

## Электротехника

УДК 621.315.175

### СИСТЕМА ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ БЕЗ ОТКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ

*А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, В.С. Осипов*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрен комплекс вопросов по моделированию тепловых процессов в линиях электропередачи в процессе плавки гололеда и расчету потерь напряжения в линии. Для решения задачи, учитывающей изменение агрегатного состояния, предложен упрощенный алгоритм. На основе анализа электрических режимов сети в процессе плавки сделан вывод о возможности использования предложенного подхода в сетях 10 и 35 кВ определенной длины.*

**Ключевые слова:** конвективный теплообмен, плавление, потери напряжения.

Возникновение гололеда на проводах линий электропередач сопровождается серьезными проблемами. Для их решения существуют стандартные процедуры, связанные с пропусканием больших токов для расплавления ледяной оболочки. Несмотря на то, что способы борьбы известны давно, эффективность решения часто бывает низкой в силу множества причин, в числе которых и слабая оснащенность средствами диагностики и автоматизации процессов плавки.

Рассмотрим некоторые аспекты процесса образования гололеда и способы борьбы с ним с целью оценки возможности использования простых алгоритмов решения задачи. Как известно, процессу плавки предшествует отключение линии от основного источника и от нагрузки и подключение на пониженное напряжение с одной стороны и короткое замыкание с другой. Выглядит более привлекательным способ нагружения линии реактивными токами для формирования нужного по величине уровня мощности тепловых потерь (рис. 1). Ток в линии содержит две составляющие: ток нагрузки и ток, определяемый индуктивностью  $L$ . Одновременное регулирование коэффициента мощности в начале линии с помощью батареи конденсаторов  $C$  решает проблему загрузки энергосистемы реактивными токами. Для обеспечения возможности поддерживать требуемое значение тока в линии индуктивность и емкость имеют несколько ступеней регулирования.

Среди плюсов такого решения можно отметить ненужность отключения нагрузки и возможность поддержания режима, предупреждающего образование

---

*Александр Александрович Базаров (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».*

*Александр Иванович Данилушкин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».*

*Вячеслав Семенович Осипов (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».*

гололеда. Однако увеличение тока неизбежно вызывает увеличение пропускаемой мощности, что может привести как к перегрузке трансформатора, так и к недопустимо большим потерям напряжения в линии, что сделает эксплуатацию сети невозможной. Для определения допустимых режимов в линии при разных нагрузках и напряжениях в сети необходимо оценить как тепловые процессы при плавке гололеда, так и отклонения напряжений при их загрузке реактивными токами.

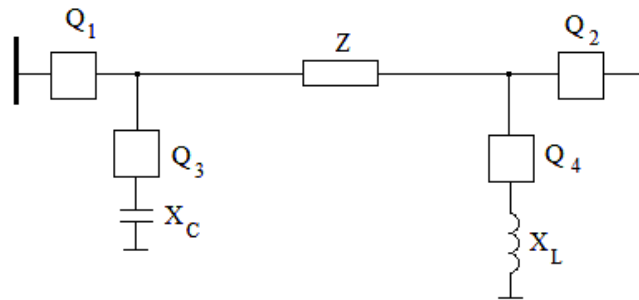


Рис. 1. Линия электропередач с коммутируемой цепью для плавки гололеда:  $X_L$ ,  $X_C$  – индуктивное и емкостное сопротивления контура для плавки;  $Q$  – выключатели

Образование гололеда наблюдается при неустойчивой погоде, когда оттепель сменяется похолоданием, при температуре ниже нуля, в туманную погоду или при выпадении переохлажденного дождя.

Различают три основных вида гололедных образований: гололед, изморозь, смесь из осадков гололеда и изморози.

Самым тяжелым режимом является образование гололеда. Гололед представляет собой плотную твердую прозрачную или полупрозрачную массу с объемным весом 600–900 кг/м<sup>3</sup>. Осадки гололеда плотно пристаю к металлическим проводам. Образование гололеда происходит при температуре от 0 до -5 °С.

Отложения гололеда, изморози и смеси происходят в большинстве случаев при ветре с наибольшими скоростями до 10–20 м/сек. В тех случаях, когда направление провода примерно перпендикулярно направлению ветра, гололедные отложения образуются с наветренной стороны проводов. Если ветер направлен вдоль провода, отложения гололеда происходят по всей его поверхности, но имеют в таких случаях значительно меньшую интенсивность и более пористую структуру.

Интенсивность гололедообразования определяется толщиной корки и объемным весом гололедного отложения. Различные районы неодинаково подвержены гололедам. В одних районах гололеды представляют собой исключительное явление и если происходят, то имеют весьма небольшую интенсивность. В других районах гололеды наблюдаются по нескольку раз в течение каждой зимы.

Вопросам борьбы с гололедными явлениями посвящено множество работ, в которых рассматриваются как диагностика гололеда, так и способы борьбы с ним.

Сложность процессов гололедообразования является причиной отсутствия надежных методов и средств его краткосрочного прогноза. В [1] проведен анализ применения различных способов и устройств диагностирования появления гололеда. Отмечено, что существующие устройства выполняют только функцию сигнализации и не решают задачи системы управления плавкой гололеда.

Развитие цифровых средств связи, измерения и обработки информации дало толчок решению существующих проблем. В работах [2, 3] приведены примеры реализации комплекса контроля гололедной нагрузки с помощью распределенных информационных систем. Связь между датчиками и системой управления осуществляется посредством радиосвязи. Непрерывный контроль температуры, влажности, скорости и направления ветра, веса проводов позволяет рассчитывать скорость нарастания гололеда и определять параметры процесса плавки. Кроме работ практической направленности существуют и исследовательские [4], где также рассматриваются вопросы сбора и обработки информации о возникновении гололеда.

Среди работ, рассматривающих круг вопросов, связанных с предотвращением образования и плавкой гололеда, с мерами по снижению отрицательных последствий гололедных явлений, нужно отметить монографию [5], в которой приведен комплексный подход к рассмотрению задачи. Среди методов решения возникающих проблем можно отметить такие, как использование проводов с углеволоконной центральной жилой для предотвращения провисания при перегреве во время плавки. Интересно выглядит не термическое, а электромеханическое воздействие на лед путем пропускания больших импульсных токов, приводящих к ударным воздействиям и далее к механическому разрушению ледяной оболочки.

Одним из способов очистки проводов от гололеда является оплавление его путем нагрева проводов электрическим током. Этот способ, широко применяющийся в линиях электропередачи, основан на следующем. Образование гололеда на проводах возможно лишь в том случае, если провод имеет температуру ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Если же провод вследствие нагревания его проходящими по нему токами имеет температуру выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то гололед на таком проводе образовываться не будет. Если провод уже покрылся гололедом, то, пропуская через него соответствующей силы ток, можно нагреть его до температуры, при которой гололед начинает постепенно таять и опадать с провода (рис. 2).

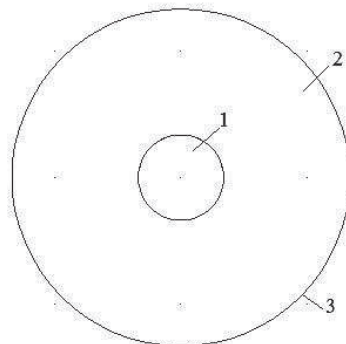


Рис. 2. Провод с ледяной оболочкой:  
1 – провод; 2 – ледяная оболочка; 3 – граница расчетной области

Степень нагрева проводов током в весьма значительной степени зависит от метеорологических условий – от температуры воздуха и от ветра. При низких температурах и особенно при сильных ветрах охлаждение проводов происходит значительно интенсивнее, вследствие чего для нагрева проводов до температуры,

при которой плавится гололед, требуются большие силы тока, пропускаемого по проводам.

Для определения параметров системы нагрева и режимов работы необходим анализ процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда». С учетом допущений о симметричном расположении ледяной оболочки, о постоянной скорости движения воздуха теплообмен может быть описан дифференциальным уравнением в частных производных с граничными и начальными условиями, что соответствует подходу при численной реализации, когда свойства задаются для каждой подобласти.

Уравнение теплопроводности для двумерной области с внутренними источниками тепла имеет вид

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + w. \quad (1)$$

Начальные условия  $T(x, y, 0) = T_0(x, y)$ .

Здесь:  $\rho$  – плотность материала;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $T$  – температура;  $w$  – удельная мощность тепловыделения.

В качестве граничных условий на боковой поверхности  $x, y \in L_B$  используется конвективный теплообмен

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_c). \quad (2)$$

Формулировка (1) принята не для осесимметричной задачи с учетом того, что в ходе расплавления ледяной оболочки происходит ее смещение относительно провода под действием силы тяжести. Правильнее говорить не о расплавлении оболочки, а о проплавлении канала. Вода, образующаяся при плавлении льда, частично просачивается через трещины и стекает на землю, а частично перемещается вверх относительно провода. Учитывая большую, чем у льда, плотность, вода не полностью окружает провод, что наряду со смещением приводит к несимметрии геометрии. В конце процесса провод просто проходит насквозь, и оболочка падает на землю.

Мощность внутренних источников локализована в проводнике. Несмотря на сравнительно небольшой диапазон температур предусмотрены зависимости всех коэффициентов от температуры. Это объясняется тем, что кроме процесса расплавления гололеда возможен нагрев участков голого провода, что приведет к перегреву.

Помимо того, что коэффициенты в уравнении (1) связаны с принадлежностью к той или иной области, имеется более сложная температурная зависимость для ледяной оболочки, обусловленная изменением агрегатного состояния. Процесс разогрева ледяной оболочки сопровождается превращением тонкого слоя льда на границе провода и оболочки в жидкую фазу. Происходит стекание жидкости в нижнюю зону, где может произойти обратное затвердевание, просачивание через стенку или сохранение в жидкой фазе. В любом случае объемные деформации ухудшают тепловой контакт нижней зоны жидкости с проводом. Частично это уменьшает отток тепла в нижнюю зону и увеличивает интенсивность прогрева верхней зоны. Указанные особенности протекания процесса существенно усложняют алгоритм расчета. Рассмотрим поэтапно формирование расчетной области и алгоритма решения.

1. *Разогрев голого провода.* Режим может быть задан для предупреждения

образования гололеда или в результате частичного расплавления. Расчетная система соответствует нелинейной задаче с постоянной геометрией и неизменным агрегатным состоянием.

2. *Разогрев провода с ледяной оболочкой до полного перехода льда в жидкую фазу.* Процесс сопровождается изменением агрегатного состояния ледяной оболочки. Изменение геометрии не производится. Особенностью расчета является сложность учета изменения теплосодержания при неизменной температуре. Стандартная формулировка такой задачи кроме уравнения (1) содержит еще одно уравнение, где переменной является не температура, а теплосодержание. Открытая система программирования в таких пакетах, как Comsol, позволяет реализовать этот подход. Однако увеличение размерности расчетной задачи всегда сопровождается не только ростом требований к вычислительным ресурсам, но и ухудшением сходимости. Учет этих соображений и стремление использовать более скромные по возможностям пакеты, такие как Elcut, обусловили разработку упрощенного алгоритма расчета. Затраченная на нагрев и фазовый переход мощность источника тепла выражается через тепловой баланс

$$P \cdot t = mc\Delta T + ml. \quad (3)$$

Здесь  $m$  – масса нагреваемого тела;  $\Delta T$  – перепад температур;  $l$  – теплота плавления льда.

По аналогии с обычной теплоемкостью можно определить дополнительное значение  $c_F$ , эквивалентное росту теплосодержания за счет теплоты плавления:

$$c_F = \frac{l}{\Delta T_F}. \quad (4)$$

Здесь необходимо задаться перепадом температуры, при котором происходит расплавление. Для практики достаточно ограничиться величиной в один градус, хотя в некоторых случаях это создает некоторые проблемы. Для ввода зависимости эквивалентной теплоемкости от температуры в качестве свойств воды кроме ввода табличных значений возможно использование аппроксимирующих выражений функции Хевисайда вида  $H = 2^{-\exp(-k(T-T_s))}$  (см. рис. 3). Однако нужно учитывать, что подобные выражения очень чувствительны к величине произведения в показателе. Снижение этой величины приводит к растягиванию по горизонтали участка сгиба кривой, а увеличение – к превышению максимально допустимого значения действительного числа компьютера. Поэтому там, где имеется возможность, лучше применять встроенные функции аппроксимации для ступенчатой функции Хевисайда, не имеющие указанного недостатка.

3. *Процесс проплавления ледяной оболочки.* Расплавление тонкого слоя льда сопровождается стеканием жидкости в нижние области и перемещением провода к верхней поверхности ледяной оболочки. Строгое описание тепловых процессов, сопровождаемых изменением геометрии, весьма затруднительно. Поэтому разработан упрощенный алгоритм расчета, заключающийся в дискретизации во времени и пространстве процессов изменения свойств и геометрии объектов. Например, изменение во времени коэффициента теплопроводности теплопроводности для отдельной области при смене льда (воды) на проводник описывается следующей зависимостью

$$\lambda = \lambda_H (H(t-t_i) - H(t-t_j)) + \lambda_M (H(t-t_j) - H(t-t_k)).$$

Здесь на интервале времени  $(t_i-t_j)$  область имеет свойства льда, а на интервале  $(t_j-t_k)$  – свойства материала проводника. Дискретное во времени изменение

свойств материала для области сопровождается рассмотренным ранее непрерывным изменением свойств в зависимости от температуры.

Возникновение гололеда на проводах происходит в условиях значительных изменений погодных условий в течение сравнительно коротких промежутков времени (несколько часов) на ограниченных расстояниях. Это приводит к тому, что по длине трассы линии электропередач могут одновременно наблюдаться режимы расплавления гололеда и нагрева голого провода. Для оценки температурных режимов рассмотрим процессы при различных скоростях движения воздуха и наличии или отсутствии гололеда.

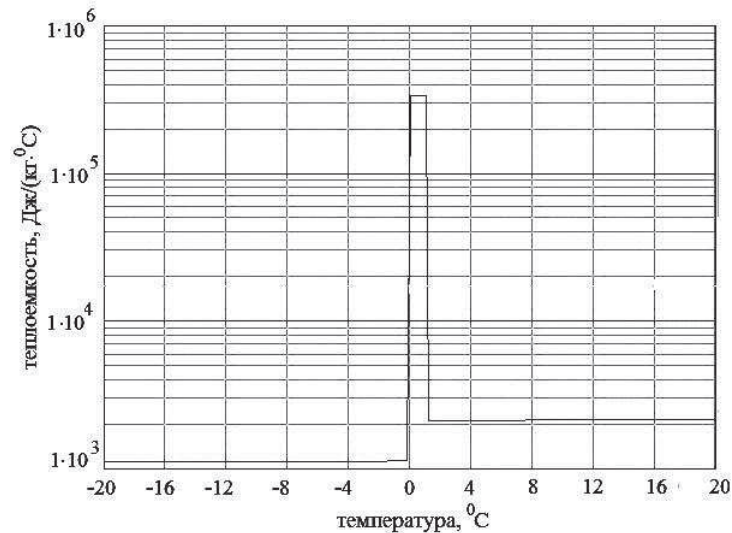


Рис. 3. Эквивалентная теплоемкость воды с учетом изменения агрегатного состояния

Определение коэффициентов конвективного теплообмена при принудительном обдуве осуществляется с помощью критериев Рейнольдса  $Re$  и Прандтля  $Pr$ , вычисляемых через физические свойства воздуха, геометрические параметры и скорость движения.

Числа Рейнольдса и Прандтля определяются следующими соотношениями [6]:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}, \quad Pr = \frac{\eta C}{\lambda},$$

где  $\rho$  – плотность;  $v$  – скорость движения воздуха;  $D$  – диаметр провода (или ледяной оболочки);  $\eta$  – динамическая вязкость;  $C$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Для значений  $Re$  в пределах от  $10^3$  до  $2 \cdot 10^5$  определяется число Нуссельта [6]:

$$\overline{Nu} = 0.245 Re^{0.6}.$$

В то же время, зная число Нуссельта, можно определить коэффициент конвективного теплообмена:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda}; \quad \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D}.$$

По приведенным соотношениям были рассчитаны значения коэффициента конвективного теплообмена для проводов сечением от 16 до 95 мм<sup>2</sup> при скорости движения воздуха от 5 до 20 м/с (рис. 4).

Полученные значения коэффициентов свидетельствуют о высокой интенсивности теплообмена. Величина мощности, рассеиваемой с одного погонного метра провода одной фазы, при условии поддержания температуры провода выше 0 °С, то есть предотвращения образования гололеда, определена с учетом коэффициентов теплообмена (рис. 5).

Нужно отметить, что моделирование процесса плавки ледяной оболочки путем проплавления показало возможность ведения процесса при минимально возможных значениях уровня мощности, достаточных для предотвращения образования гололеда. Время, затраченное на плавку, не превышает одного часа, тогда как для полного разогрева и расплавления всей оболочки необходимо в зависимости от диаметра провода при толщине оболочки 20 мм затратить гораздо больше времени. Эта особенность, а также несимметричность толщины оболочки в зависимости от направления ветра требуют постоянного контроля во избежание перегрева провода после окончания процесса расплавления.

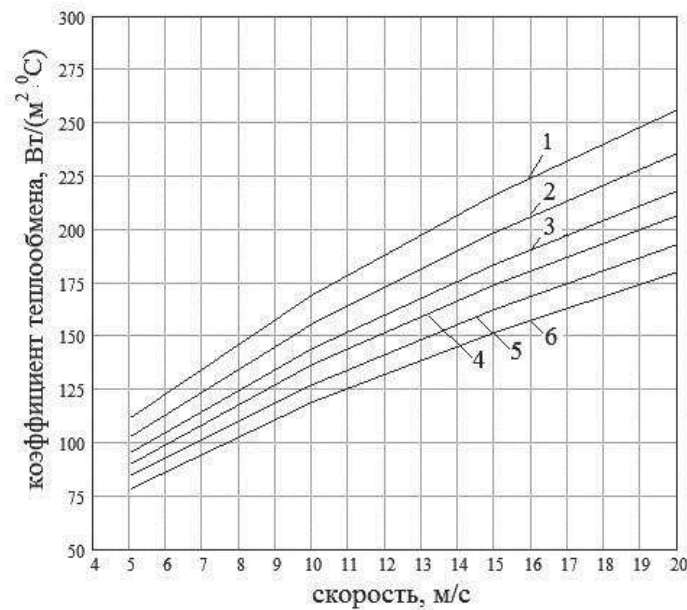


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплообмена провода с окружающей средой от скорости ветра:

1 – провод сечением 16 мм<sup>2</sup>; 2 – провод сечением 25 мм<sup>2</sup>; 3 – провод сечением 35 мм<sup>2</sup>; 4 – провод сечением 50 мм<sup>2</sup>; 5 – провод сечением 70 мм<sup>2</sup>; 6 – провод сечением 95 мм<sup>2</sup>

Соотношение мощности, передаваемой от источника потребителям, и мощности, необходимой для плавки гололеда, зависит от напряжения линии. При заданной длине линии, равной 10 км, можно определить мощность для плавки по зависимостям на рис. 5. Приняв расчетную плотность тока равной 1 А/мм<sup>2</sup>, можно вычислить передаваемую мощность для нескольких уровней напряжения.

Расчет потерь напряжения в линии (рис. 6) проводится по выражению

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I \cdot L}{U_H} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi),$$

где  $I$  – ток в линии;  $L$  – длина линии;  $r_0, x_0$  – активное и реактивное удельные сопротивления линии;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности линии.

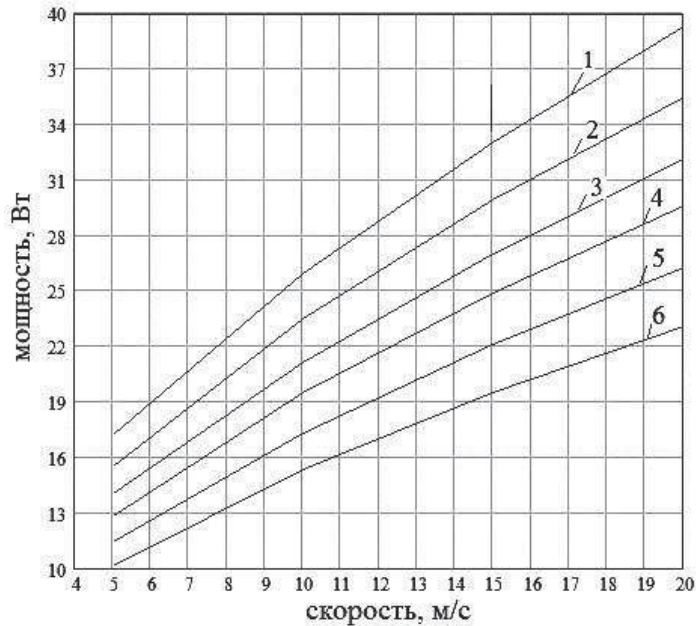


Рис. 5. Рассеиваемая мощность с одного погонного метра линии:  
1 – провод сечением 95 мм<sup>2</sup>; 2 – провод сечением 70 мм<sup>2</sup>; 3 – провод сечением 50 мм<sup>2</sup>;  
4 – провод сечением 35 мм<sup>2</sup>; 5 – провод сечением 25 мм<sup>2</sup>; 6 – провод сечением 16 мм<sup>2</sup>

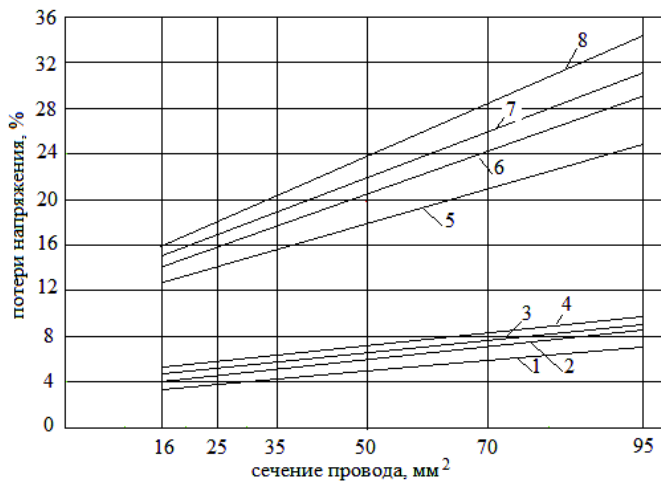


Рис. 6. Потери напряжения в линии длиной 10 км при протекании токов плавки гололеда.  
Для напряжения 35 кВ: 1 – при скорости ветра 5 м/с; 2 – при скорости ветра 10 м/с; 3 – при скорости ветра 15 м/с; 4 – при скорости ветра 20 м/с; для напряжения 10 кВ: 5 – при скорости ветра 5 м/с; 6 – при скорости ветра 10 м/с; 7 – при скорости ветра 15 м/с; 8 – при скорости ветра 20 м/с



Учитывая условность вариантов линий с проводами малого сечения для напряжения 35 кВ, нереализуемыми из-за ограничений на корону, можно сделать вывод о недопустимых потерях напряжения для линий 10 кВ, а для напряжения 35 кВ – о возможности компенсации потерь напряжения на зажимах потребителей с помощью средств регулирования напряжения. Для линий меньшей длины, а также для менее тяжелых условий теплообмена возможно использование предложенного алгоритма.

Проведение математических исследований процессов плавки гололеда на проводах в различных погодных условиях при разных токах нагрузки в линии позволит подобрать оптимальные режимы дополнительной загрузки линии реактивными токами для эффективной плавки при допустимой перегрузке трансформаторов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лебединский И.Л., Шевченко С.Ю., Волохин В.В.* Способы и устройства предупреждения гололедно-изморозевых образований // Вісник СумДУ. Сер. Технічні науки. – 2008. – № 2. – С. 21-25.
2. *Шевченко Н.Е., Лебедева Ю.В., Хромов Н.П., Сошинов А.Г.* Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в Камышинских электрических сетях // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5. – С. 127-132.
3. *Левченко И.И., Сацук Е.И.* Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 2-8.
4. *Хромов Н.П.* Информационно-измерительная система определения параметров гололедно-ветровых ситуаций : Дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 : Волгоград, 2004. – 136 с. РГБ ОД, 61:04-5/3288.
5. *Соловьев В.А., Черный С.П., Сухоруков С.И., Козин В.М.* Автоматическая система удаления льда с проводов линий электропередач [Электронный ресурс]. Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/simpoz2/72.pdf>
6. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

*Статья поступила в редакцию 25 июня 2015 г.*

## SYSTEM OF FUSION OF ICE ON WIRES OF POWERS LINE WITHOUT LOADING SWITCHING-OFF

*A.A.Bazarov, A.I. Danilushkin, V.S.Osipov*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*A set of issues on modelling the thermal processes in power lines during ice melting, and on the calculation of voltage losses in a line is treated. A simplified algorithm taking into consideration the state of aggregation change is offered for the solution of the problem. On the basis of the analysis of the network electric regimes during melting, a conclusion is drawn that the approach offered can be used in 10 and 35 kV networks of a certain length.*

**Keywords:** *a convective heat transfer, fusion, voltage losses.*

---

*Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Alexander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Vyacheslav S.Osipov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*