

Научная статья
УДК 621.311

В.П. Закарюкин

ООО «Smart grid»,

г. Иркутск, Российская Федерация

А.В. Крюков

Иркутский государственный университет

путей сообщения;

Иркутский национальный исследовательский технический
университет,

г. Иркутск, Российская Федерация

Моделирование динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей

Аннотация. Отложения гололеда на проводах линий электропередачи могут приводить к их разрегулировке, сближению, «пляске» и разрыву, а также к разрушению траверс, консольных конструкций, кронштейнов и даже самих опор. Освобождение проводов от накопившегося на них льда можно выполнить механическими, тепловыми и химическими методами. Нагрев проводов в целях профилактики, а также плавление льда на их поверхности относят к тепловым способам. В условиях цифровизации электроэнергетики для выбора наиболее рациональных схем плавки должны применяться математические модели, учитывающие все факторы сложных процессов нагрева и плавки гололедных отложений, а также современные компьютерные технологии.

Такие математические модели могут быть реализованы на основе методов моделирования электроэнергетических систем и тяговых сетей железных дорог, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения. В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку математических методов и программного обеспечения для моделирования динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей.

Результаты проведенных исследований позволили включить в программный комплекс Fazonord модуль расчета плавки гололеда на проводах воздушных ЛЭП и тяговых сетей. В нем определяются токи контролируемых проводов, их 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 методов и программного обеспечения на практике позволит более обоснованно планировать мероприятия по устранению гололедообразований с проводов ЛЭП и контактных подвесок.

Ключевые слова. Плавка гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей, компьютерные модели.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», проект № АААА-А20-12011690029-4 от 16.11.2020.

Информация о статье. Дата поступления: 28 февраля 2022 г.

V.P. Zakaryukin*LLC "Smart grid",
Irkutsk, Russian Federation***A.V. Kryukov***Irkutsk State Transport University;
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation*

Simulation of Ice Melting Dynamics on the Wires of Overhead Power Lines and Traction Contact Suspensions

Abstract. Ice deposits on the wires can lead to their misalignment, convergence, "dance" and rupture, as well as to the destruction of traverses, cantilever structures, brackets and even the supports themselves. The release of wires from the ice can be performed by mechanical, thermal and chemical methods. Heating of wires to prevent ice buildup, as well as the melting of ice on their surface, are thermal methods. In the conditions of digitalization of the electric power industry to select the most relevant melting scheme we should use mathematical models that take into account all the factors of complex processes of heating and melting of ice deposits, as well as modern computer technologies. Such mathematical models can be implemented on the basis of modeling methods for electric power systems and railway traction networks developed at the Irkutsk State Transport University. The article presents the results of research aimed at developing mathematical methods and software for modeling the dynamics of ice melting on wires of overhead power lines and contact suspensions of traction networks. The results of the study enabled us to include in the Fazonord software package a module to calculate ice melting on the wires of overhead power lines and traction networks. It determines the currents in the wires, their temperatures and thickness of the remaining ice buildup above the melted groove. These parameters are calculated for the beginning and for the end of the controlled wire. On this basis, a systematic approach is applied to solve the problem of modeling ice melting processes, since the calculations of thermal processes are based on determining the modes of a complex EPS or a traction power supply system. The use of the developed methods and software will ensure the application of more efficient measures to eliminate icing from power lines and contact suspensions.

Keywords. Ice melting on wires of overhead power lines and traction contact suspensions, computer models.

Financing. A study was carried out within the framework of the state task "Conducting applied scientific research" on the topic "Improving the quality of assessment and electromagnetic safety in the field of electric power industry of railway transport equipped with Smart Grid applications, equipped with the use of methods and means of mathematical analysis based on phase coordinates", project No. AAAA-A20-120111690029-4 dated 11/16/2020.

Article info. Received 28 February 2022.

Введение

Во время наступления отрицательных температур в отдельных районах на проводах воздушных линий электропередачи и тяговых сетей образуется лед. Гололедообразования усложняют нормальные условия эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) и систем тягового электроснабжения (СТЭ) [1; 2]. За по-

следние двадцать лет количество районов РФ, охваченных обследованием проводов, значительно увеличилось. При относительно теплых зимах на поверхности проводов оседают молекулы воды и начинается обвальный процесс образования твердого наста, толщина которого может достигать 20 мм и более. Отложения гололеда, изморози и мокрого снега на проводах могут приводить к следующим негативным последствиям [3]:

- разрегулировке, сближению, «пляске» и разрыву проводов;
- разрушению траверс, консольных конструкций, кронштейнов и даже самих опор.

Освобождение проводов от накопившегося на них льда можно выполнить механическими, тепловыми и химическими методами. Нагрев проводов в целях профилактики, а также плавление льда на их поверхности относят к тепловым способам. В условиях цифровизации электроэнергетики [4; 5] для выбора наиболее рациональных схем плавки должны применяться математические модели, учитывающие основные факторы сложных процессов нагрева и плавки гололедных отложений, а также современные компьютерные технологии.

Вопросам плавки гололеда посвящено большое число работ. Одна из первых статей, в которой было приведено решение задачи расчета тока и времени плавления гололеда на линиях электропередачи (ЛЭП) была опубликована в 1946 г. [1]. Уточнения к основам теории нагрева проводов воздушных линий (ВЛ) электропередачи описаны в работе [6], а условия успешной плавки гололеда на ВЛ сформулированы в статье [7]. Решения задач определения нагрузочной способности и мониторинга ВЛ в экстремальных погодных условиях приведены в работе [8]. Результаты исследований режимов плавки гололедных образований на грозозащитных тросах с оптоволоконным кабелем представлены в статье [9]. Вопросы диагностики, реконструкции и эксплуатации ВЛ в гололедных районах подробно рассмотрены в монографии [10]. Программно-технические средства для мониторинга ВЛ и управления ЭЭС в экстремальных погодных условиях описаны в работе [11]. Результаты анализа параметров режима плавки гололеда на воздушных ЛЭП приведены в статье [12]. Вопросы релейной защиты установок плавки гололеда рассмотрены в работе [13]. Интеллектуальная система плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП представлена в статьях [14; 15]. Применению вольтодобавочных устройств для плавки гололеда посвящена работа [16]. Рациональные методы удаления гололеда в сельских электрических сетях 6–10 кВ описаны в статье [17]. Программа для определения времени плавки гололеда представлена в работе [18]. Инновационные подходы к плавке гололеда рассмотрены в статье [19]. Организации режимов удаления гололе-

дообразований без отключения потребителей посвящены работы [20; 21]. Результаты анализа методов плавки в условиях южного региона РФ приведены в статье [22]. Вопросы выбора очередности плавок гололеда в районе электрических сетей рассмотрены в работе [23]. Стадиальный алгоритм выбора очередности плавок гололеда на магистральных ВЛ представлен в статье [24]. В работе [25] приведено решение задачи снижения расхода энергии на плавку гололеда. Новые технические решения, применимые для плавки гололеда на ВЛ 220 и 330 кВ, описаны в статье [26]. Технологии плавки гололеда на проводах и тросах ВЛ представлены в работе [27]. Метод оперативного расчета противообледенительной и гололедной мощности ЛЭП на основе плавящих проводников описан в статье [28]. Методика проектирования модульного многоуровневого противообледенительного и ледоплавильного оборудования реального времени представлена в работе [29]. Результаты исследований методов плавки и защиты от обледенения ЛЭП в распределительной сети приведены в статье [30]. Централизованная система управления таянием льда представлена в работе [31]. Методам моделирования процесса плавки льда на ЛЭП посвящена статья [32].

Разработаны нормативные документы, регламентирующие технологии плавки гололеда. В руководящем документе¹ сформулированы методические указания по плавке гололеда переменным током. Аналогичные указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях «два провода-рельс», автоблокировки и продольного электроснабжения представлены в документе². В стандарте³ приведено руководство по расчету режимов плавки гололеда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки.

Анализ представленных выше публикаций позволяет сделать вывод о том, что многие вопросы, связанные с удалением гололеда с проводов ВЛ и тяговых сетей, проработаны достаточно подробно, что создает необходимый методический фундамент для развития и совершенствования методов компьютерного моделирования процессов плавки гололеда. Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку математических

¹ РД 34.20.511 (МУ 34-70-027-82). Методические указания по плавке гололеда переменным током.

² Методические указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПР, автоблокировки и продольного электроснабжения. М.: ОАО РЖД. 2004.

³ СТО 56947007-29.060.50.122-2012. Руководство по расчету режимов плавки гололеда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки. М.: ОАО ФСК ЕЭС, 2012. 119 с.

методов и программного обеспечения для моделирования динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей.

1. Динамика нагрева гололеда до начала плавки

В уравнении баланса статьи [6]

$$I^2 r_{\Pi} d\tau_1 = (C_{\Pi} m_{\Pi} + C_{\Gamma} m_{\Gamma}) d\theta + \alpha F_{\Gamma} \theta d\tau_1, \quad (1)$$

предлагается применять в качестве θ среднюю температуру перегрева гололедной муфты. Для теплоты нагрева гололеда это оправданно, но в отношении отвода тепла в воздух это не совсем корректно, так как наружная температура гололеда ниже средней. Поэтому при прогреве гололедной муфты эта разница увеличивается.

В уравнении (1) использованы следующие обозначения: $r_{\Pi} = r_0(1 + \beta_R t_{\Pi})$ – сопротивление провода на единицу длины, Ом/м; r_0 сопротивление единицы длины провода при его температуре 20 °С, Ом/м; t_{Π} – температура провода; β_R – температурный коэффициент сопротивления, принимаемый равным для алюминия 0,00403, алюминиевого сплава АВЕ 0,00360, стали 0,00600, 1/°С; C_{Π} – удельная теплоемкость материала провода при его температуре 0 °С; C_{Γ} – теплоемкость гололедных отложений при температуре, близкой к 0 °С; α – результирующий коэффициент теплоотдачи с поверхности гололедного осадка, Вт/(м² · °С); F_{Γ} – площадь поверхности единицы длины провода, численно равная периметру Π его сечения, м²/м; m_{Π} , m_{Γ} – соответственно, массы единицы длины провода и гололедных отложений, кг/м.

Конвективный теплообмен является наиболее существенным в балансе, поэтому в качестве текущей температуры для последнего слагаемого необходимо брать температуру внешней стенки t_{c2}

$$I^2 r_{\Pi} d\tau_1 = C_{\Pi} m_{\Pi} d\theta_{\Pi} + C_{\Gamma} m_{\Gamma} d\theta_{\Gamma} + \alpha F_{\Gamma} (t_{c2} - t_{окр}) d\tau_1, \quad (2)$$

или в конечных приращениях, полагая время независимой переменной,

$$I^2 r_{\Pi} \Delta\tau_1 = C_{\Pi} m_{\Pi} \Delta\theta_{\Pi} + C_{\Gamma} m_{\Gamma} \Delta\theta_{\Gamma} + k_F (t_{c2} - t_{окр}) \Delta\tau_1, \quad (3)$$

где $k_F = 0,001\pi\alpha D$, $D = d + 2b_{\Gamma}$ – внешний диаметр гололедного цилиндра, мм; d – диаметр провода; b_{Γ} – толщина стенки гололеда.

Достаточно корректным можно считать утверждение из статьи [9] о том, что временем нагрева гололедной муфты можно пренебречь. На этой основе появляется возможность применения уравнений стационарного процесса теплопроводности. Следует отметить, что в случае изморози время нагрева может

быть значительным, так как ее теплопроводность очень мала — $0,05 \dots 0,2$ Вт/(м · °С), однако потери теплоты за счет конвекции и излучения также невелики, и поэтому погрешность неучета времени нагрева муфты будет незначительной.

В стационарном процессе теплопроводности линейная плотность теплового потока q_{C2} , проходящего через наружную поверхность гололедной муфты, и плотность теплового потока q_{OKP} от этой поверхности в окружающую среду равны

$$q_{C2} = \frac{\pi(t_{C1} - t_{C2})}{\frac{1}{2\lambda_T} \ln \frac{D}{d}}; q_{OKP} = \alpha \pi D(t_{C2} - t_{OKP}) \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

если D и d выражены в миллиметрах. Здесь t_{C1} — температура внутренней стенки; t_{OKP} — температура окружающей среды.

Если положить равенство температуры внутренней стенки гололеда температуре провода, то можно записать

$$t_{C2} = \frac{t_{\Pi} + k_D t_{OKP}}{k_D + 1}, \text{ где } k_D = \frac{\alpha D \cdot 10^{-3}}{2\lambda_T} \ln \frac{D}{d}. \quad (5)$$

В частности, это соотношение показывает, что $d\theta_{\Pi} \neq d\theta_{\Gamma}$. По аналогии с предположением авторов статьи [7] о том, что при неодинаковости температуры t_x внутри гололедной муфты вместо зависящей от текущего ее радиуса x температуры можно использовать среднюю температуру гололеда в пределах от $x_1 = d/2$ до $x_2 = D/2$, из приведенного уравнения можно получить соотношение между дифференциалами $d\theta_{\Pi}$ и $d\theta_{\Gamma}$

$$t_x = t_{\Pi} - (t_{\Pi} - t_{CT2}) \frac{\ln(D_x/d)}{\ln(D/d)} = t_{\Pi} - (t_{\Pi} - t_{CT2}) \frac{\ln(x/x_1)}{\ln(D/d)};$$

$$t_{CP} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} t_x dx = t_{\Pi} - \frac{(t_{\Pi} - t_{CT2})d}{(D - d) \ln(D/d)} \left[\frac{D}{d} \left(\ln \frac{D}{d} - 1 \right) + 1 \right];$$

$$t_{CP} = t_{\Pi} - \frac{(t_{\Pi} - t_{CT2})d}{(D - d) \ln(D/d)} (z \ln z - z) \Big|_1^{D/d};$$

$$d\theta_{\Gamma} \approx dt_{CP} = dt_{\Pi} - (dt_{\Pi} - dt_{CT2})k_{CP} = dt_{\Pi} \left(1 - k_{CP} + \frac{k_{CP}}{k_D + 1} \right) = k_{\Pi} dt_{\Pi}; \quad (6)$$

$$k_{CP} = \frac{1}{(D/d - 1) \ln(D/d)} \left[\frac{D}{d} \left(\ln \frac{D}{d} - 1 \right) + 1 \right]; k_{\Pi} = 1 - k_{CP} + \frac{k_{CP}}{k_D + 1}. \quad (7)$$

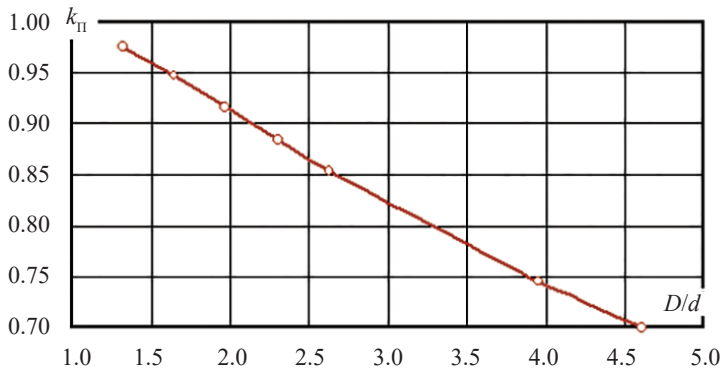
Расчеты коэффициента k_{Π} при $\lambda_T = 2,26$ Вт/(м · °С), $\alpha = 39,4$ Вт/(м · °С) представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

К определению коэффициента k_{Π}

$D, \text{ мм}$	20	25	30	35	40	60	60	70
$d, \text{ мм}$	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
D/d	1,32	1,64	1,97	2,30	2,63	3,95	3,95	4,61
k_D	0,05	0,11	0,18	0,25	0,34	0,72	0,72	0,93
k_{CP}	0,523	0,541	0,556	0,569	0,579	0,611	0,611	0,623
k_{Π}	0,976	0,947	0,916	0,885	0,854	0,745	0,745	0,700

При малой толщине стенки гололеда приращения температуры провода и гололеда совпадают, однако при большой величине b_{Γ} приращение средней температуры гололеда может составить 0,6...0,7 приращения температуры провода.

**Рис. 1. Зависимость коэффициента k_{Π} от соотношения диаметров**

Уравнение баланса в конечных приращениях таково:

$$I^2 r_{\Pi} \Delta \tau_1 = (C_{\Pi} m_{\Pi} + C_{\Gamma} m_{\Gamma} k_{\Pi}) \Delta t_{\Pi} + k_F (t_{c2} - t_{\text{окр}}) \Delta \tau_1, \quad (8)$$

где предполагаются переменными, зависящими от времени, ток I , сопротивление r_{Π} и температура t_{Π} провода, температура внешней стенки гололеда t_{c2} .

В процессе вычислений задается шаг по времени $\Delta \tau_1$, предыдущая (или исходная) температуры провода и внешней стенки гололеда (последняя в начале процесса вычислений предполагается равной температуре воздуха). Из уравнения баланса определяется текущее значение Δt_{Π} и текущие температуры.

2. Динамика плавки гололеда

После достижения температуры провода значения 0...2 °С начинается второй этап — непосредственная плавка гололеда — продолжающийся до проплавления гололедной канавки и опада-

ния муфты. В этот период мощность нагрева провода расходуется на выплавление канавки в муфте гололеда P_K и на рассеивание тепла в окружающую среду $P_{\text{окр}}$:

$$I^2 r_{\Pi} = P_K + P_{\text{окр}},$$

причем температуру внутренней стенки гололеда можно считать равной нулю, а сопротивление провода остается постоянным и равным его сопротивлению при нулевой температуре. Температура внешней стенки до окончания плавки не меняется, что означает отсутствие тепла на нагрев гололедной муфты. Энергия нагрева провода за время $d\tau_2$ расходуется на плавление слоя гололеда толщиной $d\delta$ и отвод тепла в воздух:

$$I^2 r_0 d\tau_2 = 1,1 q_{\text{пл}} \rho_{\Gamma} d_{\text{пр}} d\delta + \alpha \pi D (t_{\text{с2}} - t_{\text{окр}}) d\tau_2, \quad (9)$$

где $dS_{\Pi} \approx 1,1 d_{\text{пр}} d\delta$ — площадь поверхности плавки; ρ_{Γ} — плотность гололеда; $q_{\text{пл}}$ — теплота плавления гололедно-изморозевого образования, принимаемая равной $333 \cdot 10^3$ Вт · с/кг; $D, d_{\text{пр}}$ — диаметр гололедной муфты и провода, м; δ — текущая толщина стенки гололеда, м, уменьшающаяся по мере проплавления канавки в муфте; $t_{\text{окр}} < 0$ — температура воздуха.

Время плавки определяется путем численного интегрирования дифференциальных уравнений теплового баланса. Интегрирование ведется до тех пор, пока δ не станет равной нулю.

Запись уравнения в конечных приращениях дает возможность вычислить уменьшение толщины протаиваемой канавки за время $\Delta\tau_2$:

$$\Delta\delta = \frac{I^2 r_0 - \alpha \pi D (t_{\text{с2}} - t_{\text{окр}})}{1,1 q_{\text{пл}} \rho_{\Gamma} d_{\text{пр}}} \Delta\tau_2, \text{ м.} \quad (10)$$

3. Температурный режим провода после расплавления гололеда

В задаче расчета процесса нагрева провода с гололедом и испарения оставшейся после отпадения муфты влаги есть неопределенный момент, касающийся температуры провода в процессах плавки и испарения воды. Доля энергии на нагрев провода по сравнению с энергией расплавления льда и парообразования мала, и предположение о том, что температура провода в течение процессов плавки и испарения воды остается вблизи нуля, недостаточно обосновано. Вместе с тем такой подход позволяет сравнительно просто рассчитывать температурный режим провода после отпадения гололедной муфты. В этом случае можно рассматривать процесс тепломассообмена [6], где на основании введения коэффициента влаговыведения по [34] появляется возможность расчета

нагрева провода в ситуациях наличия слоя воды на проводе⁴. Коэффициент теплоотдачи с провода в окружающий воздух по [6] включает в себя две составляющие: коэффициент теплоотдачи конвекцией α_K и коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием α_L

$$\alpha = k_V k_D \alpha_K + \alpha_L, \quad (11)$$

где k_V — коэффициент, учитывающий направление ветра по отношению к оси провода; k_D — коэффициент влаговываждения, учитывающий интенсификацию теплообмена при погодных условиях, способствующих образованию гололеда. При отсутствии осадков $k_D = 1$. Коэффициент k_V принимают для гладких цилиндров и для витых проводов равным единице при поперечном (угол атаки ветра $80 \dots 90^\circ$) и равным $0,50 \dots 0,55$ при продольном (угол атаки ветра менее 30°) обдуве. Как указано в [там же], имеются данные о том, что значение k_V при продольном обдуве не ниже $0,7$.

Представленная в [там же] таблица значений коэффициента k_D хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени в зависимости от температуры окружающей среды $x = t_{\text{окр}}, ^\circ\text{C}$, в пределах от -10°C до 0°C :

$$k_D = 6,933 \cdot 10^{-4} x^3 + 1,829 \cdot 10^{-2} x^2 + 0,1765 x + 2,248. \quad (12)$$

Некоторые соображения могут быть высказаны по поводу малой значимости для температуры провода оставшегося после отпадения гололеда слоя воды. Этот слой приближенно можно считать цилиндрическим [там же] с толщиной стенки $0,05 d_{\text{пр}}$ и массой $0,05 \rho_B \pi d_{\text{пр}}^2$ на 1 м длины (около половины прослойки воды). Доля остающейся воды определяется соотношением поверхностных энергий льда $0,5 \text{ Дж/м}^2$ и металла провода: для окисла алюминия $0,68 \text{ Дж/м}^2$, для окисла железа $0,4 \text{ Дж/м}^2$. Если для алюминия и железа можно предполагать наличие окисной пленки на поверхности, то для меди это не совсем так. Поверхностная энергия меди составляет $1,71 \text{ Дж/м}^2$, и после отпадения гололеда на медном проводе останется большая часть водяной пленки.

При примерно одинаковых долях воды на оттаившем гололеде и проводе на испарение оставшейся воды потребуется энергия $W_{\text{пар}} = 0,05 q_{\text{пар}} \rho_B \pi d_{\text{пр}}^2$, где $q_{\text{пар}} = 2500 \text{ Дж/г}$ — теплота парообразования при 0°C . С учетом изменяющегося тока окончание процесса испарения наступает, когда сумма $r_0 \Delta \tau_3 \sum_{i=1}^n I_i^2$ окажется больше или равна $W_{\text{пар}}$. Теплопередачей за счет конвекции и излучения, а также теплотой нагрева провода по сравнению с тепловой парообразования можно пренебречь, и тогда есть возможность определения времени испарения оставшейся на проводе воды.

⁴ Независимо от причин его появления — либо остаток протаявшего гололеда, либо осаждение влаги при мороси и дожде.

К примеру, для провода АС-120/19 $d_{\text{пр}} = 1,52$ см и энергия на испарение равна $W_{\text{ИАР}} = 0,05 \cdot 2500 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 1,52^2 \cdot 100 = 88,3$ кДж/м. При токе 450 А и $r_0 = 0,00429$ Ом/м время испарения составит $\tau_3 = 88300 / (450^2 \cdot 0,00429) = 101$ с.

Тепловая постоянная нагрева провода при неизменном сопротивлении может быть определена из равенства [35]

$$T_0 = \frac{m_{\text{п}} C_0}{\pi D k_{\text{т}}}, \text{ с,}$$

где $m_{\text{п}} = 0,324 + 0,147 = 0,471$ кг/м — масса 1 м провода (1 м провода содержит 0,324 кг алюминия и 0,147 кг стали); $D = 0,0152$ м — диаметр провода; $C_0 = 745$ Дж/(кг · °С) — удельная теплоемкость провода; $k_{\text{т}} = 27,4$ Вт/(м² · °С) — коэффициент теплоотдачи.

При таких параметрах

$$T_0 = \frac{0,471 \cdot 745}{3,14 \cdot 0,0152 \cdot 27,4} = 268 \text{ с,}$$

что существенно больше времени испарения, и можно считать, что за это время температура провода изменится мало.

После испарения воды при отсутствии мороси или дождя наступает четвертый этап нагрева провода, описываемый следующим уравнением баланса по аналогии с [6] при отсутствии нагрева солнечной радиацией:

$$I^2 R_{20} [1 + \beta_{\text{R}} (t - 20)] d\tau_4 = c_0 m (1 + \beta_{\text{C}} t) dt + \alpha F (t - t_{\text{окр}}) d\tau_4, \quad (13)$$

где I — ток провода, А; R_{20} — сопротивление единицы длины провода при его температуре 20 °С, Ом/м; β_{R} — температурный коэффициент сопротивления, принимаемый равным для алюминия 0,00403, алюминиевого сплава АВЕ 0,00360, стали 0,00600, 1/°С; τ_4 — текущее время, с; m — масса единицы длины провода, кг/м; β_{C} — температурный коэффициент теплоемкости, 1/°С; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °С); F — площадь поверхности единицы длины провода, м²/м; t — температура провода, °С. Удельная теплоемкость c_0 материала провода при температуре 0 °С для меди равна 384, для алюминия 886 и для стали 437 Вт · с/(кг · °С).

Температурный коэффициент теплоемкости β_{C} для меди равен 0,000279, для алюминия 0,000534 и для стали 0,001076 1/°С. Для проводов со стальными сердечниками, биметаллических и других конструкций, включающих части, выполненные из разных материалов, имеющих в общем случае соответственно массу $m_1, m_2, \dots, m_n$, теплоемкость $c_1, c_2, \dots, c_n$ и температурные коэффициенты теплоемкости $\beta_{\text{C}1}, \beta_{\text{C}2}, \dots, \beta_{\text{C}n}$, принимают [6]

$$cm = c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_n m_n; \beta_c = \frac{\beta_{c1} m_1 + \beta_{c2} m_2 + \dots + \beta_{cn} m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}. \quad (14)$$

Для вычисления площади поверхности F единицы длины провода, численно равной периметру его сечения Π , используются следующие формулы [6]:

$$\Pi = \pi D_{(\text{мм})} \cdot 10^{-3}, \text{ м, для круглых проводов;}$$

$$\Pi = 0,5\pi D_{(\text{мм})}(n + 2) \cdot 10^{-3}, \text{ м, } n = \pi \left(\frac{D_{(\text{мм})}}{d} - 1 \right), \text{ для витых проводов;}$$

$$\Pi \approx 1,63(A + H) \cdot 10^{-3} \text{ м, для фасонных контактных проводов,}$$

где $D_{(\text{мм})}$ — расчетный (справочный) диаметр провода, мм; d — диаметр проволок наружного повива витого провода, мм; n — число проволок в наружном повиве витого провода, определяемое по справочным данным или по приведенной формуле с округлением в меньшую сторону; A, H — справочные размеры поперечного сечения фасонного контактного провода, мм.

В конечных приращении уравнение (13) принимает вид

$$\Delta t = \frac{I^2 R_{20} [1 + \beta_R (t - 20)] - \alpha F (t - t_{\text{окр}})}{c_0 m (1 + \beta_c t)} \Delta \tau_4. \quad (15)$$

Расчет начинается с температуры предыдущего этапа, то есть с температуры 1...2 °С. На каждом очередном шаге в формулу подставляется значение температуры предыдущего шага.

В соответствии с [6]

$$\alpha_K = 102 V^{0,44} / D_{\text{Э}(\text{мм})}^{0,56}, \text{ если, } 10 \leq \text{Re}_l \leq 10^3$$

или

$$\alpha_K = 73,3 V^{0,59} / D_{\text{Э}(\text{мм})}^{0,41}, \text{ если, } 10^3 \leq \text{Re}_l \leq 10^5,$$

где $D_{\text{Э}(\text{мм})} = \Pi / \pi$ — эквивалентный диаметр провода, мм; V — скорость охлаждающего потока воздуха (скорость ветра), м/с;

$\text{Re}_l = \frac{114,2 D_{\text{Э}(\text{мм})} V}{(1 + 0,0032 t_{\text{окр}})^2}$ — число Рейнольдса. Если в приведенных формулах для α_K принять наименьшее значение скорости ветра 0,6 м/с, то при этом будут учтены условия теплоотдачи и при штиле.

Составляющую коэффициента теплоотдачи излучением [33] $\alpha_{\text{л}}$ вычисляют по формуле [6]:

$$\alpha_{\text{л}} \approx 4,44 \varepsilon (1 + 0,008 t) (1 + 0,004 t_{\text{окр}}),$$

где ε — степень черноты провода. Если поверхность провода окислена и загрязнена, при этом значение ε принимают равным для медных и сталемедных проводов 0,8, для алюминиевых и сталеалюминиевых — 0,6, для стальных оцинкованных — 0,3.

4. Алгоритм расчета процесса плавки гололеда

1. Для проведения вычислений необходимы следующие исходные данные:

1) имитационная модель программного комплекса Fazonord [36] с воздушными линиями и тяговыми сетями, где в процессе движения поездов необходим расчет плавки гололеда;

2) общие параметры для многопроводной линии:

- название;
- температура окружающей среды $t_{\text{окр}} < 0$, °C;
- коэффициент k_v , учитывающий направление ветра по отношению к оси провода, по умолчанию равный единице; значение ниже 0,7 не рекомендуется;

- коэффициент влаговываждения [34] k_d ; при равенстве коэффициента единице интенсификация теплообмена при мороси или дожде не учитывается, но происходит расчет влияния пленки воды, оставшейся после отпадения гололедной муфты; при отличии коэффициента от единицы, если $-10\text{ °C} \leq t_{\text{окр}} \leq 0\text{ °C}$, производится учет интенсификации теплообмена, вне температурного диапазона коэффициент принимается равным величине, введенной пользователем;

- скорость V охлаждающего потока воздуха, по умолчанию 0,6 м/с (соответствует штилю); менее 0,6 м/с не рекомендуется;

- толщина стенки гололеда b_r , мм;

3) параметры каждого провода с возможностью их выбора по марке провода из базы данных с корректировкой отдельных значений:

- марка провода;
- его среднегеометрический диаметр d , мм;
- начальная температура провода $t_{\text{п}}$, °C, по умолчанию равная $t_{\text{окр}}$;

- масса 1 м провода m , кг/м;

- допустимый ток, А;

- эквивалентная удельная теплоемкость C_0 материала провода при температуре 0 °C, Вт · с/(кг · °C);

- температурный коэффициент теплоемкости провода β_c , 1/°C;

- сопротивление 1 м провода R_{20} при температуре 20 °C, Ом/м;

- температурный коэффициент сопротивления β_R , 1/°C;

- допустимая температура нагрева провода в длительном режиме $t_{\text{доп}}$, °C;

- толщина стенки гололеда на данном проводе, мм;

- степень черноты поверхности провода (интегральный коэффициент теплового излучения);

4) параметры гололеда с возможностью выбора из предустановленных значений:

– удельная теплоемкость C_{Γ} гололеда при температуре 0°C , по умолчанию равная $2\,300\text{ Вт} \cdot \text{с}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

– коэффициент теплопроводности гололедного осадка λ_{Γ} , по умолчанию равный $2,26\text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

– плотность гололедного осадка ρ_{Γ} , по умолчанию равная $900\text{ кг}/\text{м}^3$;

– теплота плавления гололедно-изморозевого образования $q_{\text{пл}}$, по умолчанию принимаемая равной $333 \cdot 10^3\text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{кг}$.

2. Вычисление нагрева провода до температуры 1°C производится по интервалам времени $\Delta\tau$, заданным в имитационной модели после определения режима каждой мгновенной схемы и расчета токораспределения в системах проводов.

2.1. На первом шаге температуры гололеда и провода приравняются температуре окружающей среды, $t_{\text{C1}}^{(0)} = t_{\text{C2}}^{(0)} = t_{\text{П}}^{(0)} = t_{\text{ОКР}}$, затем определяется погонное сопротивление провода

$$r_{\text{П}}^{(0)} = R_{20}[1 + \beta_{\text{R}}(t_{\text{П}}^{(0)} - 20)].$$

2.2. Рассчитываются коэффициенты k_{α} и k_{F} , связанные с коэффициентами теплоотдачи за счет конвекции и излучения:

$$k_{\alpha} = \alpha D_{\Gamma} \cdot 10^{-3} = [k_{\nu} c (V D_{\Gamma})^a + 4,45 \xi D_{\Gamma}] \cdot 10^{-3}; \quad k_{\text{F}} = \pi \alpha D_{\Gamma} \cdot 10^{-3} = \pi k_{\alpha},$$

где ξ — степень черноты (коэффициент теплового излучения), $\xi = 0,64$ для гололеда и $\xi = 0,30$ для изморози и мокрого снега; V — скорость охлаждающего потока воздуха, м/с; D_{Γ} — внешний диаметр гололедного цилиндра, мм; в диапазоне $10 \leq \text{Re}_l \leq 10^3$ параметры равны $a = 0,44$; $c = 102$, а в диапазоне $10^3 \leq \text{Re}_l \leq 10^5$ соответственно $a = 0,59$; $c = 73,3$; число Рейнольдса $\text{Re}_l \approx 114V/D_{\Gamma}$. При скорости V менее $0,6$ м/с принимается $V = 0,6$ м/с.

2.3. Определяется масса 1 м гололедной муфты, кг/м:

$$m_{\Gamma} = 0,25 \pi (D_{\Gamma}^2 - d^2) \rho_{\Gamma} \cdot 10^{-6},$$

где диаметр гололедной муфты D_{Γ} и диаметр провода d — в миллиметрах.

2.4. Вычисляются коэффициенты k_{D} , k_{CP} и $k_{\text{П}}$:

$$k_{\text{D}} = \frac{k_{\alpha}}{2 \lambda_{\Gamma}} L_d; \quad k_{\text{CP}} = \frac{K_d (L_d - 1) + 1}{(K_d - 1) L_d}; \quad k_{\text{П}} = 1 - k_{\text{CP}} + \frac{k_{\text{CP}}}{k_{\text{D}} + 1},$$

где $K_d = D_{\Gamma} / d$; $L_d = \ln K_d$.

2.5. Определяется теплота на испарение пленки воды, которая останется после отпадения гололеда

$$W_{\text{ПАР}} = 0,05 q_{\text{ПАР}} \rho_{\text{В}} \pi d^2,$$

где $q_{\text{ПАР}} = 2500$ Дж/г — теплота парообразования при 0°C ; $\rho_{\text{В}} = 1000$ кг/м³ — плотность воды.

2.6. По предыдущим значениям температуры провода и внешней стенки гололеда находятся текущие температуры провода и стенки гололеда

$$t_{\text{П}}^{(i)} = t_{\text{П}}^{(i-1)} + \Delta t_{\text{П}}^{(i)} = t_{\text{П}}^{(i-1)} + \frac{I_i^2 r_{\text{П}}^{(i-1)} - k_{\text{F}}(t_{\text{C2}}^{(i-1)} - t_{\text{ОКР}}) \Delta \tau}{C_{\text{П}} m_{\text{П}} + C_{\text{Г}} m_{\text{Г}} k_{\text{П}}};$$

$$t_{\text{C2}}^{(i)} = \frac{t_{\text{П}}^{(i-1)} + k_{\text{D}} t_{\text{ОКР}}}{k_{\text{D}} + 1}.$$

Поскольку токи начала и конца провода различаются (для контактной сети это связано с разбивкой МПЗ на участки с поездными нагрузками, а для ЛЭП — с наличием емкостных эффектов), расчеты нагрева и плавки необходимо вести отдельно для начала и для конца провода.

2.7. Вычисляется сопротивление провода при текущей температуре

$$r_{\text{П}}^{(i)} = R_{20} [1 + \beta_{\text{R}} (t_{\text{П}}^{(i)} - 20)],$$

где R_{20} — сопротивление 1 м провода при 20°C .

2.8. Шаги 2.6, 2.7 повторяются до достижения температурой провода $t_{\text{П}}^{(i)}$ интервала $0 \dots 2^\circ\text{C}$. Если на очередном шаге указанный интервал оказывается превышен, то температура провода принимается равной 2°C .

3. Вычисление процесса плавки гололедной канавки производится в предположении сохранения температур провода $t_{\text{П}}$ и внешней стенки гололеда t_{C2} , найденных на предыдущем шаге. Ток провода I_i очередного шага определяется расчетом режима мгновенной схемы.

3.1. При плавке протаивает стенка гололеда толщиной $b_{\text{Г}} = D_{\text{Г}} - d$. На первом шаге толщина канавки $\delta = b_{\text{Г}}$.

3.2. На очередном шаге i толщина проплавляемой канавки гололеда уменьшается на величину

$$\Delta \delta_i = \frac{I_i^2 R_0 + k_{\text{C2}}}{k_{\text{ПЛ}}} \Delta \tau_2, \text{ м},$$

где $R_0 = R_{20}(1 - 20\beta_R)$; $k_{C2} = k_F(t_{C2} - t_{OKP})$; $k_{ПЛ} = 1,1q_{ПЛ}\rho_I d$; $q_{ПЛ} = 333 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{с/кг}$ — теплота плавления гололедно-изморозевого образования.

3.3. Вычисляется текущая толщина проплавленной части гололеда $\delta_i = \delta_{i-1} - \Delta\delta_i$.

3.4. Шаги 3.2 и 3.3 повторяются до достижения нулевого значения δ_i .

4. Третий этап процесса заключается в испарении пленки воды, оставшейся после отпадения гололедной муфты. Теплопередачей за счет конвекции и излучения, а также теплотой нагрева провода по сравнению с теплотой парообразования можно пренебречь.

4.1. Теплота нагрева провода на первом шаге этапа принимается равной нулю, $W_0 = 0$.

4.2. Рассчитывается текущая теплота нагрева провода за интервал шага по времени $W_i = W_{i-1} + R_0 I_i^2 \Delta\tau$. Этот шаг повторяется до тех пор, пока $W_i < W_{ПАР}$.

5. Четвертый этап процесса состоит в нагреве провода без гололеда, но с учетом возможного увеличения теплоотдачи проводом за счет мороси или дождя при $t_{OKP} < 0^\circ\text{C}$.

5.1. На первом шаге температура провода $t_{\Pi}^{(0)}$ принимается равной температуре предыдущего этапа.

5.2. Вычисляется число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{114,2 V d}{(1 + 0,0032 t_{OKP})^2}$$

и принимаются формулы аппроксимации определения коэффициента конвективной теплоотдачи в зависимости от его значения

$$\alpha_K = 102 V^{0,44} / d^{0,56}, \text{ если } 10 \leq \text{Re} \leq 10^3;$$

$$\alpha_K = 73,3 V^{0,59} / d^{0,41}, \text{ если } 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^5,$$

где d подставляется в миллиметрах.

5.3. При $-10^\circ\text{C} \leq 0^\circ\text{C}$ вычисляется коэффициент влаговываждения

$$k_D = 6,933 \cdot 10^{-4} t_{OKP}^3 + 1,829 \cdot 10^{-2} t_{OKP}^2 + 0,1765 t_{OKP} + 2,248.$$

Если температура задана выходящей за указанные пределы, то величина принимается равной введенной пользователем с предупреждающим сообщением, если коэффициент больше пяти или меньше единицы.

5.4. Вычисление составляющей коэффициента теплоотдачи излучением при текущей температуре провода:

$$\alpha_{\text{л}}^{(i)} \approx 4,44 \zeta (1 + 0,008 t_{\Pi}^{(i)}) (1 + 0,004 t_{OKP}),$$

где ζ — степень черноты провода.

5.5. Определение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha^{(i)} = k_v k_d \alpha_k + \alpha_{\text{л}}^{(i)},$$

где k_v — коэффициент, учитывающий направление ветра по отношению к оси провода.

5.6. Вычисление коэффициента

$$k_F^{(i)} = \alpha^{(i)} \pi d \cdot 10^{-3}.$$

5.7. Определение текущей температуры провода

$$t^{(i)} = t^{(i-1)} + \Delta t^{(i)} = t^{(i-1)} + \frac{I_i^2 R_{20} [1 + \beta_R (t_{\text{П}}^{(i-1)} - 20)] - k_F^{(i)} (t_{\text{П}}^{(i-1)} - t_{\text{ОКР}}) \Delta \tau}{c_0 m (1 + \beta_C t_{\text{П}}^{(i-1)})} \Delta \tau.$$

5.8. На следующих шагах повторяются пункты 5.4...5.7.

5. Примеры моделирования

Для иллюстрации возможностей моделирования плавки гололеда рассмотрена система электроснабжения двухпутного участка железной дороги 25 кВ с перевальным профилем пути и с протяженными уклонами 15...17 тысячных. Система тягового электроснабжения участка представлена пятью тяговыми подстанциями ТП2 – ТП6, питаемых напряжением 110 кВ от сети 220 кВ через автотрансформаторы районной подстанции РПЭ 200000/220/110 и подстанции ТП6 125000/220/110 (рис. 2). Тяговые трансформаторы ТДТНЖ-32000/110 подстанции ТП5 и ТДТНЖ-40000/110 остальных подстанций представлены двухобмоточными моделями.

Перепад высот при движении на подъем составляет 379 м для нечетного поезда и 428 м для четного с протяженными

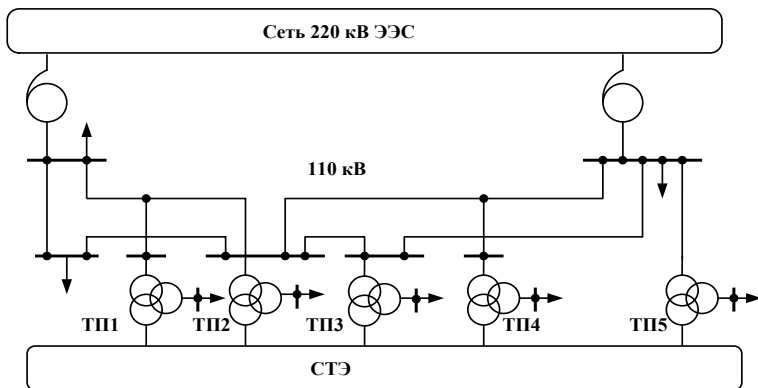


Рис. 2. Схема моделируемой сети ЭЭС и СТЭ

уклонами. Моделирование проводилось с помощью программного комплекса Fazonord [36]. Фрагменты схем расчетной модели показаны на рис. 3. Принятый для моделирования график движения поездов массами 4 500 (нечетные) и 6 000 т (четные) отображен на рис. 4. Токовые профили поездов представлены на рис. 5.

Четный поезд до пикета 5 274 км идет на подъем с уклонами 13..17 тысячных, а далее до подстанции ТП6 движется, за исключением небольшого отрезка, при значительном отрицательном уклоне. Подобная ситуация имеет место и для нечетного поезда. Тяговые расчеты проведены для звеньев пути и электровоза ВЛ-80р. Схема расчетной модели приведена на рис. 3.

На рис. 6 показано расположение проводов головной ЛЭП, для которой проводилось моделирование плавки гололеда.

Головная ЛЭП-220 кВ

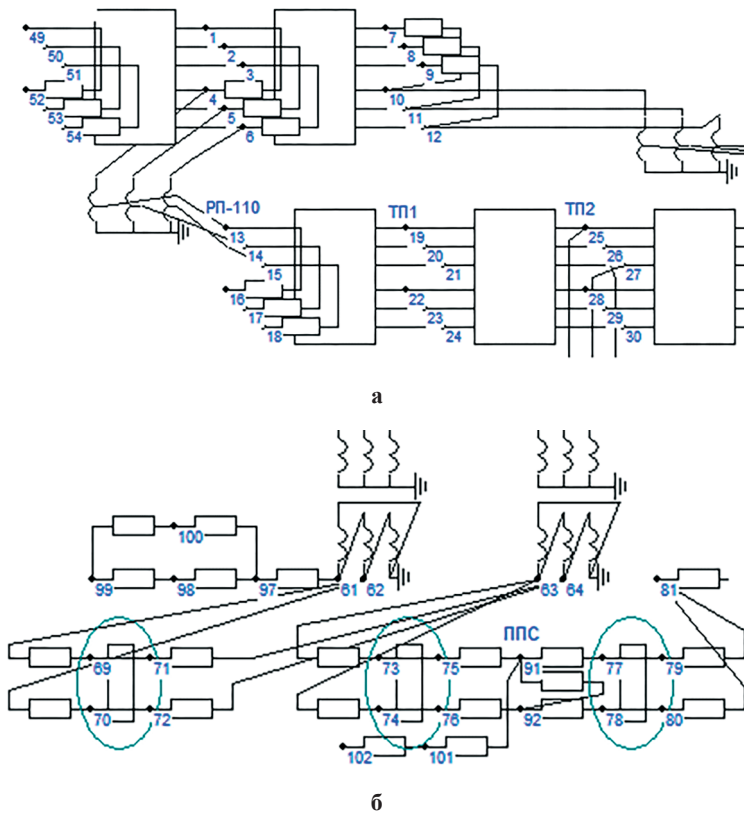


Рис. 3. Фрагменты расчетной схемы: а — часть схемы, отвечающей внешней сети; б — часть схемы, соответствующей тяговой сети 25 кВ

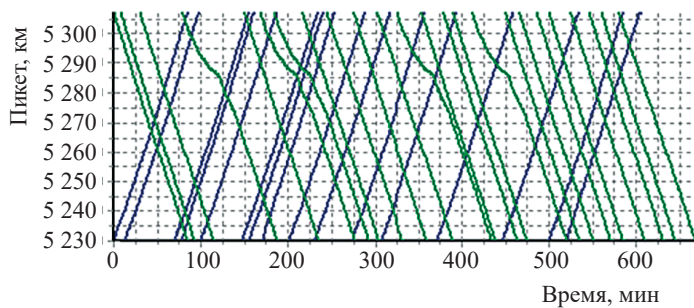


Рис. 4. График движения поездов

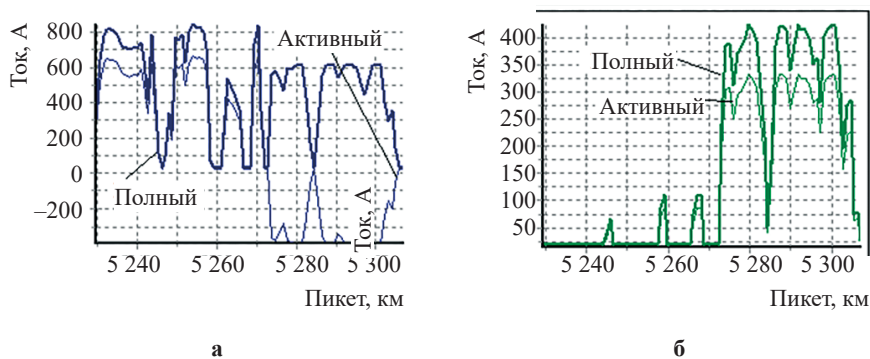


Рис. 5. Токовые профили: а — четного поезда массой 6 000 т;
 б — нечетный поезд массой 2 700 т

На рис. 7 и в табл. 2 и 3 приведены результаты моделирования процесса плавки гололеда на проводе марки АС-300/48 головной ЛЭП 220 кВ (рис. 3).

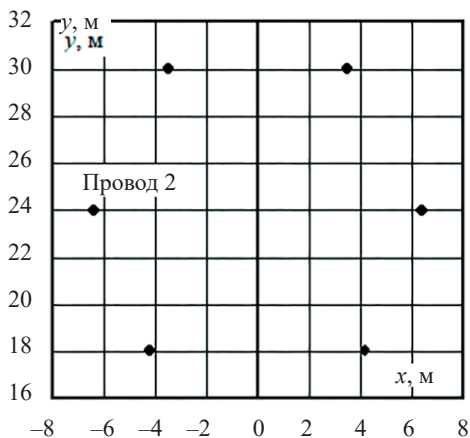


Рис. 6. Координаты расположения проводов АС-300
 головной ЛЭП 220 кВ

Таблица 2

Временные характеристики, мин

Показатель	Начало провода	Конец провода
Время до начала плавки	4	4
Время плавки	26	25

Таблица 3

Токи и температуры

Параметр	Место измерения	Мгновенное значение	Усреднение за 3 мин	Усреднение за 20 мин
Ток, А	Начало	960	946	914
	Конец	961	948	916
Макс. температура, град.	Начало	56,5	52,8	30,5
	Конец	58,4	55	33,7

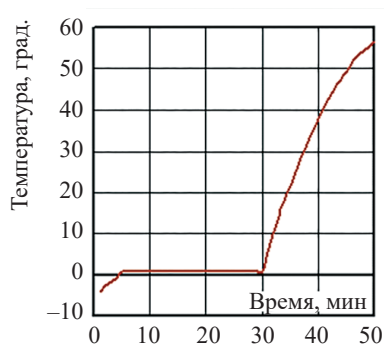
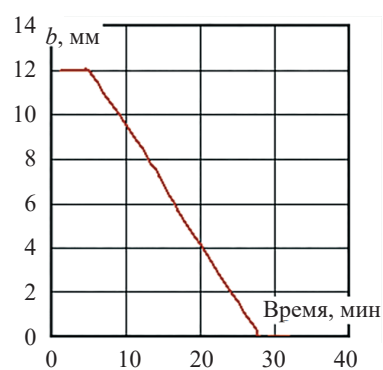
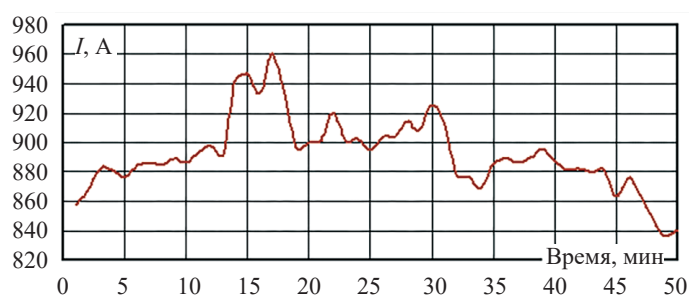
**а****б****в**

Рис. 7. Динамика плавки гололеда: а – зависимость температуры от времени; б– зависимость изменения толщины стенки гололеда от времени; в – зависимость тока провода от времени

Суммарное время плавки с учетом нагрева провода до начала плавки равно 30 мин. Расчет времени плавки по формулам, соответствующим методическим указаниям⁵, при токе 900 А и скорости ветра 0,6 м/с дает величину расчетного времени плавки 31 мин, расчет по методике статьи [7] дает 32 мин. Время до начала плавки по Fazonord и данным этой статьи одинаково и составляет 4 мин, в указаниях⁶ время до начала плавки не выделено. Меньшее время плавки при расчетах ПК Fazonord связано с тем обстоятельством, что методики [там же] и⁷ включают расчеты расхода тепла на нагрев гололедной муфты в стационарном процессе плавки, что неправомерно ввиду постоянства теплового поля муфты при плавке, если не принимается во внимание изменение массы гололеда при проплавлении канавки. В ПК Fazonord расход энергии на нагрев гололедной муфты при достижении температуры плавления не заложен.

Дополнительно проведены расчеты в схеме при неизменном токе, протекающем по проводу. Схема сети показана на рис. 8. Расчеты проведены для линии 110 кВ с проводами АС-120 при токе плавки 345 А. Температура воздуха задана равной $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость ветра 0,6 м/с при коэффициенте направления 1,0, толщина стенки гололеда 12 мм, интегральный коэффициент теплового излучения 0,6. Результаты моделирования представлены в табл. 4, 5 и на рис. 9.

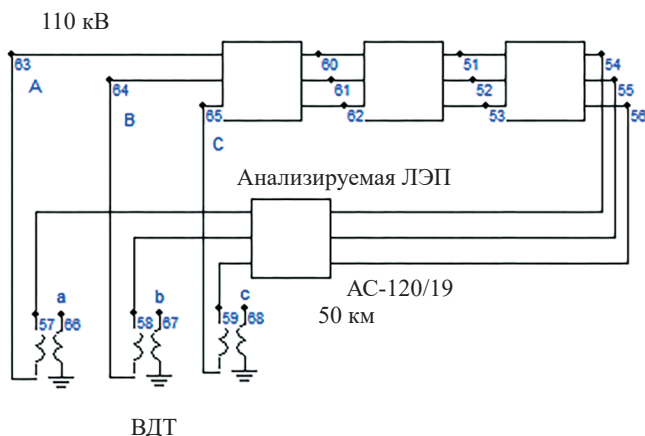


Рис. 8. Расчетная схема: ВДТ — вольтодобавочный трансформатор

⁵ Методические указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПР, автоблокировки и продольного электроснабжения. М., 2004. 148 с.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

Таблица 4

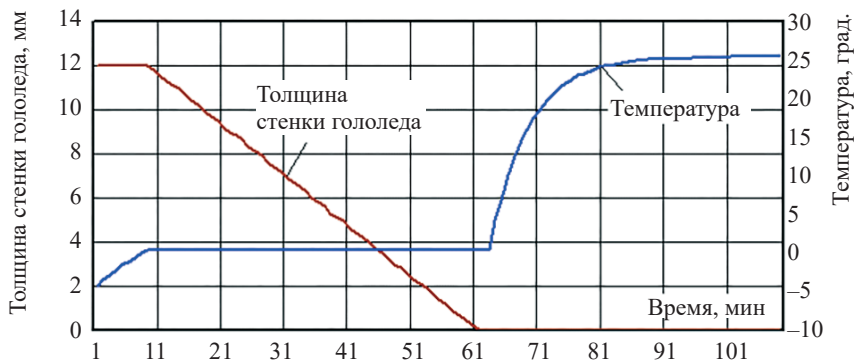
Временные характеристики, мин

Показатель	Начало провода	Конец провода
Время до начала плавки	8	7
Время плавки	55	51

Таблица 5

Токи и температуры

Параметр	Место измерения	Мгновенное значение	Усреднение за 3 мин	Усреднение за 20 мин
Ток, А	Начало	345	345	345
	Конец	351	351	351
Макс. температура, град.	Начало	25,4	25,4	25,4
	Конец	26,4	26,4	26,4

**Рис. 9. Динамика плавки гололеда**

Вычисления процесса в ПК Fazonord дали время до начала плавки 8 мин и время плавки 55 мин с суммарным временем 63 мин. Расчеты по методическим указаниям⁸ и по методике [7] дали одинаковые результаты суммарного времени 69 мин. Указанная методика выделяет время до начала плавки, которое равно 8 мин. Полученные расхождения суммарного времени плавки в 8,6 % укладываются в отказ от учета нагрева гололедной муфты в процессе проплавления в ПК Fazonord.

⁸ МУ 34-70-027-82. РД 34.20.511 : методические указания по плавке гололеда переменным током : утв. гл. техн. управлением по эксплуатации энергосистем // Кодекс. 2022. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200042643>; Методические указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПП, автоблокировки и продольного электроснабжения. М., 2004. 148 с.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволили включить в программный комплекс Fazonord модуль расчета плавки гололеда на проводах воздушных ЛЭП и тяговых сетей. В нем определяется динамика изменения токов контролируемых проводов, их температуры и толщина остающейся гололедной части над проплавляемой канавкой. Эти параметры вычисляются для начала и для 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 ЭЭС или системы тягового электроснабжения. Использование разработанных методов и программного обеспечения на практике позволит более обоснованно планировать мероприятия по устранению гололедообразований с проводов ЛЭП и контактных подвесок.

Список использованной литературы

1. Бургсдорф В.В. Расчет тока и времени плавления гололеда на линиях электропередачи / В.В. Бургсдорф // Электричество. — 1946. — № 2. — С. 69–72.
2. Закарюкин В.П. Моделирование режимов плавки гололеда в тяговых сетях / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Н.С. Лагунова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2016. — № 2 (54). — С. 167–174.
3. Дьяков А.Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем / А.Ф. Дьяков, А.С. Засыпкин, И.И. Левченко. — Пятигорск : Южэнерготехнадзор, 2000. — 284 с.
4. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития / Я.В. Василенко // Проблемы российской экономики на современном этапе : материалы всерос. науч.-практ. конф. — Москва, 2020. — С. 105–111.
5. Воротницкий В.Э. О цифровизации в экономике и электроэнергетике / В.Э. Воротницкий // Энергетик. — 2019. — № 12. — С. 6–14.
6. Уточнения к основам теории нагревания проводов воздушных линий электропередачи / Е.П. Фигурнов, Ю.И. Жарков, Т.Е. Петрова, А.Б. Кууск // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2013. — № 1. — С. 36–40.
7. Фигурнов Е.П. Условия успешной плавки гололеда на неизолированных проводах воздушных линий / Е.П. Фигурнов, Ю.И. Жарков, Т.Е. Петрова // Электричество. — 2013. — № 8. — С. 21–27.
8. Левченко И.И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И.И. Левченко, Е.И. Сацук // Электричество. — 2008. — № 4. — С. 2–8.
9. Егоров К.С. Исследование режимов плавки для удаления гололедных образований на грозозащитных тросах с оптоволоконным кабелем / К.С. Егоров, С.И. Каськов // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — № 5. — URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/crigen/725.html>.
10. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сацук. — Москва : ИД МЭИ, 2007. — 494 с.

11. Сацук Е.И. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.02 / Е.И. Сацук. — Новочеркасск, 2011. — 32 с.
12. Анализ параметров режима плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи / Н.Ю. Шевченко, Г.Г. Угаров, С.Н. Кириллова, О.И. Елфимова // Вопросы электротехнологии. — 2019. — № 2 (23). — С. 65–73.
13. Исаев В.В. Релейная защита установок плавки гололеда / В.В. Исаев, И.А. Никитин // Релейная защита и автоматизация. — 2011. — № 1 (2). — С. 44–45.
14. Интеллектуальная система плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи ПАО «МРСК Юга» / И.И. Левченко, П.В. Гончаров, Е.И. Сацук, С.С. Шовкопляс // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2018. — № 1 (46). — С. 72–82.
15. Levchenko I.I. Intellectual Ice Melting System on Wires of Overhead Transmission Lines of Distribution Electric Networks / E.I. Levchenko, S.S. Satsuk // International Russian automation conference, Rusautocon 2019. — Sochi, 2019. — P. 8867692.
16. Применение вольтодобавочных устройств для плавки гололеда / Е.В. Добрынин, Т.В. Бошкарева, О.В. Табаков, К.В. Титоренко // Наука и образование транспорта. — 2019. — № 1. — С. 365–368.
17. Федяй О.В. Методы плавки гололеда, наиболее приемлемые для сетей 6–10 кВ, проходящих в сельской местности // Научный и человеческий капитал как движущая сила прогресса информационного общества : сб. науч. тр. — Смоленск, 2019. — С. 49–50.
18. Вавилова И.В. Программная реализация расчета времени плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи / И.В. Вавилова, А.В. Гусаров, В.С. Лукманов // Электротехнические комплексы и системы : межвуз. науч. сб. — Уфа, 2014. — С. 19–24.
19. Мясоедов Ю.В. Плавка гололеда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация / Ю.В. Мясоедов, О.Н. Коржова // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. — 2019. — № 87. — С. 65–66.
20. Комиссар А.Ю. Режим плавки гололеда без отключения потребителей / А.Ю. Комиссар, Е.Е. Тен // Научные исследования XXI века. — 2020. — № 6 (8). — С. 70–73.
21. Елизарьев А.Ю. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей / А.Ю. Елизарьев, А.Р. Валеев // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2015. — Т. 19, № 4 (70). — С. 59–65.
22. Молошная Е.С. Анализ методов плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи в условиях южного региона / Е.С. Молошная, И.В. Мельников, В.Н. Козоброд // Глобальная ядерная безопасность. — 2020. — № 2 (35). — С. 92–99.
23. Засыпкин А.С. Выбор очередности плавков гололеда в районе электрических сетей с учетом ответственности ВЛ / А.С. Засыпкин, А.Н. Щуров // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2019. — № 1 (52). — С. 72–77.
24. Засыпкин А.С. Стадиальный алгоритм выбора очередности плавков гололеда на магистральных линиях электропередачи / А.С. Засыпкин, А.Н. Щуров // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2019. — № 6 (57). — С. 42–48.
25. Дайчман Р.А. Снижение расхода энергии на плавку гололеда при увеличении тока до максимально допустимого / Р.А. Дайчман // Вестник современных исследований. — 2018. — № 9.3 (24). — С. 243–246.

26. Новые решения в системах плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения 220 и 330 кВ / А.В. Кольцов, Г.Н. Ковтун, Ю.А. Горюшин [и др.] // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2016. — Т. 12, № 4. — С. 21–27.

27. Куликова Н.А. Плавка гололеда на проводах и тросах воздушных линий электрических сетей / Н.А. Куликова, О.Н. Титаренко // Энергетические установки и технологии. — 2017. — Т. 3, № 3. — С. 45–50.

28. Real-time On-line Anti-icing and Ice-melting Power Calculation Method for Transmission Lines Based on Self-ice-melting Conductors / Bo Li, Site Mo, Yanjun Tan, Siguo Zhu. — DOI 10.1109/EI247390.2019.9061823 // 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration.

29. Design Method of Modular Multilevel Real-time On-line Anti-icing and Ice-melting Equipment Based on Self-ice-melting Conductors / Fang Zhen, Mo SiTe, Li Bo [et al.]. — DOI: 10.1109/EI247390.2019.9061959 // 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration.

30. Research on Melting and De-icing Methods of Lines in Distribution Network / Yuan Zhu, Yanjun Tan, Qingjun Huang [et al.] // 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration. DOI:10.1109/EI247390.2019.9062235.

31. Zasyplin A. Centralize ice melting controlled system / Zasyplin, A. Shchurov // 2016. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. — Chelyabinsk, 2016. — P. 564–569.

32. Korovkin N. Ice-Melting process modeling on transmission lines / N. Korovkin, V. Goncharov, N. Silin // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — Chelyabinsk, 2017. — P. 8076411.

33. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. — Москва : Энергия, 1977. — 344 с.

34. Теоретические основы хладотехники / под ред. Э.И. Гуйго. — Москва : Агроиздат, 1986. — Ч. 2 : Теплообмен. — 320 с.

35. Закарюкин В.П. Расчет динамики изменения температуры токоведущих частей при имитационном моделировании систем тягового электроснабжения / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Е.Ю. Литвинов // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. В 2 т. Красноярск, 2005. — Т. 1. — С. 221–225.

36. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. — Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. — 273 с.

References

1. Burgsdorf V.V. Calculation of the current and time of ice melting on power lines. *Elektrichestvo*, 1946, no. 2, pp. 69–72. (In Russian).

2. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Lagunova N.S. *Modelling of ice melting modes in traction networks = Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2016, no. 2, pp. 167–174. (In Russian).

3. D'yakov A.F., Zasyplin A.S., Levchenko I.I. *Prevention and elimination of ice accidents in electrical networks of power systems*. Pyatigorsk, Yuzhenergotekhnadzor Publ., 2000. 284 p.

4. Vasilenko Ya.V. *Problems of the Russian economy at the present stage. Materials of All-Russian Research Conference*. Moscow, 2020, pp. 105–111. (In Russian).

5. Vorotnitsky V.E. About digitization in economics and power industry. *Energetik = Energetik*, 2019, no. 12, pp. 6–14. (In Russian).

6. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Petrova T.E., Kuusk A.B. Refinements to the basics of the theory of heating wires of overhead power lines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* = Russian electromechanics, 2013, no. 1, pp. 36–40. (In Russian).
7. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Petrova T.E. Conditions of successful melting of ice on uninsulated wires of airlines. *Elektrichestvo*, 2013, no. 8, pp. 21–27. (In Russian).
8. Levchenko I.I., Satsuk E.I. Loading capacity and monitoring of overhead power transmission lines under extreme weather conditions. *Elektrichestvo*, 2013, no. 4, pp. 2–8. (In Russian).
9. Egorov K.S., Kaskov S.I. Research of melting operations aimed at removing a glaze from fiber-optic ground wire cable. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* = Engineering Journal: Science and Innovation, 2013, no. 5. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/crigen/725.html>. (In Russian).
10. Levchenko I.I., Zasyplin A.S., Alliluev A.A., Satsuk E.I. *Diagnostics, reconstruction and use of overhead power lines in icy regions*. Moscow, ID MEI Publ., 2007. 494 p.
11. Satsuk E.I. *Software and hardware for monitoring overhead power lines and managing the power system in extreme weather conditions*. Cand. Diss. Thesis. Novocherkassk, 2011. 32 p.
12. Shevchenko N.Yu., Ugarov G.G., Kirillova S.N., Elfimova O.I. Analysis of parameters to the ice-melting mode in overhead power transmission lines. *Voprosy elektrotehnologii* = Journal of electrotechnics, 2019, no. 2, pp. 65–73. (In Russian).
13. Isaev V.V., Nikitin I.A. Relay protection of ice melting installations. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* = Relay protection and automation, 2011, no. 1, pp. 44–45. (In Russian).
14. Levchenko I.I., Goncharov P.V., Satsuk E.I., Shovkoplyas S.S. Intelligent system for melting ice on wires and lightning protection cables of overhead power lines. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* = Electric power. Transmission and distribution, 2018, no. 1, pp. 72–82. (In Russian).
15. Levchenko I.I., Satsuk E.I., Shovkoplyas S.S. Intellectual Ice Melting System on Wires of Overhead Transmission Lines of Distribution Electric Networks. *International Russian automation conference, Rusautocon 2019*. Sochi, 2019. pp. 8867692.
16. Dobrynin E.V., Boshkareva T.V., Tabakov O.V., Titorenko K.V. Application of booster devices for ice melting. *Nauka i obrazovanie transportu* = Science and education for transport, 2019, no. 1, pp. 365–368. (In Russian).
17. Fedyai O.V. Ice melting methods most suitable for 6-10 kV networks in rural areas. *Scientific and human capital as a driving force for the progress of the information society*. Smolensk, 2019, pp. 49–50. (In Russian).
18. Vavilova I.V., Gusarov A.V., Lukmanov V.S. Software implementation of calculation of ice melting time on overhead power lines. *Electrical Complexes and Systems*. Ufa, 2014, pp. 19–24.
19. Myasoedov Yu.V., Korzhova O.N. Ice melt on the electric transmission lines: methods, innovation, operation. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki* = Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences, 2019, no. 87, pp. 65–66. (In Russian).
20. Komissar A.Y., Ten E.E. Ice melting mode without disconnecting the consumers. *Nauchnye issledovaniya XXI veka* = Scientific research in XXI century, 2020, no. 6, pp. 70–73. (In Russian).
21. Elizarev A.Yu., Valeev A.R. Ice melting on over-head transmission lines without customers disconnect. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* = Ufa State Aviation Technical University, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 59–65. (In Russian).

22. Moloshnaya E.S., Melnikov I.V., Kozobrod V.N. Analysis of ice melting techniques on aerial power lines in the southern region. *Global'naya yadernaya bezopasnost' = Global Nuclear Safety*, 2020, no. 2, pp. 92–99. (In Russian).

23. Zasyupkin A.S., Shchurov A.N. The choice of sequence of ice melting in power networks region taking into account responsibility of overhead. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and distribution*, 2019, no. 1, pp. 72–77. (In Russian).

24. Zasyupkin A.S., Shchurov A.N. Stadial Algorithm for Choosing the Sequence of Ice Melting on High voltage Transit Lines. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and distribution*, 2019, no. 6, pp. 42–48. (In Russian).

25. Daichman R.A. Reduction of energy consumption for melting ice with an increase in current to the maximum allowable. *Vestnik sovremennykh issledovaniy = Bulletin of Modern Studies*, 2018, no. 9.3, pp. 243–246. (In Russian).

26. Koltsov A.V., Kovtun G.N., Goryushin Y.A., Zhernakov Yu.V., Salihzyanov R.M. New ice-melting solutions for 220 and 330 kv ac overhead transmission lines. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and Information Complexes and Systems*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 21–27. (In Russian).

27. Kulikova N.A., Titarenko O.N. De-icing of wires and cables in overhead electric power networks. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii = Power plants and technologies*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 45–50. (In Russian).

28. Bo Li, Site Mo, Yanjun Tan, Siguo Zhu Real-time On-line Anti-icing and Ice-melting Power Calculation Method for Transmission Lines Based on Self-ice-melting Conductors. *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration*. DOI: 10.1109/EI247390.2019.9061823.

29. Fang Zhen, Mo SiTe, Li Bo, Tan Yan Jun, Zhu Si Guo Design Method of Modular Multilevel Real-time On-line Anti-icing and Ice-melting Equipment Based on Self-ice-melting Conductors. *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration*. DOI:10.1109/EI247390.2019.9061959.

30. Yuan Zhu, Yanjun Tan, Qingjun Huang, Fuyong Huang, Siguo Zhu. Research on Melting and De-icing Methods of Lines in Distribution Network. *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration*. DOI: 10.1109/EI247390.2019.9062235.

31. Zasyupkin A., Shchurov A. Centralize ice melting controlled system. *2016. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. Chelyabinsk, 2016. pp. 564–569.

32. Korovkin N., Goncharov V., Silin N. Ice-Melting process modeling on transmission lines. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Chelyabinsk, 2017, pp. 8076411.

33. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Fundamentals of heat transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1977. 344 p.

34. Guigo E.I. (ed.). *Theoretical foundations of cold technology*. Moscow, Agroizdat Publ., 1986. 320 p.

35. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Litvinov E.Yu. Calculation of the dynamics of temperature changes of current-carrying parts in the simulation of traction power supply systems. *Resource-saving technologies in railway transport. Materials of Research Conference with International Participation*. Krasnoyarsk, 2005, pp. 221–225. (In Russian).

36. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., *Multi asymmetrical modes of electric systems*. Irkutsk State University Publ., 2005. 273 p.

Информация об авторах

Закарюкин Василий Пантелеймонович — доктор технических наук, доцент, консультант ООО «Smart grid», г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: zakar49@mail.ru.

Крюков Андрей Васильевич — доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Information about the Authors

Vasiliy P. Zakaryukin — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Consultant at Smart grid LLC, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: zakar49@mail.ru.

Andrey V. Kryukov — Doctor of Technical Sciences, Professor of Irkutsk State Transport University; Professor of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Закарюкин В.П. Моделирование динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. — DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(1).11-37 // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2022. — Т. 4, № 1. — С. 11–37.

For Citation

Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Simulation of Ice Melting Dynamics on the Wires of Overhead Power Lines and Traction Contact Suspensions. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2022, vol. 4, no. 1, pp. 11–37. (In Russian). DOI: 10.17150/2713-1734.2022.4(1).11-37.