

ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ГОЛОЛЁДООБРАЗОВАНИЯ НА ВЛ И ЕЁ ОБОСНОВАНИЕ ПРИ ДОПУСТИМЫХ УПРОЩЕНИЯХ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Выполнено описание технологии дистанционного контроля гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи, позволяющей определять длину гололёдного участка по параметрам режима, измеренным на подстанции. Показано преимущество предложенной технологии перед существующими, заключающееся в отсутствии необходимости размещения дополнительных распределённых устройств контроля на всей протяжённости линии. Произведено математическое обоснование технологии с использованием метода «порождающей задачи», заключающегося в упрощении исходной задачи путём пренебрежения второстепенными параметрами и получении точного решения упрощённой задачи в виде аналитической функции. Описан принцип новой интеллектуальной технологии контроля длины гололёдной муфты при плавке гололёда в повторно-кратковременном режиме, заключающийся в цифровой фиксации температуры провода, не покрытого гололёдом, и активного сопротивления всей проплавляемой ВЛ, зависящего от этой температуры и искомой длины участка ВЛ, покрытого гололёдом (гололёдной муфты). По этим параметрам режима плавки и исходным данным, определяемым по режиму пробной плавки при подготовке к осенне-зимнему периоду, рассчитывается относительная длина гололёдной муфты при каждом импульсе тока. Окончание плавки фиксируется, когда эта длина становится равной нулю. Перечислены допущения, принятые для упрощения физических процессов при разработке технологии. Отражены особенности измерения параметров режима плавки гололёда как постоянным, так и переменным током. Описан процесс обработки результатов измерений при реализации технологии. Показано, что использование определённых интегралов при решении «порождающей задачи» делает задачу лучше обусловленной и позволяет исключить выбросы измерений контролируемых параметров режима. Для компенсации погрешностей, вызванных принятыми упрощениями, произведён анализ допущений и указаны рекомендуемые поправки. На базе описанной технологии, в соответствии с заданием по гранту РФФИ «Аспиранты», планируется разработка цифрового устройства или использование алгоритма в качестве элемента цифровой подстанции, обеспечивающего функционирование универсальной автоматической системы плавки гололёда на всех ВЛ, отходящих от подстанции.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, плавка гололёда, гололёдная муфта, контроль гололёдообразования, контроль окончания плавки.

ВВЕДЕНИЕ

В осенне-зимний период при возникновении тяжёлых погодных условий воздушные линии электропередачи (ЛЭП) подвергаются опасности возникновения гололёдно-изморозевых отложений. Для удаления гололёдообразований на линии в большинстве случаев применяется плавка гололёда (как постоянным, так и переменным током, в том числе в повторно-кратковременном режиме). С целью адекватного проведения данного мероприятия необходимо осуществлять контроль гололёда на протяжении проплавляемого участка линии. В настоящее время такой контроль может быть реализован посредством систем, использующих распределённые устройства, специализированные локационные устройства, а также волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [1]. При этом для нормального функционирования таких систем требуется либо наличие ВОЛС, встроенной в провод, либо передача информации от места установки датчика к оборудованию сбора данных.

Целью данной статьи является математическое обоснование технологии на основе способа, предложенного в [2] и описанного в [3] в рамках работы по гранту РФФИ «Аспиранты». Описываемая в данной статье технология заключается в осуществлении контроля гололёдообразования непосредственно по пара-

метрам режима, контролируемого на подстанции, без применения специализированных устройств связи.

МЕТОД «ПОРОЖДАЮЩЕЙ ЗАДАЧИ» КАК ОСНОВА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Суть метода «порождающей задачи», предложенного в [4] и обобщённого на использование в расчётных методиках [5], заключается в упрощении исходной задачи путём пренебрежения второстепенными («малыми») параметрами (принятием допущений) и получении точного решения упрощённой задачи в виде аналитической функции. Для компенсации погрешности, вызванной упрощением, вводится поправка в виде расчётных кривых или аналитических выражений. Упрощённая задача решается достаточно просто, но для получения поправки необходимы многочисленные расчёты на ЭВМ или физические эксперименты и их обобщение. В дальнейших инженерных расчётах применение ЭВМ не требуется.

ПРИНЦИП КОНТРОЛЯ ДЛИНЫ ГОЛОЛЁДНОЙ МУФТЫ ПО ПАРАМЕТРАМ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ ГОЛОЛЁДА НА ВЛ

Принцип контроля выявляется как решение «порождающей задачи» при следующих допущениях, погрешности от которых анализируются в работе и, по возможности, компенсируются.

Допущение 1. При плавлении гололёда электрическим током температура провода, охлаждаемого талой

водой, стабилизируется на уровне $\vartheta_{\text{ст}} > 0^\circ\text{C}$ (обычно принимают $\vartheta_{\text{ст}} \approx 2^\circ\text{C}$ [6, 7]. Однако это значение не во всех случаях подтверждается экспериментально [8]. При этом допущении электрическое сопротивление провода под гололёдом до его опадания постоянно:

$$R_{\text{пр.г}} = R_0 (1 + \beta \vartheta_{\text{ст}}) \cdot l_{\text{г.м}}, \quad (1)$$

где R_0 – удельное сопротивление провода при 0°C , Ом/км; β – температурный коэффициент сопротивления, 1/град (для алюминиевого провода $\beta = 0,00403$); $l_{\text{г.м}}$ – длина гололёдной муфты, км (в относительных единицах $l_{\text{г.м}}^* = l_{\text{г.м}}/l_{\text{ВЛ}}$, где $l_{\text{ВЛ}}$ – длина проплавляемой линии).

Допущение 2. Участки ВЛ без гололёда, общей длиной $l_{\text{б.г}} = l_{\text{ВЛ}} - l_{\text{г.м}}$ (в относительных единицах $l_{\text{б.г}}^* = 1 - l_{\text{г.м}}^*$) имеют одинаковые условия охлаждения и, следовательно, одинаковую температуру $\vartheta_{\text{б.г}}$, $^\circ\text{C}$, и суммарное электрическое сопротивление

$$R_{\text{пр.б.г}} = R_0 (1 + \beta \vartheta_{\text{б.г}}) (l_{\text{ВЛ}} - l_{\text{г.м}}). \quad (2)$$

С учётом допущений 1 и 2 суммарное сопротивление провода всех участков ВЛ по (1) и (2):

$$\begin{aligned} R_{\text{ВЛ}} &= R_{\text{пр.г}} + R_{\text{пр.б.г}} = \\ &= R_0 l_{\text{ВЛ}} [1 + l_{\text{г.м}}^* \beta \vartheta_{\text{ст}} + \beta (1 - l_{\text{г.м}}^*) \vartheta_{\text{б.г}}] = \\ &= R_{\text{ВЛ}0} (1 + l_{\text{г.м}}^* \beta \vartheta_{\text{ст}}) + R_{\text{ВЛ}0} \beta (1 - l_{\text{г.м}}^*) \vartheta_{\text{б.г}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если в течение одного (контролируемого) импульса тока плавки длина гололёдной муфты не изменится, то активное сопротивление ВЛ $R_{\text{ВЛ}}$ увеличивается на $\Delta R_{\text{ВЛ}}$ из-за увеличения температуры $\vartheta_{\text{б.г}}$ на $\Delta \vartheta_{\text{б.г}}$.

Из (3) следует

$$\Delta R_{\text{ВЛ}} = R_{\text{ВЛ}0} \beta (1 - l_{\text{г.м}}^*) \Delta \vartheta_{\text{б.г}}.$$

Отсюда

$$1 - l_{\text{г.м}}^* = \frac{\Delta R_{\text{ВЛ}} / R_{\text{ВЛ}0}}{\beta \Delta \vartheta_{\text{б.г}}} = y_* \text{ (обозначение),}$$

$$l_{\text{г.м}}^* = 1 - y_*. \quad (4)$$

В (4) y_* – обобщённый параметр режима, в котором $R_{\text{ВЛ}0}$ и β известны, а приращения активного сопротивления ВЛ $\Delta R_{\text{ВЛ}}$ и температуры провода без гололёда $\Delta \vartheta_{\text{б.г}}$ должны измеряться в течение каждого импульса тока плавки. Плавку следует закончить при $l_{\text{г.м}}^* = 0$, т.е. $y_* = 1$.

Можно обойтись без использования $R_{\text{ВЛ}0}$ – активного сопротивления ВЛ при 0°C , если провести измерения при отсутствии гололёда, например при пробной плавке. Поскольку $l_{\text{г.м}}^* = 0$, то обобщённый параметр при пробной плавке (п.п) по (4)

$$y_* = \frac{(\Delta R_{\text{ВЛ}} / \Delta \vartheta_{\text{б.г}})_{\text{п.п}}}{R_{\text{ВЛ}0} \beta} = 1,$$

откуда

$$R_{\text{ВЛ}0} \beta = (\Delta R_{\text{ВЛ}} / \Delta \vartheta_{\text{б.г}})_{\text{п.п}},$$

следовательно, в общем случае

$$y_* = \frac{\Delta R_{\text{ВЛ}} / \Delta \vartheta_{\text{б.г}}}{(\Delta R_{\text{ВЛ}} / \Delta \vartheta_{\text{б.г}})_{\text{п.п}}}. \quad (5)$$

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Для определения обобщённого параметра режима y_* необходимо в течение каждого импульса тока измерять в зависимости от времени первичные параметры режима: напряжение $U_{\text{ВЛ}}$, ток $I_{\text{ВЛ}}$, температуру провода без гололёда $\vartheta_{\text{б.г}}$.

При плавке переменным током рассчитывается активное сопротивление провода

$$R_{\text{ВЛ}}(t) = U_{\text{ВЛ}a}^{(t)} / I_{\text{ВЛ}}^{(t)},$$

где $U_{\text{ВЛ}a}^{(t)} = U_{\text{ВЛ}}^{(t)} \cos \varphi(t)$ – активная составляющая падения напряжения на ВЛ, его приращение $\Delta R_{\text{ВЛ}} = R_{\text{ВЛ}k} - R_{\text{ВЛ}n}$ за интервал времени $\Delta t = t_k - t_n$, где t_n , t_k – начальный и конечный моменты времени измерения.

В течение этого же интервала определяется приращение температуры провода без гололёда:

$$\Delta \vartheta_{\text{б.г}} = \vartheta_k - \vartheta_n.$$

При плавке постоянным током в качестве $R_{\text{ВЛ}}$ необходимо использовать отношение выпрямленных значений напряжения и тока

$$R_{\text{ВЛ}} = U_d / I_d,$$

но измеряются действующие значения напряжения и тока на входе выпрямительной установки, по которым пересчитываются U_d , I_d , $R_{\text{ВЛ}}$ с использованием формул, приведённых в [9]. Измерение переменного напряжения сопряжено с проблемой защиты трёхфазного электромагнитного трансформатора напряжения от постоянного напряжения, имеющегося на входе ВУ во время плавки гололёда на ВЛ с заземлением в одной точке схемы плавки.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для решения задачи требуется вычитание приближённых чисел одного знака:

$$\Delta R_{\text{ВЛ}} = R_{\text{ВЛ}k} - R_{\text{ВЛ}n}; \quad \Delta \vartheta_{\text{пр}} = \vartheta_{\text{пр}k} - \vartheta_{\text{пр}n},$$

что является примером плохо обусловленной задачи, в которой малые погрешности исходных данных приводят к большим погрешностям решения [10].

Чтобы избежать вычитания двух чисел, преобразуем формулу определения обобщённого параметра y_* .

Как показали эксперименты на компьютерной и физической моделях, зависимости $R_{\text{ВЛ}}(t)$ и $\vartheta_{\text{пр}}(t)$ во время импульса тока от t_n до t_k близки к экспоненциальным:

$$R_{\text{ВЛ}} = R_{\text{ВЛ}уст} - (R_{\text{ВЛ}уст} - R_{\text{ВЛ}n}) e^{-\frac{t-t_n}{T_R}}; \quad (6)$$

$$\vartheta_{\text{пр}} = \vartheta_{\text{пр}уст} - (\vartheta_{\text{пр}уст} - \vartheta_{\text{пр}n}) e^{-\frac{t-t_n}{T_\vartheta}}, \quad (7)$$

где T_R, T_θ – постоянные времени измерения $R_{ВЛ}$ и $\vartheta_{пр}$.
Вычитаем из левой и правой частей уравнений (6) и (7) соответственно $R_{ВЛ.н}$ и $\vartheta_{пр.н}$:

$$R_{ВЛ} - R_{ВЛ.н} = (R_{ВЛ.уст} - R_{ВЛ.н}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_n}{T_R}}\right); \quad (8)$$

$$\vartheta_{пр} - \vartheta_{пр.н} = (\vartheta_{пр.уст} - \vartheta_{пр.н}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_n}{T_\theta}}\right), \quad (9)$$

где $R_{ВЛ.уст}, \vartheta_{пр.уст}$ – установившиеся значения сопротивления и температуры, которые не достигаются при импульсах тока плавки, но могут быть выражены из (8) и (9) через измеряемые величины.

При $t = t_k$ ($R_{ВЛ} = R_{ВЛ.к}$ и $\vartheta_{пр} = \vartheta_{пр.к}$):

$$R_{ВЛ.уст} - R_{ВЛ.н} = \frac{(R_{ВЛ.к} - R_{ВЛ.н})}{\left(1 - e^{-\frac{t_k-t_n}{T_R}}\right)}; \quad (10)$$

$$\vartheta_{пр.уст} - \vartheta_{пр.н} = \frac{(\vartheta_{пр.к} - \vartheta_{пр.н})}{\left(1 - e^{-\frac{t_k-t_n}{T_\theta}}\right)}. \quad (11)$$

В «порождающей» (идеализированной) задаче $T_R = T_\theta = T$. Докажем это утверждение.

По формуле (3) с учётом (7)

$$R_{ВЛ} = R_{ВЛ.0} (1 + l_{г.м*} \beta \vartheta_{ст}) + R_{ВЛ.0} \cdot \beta (1 - l_{г.м*}) \times \left[\vartheta_{пр.уст} - (\vartheta_{пр.уст} - \vartheta_{пр.н}) \cdot e^{-\frac{t-t_n}{T_\theta}} \right]. \quad (12)$$

Производные по времени от $R_{ВЛ}$ ($dR_{ВЛ}/dt$) от выражений (6) и (12) одинаковы:

$$\begin{aligned} \frac{R_{ВЛ.уст} - R_{ВЛ.н}}{T_R} e^{-\frac{t-t_n}{T_R}} &= \\ &= \frac{R_{ВЛ.0} \beta (1 - l_{г.м*}) (\vartheta_{пр.уст} - \vartheta_{пр.н})}{T_\theta} e^{-\frac{t-t_n}{T_\theta}}. \end{aligned}$$

Поскольку в «порождающей задаче»

$$R_{ВЛ.0} \beta (1 - l_{г.м*}) (\vartheta_{пр.уст} - \vartheta_{пр.н}) = R_{ВЛ.уст} - R_{ВЛ.н},$$

то

$$\frac{1}{T_R} e^{-\frac{t-t_n}{T_R}} = \frac{1}{T_\theta} e^{-\frac{t-t_n}{T_\theta}},$$

следовательно, $T_R = T_\theta = T$, что и требовалось доказать.

При этом условии из (10) и (11) следует

$$\frac{R_{ВЛ.уст} - R_{ВЛ.н}}{\vartheta_{пр.уст} - \vartheta_{пр.н}} = \frac{R_{ВЛ.к} - R_{ВЛ.н}}{\vartheta_{пр.к} - \vartheta_{пр.н}}. \quad (13)$$

Проинтегрируем (8) и (9) от t_n до t_k с учётом того, что $T_R = T_\theta = T$, получим

$$\begin{aligned} \int_{t_n}^{t_k} (R_{ВЛ} - R_{ВЛ.н}) dt &= \\ &= (R_{ВЛ.уст} - R_{ВЛ.н}) \cdot \left[t_k - t_n - T \left(1 - e^{-\frac{t_k-t_n}{T}}\right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{t_n}^{t_k} (\vartheta_{пр} - \vartheta_{пр.н}) dt &= \\ &= (\vartheta_{пр.уст} - \vartheta_{пр.н}) \cdot \left[t_k - t_n - T \left(1 - e^{-\frac{t_k-t_n}{T}}\right) \right]. \end{aligned}$$

Разделив левые и правые части этих уравнений друг на друга, с учётом (13) получим

$$\frac{\int_{t_n}^{t_k} (R_{ВЛ} - R_{ВЛ.н}) dt}{\int_{t_n}^{t_k} (\vartheta_{пр} - \vartheta_{пр.н}) dt} = \frac{(R_{ВЛ.к} - R_{ВЛ.н})}{(\vartheta_{пр.к} - \vartheta_{пр.н})} = \frac{\Delta R_{ВЛ}}{\Delta \vartheta_{пр}}. \quad (14)$$

Таким образом, приращения $\Delta R_{ВЛ}$ и $\Delta \vartheta_{пр}$, получаемые вычитанием конечных и начальных значений, можно заменить определёнными интегралами, что делает задачу лучше обусловленной и позволяет исключать при интегрировании отдельные интервалы времени внутри $t_n \div t_k$, в которых имеют место выбросы контролируемых величин.

В (14) температура провода на участке без гололёда измеряется непосредственно, а активное сопротивление $R_{ВЛ}$ определяется по закону Ома, поэтому

$$\begin{aligned} \int_{t_n}^{t_k} (R_{ВЛ} - R_{ВЛ.н}) dt &= \\ &= \int_{t_n}^{t_k} \left(\frac{U_{ВЛ.а}(t)}{I_{ВЛ}(t)} - \frac{U_{ВЛ.а}(t_n)}{I_{ВЛ}(t_n)} \right) dt = \\ &= U_{ВЛ.а.срд} \int_{t_n}^{t_k} \frac{1}{I_{ВЛ}(t)} dt - \frac{U_{ВЛ.а}(t)}{I_{ВЛ}(t)} (t_k - t_n), \end{aligned} \quad (15)$$

где первое слагаемое получено с использованием обобщённой теоремы о среднем, в которой вместо $U_{ВЛ.а}(t_i)$, $t_n \leq t_i \leq t_k$, использовано среднее значение $U_{ВЛ.а.срд}$. При этом интервал времен внутри $t_n \div t_k$, где $U_{ВЛ.а}$ отклоняется от среднего значения, можно отбрасывать.

АНАЛИЗ ДОПУЩЕНИЙ И ВНЕСЕНИЕ ПОПРАВОК В РЕШЕНИЕ «ПОРОЖДАЮЩЕЙ ЗАДАЧИ»

1. В начале плавки допущение 1 о постоянстве температуры провода под гололёдом $\vartheta_{пр.г}$ некорректно: температура изменяется (возрастает), начиная от температуры воздуха при гололёде $\vartheta_{в} < 0^\circ\text{C}$. Поправка вносится путём смещения начала отсчёта параметров режима от начала плавки на время нагрева провода $t_{н.пр}$ от $\vartheta_{в}$ до $\vartheta_{ст}$. Это время подлежит анализу и учёту при определённой $l_{г.м*}$ в начале плавки.

2. Условия охлаждения провода без гололёда отличаются на разных участках линии. В (2) в качестве $\theta_{б.г}$ нужно использовать средневзвешенное значение температуры этих участков, а измеряется температура провода, возможно другой марки, на территории подстанции. Связь между этими температурами не изменяется, но должна учитываться при определении приращения средневзвешенной температуры $\Delta\theta_{б.г}$ в качестве погрешности при определении y^* .

3. Активное сопротивление $R_{ВЛ}$ непрерывно контролируется как отношение напряжения на ВЛ к току. При плавке переменным током используется активная составляющая измеряемого напряжения (совпадающая по фазе с током), при плавке постоянным током – выпрямленное напряжение, рассчитываемое по контролируемому переменному напряжению источника питания выпрямительной установки (ВУ). В обоих случаях определение приращения $\Delta R_{ВЛ}$ при близких начальном и конечном значениях представляет пример плохо обусловленной задачи, в которой погрешность $\Delta R_{ВЛ}$ значительно больше погрешности $R_{ВЛ}$. Улучшение обусловленности достигается применением формулы (15).

4. Дополнительную погрешность измерения переменного напряжения источника питания ВУ может внести постоянная составляющая, которую нужно компенсировать при использовании трёхфазного ТН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная технология дистанционного контроля гололёдообразования на ВЛ позволяет по параметрам режима плавки, измеряемым на подстанции, определять суммарную длину гололёдных участков в процессе плавки в повторно-кратковременном режиме и фиксировать окончание плавки гололёда, когда эта длина становится равной нулю.

На базе описанной технологии планируется в соответствии с заданием по гранту РФФИ «Аспиранты» разработка цифрового устройства или использование алгоритма в качестве элемента цифровой подстанции, обеспечивающего функционирование универсальной автоматической системы плавки гололёда на всех ВЛ, отходящих от подстанции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-38-90102.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев В. Средства диагностики и предотвращения снегонапления и гололедообразования на воздушных линиях 6-150 кВ // Новости электротехники. 2017. № 5(107)-6(108). С. 50-57.
2. Пат. № 2569318 Российская Федерация, МПК H02G7/16. Способ плавки гололёда на проводах воздушной линии электропередачи / Засыпкин А.С., Засыпкин А.С. (мл.), Тетерин А.Д., Щуров А.Н.; Заявл. 14.08.2014, Оpubл. 20.11.2015.
3. Дистанционное определение длины гололёдного участка и окончания плавки гололёда на ВЛ длительными импульсами тока / Засыпкин А.С., Щуров А.Н., Засыпкин А.С. (мл.), Тетерин А.Д. // Известия вузов. Электромеханика. 2017. №6. С. 77-83. doi: 10.17213/0136-3360-2017-6-77-83
4. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1969. 424 с.
5. Засыпкин А.С. Метод «порождающей задачи» и его использование в расчётных инженерных методиках электроэнергетики // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2020. Вып. 22. С. 30-39.
6. Бургсдорф В.В. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильногололёдных районах. М.: Госэнергоиздат, 1947. 196 с.
7. Сацук Е.И. Электротепловые и механические процессы в воздушных линиях электропередачи: монография. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. 106 с.
8. Temperature characteristic of DC ice-melting conductor / S. Fan, X. Jiang, C. Sun, Z. Zhang, L. Shu // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. Iss. 1. Pp. 29-38. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.02.012
9. Аллилуев А.А., Левченко И.И. Расчёт режимов выпрямительных установок плавки гололёда на линиях электропередачи: учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2000. 192 с.
10. Бахвалов Ю.А. Математическое моделирование: учеб. пособие для вузов. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. 142 с.

Поступила в редакцию 23 июня 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ICE FORMATION REMOTE CONTROL TECHNOLOGY ON OVERHEAD TRANSMISSION LINES AND ITS VALIDATION WITH ALLOWABLE SIMPLIFICATIONS OF THE PHYSICAL PROCESSES MODEL

Aleksandr S. Zasyupkin (Jr.)

Postgraduate student, Power Plants and Electrical Power Systems Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: zasandzas@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6901-4425>

The description of the ice formation remote control technology on overhead transmission lines, which makes it possible to determine the length of the ice formation based on modes parameters measured at the substation, has been performed. The advantage of the proposed technology over existing ones is shown. It consists in the absence of the need to place additional distributed control devices along the whole length of the line. The mathematical proof of the technology using the "initial problem" method, which consists in simplifying the original problem by neglecting the secondary parameters and obtaining the exact solution of the simplified problem in the form of an analytical function, has been made. The principle of the

new intelligent technology for ice formation length control in the ice melting intermittent duty is described. The principle consists in digital fixing of wire temperature, uncovered by ice, and the entire overhead line active resistance. The resistance depends on this temperature and on the length of the overhead line section covered by ice formation, that should be defined. According to these parameters of the melting mode and the initial data determined by the trial melting mode in preparation for the autumn-winter period, it is possible to determine the relative length of the ice formation at each current pulse. The end of the melting is fixed when the ice formation length becomes equal to zero. The assumptions made to simplify physical processes in

technology development are outlined. The features of ice melting mode parameters measurement with the both direct and alternating current are shown. The procedure for processing of measurement results during the technology realization is described. It is shown that the use of certain integrals in solving the "initial problem" makes the problem better conditioned and allows excluding measurement emissions of the controlled mode parameters. To compensate errors caused by the accepted simplifications, assumptions are analyzed and recommended corrections are specified. It is planned on the basis of the described technology, in accordance with the work under the RFBR grant "Aspirants", to design a digital device or use the algorithm as an element of the digital substation providing the functioning of ice melting universal automatic system on all overhead lines branching from the substation.

Keywords: overhead transmission line, ice melting, ice formation, ice formation controll, ice melting end control.

REFERENCES

1. Zhuravlev V. Diagnostic and prevention tools for snow and ice formation on overhead lines of 6-150 kV. *Novosti Elektro Tekhniki* [Electrical Engineering News], 2017, no. 5(107)-6(108), pp. 50-57. (In Russian)
2. Zasyppkin A.S., Zasyppkin A.S. (Jr.), Teterin A.D., Shchurov A.N. *Sposob plavki gololeda na provodakh vozduшной linii elektroperedachi* [Method for ice melting on overhead transmission lines wires]. Patent RF, no. 2569318, 2015.
3. Zasyppkin A.S., Shchurov A.N., Zasyppkin A. S. (Jr.), Teterin A.D. Distant determination of the ice area length and the end of ice melting on overhead power line with long current impulses. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2017, no. 6, pp. 77-83. (In Russian) doi: 10.17213/0136-3360-2017-6-77-83
4. Elsgolts L.E. *Differentsialnye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* [Differential equations and calculus of variations], Moscow, Science Publ., 1969, 424 p. (In Russian)
5. Zasyppkin A.S. The «initial problem» method and its use in calculation engineering methods of the electric power industry. *Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk RF* [Proceedings of the Russian Federation Electrotechnical Academy of Sciences], 2020, issue 22, pp. 30-39. (In Russian)
6. Burgsdorf V.V. *Sooruzhenie i eksploatsiya liniy elektroperedachi v silnogololeednykh rayonakh* [Construction and exploitation of power lines in heavily icing areas]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1947, 196 p. (In Russian)
7. Satsuk E.I. *Elektroteplovye i mekhanicheskie protsessy v vozduшной liniyakh elektroperedachi* [Electrothermal and mechanical processes in overhead transmission lines]. Novocherkassk, SRSTU (NPI) Publ., 2010, 106 p.
8. Fan S., Jiang X., Sun C., Zhang Z., Shu L. Temperature characteristic of DC ice-melting conductor. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, vol. 65. Iss. 1, pp. 29-38. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.02.012
9. Alliluyev A.A., Levchenko I.I. *Raschet rezhimov vypriamitelnykh ustanovok plavki gololeda na liniyakh elektroperedachi* [Calculation of rectifier installations modes for ice melting on transmission lines]. Novocherkassk, SRSTU (NPI) Publ., 2007. 192 p. (In Russian)
10. Bakhvalov Yu.A. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling]. Novocherkassk. SRSTU (NPI) Publ., 2010, 142 p. (In Russian)

Засыпкин А.С. (мл.). Технология дистанционного контроля гололёдообразования на ВЛ и её обоснование при допустимых упрощениях модели физических // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3(52). С. 52-56. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-52-56](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-52-56)

Zasyppkin A.S. (Jr.). Ice Formation Remote Control Technology on Overhead Transmission Lines and Its Validation with Allowable Simplifications of the Physical Processes Model. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 3(52), pp. 52-56. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-52-56](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-52-56)