

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311

EDN: RFNGXW

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-2-247-258



Моделирование режимов плавки гололёда на проводах контактной сети постоянного тока повышенного напряжения 6 кВ

А.В. Крюков^{1✉}, К.В. Суслов², И.С. Овечкин³^{1,3}Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация²Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Российская Федерация

Резюме. Цель – разработка компьютерных моделей и методик, позволяющих корректно учитывать однофазную, изменяющуюся во времени тяговую нагрузку, а также особенности конструктивного исполнения токоведущих частей при моделировании режимов плавки гололёда на проводах контактной сети постоянного тока напряжением 6 кВ. Цель достигалась на основании использования мультифазного представления элементов электроэнергетических систем, которое базируется на применении моделей линий электропередачи и трансформаторов в фазных координатах. Данный подход реализован в промышленном программном комплексе Fazonord AC–DC. В результате моделирования установлено, что удаление гололедно-изморозевых образований на проводах контактных подвесок осуществляется за 13...14 мин; плавка на контактном проводе происходит на 1 мин быстрее, чем на несущем тросе. Показано, что за счет значительных токов, не превышающих допустимых значений, наблюдается значительный рост температуры проводов после расплавления гололёда; при этом для контактного провода допустимая температура нагрева (80 °С) достигается на 21-й мин, а для несущего троса (100 °С) – на 25-й. Следовательно, после удаления льда на 14-й мин плавка гололёда должна быть завершена. Выявлено, что за первые 15 мин температура наиболее нагретой точки понизительных трансформаторов возрастает на 20...40 °С, что указывает на повышенные потери в обмотках. Далее скорость роста снижается, и указанные параметры достигают максимального значения. Предложен подход для создания компьютерных моделей, который позволяет корректно определять параметры режимов работы систем тягового электроснабжения постоянного тока при плавке гололёда на проводах контактной сети напряжением 6 кВ. Полученные результаты могут использоваться на практике для моделирования процессов удаления гололедно-изморозевых отложений и точного вычисления времени окончания плавки. Также они могут применяться при настройке устройств релейной защиты для петлевых схем присоединения контактных подвесок к выводам 6 кВ тяговых подстанций.

Ключевые слова: плавка гололёда, контактная сеть 6 кВ, постоянный ток, моделирование

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

Для цитирования: Крюков А.В., Суслов К.В., Овечкин И.С. Моделирование режимов плавки гололёда на проводах контактной сети постоянного тока повышенного напряжения 6 кВ // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 2. С. 247–258. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-2-247-258>. EDN: RFNGXW.

POWER ENGINEERING

Original article

Modeling ice-melting operation in conductors of a 6 kV DC overhead contact system

Andrey V. Kryukov^{1✉}, Konstantin V. Suslov², Ilya S. Ovechkin³^{1,3}Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation²National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Moscow, Russian Federation

Abstract. This study develops computational models and methods capable of accurately accounting for the single-phase time-varying traction load and the design features of current-carrying components during ice-melting operation in a 6 kV DC overhead contact system. The approach is based on a multiphase representation of power-system elements using transmission-line and transformer models formulated in phase coordinates. The method was

implemented in the industrial software Fazonord AC–DC. Simulation results showed that removal of glaze-ice and rime deposits from the contact suspension conductors is completed within 13–14 min, while melting on the contact wire proceeds approximately 1 min faster than on the messenger wire. Since the currents remain within permissible limits, the conductor temperature continues to increase following ice removal. Under these conditions, the allowable temperature of the contact wire (80 °C) is reached after 21 min, whereas that of the messenger wire (100 °C) is reached after 25 min. Therefore, the ice-melting process should be terminated once ice removal is completed, approximately 14 min after the start of operation. During the first 15 min of operation, the temperature of the hottest point in the step-down transformers increases by 20–40 °C, indicating elevated winding losses. Subsequently, the rate of temperature rise decreases, and the temperatures approach their maximum values. The study proposes a modeling approach that enables accurate determination of operating parameters in DC traction-power systems during ice-melting on 6 kV overhead contact conductors. The results can be used to simulate ice-removal processes and determine the required melting time. They may also be applied to configuring relay-protection devices for looped connection schemes between contact suspensions to the 6 kV terminals of traction substations.

Keywords: ice melting, 6 kV overhead contact system, direct current, modeling

Funding. The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant (project No. 25-29-00937).

For citation: Kryukov A.V., Suslov K.V., Ovechkin I.S. Modeling ice-melting operation in conductors of a 6 kV DC overhead contact system. *iPolytech Journal*. 2026;30(2):247-258. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-2-247-258>. EDN: RFNGXW.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно по причине образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи и контактной сети происходит их обрыв и случаются повреждения. Это приводит к таким негативным последствиям, как перебои в электроснабжении и нарушения графиков движения поездов. Для устранения гололеда используются различные методы, основным из которых является плавка ледяной корки путем разогрева проводов повышенными токами. В современных условиях выбор рациональных режимов плавки должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Актуальность этой задачи подтверждается большим числом публикаций по данной тематике. Так, например, термодинамические параметры фазового перехода, используемые для прогнозирования скорости образования различных типов атмосферных осадков (иней, мокрый снег, гололед), исследованы в [1]. Метод определения тока плавки с целью предотвращения перегрева токоведущих частей, учитывающий изменение геометрии ледяной корки в процессе таяния, предложен в [2, 3]. Для более точного вычисления этого параметра в различных климатических зонах авторами [4] предлагается использовать эмпирические данные об адгезии льда. Сравнительное исследование режимов плавки гололеда переменным и постоянным током выполнено в [5]. За счет меньшего потребления мощности на плавку гололеда при постоянном токе отмечается его энергетическая эффективность.

Практическая реализация схем плавки постоянным током невозможна без совершенствования преобразовательных агрегатов. Для решения этой проблемы при устранении гололедно-изморозевых отложений на проводах линии электропередачи (ЛЭП) 500 кВ авторы [6] предлагают использовать мощные 12-пульсные выпрямители с многоуровневым регулированием напряжения. Результаты разработки выпрямительных агрегатов для плавки гололеда постоянным током описаны в [7]. На основе полевых испытаний показана высокая эффективность данных установок в период повышенного гололедообразования. На базе программного обеспечения PSCAD/EMTDC в [8] проведено моделирование режима плавки с использованием схемы трехфазного управляемого мостового выпрямителя. По результатам выявлено, что она способна обеспечить стабильный ток на выходе преобразователя, что гарантирует высокую скорость плавления. В [9] проанализировано использование преобразовательного агрегата для плавки льда на ЛЭП различной протяженности. Установлено, что для коротких линий нет необходимости его применения, поскольку ток плавления достаточен для быстрого удаления ледяной корки. Для длинных ЛЭП его применение позволяет поддерживать стабильный уровень тока плавки. Топология управляемого на базе IGBT-транзисторов устройства плавки гололеда постоянным током описана в [10]. Используется схема выпрямителя с ШИМ-управлением (широтно-импульсная модуляция), которая

позволяет обеспечить плавный пуск, стабилизацию тока плавки и быстрого перехода между различными режимами работы.

Вопросы защиты от перенапряжений установок плавки гололеда постоянным током со статическими тиристорными компенсаторами рассмотрены в [11]. Проведен анализ электромагнитных переходных процессов с целью выбора оптимального места размещения ограничителей перенапряжения. Новая схема плавления льда на постоянном токе, основанная на гибридном модульном многоуровневом преобразователе, предложена в [12]. Устройство можно использовать для удаления гололеда и компенсации реактивной мощности, что подтверждается результатами моделирования в PSCAD/EMTDC. Похожее решение рассмотрено в [13], где помимо новой конструкции преобразователя предложен метод управления, который обеспечивает точное регулирование величины тока в широком диапазоне.

Оригинальный алгоритм оптимизации процесса плавки гололеда разработан в [14]. Он использует данные о топологии сети и толщине стенки гололеда и позволяет автоматически определить наиболее эффективный план плавки с минимальными временными и энергетическими затратами. Описание мобильной установки на базе тиристорного выпрямителя для плавки гололеда приведено в [15]. За счет модульного исполнения и плавного регулирования величины тока данную установку можно оперативно разворачивать на участках сети со сложной гололедной обстановкой и эффективно очищать от льда провода различного сечения.

В отличие от ЛЭП, для расчета режимов плавки гололеда на проводах контактной сети (КС) железных дорог требуются более сложные алгоритмы, т.к. там используется сложная геометрия расположения токоведущих частей, а также имеют место значительные гармонические искажения. Режимы плавки гололеда на контактом проводе при различных погодных условиях проанализированы в [16]. Результаты проведенных авторами исследований показали, что время плавления уменьшается нелинейно с ростом величины постоянного тока. Представлена методика определения тока, который может предотвратить обледенение контактной сети при любых параметрах окружающей среды.

Способы плавки гололеда, основанные на управлении потоком мощности или bipolarной параллельной работе преобразовательных агрегатов, предложены в [17]. Особенностью данных подходов является эффективный нагрев и удаление гололедных отложений без прерывания электроснабжения потребителей. Метод плавки гололеда на контактной сети без остановки движения поездов рассмотрен в [18]. Он основан на использовании токов от блока питания, обеспечивающего хорошую эффективность удаления гололеда и стабильную работу системы тягового электроснабжения.

Для изучения влияния эксплуатационных режимов контактной сети на процесс развития обледенения проводов и тросов в статье [19] предлагается метод прогнозирования гололедообразования, основанный на численных алгоритмах и глубоком обучении. В [20] выполнен анализ способов плавки гололеда на проводах КС на базе моделирования и измерений в климатической камере. Электротермическая технология борьбы с обледенением КС электрифицированных железных дорог описана в [21]. Показано, что с помощью представленной авторами модели теплового баланса можно оценить продолжительность плавки при заданной величине тока. Методы прогнозирования процессов осадения льда на проводах ЛЭП проанализированы в [22]. Способ повышения эффективности устранения гололедных образований, основанный на увеличении плотности тока, предложен в [23]. Вопросы применения регулируемого реактора с переменным магнитным потоком для изменения тока плавления рассмотрены в [24]. На основе программного обеспечения COMSOL в [25] проанализировано влияние температуры, толщины стенки льда и величины тока на режим плавки. Результаты показали, что скорость таяния льда зависит от температуры окружающей среды. Достоверность модели подтверждена путем сравнения результатов моделирования и измеренных данных. Схема удаления льда с проводов КС двухпутных участков железной дороги, представленная в [26], включает однофазный преобразователь и позволяет в онлайн-режиме регулировать ток плавки, что в совокупности с алгоритмом оптимизации обеспечивает минимальные отклонения напряжения в контактной сети и предотвращает перегрузки по току.

По результатам анализа представленных выше публикаций можно сделать следующие выводы:

- в современных условиях задачи моделирования режимов плавки гололеда приобретают особую актуальность;
- в приведенных публикациях описаны эффективные способы плавки гололедных отложений, а также multifunctional системы мониторинга.

Однако методика моделирования режимов плавки гололеда в тяговых сетях (ТС) постоянного тока повышенного напряжения, позволяющая учитывать движение поездов на смежных участках, в рассмотренных публикациях не приведена. Поэтому ниже представлены результаты исследований, цель которых состояла в разработке методик и компьютерных моделей, позволяющих корректно учитывать однофазную, изменяющуюся во времени тяговую нагрузку, а также особенности конструктивного исполнения токоведущих частей при моделировании режимов плавки гололеда на проводах контактной сети постоянного тока напряжением 6 кВ.

Для решения этой задачи целесообразно использовать подходы, базирующиеся на multifase представлении элементов электроэнергетических систем (ЭЭС) и систем тягового электроснабжения (СТЭ), реализованные в программном комплексе (ПК) Fazonord AC-DC [27]. Преимущество данного ПК заключается в использовании метода фазных координат, который, в отличие от широко распространенного метода симметричных составляющих, дает возможность представлять силовые элементы ЭЭС и СТЭ в многопроводном исполнении. С помощью multifase подхода обеспечивается высокая точность расчета токо-распределения для режимов плавки и получения графиков изменения температур проводов во времени.

На рис. 1, 2 представлены основные этапы алгоритма плавки гололеда и группы используемых исходных данных. Подробное описание метода моделирования режимов СТЭ постоянного тока приведено в [28]. Методика моделирования процессов плавки гололеда представлена в [29].



Рис. 1. Основные этапы алгоритма моделирования плавки гололеда

Fig. 1. The main stages of the ice melting modeling algorithm

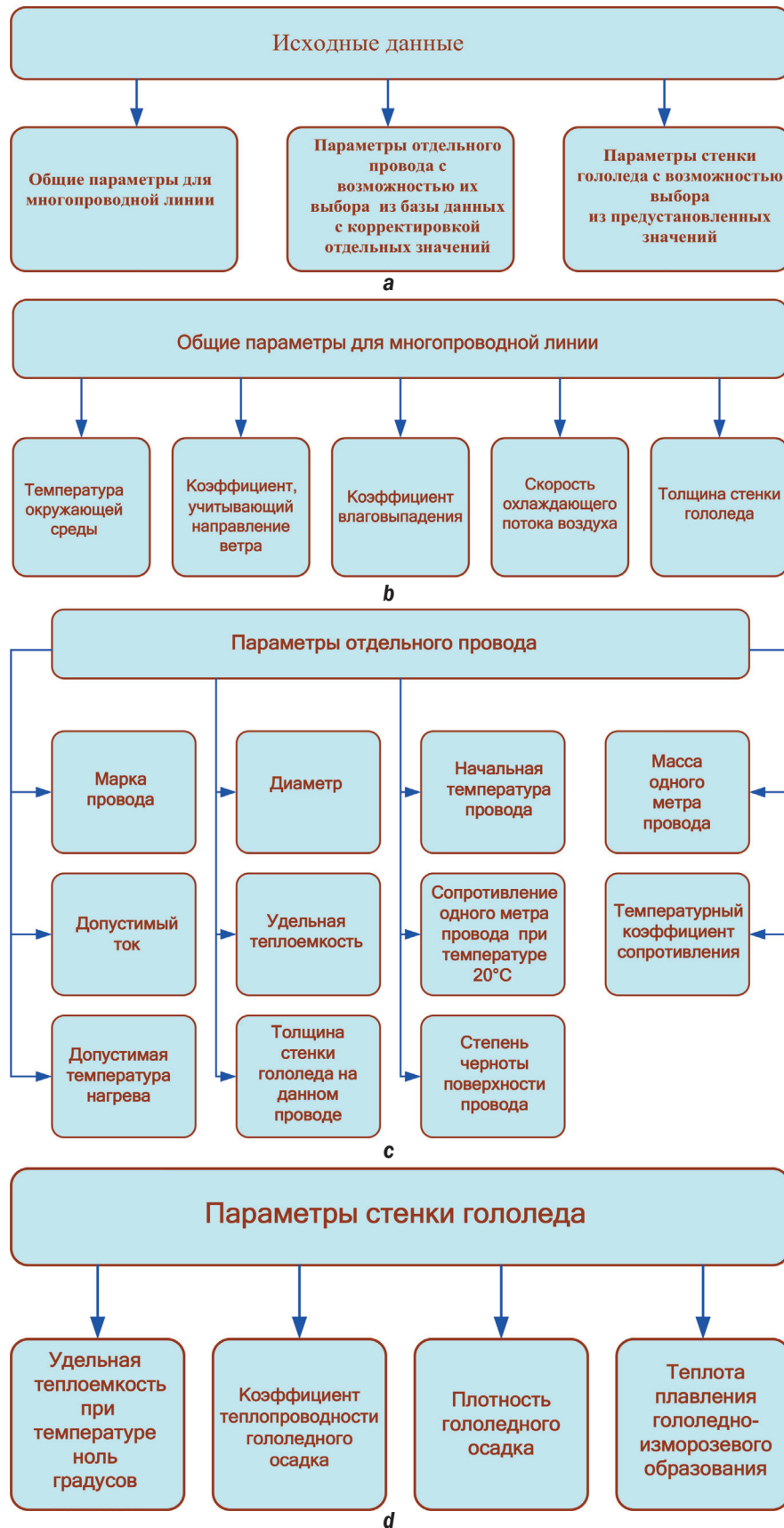


Рис. 2. Исходные данные для моделирования: а – группы параметров; б – параметры многопроводной линии; с – параметры провода; д – параметры стенки гололеда

Fig. 2. Initial modeling data: a – groups of parameters; б – parameters of a multi-wire line; с – parameters of a wire; д – parameters of an ice wall

Ниже представлены результаты моделирования режимов плавки гололеда на проводах контактной сети напряжением 6 кВ, учитывающие влияние тяговых нагрузок на смежных участках ТС.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

За основу взята схема (рис. 3), включающая следующие элементы: питающие ЛЭП 110 кВ; пять тяговых подстанций (ТП), на каждой из которых размещаются понижительные (Т 1-1...Т 5-1) и преобразовательные трансформаторы (Т 1-2...Т 5-2); четыре участка ТС протяженностью 20 км каждый, включающие контактные подвески М-120+2МФ-100 и рельсовые нити Р-65. На тяговых подстанциях были установлены двенадцатипульсные выпрямительно-инверторные преобразователи.

Рассматривались режимы плавки гололеда на проводах контактной сети левой межподстанционной зоны (МПЗ 1) по петлевой схеме с питанием от ТП 1; при этом в процессе моделирования учитывались тяговые нагрузки на смежных МПЗ 2...4, которые создавались движением шести поездов массой 3884 т: по три поезда в четном и нечетном направлениях.

Для моделирования процесса плавки использовались следующие исходные данные: температура воздуха $t_{\text{в}} = -5^{\circ}\text{C}$; скорость ветра

$v = 3,3 \text{ м/с}$; толщина стенки гололеда – 12 мм; плотность гололедно-изморозевых отложений – 900 кг/м^3 . На рис. 4 представлены временные зависимости температуры проводов КС ($\tau(t)$) и толщины стенки гололеда ($\delta(t)$). По результатам моделирования видно, что плавка гололеда на проводах КС осуществляется за 13...14 мин; при этом удаление льда на контактном проводе происходит на одну минуту быстрее, чем на несущем тросе. Это объясняется тем (см. рис. 4), что величина тока плавки для контактного провода (КП) равна 830 А, а для несущего троса (НТ) – 740 А.

За счет значительных токов, не превышающих допустимых, наблюдается значительный рост температуры проводов после расплавления ледяной корки. В среднем 11°C приходится на каждую минуту времени. При этом для КП допустимая температура нагрева 80°C достигается на 21-й мин моделирования, а для НТ 100°C – на 25-й мин. Поэтому после удаления льда на 14-й мин плавка гололеда должна быть завершена.

Режим плавки гололеда характеризуется повышенным электропотреблением, поэтому необходимо, кроме контроля нагрева проводов, определять температуру нагрева трансформаторов и их загрузку. На рис. 5 и 6 изображены временные зависимости перегрева масла ($\Delta\vartheta(t)$) и температуры наиболее нагретой точки (ННТ) трансформаторов ТП 1.

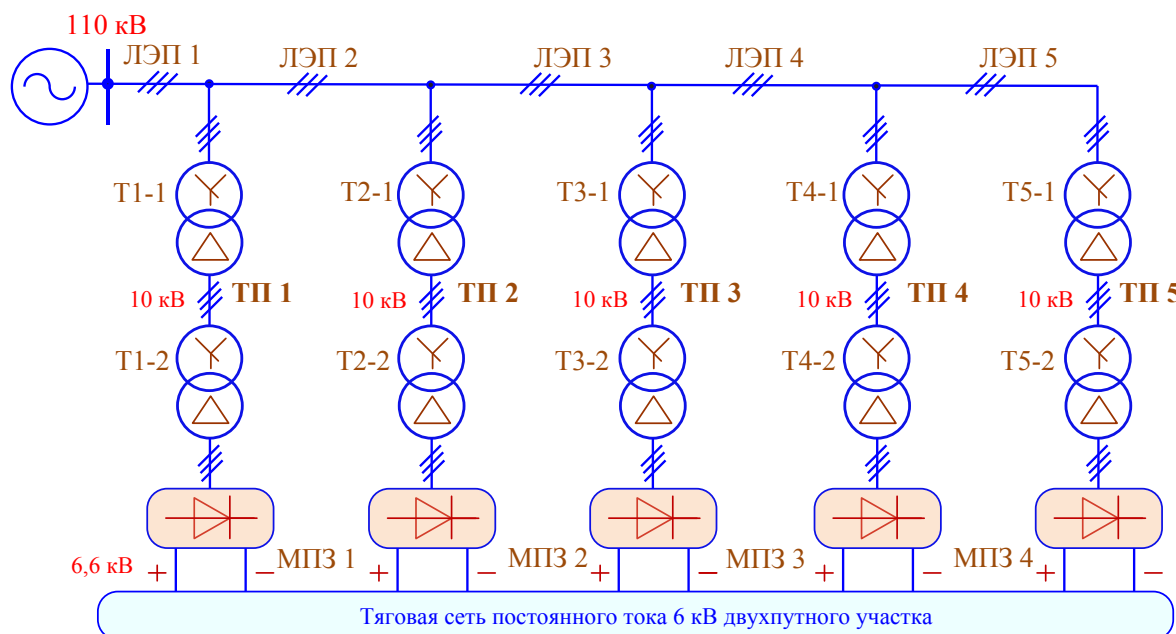


Рис. 3. Схема системы электроснабжения

Fig. 3. Diagram of the power supply system

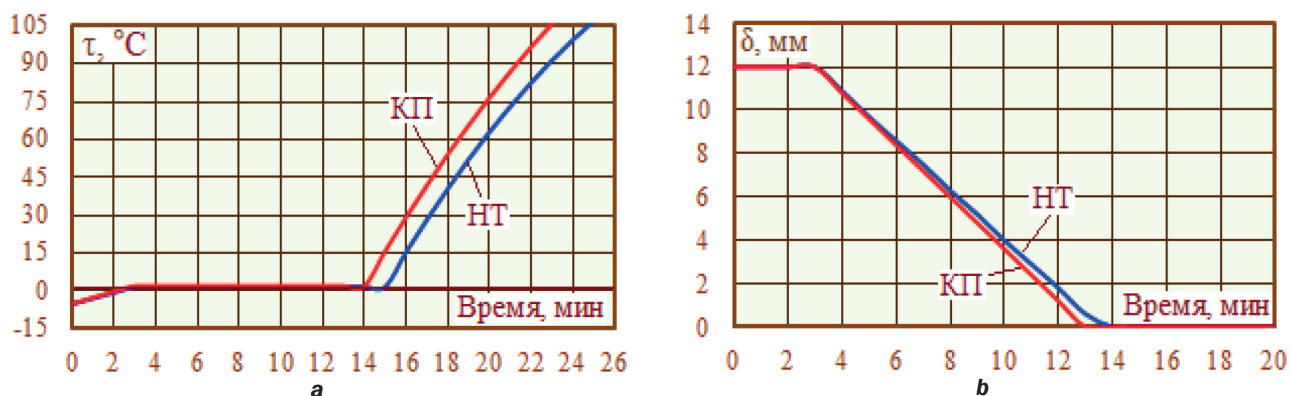


Рис. 4. Временные зависимости для режима плавки гололёда на контактной сети: а – температуры провода; б – толщины стенки гололёда

Fig. 4. Time dependences for the ice melting mode on the contact network: а – wire temperature; б – ice wall thickness

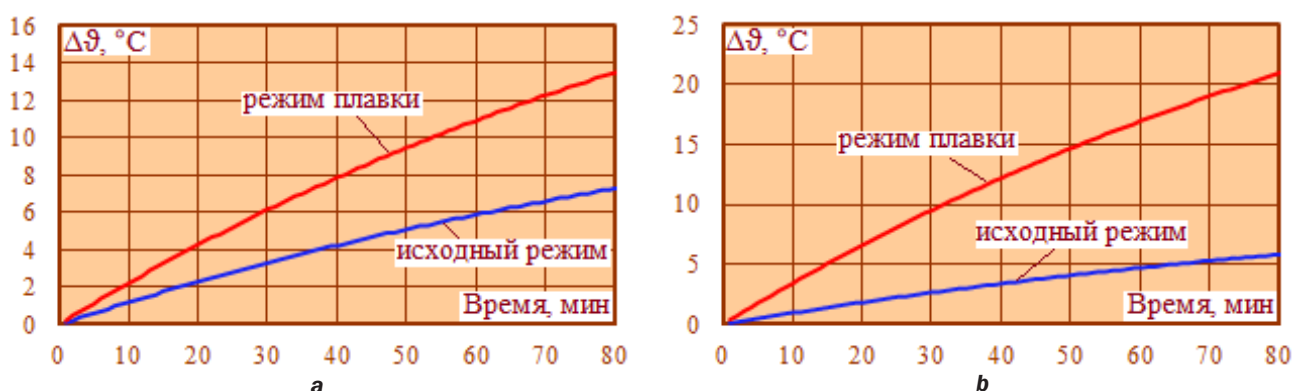


Рис. 5. Временные зависимости перегрева масла трансформаторов: а – Т 1-1; б – Т 1-2

Fig. 5. Time dependences of transformer oil overheating: а – Т 1-1; б – Т 1-2

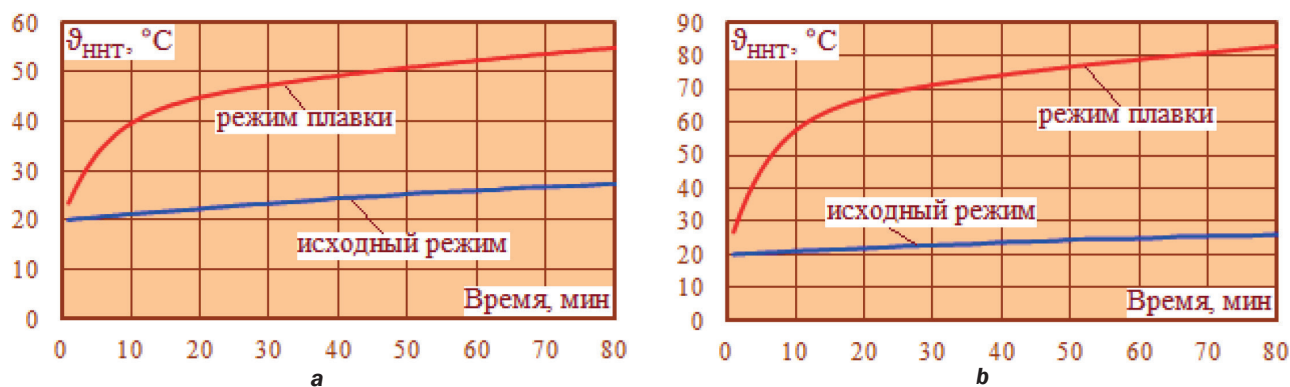


Рис. 6. Временные зависимости температуры наиболее нагретых точек трансформаторов: а – Т 1-1; б – Т 1-2

Fig. 6. Time dependences of the temperature of the most heated points of transformers: а – Т 1-1; б – Т 1-2

Из рис. 5 и 6 можно заключить, что скорость роста температур для режима плавки значительно выше. Так, к 80-й мин моделирования перегрев масла для Т 1-1 и Т 2-1 достигает 14 и 21°C, что в 1,8 и 3,5 раза больше, чем для исходного режима. Температура ННТ для исходного режима растет практически линейно и медленно. Наблюдается увеличение температуры на

8°C за 80 мин. В то время как для режима плавки $\theta_{\text{ннт}}(t)$ имеет экспоненциальный характер роста, за первые 15 мин температура ННТ возрастает на 20 и 40°C для Т1-1 и Т1-2, соответственно, что указывает на повышенные потери в обмотках для режима плавки. Далее скорость роста снижается, а $\theta_{\text{ннт}}(t)$ достигает максимального значения 55 и 82°C. Разница между зависимостями

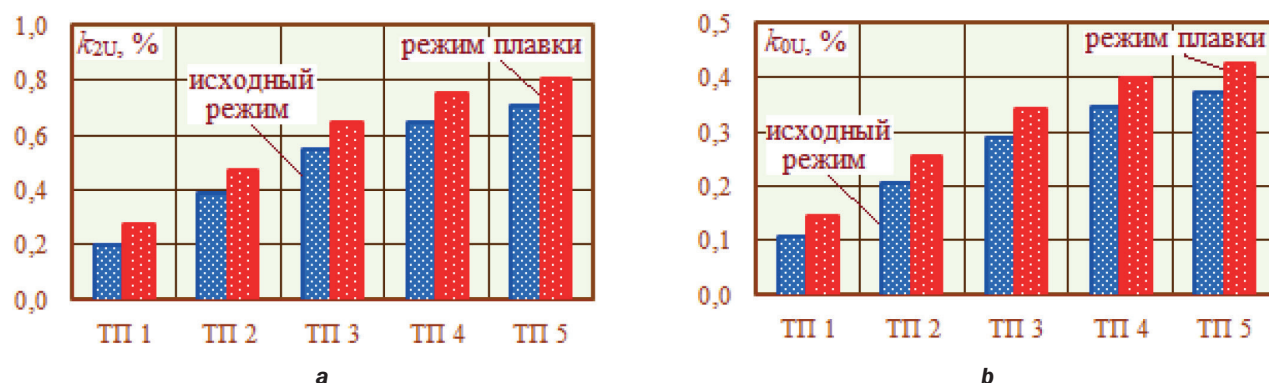


Рис. 7. Коэффициент несимметрии напряжения на вводах тяговых подстанций: а – по обратной последовательности; б – по нулевой последовательности

Fig. 7. Voltage unbalance factor at the inputs of traction substations: а – for the negative sequence; б – for the zero sequence

для режимов нормальной эксплуатации и плавки гололеда обусловлена увеличением нагрузочных потерь, которые пропорциональны квадрату тока.

Задача влияния режимов плавки гололеда в тяговых сетях на показатели качества электроэнергии в системе внешнего электроснабжения в рассмотренных во введении публикациях решения не получила. Для анализа этих влияний проведено моделирование несимметричных режимов рассматриваемой сети. На рис. 7 показаны гистограммы коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям на вводах ТП. Возникновение несимметрии связано с различными высотами подвеса проводов на типовой опоре ЛЭП 110 кВ, отличающимися расстояниями между токоведущими частями отдельных фаз, а также отсутствием транспозиции ЛЭП.

Из рис. 7 для обоих режимов заметна тенденция роста k_{2u} и k_{0u} по мере удаления от источника питания. При переходе в режим плавки k_{2u} увеличивается в среднем на 0,1...0,13 %; максимальное значение равно 0,8 % для ТП 5. Приращение k_{0u} для режима плавки составляет 0,04...0,06 %. Максимум фиксируется на вводе ТП 5 и равен 0,43 %. Полученная величина коэффициентов несимметрии не превышает нормально допустимого 2%-го значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны компьютерные модели, которые позволяют корректно определять параметры режимов работы систем тягового электроснабжения постоянного тока при

плавке гололеда на проводах контактной сети напряжением 6 кВ. Для их формирования использовался программный комплекс Fazonord AC-DC, в котором реализованы алгоритмы для моделирования динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей. На их основе определяются токи контролируемых проводов, температуры и толщина остающейся гололедной части над проплавляемой канавкой. Эти параметры вычисляются для начала и конца контролируемого провода. На этой основе реализуется системный подход к решению задачи моделирования процессов плавки гололеда, так как расчеты тепловых процессов базируются на определении режимов сложной электроэнергетической системы или системы тягового электроснабжения. Использование разработанных моделей позволит более обоснованно планировать мероприятия по устранению гололедообразований с проводов ЛЭП и контактных подвесок. Методика является комплексной и позволяет оценить влияние режимов плавки гололеда на показатели качества электроэнергии в системе внешнего электроснабжения.

Полученные результаты могут использоваться на практике для моделирования процессов удаления гололедно-изморозевых отложений и точного вычисления времени окончания плавки, а также для настройки устройств релейной защиты с учетом применения петлевых схем присоединения контактных подвесок к выводам 6 кВ тяговых подстанций. Предложенный подход является универсальным и может применяться для

систем тягового электроснабжения любой сложности и различного конструктивного исполнения.

Методика может быть адаптирована к ситуации, когда в межподстанционной зоне есть участки с различной толщиной стенки гололеда, а также участки, не покрытые льдом.

Решение этой задачи возможно путем разбивки модели тяговой сети на ряд участков, для которых могут быть заданы индивидуально следующие параметры: толщина стенки гололеда, температура воздуха, скорость ветра и его направление, коэффициент влаговыпадения и др.

Список источников

1. Makkonen L. Models for the growth of rime, glaze, and wet snow on structures // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2000. Vol. 358. Iss. 1776. P. 2913–2939. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0690>.
2. Jiang X.-L., Fan S.-H., Hu J.-L., Zhang Zhijin, Sun C.-X. Analysis of critical ice-melting current for short-circuit DC transmission line // Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao: Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering. 2010. Vol. 30. P. 111–116.
3. Базаров А.А., Будко С.И. Моделирование тепловых процессов при плавке гололеда на линии электропередачи // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31. № 4. С. 49–67. <https://doi.org/10.14498/tech.2023.4.4>. EDN: PNNBPB.
4. Savadjiev K., Farzaneh M. Modeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data // IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. Vol. 19. Iss. 2. P. 715–721. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822527>.
5. Jiang Xingliang, Hu Jianlin, Zhang Jiwei, Shu Daisong, Gong Xiaowei, Yi Tianzhi. Ice-melting methods and comparison with AC and DC currents // 16th International Symposium on High Voltage Engineering (Hannover, 22–26 August 2011). Hannover, 2011.
6. Lu J., Zhang Y. Realization of de-icing device based on 12-pulse rectification for 500 kV transmission line // High Voltage Engineering. 2012. Vol. 38. Iss. 11. P. 3041–3047. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2012.11.036>.
7. Chuang Fu, Xu S., Rao H., Li X., Chen Y., Li L. Design and application of DC Deicer for AC transmission system // Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering. 2013. Vol. 39. Iss. 3. P. 705–711. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2013.03.029>.
8. Wang Chao, Wen Jun, Li Shuqi, Ma Xueling, Wang Jun. Design on DC de-icing schemes for high voltage transmission line // 5th International Conference on Critical Infrastructure. 2010. <https://doi.org/10.1109/CRIS.2010.5617565>.
9. He P., Wang Y., Li X., Wei W., Li S., Zou J., et al. Research on influences of converter transformer on DC ice-melting device // Power System Technology. 2012. Vol. 36. Iss. 5. P. 113–117.
10. Jing H., Nian Xianbo, Fan R., Liu D. Control and switchover strategy of full-controlled ice-melting DC power for ice-covered power lines // IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2012. P. 714–717.
11. Wu C., Fu C., Dong M., Wan H., He J. Overvoltage protection and insulation coordination for DC de-icer with static var compensator // High Voltage Technology. 2013. Vol. 39. Iss. 5. P. 1258–1264. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2013.05.035>.
12. Huang Zhisong, Wang Guangzhu, Feng Jianzhou, Ou Zhujian, Zhao Ximin, Liu Danging, et al. A new DC-ice-melting device based on hybrid MMC structure // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. Asia-Pacific, 2017. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8081019>.
13. Mei Hongming, Liu Jianzheng. A novel DC ice-melting equipment based on modular multilevel cascade converter // Automation of Electric Power Systems. 2013. Vol. 37. Iss. 16. P. 96–102. <https://doi.org/10.7500/AEPS201211233>.
14. Chen L., Fu C., Li X. Optimized decision-making of power grid DC de-icing plan based on tabu search algorithm // Power System Technology. 2015. Vol. 39. P. 1637–1642. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2015.06.027>.
15. Guobang B., Xiaohong M., Yangzeyu O., Li L., Jianwen L., Binyuan W. Research on Influencing Factors of voltage control for MMC type mobile DC ice melting device // IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications. Chengdu, 2021. P. 1256–1260. <https://doi.org/10.1109/ICIEA51954.2021.9516122>.
16. Li B., Huang L., Xu P., Chen Q., Huai X., Deng Y. Study on DC ice-melting rate and critical anti-icing current of overhead contact line // International Conference on Smart Electrical Grid and Renewable Energy. Changsha, 2023. P. 354–359.
17. Lu Yi, Zhang Xu, Xia Jiahang, Zhao Chengyong. Research on melting scheme for overhead line of flexible DC grid without power failure // 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid. Xiamen, 2019. <https://doi.org/10.1109/eGRID48402.2019.9092728>.
18. Wang Yunga, Zhang Gang, Tian Zhongbei, Qiu Ruichang, Liu Z. An online thermal deicing method for urban rail transit catenary // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2020. Vol. 7. Iss. 2. P. 870–882. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3032614>.
19. Li Z., Wu G., Huang G., Guo Y., Zhu H. Study on icing prediction for high-speed railway catenary oriented to numerical model and deep learning // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2025. Vol. 11. Iss. 1. P. 1189–1200. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3401209>.

20. Nilsson F., Moyassari A., Bautista Á., Castro A., Arbeloa I., Järn M., et al. Modelling anti-icing of railway overhead catenary wires by resistive heating // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 143. P. 118505. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118505>.
21. Xiao S., He Y., Zhang Y., Wu G., Cao Y., Zhang X., et al. Electrical-thermal conduction and distribution characteristics of the catenary system for electrified railway applying electrothermal ice-melting technique // *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 277. P. 126809. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126809>.
22. Sirui Yu, Song Mengjie, Gao Runmiao, Bae Jiwoong, Zhang Xuan, Zhou Shiqiang. A review of icing prediction techniques for four typical surfaces in low-temperature natural environments // *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 241. P. 122418. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122418>.
23. Yang Guolin, Jiang Xingliang, Liao Yi, Li Tao, Deng Ying, Wang Maozheng, et al. Research on load transfer melt-icing technology of transmission lines: Its critical melt-icing thickness and experimental validation // *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 221. P. 109409. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109409>.
24. Hou Yuning, Wang Haifei, Xue Manyu, Wang Tingkang, Wang Cong, Chen Jianchun. An no power failure ice melting system based on flux controlled reactor // 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems. Harbin, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921434>.
25. Huang G., Wu M., Liang J., Fu S., Tian F., Pei X., et al. Research on the DC ice-melting model and its influencing factors on the overhead contact systems of an electrification railway // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 1028. <https://doi.org/10.3390/en18051028>.
26. Ge Y., Chen J., Li Z., Hu H., He Z. Terminal series-connected catenary online anti-icing and de-icing system for double-track AC electric railways // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2026. Vol. 73. Iss. 2. P. 1943–1955. <https://doi.org/10.1109/TIE.2025.3600522>.
27. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем: монография. Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. 273 с. EDN: PTVITA.
28. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат: монография. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с. EDN: LIJPRI.
29. 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. T. 4. № 1. С. 11–37. [https://doi.org/10.17150/2713-1734.2022.4\(1\).11-37](https://doi.org/10.17150/2713-1734.2022.4(1).11-37). EDN: HLXMBJ.

References

1. Makkonen L. Models for the growth of rime, glaze, and wet snow on structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2000;358(1776):2913-2939. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0690>.
2. Jiang X.-L., Fan S.-H., Hu J.-L., Zhang Zhijin, Sun C.-X. Analysis of critical ice-melting current for short-circuit DC transmission line. In: *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao: Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. 2010;30:111-116.
3. Bazarov A.A., Budko S.I. Modeling of thermal processes when melting ice on power lines. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2023;31(4):49-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.14498/tech.2023.4.4>. EDN: PNNBPB.
4. Savadjiev K., Farzaneh M. Modeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004;19(2):715-721. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822527>.
5. Jiang Xingliang, Hu Jianlin, Zhang Jiwu, Shu Daisong, Gong Xiaowei, Yi Tianzhi. Ice-melting methods and comparison with AC and DC currents. In: *16th International Symposium on High Voltage Engineering*. 22-26 August 2011, Hannover. Hannover; 2011.
6. Lu J., Zhang Y. Realization of de-icing device based on 12-pulse rectification for 500 kV transmission line. *High Voltage Engineering*. 2012;38(11):3041-3047. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2012.11.036>.
7. Chuang Fu, Xu S., Rao H., Li X., Chen Y., Li L. Design and application of DC deicer for AC transmission system. *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*. 2013;39(3):705-711. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2013.03.029>.
8. Wang Chao, Wen Jun, Li Shuqi, Ma Xueling, Wang Jun. Design on DC de-icing schemes for high voltage transmission line. In: *5th International Conference on Critical Infrastructure*. 2010. <https://doi.org/10.1109/CRIS.2010.5617565>.
9. He P., Wang Y., Li X., Wei W., Li S., Zou J., et al. Research on influences of converter transformer on DC ice-melting device. *Power System Technology*. 2012;36(5):113-117.
10. Jing H., Nian Xianbo, Fan R., Liu D. Control and switchover strategy of full-controlled ice-melting DC power for ice-covered power lines. In: *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. 2012;714-717.
11. Wu C., Fu C., Dong M., Wan H., He J. Overvoltage protection and insulation coordination for DC de-icer with static var compensator. *High Voltage Technology*. 2013;39(5):1258-1264. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2013.05.035>.

12. Huang Zhisong, Wang Guangzhu, Feng Jianzhou, Ou Zhujiang, Zhao Ximin, Liu Danging, et al. A new DC-ice-melting device based on hybrid MMC structure. In: *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. Asia-Pacific*; 2017. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8081019>.
13. Mei Hongming, Liu Jianzheng. A novel DC ice-melting equipment based on modular multilevel cascade converter. *Automation of Electric Power Systems*. 2013;37(16):96-102. <https://doi.org/10.7500/AEPS201211233>.
14. Chen L., Fu C., Li X. Optimized decision-making of power grid DC de-icing plan based on tabu search algorithm. *Power System Technology*. 2015;39:1637-1642. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2015.06.027>.
15. Guobang B., Xiaohong M., Yangzeyu O., Li L., Jianwen L., Binyuan W. Research on influencing factors of voltage control for MMC type mobile DC ice melting device. In: *IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications*. Chengdu; 2021, p. 1256-1260. <https://doi.org/10.1109/ICIEA51954.2021.9516122>.
16. Li B., Huang L., Xu P., Chen Q., Huai X., Deng Y. Study on DC ice-melting rate and critical anti-icing current of overhead contact line. In: *International Conference on Smart Electrical Grid and Renewable Energy*. Changsha; 2023, p. 354-359.
17. Lu Yi, Zhang Xu, Xia Jiahang, Zhao Chengyong. Research on melting scheme for overhead line of flexible DC grid without power failure. In: *4th IEEE Workshop on the Electronic Grid*. Xiamen; 2019. <https://doi.org/10.1109/eGRID48402.2019.9092728>.
18. Wang Yunga, Zhang Gang, Tian Zhongbei, Qiu Ruichang, Liu Z. An online thermal deicing method for urban rail transit catenary. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020;7(2):870-882. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3032614>.
19. Li Z., Wu G., Huang G., Guo Y., Zhu H. Study on icing prediction for high-speed railway catenary oriented to numerical model and deep learning. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2025;11(1):1189-1200. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3401209>.
20. Nilsson F., Moyassari A., Bautista Á., Castro A., Arbeloa I., Järn M., et al. Modelling anti-icing of railway overhead catenary wires by resistive heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;143:118505. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118505>.
21. Xiao S., He Y., Zhang Y., Wu G., Cao Y., Zhang X., et al. Electrical-thermal conduction and distribution characteristics of the catenary system for electrified railway applying electrothermal ice-melting technique. *Applied Thermal Engineering*. 2025;277:126809. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126809>.
22. Sirui Yu, Song Mengjie, Gao Runmiao, Bae Jiwoong, Zhang Xuan, Zhou Shiqiang. A review of icing prediction techniques for four typical surfaces in low-temperature natural environments. *Applied Thermal Engineering*. 2024;241:122418. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122418>.
23. Yang Guolin, Jiang Xingliang, Liao Yi, Li Tao, Deng Ying, Wang Maozheng, et al. Research on load transfer melt-icing technology of transmission lines: Its critical melt-icing thickness and experimental validation. *Electric Power Systems Research*. 2023;221:109409. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109409>.
24. Hou Yuning, Wang Haifei, Xue Manyu, Wang Tingkan, Wang Cong, Chen Jianchun. An no power failure ice melting system based on flux controlled reactor. In: *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems*. Harbin; 2019. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921434>.
25. Huang G., Wu M., Liang J., Fu S., Tian F., Pei X., et al. Research on the DC ice-melting model and its influencing factors on the overhead contact systems of an electrification railway. *Energies*. 2025;18:1028. <https://doi.org/10.3390/en18051028>.
26. Ge Y., Chen J., Li Z., Hu H., He Z. Terminal series-connected catenary online anti-icing and de-icing system for double-track AC electric railways. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2026;73(2):1943-1955. <https://doi.org/10.1109/TIE.2025.3600522>.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Multi asymmetrical modes of electric systems*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2005, 273 p. (In Russ.). EDN: PTVITA.
28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Simulation of DC traction power supply systems based on phase coordinates*. Moscow: Direkt-Media; 2023, 156 p. (In Russ.). EDN: LIJPRI.
29. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Simulation of ice melting dynamics on the wires of overhead power lines and traction contact suspensions. *System Analysis and Mathematical Modeling*. 2022;4(1):11-37. [https://doi.org/10.17150/2713-1734.2022.4\(1\).11-37](https://doi.org/10.17150/2713-1734.2022.4(1).11-37). EDN: HLXMBJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Андрей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
✉ and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov,
Dr. Sci (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Transport
Electrical Engineering,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074,
Russian Federation
✉ and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Суслов Константин Витальевич,

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры гидроэнергетики
и возобновляемых источников энергии,
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
111250, Российская Федерация, г. Москва,
ул. Красноказарменная, 14, стр. 1
dr.souslov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>

Овечкин Илья Сергеевич,

аспирант,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
iliaov2015@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>

Konstantin V. Suslov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Hydropower and
Renewable Energy Sources,
National Research University "Moscow Power
Engineering Institute" (MPEI),
14, Krasnokazarmennaya St., build.1, Moscow
111250, Russian Federation
dr.souslov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>

Ilya S. Ovechkin,

Postgraduate Student,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074,
Russian Federation
iliaov2015@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Суслов Константин Витальевич с 2015 года и Крюков Андрей Васильевич с 2018 года являются членами редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal», но не имеют отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.12.2025 г.; одобрена после рецензирования 19.01.2026 г.; принята к публикации 30.02.2026 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Konstantin V. Suslov and Andrey V. Kryukov had been members of the iPolytech Journal Editorial Board since 2015 and 2018 correspondently, but they were not involved in making a decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 15.12.2025; approved after reviewing 19.01.2026; accepted for publication 30.02.2026.