавки гололеда в тяговых сетях переменного тока

Ю.Н. Булатов<sup>1а</sup>, А.В. Крюков<sup>2,3б</sup>, К.В. Суслов<sup>3,4с</sup>, А.В. Черепанов<sup>2д</sup><sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия<sup>4</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», ул. Красноказарменная, 14, Москва, Россия<sup>а</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>б</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>с</sup> dr.suslov@yandex.ru, <sup>д</sup> smart\_grid@mail.ru<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>

Статья поступила 05.08.2024, принята 16.09.2024

Цель представленных в статье исследований состоит в разработке цифровых моделей для определения режимов плавки гололеда на проводах контактных подвесок железных дорог переменного тока. Они были реализованы в программном комплексе Fazonord, версия 5.3.5.0–2024. Алгоритм 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 включали 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) переменного тока. Моделируемая система электроснабжения включала следующие элементы: 3 питающих ЛЭП 220 кВ и такое же число тяговых подстанций (ТП); 2 участка ТС 25 кВ протяженностью по 50 км. Рассмотрены 2 схемы плавки: петлевая, при питании от одной ТП, и разнофазная, с подключением к разным фазам смежных ТП. Показано, что гололед в первой схеме удаляется с несущих тросов за 22 мин, а с контактных проводов — за 28 мин. Для второй схемы эти показатели соответственно равны 36 и 45 мин. Температуры нагрева токоведущих частей и наиболее нагретых точек трансформаторов во время плавки не превышают допустимых величин. Методика является универсальной и может применяться для тяговых сетей различного исполнения, включая перспективные конструкции повышенного напряжения.

**Ключевые слова:** удаление гололедных отложений; железные дороги переменного тока; системы электроснабжения.

## Modeling of ice melting processes in AC traction networks

Yu.N. Bulatov<sup>1а</sup>, A.V. Kryukov<sup>2,3б</sup>, K.V. Suslov<sup>3,4с</sup>, A.V. Cherepanov<sup>2д</sup><sup>1</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia<sup>4</sup> National Research University "MEI"; 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, Russia<sup>а</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>б</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>с</sup> dr.suslov@yandex.ru, <sup>д</sup> smart\_grid@mail.ru<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>

Received 05.08.2024, accepted 16.09.2024

The purpose of the research presented in the article is to develop digital models to determine the melting modes of ice on the wires of overhead contact suspensions of AC railways. They are implemented in the Fazonord software package, version 5.3.5.0–2024. The algorithm includes the following stages: calculation of a series of modes determined by the train schedule, based on an approach using phase coordinates; formation of time dependences of currents flowing through wires; calculation of their heating temperatures; modeling the melting process of an ice-covered groove; taking into account the evaporation of the water film remaining after the ice sleeve falls off; modeling of heating of current-carrying parts without ice crust in the presence or absence of drizzle and rain. The initial data necessary for the calculations are described. They include the following groups of parameters: geometric, thermal and electrical ones. Computer models are presented that take into account the main factors of the processes of heating and removing icing deposits on over-

head wires of AC traction networks. The simulated power supply system includes the following elements: three 220 kV supply power lines and the same number of traction substations; two sections of 25 kV traction network with a length of 50 km. Two smelting schemes are considered: loop when powered from one substation and multi-phase, with connection to different phases of adjacent substations. It is shown that ice in the first scheme is removed from the supporting cables in 22 minutes, and from the contact wires in 28 minutes. For the second scheme, these indicators are respectively 36 and 45 minutes. The heating temperatures of current-carrying parts and the hottest points of transformers during melting do not exceed permissible values. The technique is universal and can be used for traction networks of various designs, including advanced high-voltage designs.

**Keywords:** deicing; AC railways; power supply systems.

**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]:

- сближению токоведущих частей на недопустимые расстояния;
- 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 противогололедного 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]. Высококачественные 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 токоведущих частей кольцевой сети предложен в [17]. Практика борьбы с гололедом в распределительных сетях описана в [18]. Результаты исследования методов плавания льда на ЛЭП среднего напряжения представлены в [19]. Система мониторинга обледенения линий электропередачи предложена в [20].

При эксплуатации ТС переменного 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 (СЭЖД) переменного тока в режимах плавки гололеда [21].

Для реализации тепловых методов борьбы используется подогрев проводов токами, возникающими при питании участка контактной сети от разных фаз одной (рис. 1) или двух смежных (рис. 2) тяговых подстанций.

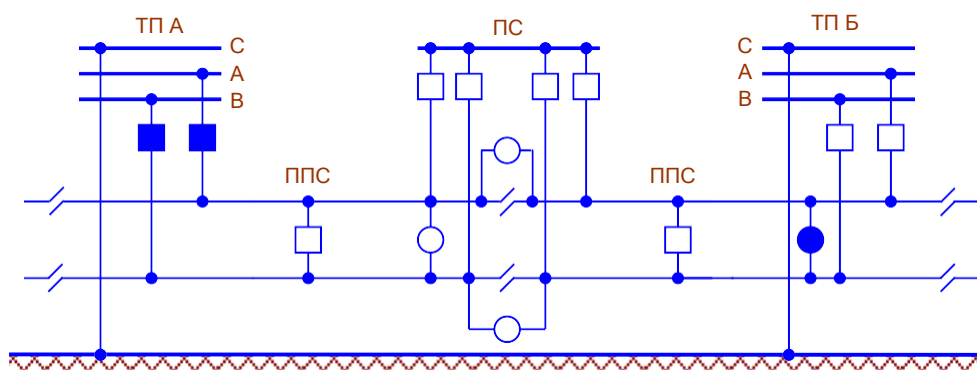


Рис. 1. Петлевая схема питания участка контактной сети от разных фаз одной ТП

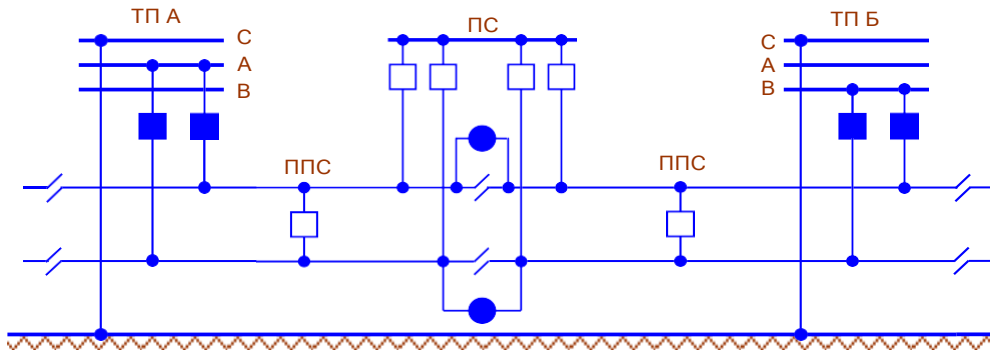


Рис. 2. Разнофазная схема питания тяговой сети от смежных подстанций

**Методика и результаты моделирования.**

Алгоритм моделирования процессов плавки гололеда, подробно описанный в [21] и реализованный в программном комплексе *Fazonord* [22; 23], версия 5.3.5.0–2024, включает следующие этапы:

δ 1. Определение серии режимов с дискретностью  $t_k = t_{k+1} - t_k$ .

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. Вычисление 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.

Для моделирования сложных электрических и тепловых процессов плавки гололеда использовались следующие группы исходных данных:

- общие параметры для многопроводной линии;
- данные для конкретного провода с возможностью их выбора из базы с корректировкой отдельных значений;
- информация по стенке гололеда.

Расчеты проводились для СЭЖД, схема которой показана на рис. 3. Плавка гололеда выполнялась на левой межподстанционной зоне (МПЗ) путем создания

схем, приведенных на рис. 1 и 2. На правой МПЗ (между ТП 2 и ТП 3) предусматривалось движение поездов.

Моделируемая СЭЖД включала 3 тяговых подстанции и 2 МПЗ, протяженностью по 20 км.

220 кВ

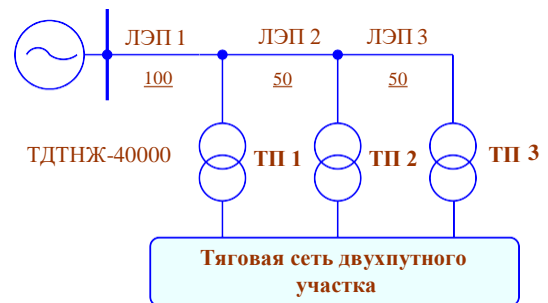
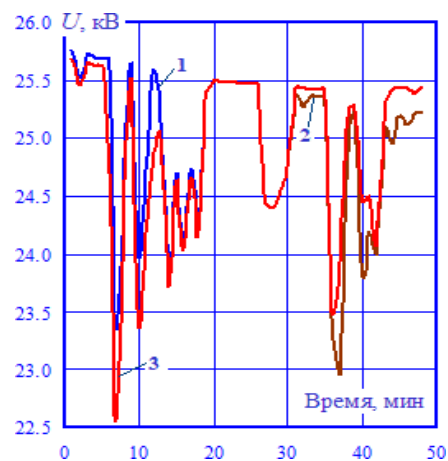


Рис. 3. Схема нормального режима

Результаты моделирования представлены на рис. 4–14. На рис. 4 проиллюстрирована динамика изменений напряжений на пантографах электровозов при плавке льда по схемам, показанным на рис. 1 и 2. Из представленных зависимостей  $U = U(t)$  можно сделать вывод о том, что режим устранения гололеда с толщиной стенки 12 мм на первой МПЗ практически не оказывает влияние на процессы перевозок во второй зоне. Это подтверждает возможность применения рассмотренных схем плавки.



а)



б)

Рис. 4. Напряжения на пантографах электровозов: а — петлевая схема; б — разнофазная.

Цифрами обозначены номера составов

На рис. 5 приведены результаты определения коэффициентов несимметрии  $k_{2U}$  на шинах 220 кВ ТП.

Из них видно, что с ростом удаленности от источника питания несимметрия возрастает.

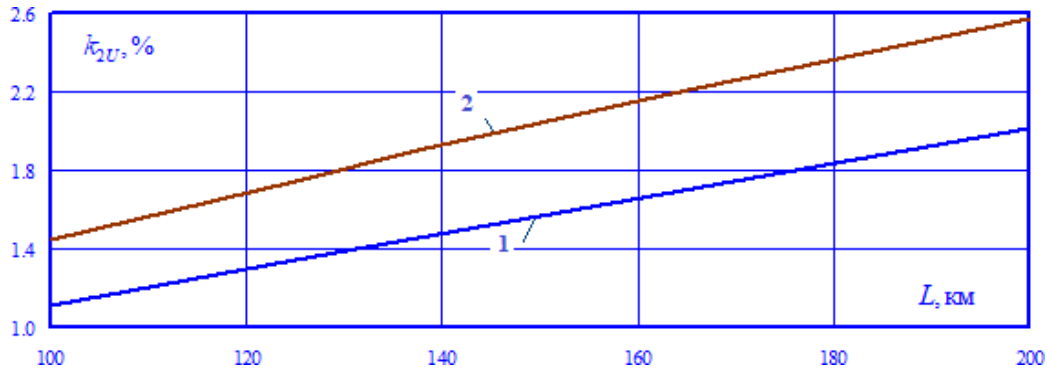


Рис. 5. Зависимости  $k_{2U} = k_{2U}(L)$ :  $L$  — расстояние от подстанции ЭЭС; 1 — петлевая схема; 2 — разнофазная

Выпрямительные электровозы создают повышенные уровни гармонических искажений на шинах 220 кВ ТП (рис. 6) со значительным превышением предельно

допустимых значений. Для снижения уровней высших гармоник можно использовать активные и пассивные фильтры [24].

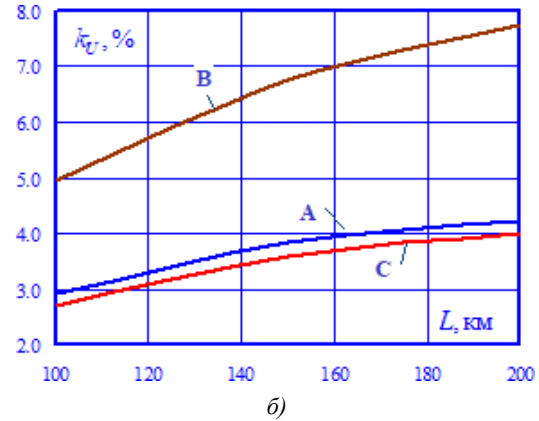
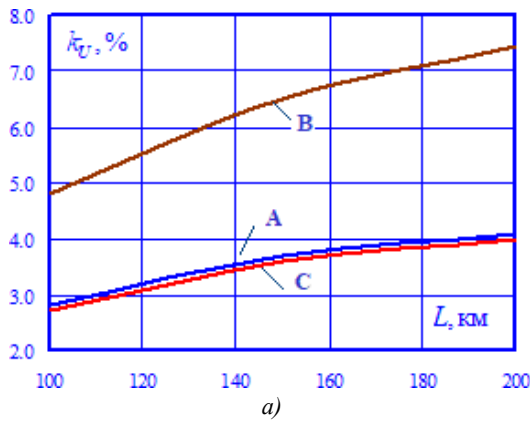


Рис. 6. Зависимости  $k_U^{(max)} = k_U^{(max)}(L)$ :  $L$  — расстояние от подстанции ЭЭС; а — петлевая схема; б — разнофазная

На рис. 7 показаны зависимости потоков  $P$  и потерь  $\Delta P$  в ЛЭП 2 активной мощности от времени. Из них видно, что средние значения  $\Delta P$  в разнофазной схеме

выше аналогичных показателей для петлевой в 5 раз. Для потоков  $P$  это соотношение равно 2,2.

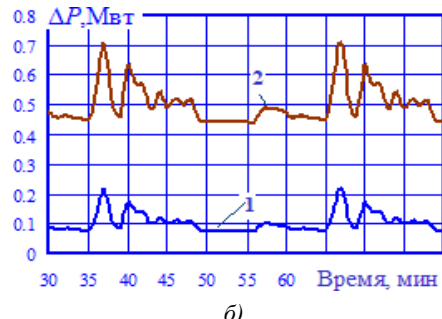
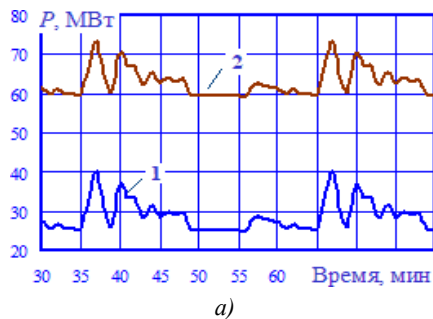


Рис. 7. Потоки активной мощности (а) и потери (б) в ЛЭП 2: 1 — петлевая схема; 2 — разнофазная

Для потерь мощности  $P$  в тяговой сети МПЗ, на которой осуществляется плавка, наблюдается обратная картина (рис. 8). Средние значения  $P$  для петлевой

схемы выше аналогичных показателей для разнофазной на 10 %. Графики  $P = P(t)$  для тяговых трансформаторов представлены на рис. 9.

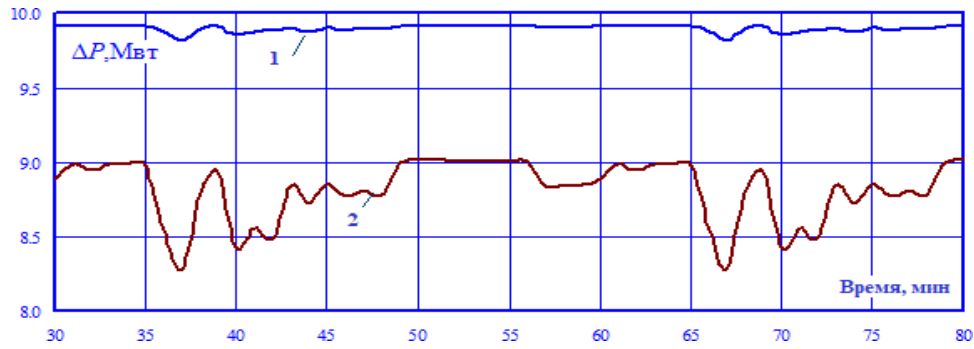


Рис. 8. Потери активной мощности в ТС, на которой осуществляется плавка: 1 — петлевая схема; 2 — разнофазная

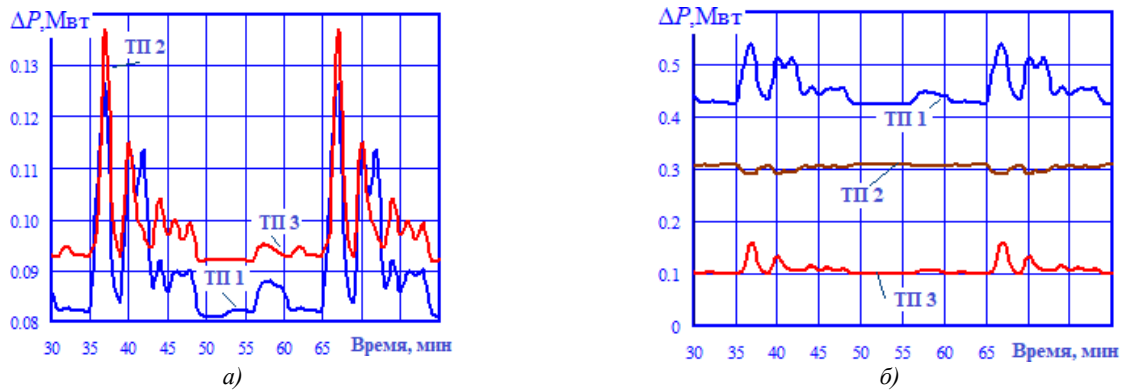


Рис. 9. Потери в тяговых трансформаторах: а — петлевая схема; б — разнофазная

Из рис. 9 видно, что графики  $\Delta P = \Delta P(t)$  для трансформаторов в рассматриваемых схемах плавки заметно отличаются; при этом суммарные потери по трем ТП в разнофазной схеме выше аналогичного показателя для петлевой в 2,3 раза.

На рис. 10 показаны зависимости, отвечающие температурам  $\vartheta$  наиболее нагретых точек (ТНТ) трансформаторов ТДТНЖ-40000. Из них видно, что величины ТНТ не превышают допустимого значения в

98 °С. Это свидетельствует о применимости рассматриваемых схем плавки гололеда. Средние значения  $\vartheta$  для ТП 1 в рассматриваемых схемах плавки практически одинаковы, а для ТП 3 при разнофазном подключении на 12 % выше. Для ТП 2 этот показатель при петлевой структуре в 2,3 раза ниже, чем в разнофазной.

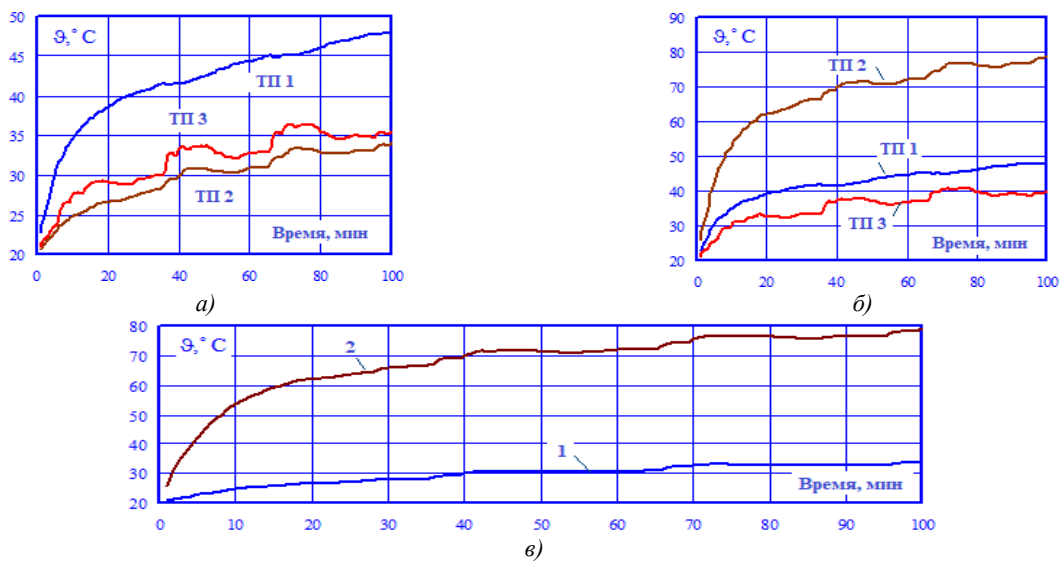


Рис. 10. Температуры наиболее нагретых точек трансформаторов ТДТНЖ-40000 (а), (б) и сравнение для ТП 2 (в): 1 — петлевая схема; 2 — разнофазная

На рис. 11 приведены результаты определения напряженностей  $H_{\max}$  магнитного поля, создаваемого ТС первой МПЗ в междупутье на высоте 1,8 м. Из него видно, что из-за разной направленности токов в проводах контактных подвесок четного и нечетного путей петлевой схемы происходит компенсация  $H_{\max}$ ; при этом отношение максимумов этого показателя для разнофазной и петлевой схем равно 4,2.

На рис. 12–14 приведены результаты моделирования процессов плавки гололеда при использовании петлевой и

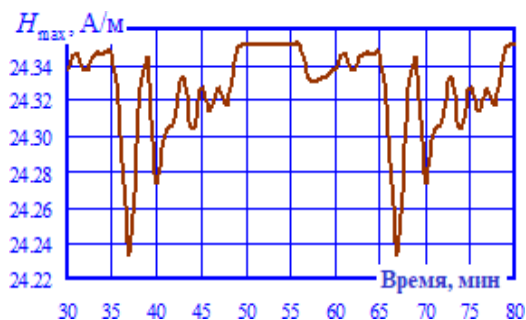
разнофазной схем. На них представлены следующие зависимости:

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

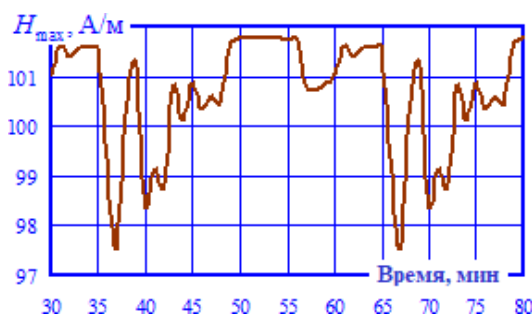
$$\delta = \delta(t);$$

$$I = I(t),$$

где  $\tau$  — температура, град.;  $\delta$  — толщина стенки гололедных отложений, мм;  $I$  — токи.

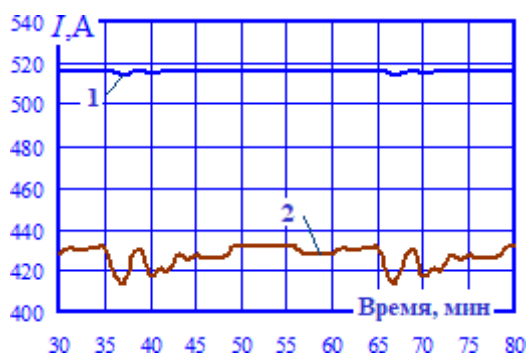


а)



б)

Рис. 11. Напряженности магнитного поля, создаваемого ТС, на которой идет плавка: а — петлевая схема; б — разнофазная

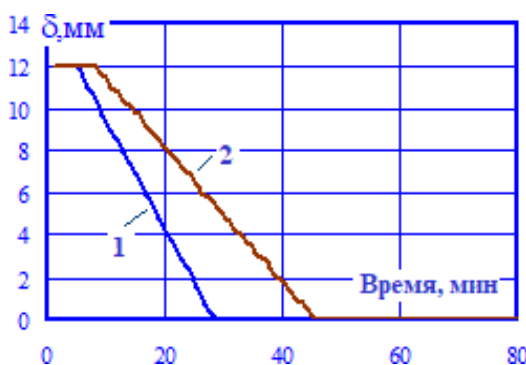


а)

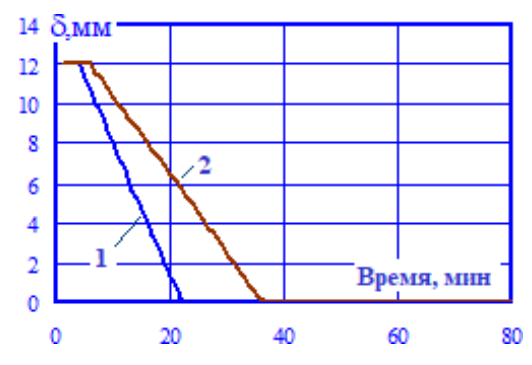


б)

Рис. 12. Токи, протекающие по проводам контактной сети (КС): а — петлевая схема; б — разнофазная; 1 — контактный провод; 2 — несущий трос



а)



б)

Рис. 13. Толщина стенки гололеда: а — контактный провод (КП); б — несущий трос (НТ); 1 — петлевая схема; 2 — разнофазная

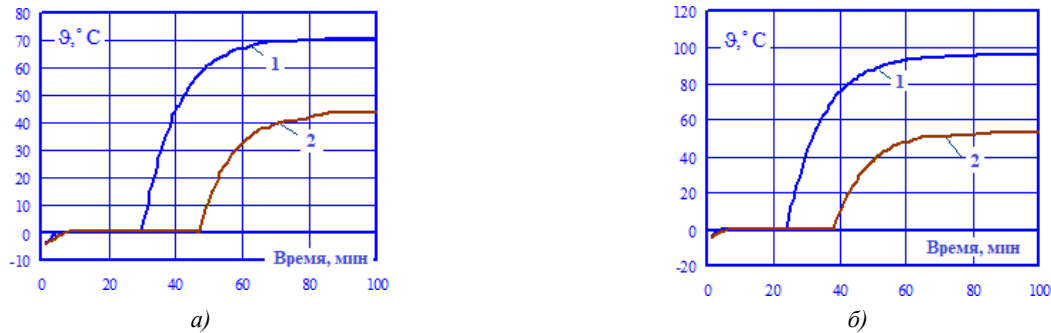


Рис. 14. Температура проводов: а — КП; б — НТ; 1 — петлевая схема; 2 — разнофазная

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- гололед в петлевой схеме удаляется с несущих тросов за 22 мин, а с контактных проводов — за 28 мин. Для второй схемы эти показатели соответственно равны 36 и 45 мин;
- температура токоведущих частей во время плавки не превышает допустимых величин.

**Заключение.** Разработаны модели, обеспечивающие определение режимов плавки гололеда в тяговых сетях переменного тока. Методика их создания является универсальной и может применяться для ТС любого конструктивного исполнения. На основе моделирования

формируется набор данных, характеризующих следующие важные для практики аспекты:

- скорость процессов удаления гололеда с проводов контактных подвесок;
- токи, протекающие по проводам ЛЭП и ТС, а также по обмоткам тяговых трансформаторов;
- потери активной мощности в элементах тягового и внешнего электроснабжения;
- температура наиболее нагретых точек трансформаторов и др.

На основе этих данных могут быть реализованы процедуры многокритериального сравнения различных схем плавки.

#### Литература

1. Дьяков А.Ф., Засыпкин А.С., Левченко И.И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. Пятигорск: РП «Южэнергогидроэнерго», 2000. 284 с.
2. Мясоедов Ю.В., Коржова О.Н. Плавка гололеда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация // Вестн. Амурского гос. ун-та. Сер. Естественные и экономические науки. 2019. № 87. С. 65-66.
3. Кольцов А.В., Ковтун Г.Н., Горюшин Ю.А. Новые решения в системах плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения 220 и 330 кВ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12, № 4. С. 21-27.
4. Yunda Wang, Gang Zhang, Zhongbei Tian, Ruichang Qiu, Zhigang Liu. An Online Thermal Deicing Method for Urban Rail Transit Catenary. IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. V. 7, iss. 2. Publisher: IEEE.
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. Publisher: IEEE.
6. Cinieri Enrico, Fumi Alvaro. Deicing of The Contact Lines of the High-Speed Electric Railways: Deicing Configurations. Experimental Test Results. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. V. 29, iss. 6. Publisher: IEEE.
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), 2020. Publisher: IEEE.
8. Luo Yong, Deng Shaoping, Xu Zhengtao, Huang Xianxu. Analysis of Deicing Jump Characteristics of Double Circuit Overhead Transmission Lines. 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), 2023. Publisher: IEEE.
9. Shiguang Nie, Guangyu Qu, Haifeng Ye, Xiuchen Jiang. On-line monitoring system for icing state of overhead transmission line. 2012 Power Engineering and Automation Conference, 2012. Publisher: IEEE.
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. V. 55, iss. 2. Publisher: IEEE.
11. Mingguan Zhao, Jianlin Hu, Meng Li, Yang Yang, Xinsheng Dong, Hongfei Deng, Yijie Liu, Weiyi Zeng, Peiyu Qin. Early Warning Model for Transmission line Deicing Jumps Based on BP Neural Network. 2023. IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), 2023. Publisher: IEEE.
12. Yushen Hou, Xiuli Wang, Zechen Wu, Zece Zhang. Risk-based transmission lines importance calculation under ice storm weather. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015. Publisher: IEEE.
13. Xiaohong Ma, Zhou Dai, Yusheng Zhou, Tingfang Yang, Qiang Xiong. High Frequency Dielectric Property of Transmission Lines Ice. 2017. International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), 2017. Publisher: IEEE.
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. V. 24, iss. 3. Publisher: IEEE.
15. Sullivan C.R., Petrenko V.F., McCurdy J.D., Koziouk V. Breaking the ice [transmission line icing]. IEEE Industry Applications Magazine. 2003. V. 9, iss. 5. Magazine Article Publisher: IEEE.
16. Dong Wang, Min Qi, Qun Zhang, Shengtao Liao, Ben Niu, Jiawei Hou. Prediction of Breaking Probability of Transmission Line Galloping Under Ice Storm Disaster. 2019. IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2019. Publisher: IEEE.

17. Xiao-Long Luo, Xiang-Jun Zeng, Min Zeng, Zhen Liao, Dong-Hong Zhao. A novel protection method for icing lines of ring network. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012. Publisher: IEEE.
18. Lyuzerui Yuan, Wei Huang, Xinhao Lin, Yue Li, Shuyin Duan, Bing Gao. Exploration and practice of guarding against icing on distribution network lines in southern region. 2023 7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), 2023. Publisher: IEEE.
19. Yuan Zhu, Yanjun Tan, Qingjun Huang, Fuyong Huang, Siguo Zhu, Xinguo Mao. Research on Melting and De-icing Methods of Lines in Distribution Network. 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2019. Publisher: IEEE.
20. Jiankun Zhao, Baofeng Yan, Jianli Zhao, Bo Chen. Icing Monitoring System of Transmission Lines Based on Image and Stress. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018. Publisher: IEEE.
21. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей // System Analysis and Mathematical Modeling. 2022. V. 4, № 1. P. 11-37.
22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. 273 с.
24. Крюков А.В., Сулов К.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиеу. Уменьшение гармонических искажений в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог постоянного тока // Промышленная энергетика. 2024. № 4. С. 51-57.
- Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), 2023. Publisher: IEEE.
9. Shiguang Nie, Guangyu Qu, Haifeng Ye, Xiuchen Jiang. On-line monitoring system for icing state of overhead transmission line. 2012 Power Engineering and Automation Conference, 2012. Publisher: IEEE.
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. V. 55, iss. 2. Publisher: IEEE.
11. Mingguan Zhao, Jianlin Hu, Meng Li, Yang Yang, Xinsheng Dong, Hongfei Deng, Yijie Liu, Weiyi Zeng, Peiyu Qin. Early Warning Model for Transmission line Deicing Jumps Based on BP Neural Network. 2023. IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), 2023. Publisher: IEEE.
12. Yushen Hou, Xiuli Wang, Zechen Wu, Zece Zhang. Risk-based transmission lines importance calculation under ice storm weather. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015. Publisher: IEEE.
13. Xiaohong Ma, Zhou Dai, Yusheng Zhou, Tingfang Yang, Qiang Xiong. High Frequency Dielectric Property of Transmission Lines Ice. 2017. International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), 2017. Publisher: IEEE.
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. V. 24, iss. 3. Publisher: IEEE.
15. Sullivan C.R., Petrenko V.F., McCurdy J.D., Kozliouk V. Breaking the ice [transmission line icing]. IEEE Industry Applications Magazine. 2003. V. 9, iss. 5. Magazine Article Publisher: IEEE.
16. Dong Wang, Min Qi, Qun Zhang, Shengtao Liao, Ben Niu, Jiawei Hou. Prediction of Breaking Probability of Transmission Line Galloping Under Ice Storm Disaster. 2019. IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2019. Publisher: IEEE.
17. Xiao-Long Luo, Xiang-Jun Zeng, Min Zeng, Zhen Liao, Dong-Hong Zhao. A novel protection method for icing lines of ring network. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012. Publisher: IEEE.
18. Lyuzerui Yuan, Wei Huang, Xinhao Lin, Yue Li, Shuyin Duan, Bing Gao. Exploration and practice of guarding against icing on distribution network lines in southern region. 2023 7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), 2023. Publisher: IEEE.
19. Yuan Zhu, Yanjun Tan, Qingjun Huang, Fuyong Huang, Siguo Zhu, Xinguo Mao. Research on Melting and De-icing Methods of Lines in Distribution Network. 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2019. Publisher: IEEE.
20. Jiankun Zhao, Baofeng Yan, Jianli Zhao, Bo Chen. Icing Monitoring System of Transmission Lines Based on Image and Stress. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018. Publisher: IEEE.
21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. 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. V. 4, № 1. P. 11-37.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 p.
23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta, 2005. 273 p.
24. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguen Kuok Hieu. Reduction of harmonic distortion in electrical networks supplying traction substations of direct current railways // Industrial Power Engineering. 2024. № 4. P. 51-57.

#### References

1. D'yakov A.F., Zasyupkin A.S., Levchenko I.I. 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. Melting ice on power lines: methods, innovations, operation // Vestn. Amurskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennyye i ekonomicheskie nauki. 2019. № 87. P. 65-66.
3. Kol'cov A.V., Kovtun G.N., Goryushin Yu.A. New solutions in systems for melting ice on overhead power lines of high voltage 220 and 330 kV // Electrical and data processing facilities and systems. 2016. V. 12, № 4. P. 21-27.
4. Yunda Wang, Gang Zhang, Zhongbei Tian, Ruichang Qiu, Zhigang Liu. An Online Thermal Deicing Method for Urban Rail Transit Catenary. IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. V. 7, iss. 2. Publisher: IEEE.
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. Publisher: IEEE.
6. Cinieri Enrico, Fumi Alvaro. Deicing of The Contact Lines of the High-Speed Electric Railways: Deicing Configurations. Experimental Test Results. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. V. 29, iss. 6. Publisher: IEEE.
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), 2020. Publisher: IEEE.
8. Luo Yong, Deng Shaoping, Xu Zhengtao, Huang Xianxu. Analysis of Deicing Jump Characteristics of Double Circuit Overhead Transmission Lines. 2023 IEEE 2nd International