

Моделирование режимов плавки гололёда на грозозащитных тросах высоковольтных линий электропередачи

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2, 3b}, И.С. Овечкин^{2c}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c iliaov2015@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>

Статья поступила 05.06.2025, принята 09.09.2025

В статье описаны исследования, целью которых являлась разработка цифровых моделей систем электроснабжения для определения режимов плавки гололёдно-изморозевых отложений (ГИО) на грозозащитных тросах (ГЗТ) ЛЭП 220 кВ. Предполагалось, что от данных ЛЭП питаются тяговые нагрузки, создаваемые движением двенадцати поездов массой 3000 тонн в нечётном и чётном направлениях с интервалом в 15 мин. Для достижения поставленной цели использовался программный продукт Fazonord AC-DC, версия 5.3.7.9-2025, позволяющий корректно моделировать режимы плавки гололёда. Плавка осуществлялась подогревом троса током, который образуется в замкнутом контуре «трос – земля» за счёт ЭДС, наводимой фазными проводами. Учитывалась динамика изменений этого тока, вызванная вариацией тяговых нагрузок при движении поездов по участку с реальными планом и профилем пути, а также осуществлялся контроль величины тока плавки, температуры, времени и толщины стенки гололёда. Для уменьшения индуктивного сопротивления контура «трос – земля» использовалась батарея конденсаторов с ёмкостным сопротивлением в 1,5 Ом. Результаты моделирования показали, что общее время плавки составило 35 минут. После расплавления гололёда температура троса увеличилась до значений, близких к 1 градусу. Зависимость тока, протекающего по грозозащитному тросу, от времени отличалась резко нелинейным характером. Максимальное значение тока достигало 112 А, а минимальное 99 А. Разработанные по результатам исследования цифровые модели обеспечивают корректный учёт всех факторов, влияющих на режимы плавки гололёда. Их можно использовать на практике для выбора наиболее эффективных мероприятий для устранения гололёда на ГЗТ. Предлагаемый подход является универсальным и применим для ЛЭП любого конструктивного исполнения.

Ключевые слова: плавка гололёдно-изморозевых отложений; грозозащитные тросы; моделирование.

Modeling of ice melting modes on lightning protection cables of high-voltage power transmission lines

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2, 3b}, I.S. Ovechkin^{2c}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c iliaov2015@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>

Received 05.06.2025, accepted 09.09.2025

The article describes the research aimed at developing digital models of power supply systems to determine the modes of melting ice and frost deposits on ground-wires of 220 kV power transmission lines. It is assumed that these power transmission lines supply traction loads created by the movement of twelve trains weighing 3000 tons in odd and even directions with an interval of 15 minutes. In order to achieve this goal, the Fazonord AC-DC software product, version 5.3.7.9-2025, is used, which allows for correct modeling of ice melting modes. Ice melting is carried out by heating the cable with current, which is formed in the closed "cable-ground" circuit due to the EMF induced by the phase wires. The dynamics of this current changes caused by variations in traction loads when trains move along a section with a real track plan and profile are taken into account, and the melting current value, temperature, time and ice wall thickness are monitored. A capacitor bank with a capacitive resistance of 1.5 Ohm is used to reduce the inductive resistance of the cable-to-ground circuit. The simulation results show that the total ice melting time is 35 minutes. After melting the ice, the wire temperature increases to values close to 1 degree. The dependence of the current flowing through the lightning protection cable on time is sharply nonlinear. The maximum current value reaches 112 A, and the minimum 99 A. The digital models developed based on the research results provide correct consideration of all factors affecting the ice melting modes. They can be used in practice to select the most effective measures to eliminate ice on lightning protection cables. The proposed approach is universal and applicable to power transmission lines of any design.

Keywords: melting of ice and frost deposits; lightning protection cables; modeling.

Введение. В ряде северных и горных регионов России возникают тяжёлые гололёдно-изморозевые образования (ГИО) на проводах воздушных линий (ВЛ) в зимний период (рис. 1). Появлению гололёда способствуют следующие факторы:

- повышенная влажность;
- холодные ветры;
- резкие перепады температуры.



Рис. 1. Гололёд на проводах ЛЭП

Толщина стенки гололёда часто достигает 10 см и более, а вес обледеневших проводов возрастает в несколько раз, что создает дополнительные механические нагрузки на провода, изоляторы, поддерживающие конструкции и опоры. Значительные образования льда на проводах приводят к следующим авариям:

- обрыв питающих проводов;
- разрушение изоляторов, арматуры и опор (рис. 2).



Рис. 2. Разрушение опор при гололёде

Провода освобождаются от намёрзшего на них снега неравномерно, что может привести к резкому «подскоку», что способно привести к перекрытиям воздушных промежутков; данному процессу способствует разница в стрелах провеса в пролётах (рис. 3). По причине образования льда возможна «пляска проводов», в результате которой происходит их схлестывание.



Рис. 3. Различия стрел провеса проводов при гололёде

Гололёдные аварии приводят к значительным ущербам энергетических компаний и потребителей электроэнергии. Для ликвидации таких аварий требуется более длительное время, чем для аварий, вызванных другими причинами. В некоторых случаях наблюдается десятикратное различие.

На перерывы в электроснабжении потребителей по причине ГИО приходится порядка 17...20 % от общего числа отключений [1, 2]. Поэтому вопросам устранения ГИО уделяется особое внимание при планировании мероприятий по подготовке к осенне-зимним периодам [2]. Грозозащитные тросы (ГЗТ) высоковольтных ЛЭП ввиду меньшего сечения в сравнении с фазными проводами в наибольшей степени подвержены негативному влиянию ГИО.

Плавка гололёдных отложений и изморози путем нагревания проводов протекающим по ним током является основным методом устранения гололёда. Такая методика борьбы с обледенением применима для классов напряжения ЛЭП $U \leq 220$ кВ, а также для проводов с сечениями $F < 240$ мм².

Анализ литературы, представленной в библиографическом списке, показывает, что проблема ГИО на ВЛ электропередачи начинает активно рассматриваться с середины XX века [3–4]. Традиционное решение по борьбе с ГИО состоит в плавке гололёдных отложений на проводах и тросах с помощью тепла, выделяемого при протекании переменного или постоянного токов. Использование переменного тока для плавки ГИО рассмотрено в работах [5–9]. В [6] для борьбы с обледенением предлагается применять ток однофазного замыкания на землю. Добавление регулируемого реактора и трансформатора в цепь плавки гололёда «провод – земля» рассматривается в [7]. Авторы в [8] предлагают решить проблему гололёдообразования использованием метода точечных источников поля. В [9] приведена классификация способов по предотвращению аварий из-за ГИО.

Наибольшее распространение получили системы плавки постоянным током [10–14], поскольку обеспечивают более широкий диапазон тока плавки. В [11] предлагается использовать установку на базе тиристорного коммутатора. Авторами в [12] предложена универсальная установка плавки гололёда с дискретным управлением. В работе [13] представлена технология высоковольтного импульсного воздействия на скопления льда, разрушающие его изнутри. В [14] предложена схема

плавления льда постоянным током на основе гибридного модульного многоуровневого преобразователя.

Поскольку зачастую ГЗТ совмещают с оптическим кабелем, то возникает опасность перегрева оптоволокну и разрушения его структуры. Поэтому при плавке ГИО на данных ГЗТ возникает задача ограничения и контроля температуры нагрева троса [15].

Плавка гололёда на ГЗТ приводит к необходимости контролировать напряжение на поверхности земли для контура «ГЗТ – земля» и напряжения, прикладываемого к ГЗТ. Дополнительной настройки требует и релейная защита для исключения ложного срабатывания по току нулевой последовательности [16].

Авторами в [17–20] для плавки ГИО на ГЗТ предлагается применять наводимую токами фазных проводов ЭДС. При образовании замкнутого контура «трос-земля» по ГЗТ начинает протекать ток, достаточный для плавки ГИО. В нормативном документе [21] отмечается необходимость контролировать время плавки ГИО, которое не должно превышать 40...60 минут. Плавка гололёда данным способом осуществляется в следующем порядке: при обнаружения гололёда на ГЗТ специализированными датчиками происходит сборка контура и начинается процесс удаления гололёда до момента достижения температуры троса $+1...+2$ градуса, достаточной для предотвращения образования ГИО [22].

В современных условиях выбор рациональных мероприятий по устранению ГИО с ГЗТ должен осуществляться на основе компьютерного моделирования с применением адекватных моделей, учитывающих все влияющие факторы. Такие модели могут быть реализованы на основе подхода, использующего фазные координаты [23].

Методика и результаты моделирования. Для изучения вопроса плавки гололёда на ГЗТ применялись методы мультифазного представления электроэнергетических систем (ЭЭС), предложенные в [23] и реализованные в программном комплексе (ПК) Fazonord AC-DC (рис. 4).

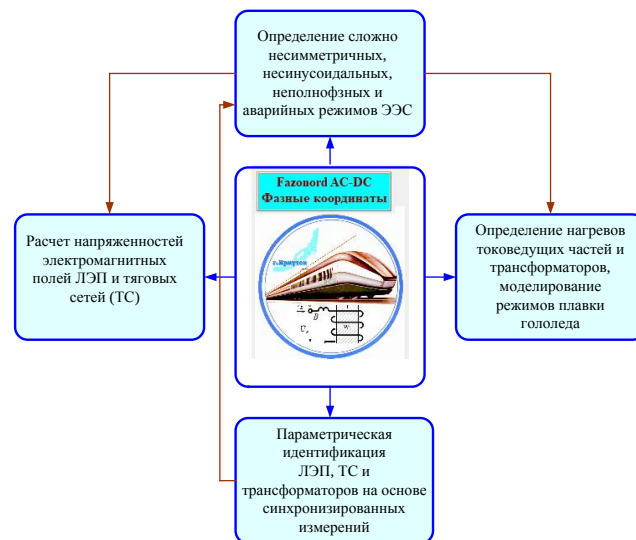


Рис. 4. Комплекс задач, решаемых в ПК Fazonord AC-DC

Основные этапы алгоритма моделирования процессов плавки гололёда, реализованного в Fazonord AC-DC, подробно описанного в [24], представлены на рис. 5

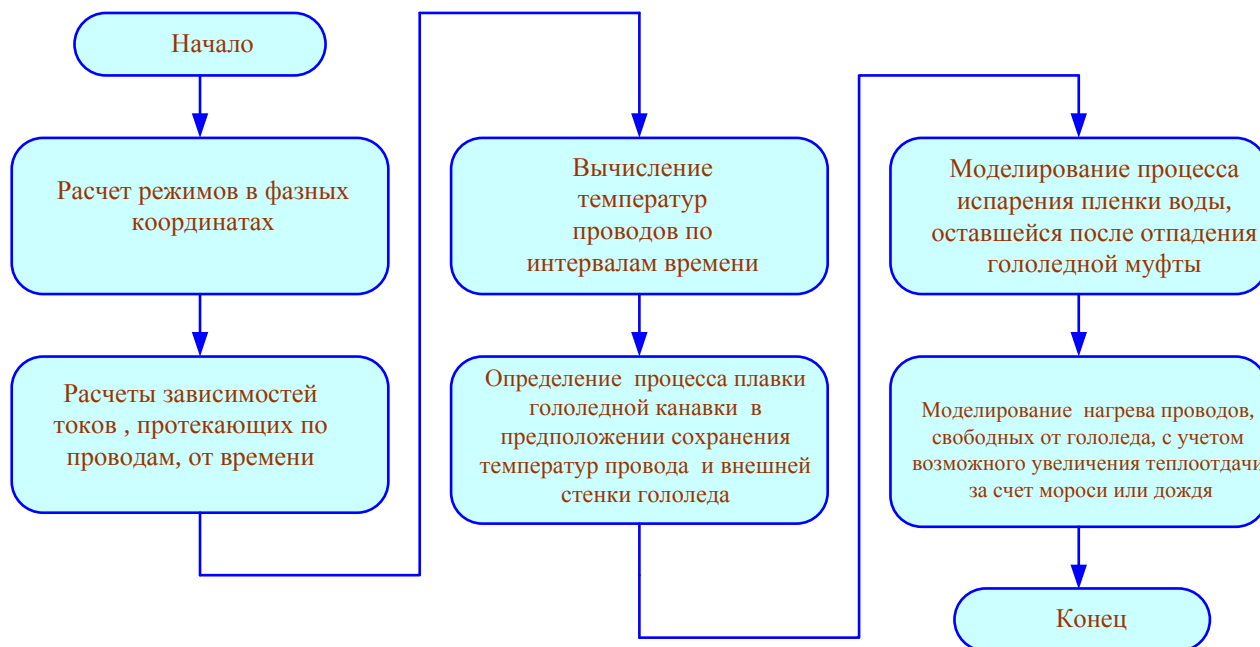


Рис. 5. Основные этапы алгоритма

При моделировании тяговые нагрузки создавались движением двенадцати поездов массой 3000 т в нечётном и чётном направлениях с интервалом в 15 мин. Кроме питания тяговых подстанций (ТП) по ЛЭП

220 кВ осуществлялся транзит мощности $57 + j30$ МВА на фазу. Схема исследуемой системы электроснабжения с тремя ТП представлена на рис. 6.

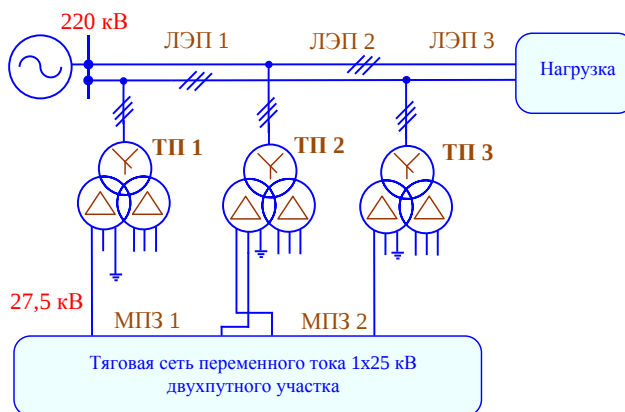


Рис. 6. Схема системы электроснабжения

Поперечное сечение системы токоведущих частей двухцепной линии электропередачи 220 кВ показано на рис. 7.

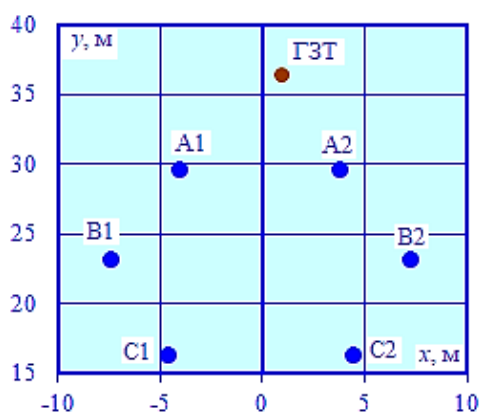


Рис. 7. Расположение токоведущих частей

Для плавки гололёда на ГЗТ использовался ток, индуцируемый в замкнутом контуре «грозозащитный трос – земля» фазными токами ЛЭП. Для организации контура на подходе к ТП1 выполнено заземление локального участка ГЗТ длиной 3 км через сопротивление заземляющего устройства опоры 10 Ом (рис. 8).

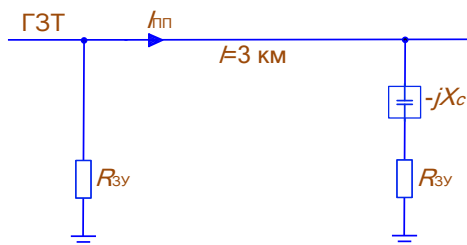


Рис. 8. Схема контура «ГЗТ – земля»

Для компенсации индуктивного сопротивления и изменения тока плавки в контуре «ГЗТ – земля» установлена регулируемая конденсаторная батарея (КБ). Моделирование осуществлялось при ёмкостном сопротивлении КБ, равном $-1,5 \text{ Ом}$.

Общее время моделирования процессов плавки гололёда на исследуемом участке с учётом однофазной,

изменяющейся тяговой нагрузки составило 100 минут. Результаты моделирования в виде зависимостей температуры ГЗТ, толщины стенки гололёда и тока плавки от времени представлены на рис. 9 и 10.

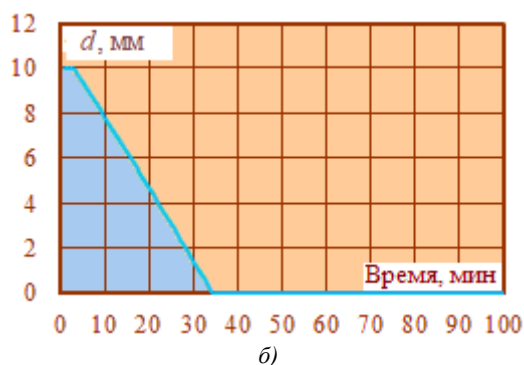
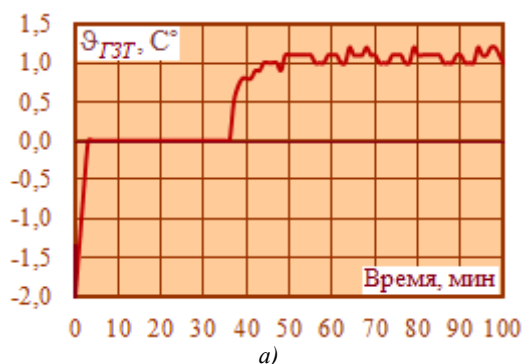


Рис. 9. Зависимости температуры ГЗТ (а) и толщины стенки гололёда (б) от времени

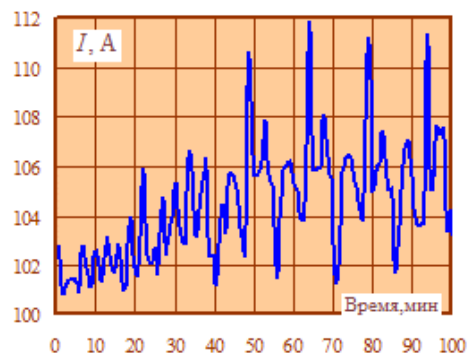


Рис. 10. Зависимость тока плавки от времени

Зависимости токов, протекающих через заземляющие устройства опор в начале и конце контура, рассчитанные с учётом высших гармоник (ВГ), представлены на рис. 11. Графики напряжений на поверхности земли показаны на рис. 12. Данная информация необходима для анализа электробезопасности.

Результаты моделирования позволяют обоснованно подходить к планированию мероприятий по борьбе с гололёдом на грозозащитных тросах ЛЭП, а также выбирать параметры регулируемой батареи статических конденсаторов.



Рис. 11. Зависимость тока с учётом ВГ, протекающего через заземляющее устройство опор в начале и конце контура



Рис. 12. Зависимость напряжения на поверхности земли

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Нагрев ГЗТ до температуры 0 °С происходит за три первых минуты, и с этого момента начинается плавка гололёда.
2. Общее время плавки гололёдно-изморозевых образований составляет 35 минут.
3. После удаления гололёда (с 35 минуты) происходит увеличение температуры $\vartheta_{ГЗТ}(t)$ до значений, близких к одному градусу.
4. Зависимость тока плавки от времени имеет нелинейный характер. Максимальное значение тока составляет 112 А, а минимальное 99 А.

Литература

1. Итоги прохождения группой компаний «Россети» осенне-зимнего периода 2022/2023 годов. Основные задачи по подготовке к осенне-зимнему периоду 2023/2024 годов [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». – 2023. – Режим доступа: <https://clck.ru/3Fi3Ew>.
2. Итоги прохождения группой компаний «Россети» осенне-зимнего периода 2023/2024 годов. Основные задачи по подготовке к осенне-зимнему периоду 2024/2025 годов [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». 2024. – Режим доступа: <https://clck.ru/3Fi3M4>.

Заключение. Представлена методика компьютерного моделирования, на основании которой разработаны цифровые модели в программном комплексе Fazonord AC-DC, позволяющие корректно определять режим плавки гололёдно-изморозевых образований на ГЗТ с учётом тяговой нагрузки. Методика универсальна и подходит для электрических сетей любой конфигурации.

Исследования выполнены за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

3. H.F. Brown. Sleet Problems on Electrified Railroads. In Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Vol. 61. – № 8. – 1942. – pp. 589–593.
4. Г.П. Зедгинидзе. Приспособление для механической очистки электрических воздушных проводов от снега и гололёда Авторское свидетельство № 65433 А1 СССР, МПК H02G 7/16. № 199 : заявл. 13.01.1944 : опубл. 01.01.1945.
5. Z. Guo, T. Zhang, L. Jia, R. Liu, W. Duan. Intelligent control and optimization of uninterrupted power serving de-icing technology for 110 kV power lines. Int. J. Low-Carbon Technol. 19 (2024). – pp. 1910–1918.
6. K. Yu, L. Xie, Y. Liu, X. Zeng and Y. Gu. An Online De-icing Method Based on Single-Phase Grounding Fault Current for Distribution Lines. 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China. 2018. pp. 3796–3800.
7. X. Xie et al. Research on the New Technology of Uninterruptible Electric Ice Melting in Distribution Network. – 2023. 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC). Shanghai, China. – 2023. – pp. 955–959.
8. Князев С.Ю., Щербаква Е.Е., Щербakov А.А. Моделирование плавки гололёда на проводах воздушных линий электропередач с помощью метода точечных источников поля, // Пром-Инжиниринг : труды II международной научно-технической конференции. – Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 423–428.
9. Способы предотвращения аварий, вызванных гололёдообразованием на проводах и грозозащитных тросах ВЛ / М.К. Гуревич, М.А. Козлова, А.В. Репин [и др.] // Известия НИИ постоянного тока. – № 1(64). 2010. – С. 235–246.
10. Jiang X., Meng Z., Zhang Z., Hu J., Lei Y. (2016). DC ice-melting and temperature variation of optical fibre for ice-covered overhead ground wire. Iet Generation Transmission & Distribution. 10. – pp. 352–358.
11. Интеллектуальная система плавки гололёда на проводах и грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи ПАО «МРСК Юга» / И.И. Левченко, П.В. Гончаров, Е.И. Сацук [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – № 1(46). – 2018. – С. 72–82.
12. Схемы плавки гололёда на проводах воздушных линий электропередачи с управляемыми выпрямительными установками / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, С.С. Шовкопляс [и др.] // Электротехника. – № 7. – 2016. – С. 17–25.
13. Yu Y., Zheng J., Zhang M., Du Z. (2024). Research on High Voltage Pulse Ice-Breaking Technology. The Proceedings of 2023 4th International Symposium on Insulation and Discharge Computation for Power Equipment. IDCOPU 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1103. Springer, Singapore.
14. Huang Z., Wang G., Feng J., Ou Z., Zhao X., Liu D., Chai Z. (2017). A new DC-ice-melting device based on hybrid MMC structure. 2017. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). – pp. 1–6.
15. Зарипов Р.Ф., Валеев А.Р. Расчет параметров плавки гололёда на грозотросах типа ОКГТ // Электротехнические комплексы и системы. – 2015. – С. 53–57.
16. Maruda J.F. Shovkoplyas S.S. (2009). The effect of the current of the melting ice cover in the lightning-protection cable on the relay protection of an electric power line. Power Technology and Engineering, 43. – Pp. 64–67.
17. Shovkoplyas S.S. (2020). Mathematical Models of Ice Melting Schemes on Lightning Protection Ropes of Overhead Transmission Lines. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Pp. 1095–1100.
18. Korovkin N.V., Goncharov V., Silin N.V. (2014). Modelling of ice-melting circuit under influence of EMF induced by the currents of overhead lines. WSEAS Transactions on Circuits and Systems archive, 13. – Pp. 476–484.
19. Bagi Tamas. A method presented by measurements to prevent harmful effects of icing forming on ground wires of high-voltage transmission lines. (2017).
20. Коровкин Н.В., Гончаров В.О., Силин Н.В. Оценка надёжной ЭДС в грозозащитном тросе и ее влияние на процесс плавки гололёда // Современные технологии и развитие политехнического образования. Владивосток, 2015.:
21. СТО 56947007-29.060.50.122-2012. Руководство по расчету режимов плавки гололёда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки : стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» : утверждён и введён в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 18.05.2012 № 264. – Москва, 2012. – 119 с.
22. Masoud Farzaneh. Atmospheric Icing of Power Networks. Springer Science Business Media B.V. 2008. – 388 p.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем : учеб. пособие. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. – 273 с.
24. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование динамики плавки гололёда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей // System Analysis & Mathematical Modeling. – 2022. – Т. 4, № 1. – С. 11–37.
25. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололёдных районах: учебное пособие / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев [и др.]. – М. : Изд. дом МЭИ, 2007. – 494 с.

References

1. Results of the Rosseti Group of Companies' Passage through the Autumn-Winter Period of 2022/2023. The Main Tasks in Preparing for the Autumn-Winter Period of 2023/2024 [Electronic Resource] // Rosseti PJSC. 2023. Access Mode: <https://clck.ru/3Fi3Ew>.
2. Results of the Rosseti Group of Companies' Passage through the Autumn-Winter Period of 2023/2024. The Main Tasks in Preparing for the Autumn-Winter Period of 2024/2025 [Electronic Resource] // Rosseti PJSC. 2024. Access Mode: <https://clck.ru/3Fi3M4>.
3. H.F. Brown. Sleet Problems on Electrified Railroads. In Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Vol. 61. № 8. 1942. – Pp. 589–593.
4. G.P. Zedginidze. Device for mechanical cleaning of electric overhead wires from snow and ice Author's certificate No. 65433 A1 USSR, IPC H02G 7/16. No. 199: declared. 13.01.1944: published. 01.01.1945.
5. Z. Guo, T. Zhang, L. Jia, R. Liu, W. Duan. Intelligent control and optimization of uninterrupted power serving de-icing technology for 110 kV power lines. Int. J. Low-Carbon Technol. 19 (2024). – pp. 1910–1918.
6. K. Yu, L. Xie, Y. Liu, X. Zeng and Y. Gu. An Online De-icing Method Based on Single-Phase Grounding Fault Current for Distribution Lines. 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China. – 2018. – pp. 3796–3800.
7. X. Xie et al. Research on the New Technology of Uninterruptible Electric Ice Melting in Distribution Network. 2023. 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC). Shanghai, China. – 2023. – pp. 955–959.
8. Knyazev S.Yu., Shcherbakova E.E., Shcherbakov A.A. Modeling of ice melting on overhead power line wires using the point source method // Prom-Engineering: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference. Publishing Center of SUSU, 2016. – Pp. 423–428.
9. Methods for preventing accidents caused by ice formation on wires and lightning protection cables of overhead power lines

- / M.K. Gurevich, M.A. Kozlova, A.V. Repin [et al.] // Bulletin of the Direct Current Research Institute. – № 1(64). – 2010. – Pp. 235–246.
10. Jiang X., Meng Z., Zhang Z., Hu J., Lei Y. (2016). DC ice-melting and temperature variation of optical fibre for ice-covered overhead ground wire. *Iet Generation Transmission & Distribution*. 10. – Pp. 352–358.
11. Intelligent system for melting ice on wires and lightning protection cables of overhead power transmission lines of PJSC "MRSK Yuga" / I.I. Levchenko, P.V. Goncharov, E.I. Satsuk [et al.] // *Electric power. Transmission and distribution*. – № 1 (46). 2018. – Pp. 72–82.
12. Schemes for melting ice on wires of overhead power transmission lines with controlled rectifier units / I.I. Levchenko, A.S. Zasyplin, S.S. Shovkoplyas [et al.] // *Electrical engineering*. – № 7. – 2016. – Pp. 17–25.
13. Yu Y., Zheng J., Zhang M., Du Z. (2024). Research on High Voltage Pulse Ice-Breaking Technology. *The Proceedings of 2023 4th International Symposium on Insulation and Discharge Computation for Power Equipment. IDCOMPU 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1103. Springer, Singapore.
14. Huang Z., Wang G., Feng J., Ou Z., Zhao X., Liu D., Chai Z. (2017). A new DC-ice-melting device based on hybrid MMC structure. 2017. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. – Pp. 1–6.
15. Zaripov R.F., Valeev A.R. Calculation of ice melting parameters on OKGT ground wires // *Electrotechnical complexes and systems*. – 2015. – Pp. 53–57.
16. Maruda J.F. Shovkoplyas S.S. (2009). The effect of the current of the melting ice cover in the lightning-protection cable on the relay protection of an electric power line. *Power Technology and Engineering*, 43. – Pp. 64–67.
17. Shovkoplyas S.S. (2020). *Mathematical Models of Ice Melting Schemes on Lightning Protection Ropes of Overhead Transmission Lines*. 2020 *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – pp. 1095–1100.
18. Korovkin N.V., Goncharov V., Silin N.V. (2014). Modeling of ice-melting circuit under influence of EMF induced by the currents of overhead lines. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems archive*, 13. – Pp. 476–484.
19. Bagi Tamas. A method presented by measurements to prevent harmful effects of icing forming on ground wires of high-voltage transmission lines. (2017).
20. Korovkin N.V., Goncharov V.O., Silin N.V. Evaluation of induced EMF in a ground wire and its influence on the process of ice melting // *Modern technologies and development of polytechnic education*. – Vladivostok, 2015.
21. STO 56947007-29.060.50.122-2012. Guidelines for calculating ice melting modes on a ground wire with an integrated optical cable (OPGT) and the use of distributed temperature control of the OPGT in the melting mode: standard of the organization of JSC "FGC UES": approved and put into effect by the order of JSC «FGC UES» dated 18.05.2012. – № 264. – Moscow, 2012. – 119 p.
22. Masoud Farzaneh. *Atmospheric Icing of Power Networks*. Springer Science Business Media B.V. 2008. – 388 p.
23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Complex-symmetric modes of electrical systems*. Irkutsk: Publishing house of Irkut. University, 2005. – 273 pages
24. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling the dynamics of ice melting on the wires of overhead power transmission lines and contact suspensions of traction networks // *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2022. – Vol. 4, № 1. Pp. 11–37.
25. Diagnostics, reconstruction and operation of overhead power transmission lines in icy areas: a tutorial / I.I. Levchenko, A.S. Zasyplin, A.A. Alliluyev [et al.]. – Moscow : Publishing house of MEI, 2007. – 494 p.