

УДК 621.315

УЧЕТ ПРОВИСАНИЯ ПРОВОДОВ В ПРОЛЕТЕ ВЛ 220 КВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТОКА, НАВЕДЕННОГО В ГРОЗОЗАЩИТНОМ ТРОСЕ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ТОКОВ ФАЗ

*Е.А. Кротков, Н.В. Безменова, А.А. Щобак**

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

E-mail: krotkov.e.a@gmail.com, saidova_nadezhda@mail.ru, shonSamara@gmail.com

Аннотация. Грозозащитный трос по сравнению с проводами ВЛ 220 кВ наиболее подвержен гололедообразованию. Применяемые в эксплуатации схемы плавки гололеда на грозозащитном тросе, использующие специальный источник электроэнергии, имеют технические ограничения и требуют отключения ВЛ. Альтернативой плавке гололеда является профилактический подогрев грозозащитного троса до положительной температуры индукционным способом от электромагнитных полей проводов ВЛ 220 кВ в рабочем режиме. Приведен краткий обзор индукционных способов подогрева грозозащитного троса ВЛ 220 кВ. Математические модели индукционного подогрева грозозащитного троса не учитывают влияние провисания проводов и грозозащитного троса ВЛ 220 кВ на параметры электромагнитного поля и схемы замещения контура «грозотрос – земля». Поэтому применение на практике индукционного способа подогрева грозозащитного троса на участке ВЛ 220 кВ требует разработки адекватной математической модели. Рассматривается способ индукционного подогрева грозотроса двухцепной ВЛ 220 кВ в специально созданном замкнутом контуре «грозотрос – дополнительный проводник» для предотвращения гололедообразования на нем. Разработана математическая модель для расчета величины тока, индуктированного (наведенного) в контуре «грозозащитный трос – дополнительный проводник» магнитными полями токов ВЛ 220 кВ в рабочем режиме. Приведена оценка влияния провисания проводов и грозозащитного троса двухцепной ВЛ 220 кВ на параметры электромагнитного поля и схемы замещения контура «грозозащитный трос – дополнительный проводник». Применение математической модели позволяет оценить величину наведенного тока для предотвращения гололедообразования на грозозащитном тросе двухцепной ВЛ 220 кВ в рабочем режиме.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, провис провода, грозозащитный трос, гололедно-изморозевые отложения, электромагнитное поле, индуктивное сопротивление замкнутого контура, наведенный ток, профилактический подогрев.

* Евгений Александрович Кротков, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы», кандидат технических наук.

Надежда Валерьевна Безменова, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы», кандидат технических наук.

Александр Андреевич Щобак, аспирант кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Основным способом борьбы с гололедообразованием на проводах и грозозащитных тросах является плавка гололеда на отключенной ВЛ 220 кВ. Известно [1], что грозозащитный трос (грозотрос) по сравнению с проводами ВЛ более подвержен гололедообразованию, поэтому в эксплуатации плавка гололеда на грозотросе проводится чаще, чем на проводах ВЛ 220 кВ.

Применяемые на практике схемы плавки гололеда на грозотросе ВЛ основаны на использовании специального источника электроэнергии и имеют технические ограничения [2, 3]. Грозозащитные тросы ВЛ 220 кВ изолированы от земли и имеют класс изоляции более низкий, чем провода ВЛ. Поэтому при подключении источника электроэнергии к грозотросу ВЛ 220 кВ приходится ограничивать длину участков плавки, так как повышение напряжения источника электроэнергии требует усиления изоляции грозотроса и вызывает необходимость увеличения пробивных напряжений искровых промежутков, защищающих эту изоляцию [2]. Это ограничение препятствует плавке гололеда на грозотросе ВЛ 220 кВ непосредственно от источника электроэнергии и побуждает к поиску принципиально других способов.

Альтернативой плавке гололеда является индукционный способ подогрева грозотроса в контуре «грозотрос – земля» до положительной температуры наведенным током от электромагнитных полей проводов ВЛ 110-500 кВ в рабочем режиме [4–8]. Электроэнергия при индукционном способе подогрева грозотроса вводится в контур «грозотрос – земля» не локально (в начале участка контура), как это происходит при непосредственном присоединении источника электроэнергии к грозотросу, а по всей длине участка грозотроса. Это позволяет применять индукционный способ подогрева грозотроса ВЛ 220 кВ, заземленного не только по концам контура, но и внутри контура. Реализация индукционного способа подогрева грозотроса на эксплуатируемой ВЛ 220 кВ заключается: в выборе участка трассы ВЛ с интенсивным гололедообразованием; в создании замкнутого контура с грозотросом для протекания наведенного тока; в выборе электрического режима работы ВЛ (нормальный симметричный, искусственно несимметричный).

Математические модели индукционного способа подогрева грозотроса, рассматриваемые в работах [4–8], основаны на определении параметров схем замещения контуров «провод – грозотрос» и «грозотрос – земля» по формулам J.R. Carson [9, 10]. Недостатком указанных математических моделей является неучёт влияния провисания проводов и грозотроса на параметры электромагнитного поля на промежуточных пролетах ВЛ 220 кВ. Поэтому разработка адекватной математической модели для реализации индукционного способа профилактического подогрева грозотроса на участке ВЛ 220 кВ является актуальным научным исследованием.

В системообразующих электрических сетях, проходящих в гололедоопасном районе 3–4-й категории [11] России, применяются двухцепные ВЛ 220 кВ с промежуточной опорой типа П220-2,4-9,3 [12]. Расположение фазных проводников и грозотроса на опоре П220-2,4-9,3 в декартовой системе координат приведено на рис. 1.

Для предотвращения образования гололеда на двухцепных ВЛ 220 кВ предлагается сформировать замкнутый и заземленный с одной стороны в нормальном режиме контур, состоящий из грозотроса T_1 и изолированного проводника T_2 , проложенного по поверхности земли (рис. 2) [13]. ЭДС, наведенная в контуре T_1-T_2 , является результатом взаимодействия электростатического и электромаг-

нитного поля проводников фаз ВЛ 220 кВ. Величина ЭДС, наведенной электростатическим полем, значительно меньше величины ЭДС, наведенной электромагнитным полем токов фаз ВЛ 220 кВ, поэтому допускается в расчетах ее не учитывать [14].

В реальных условиях провода цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ и грозотрос T_1 ВЛ 220 кВ не являются прямолинейными, а провисают под действием собственного веса в промежуточных пролетах линии (рис. 3). Проводник T_2 , расположенный на поверхности земли (в грунте), может считаться прямолинейным.

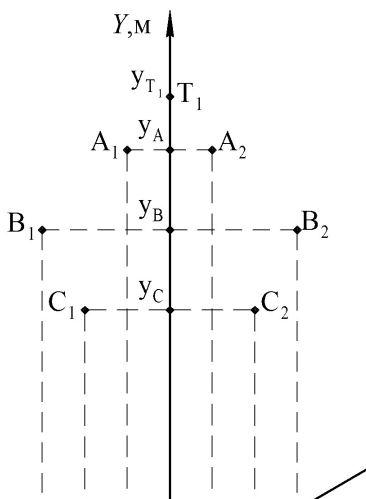


Рис. 1. Схема расположения проводов цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ и грозотроса T_1 на опоре П220-2,4-9,3

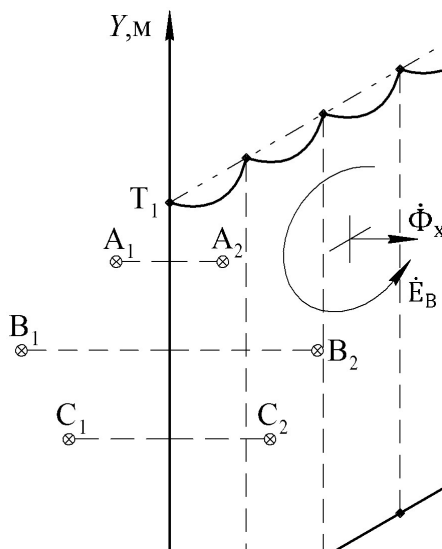


Рис. 2. Схема соединения грозотроса T_1 и проводника T_2 на участке l_k ВЛ 220 кВ

Известно [15, 16], что механическое напряжение в материале провода (грозотроса) в любой точке пролета ВЛ обусловлено только растяжением и направлено по касательной к кривой в рассматриваемой точке. Поэтому в качестве математической модели для анализа провисания проводов и грозозащитных тросов ВЛ высокого напряжения их представляют в виде идеально гибкой однородной нерастяжимой тяжелой нити. Гибкая однородная нерастяжимая тяжелая нить с закрепленными концами в однородном гравитационном поле описывается уравнением цепной линии [16].

В канонической форме уравнение цепной линии пролета ВЛ в декартовой системе координат имеет вид [17]

$$y = h \cdot ch\left(\frac{z}{h}\right) = \frac{h}{2} \left(e^{\frac{z}{h}} + e^{-\frac{z}{h}} \right).$$

В принятой системе координат функция цепной линии каждого провода цепи $A_1B_1C_1 (A_2B_2C_2)$ и грозотроса T_1 ВЛ 220 кВ (рис. 3) примет вид

$$y = h_i \cdot ch\left(\frac{1}{h_i} \left(z - \frac{d}{2} \right)\right), \quad (1)$$

где h_i – минимальная высота каждого провода цепи $A_1B_1C_1 (A_2B_2C_2)$ и грозотроса T_1 в точке $z - \frac{d}{2}$.

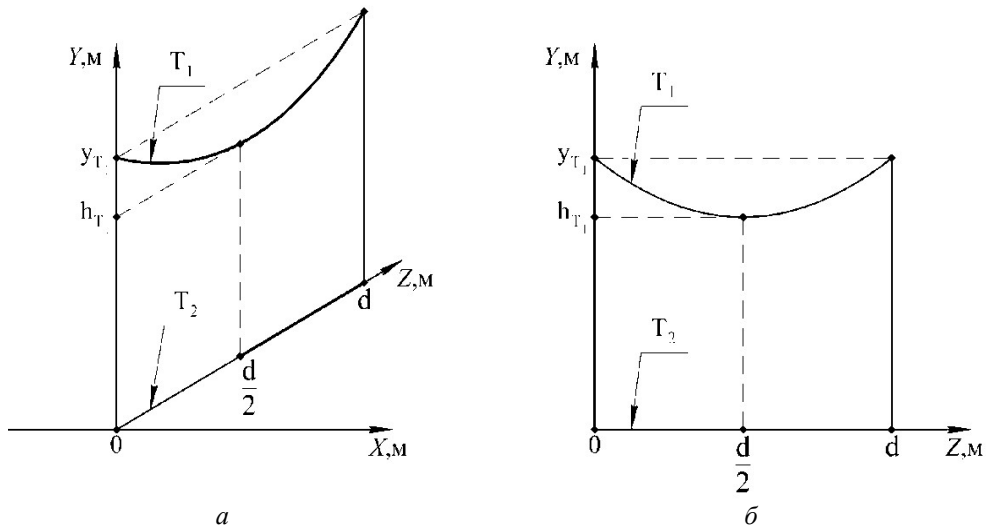


Рис. 3. Кривая провисания грозотроса T_1 в одном пролете ВЛ в пространстве (а) и в плоскости YOZ (б) декартовой системы координат: d – длина пролета; h_{T1} – расстояние от нижней точки грозотроса T_1 до оси OZ ; Y_{T1} – высота точки крепления грозотроса T_1

Вычисление вектора магнитной индукции \vec{B} цепной линии представляет собой частный случай задачи об электромагнитном поле проводящего контура произвольной конфигурации (рис. 4), аналитическое решение которой описывается законом Био – Савара – Лапласа [18]:

$$\vec{B} = \frac{I}{4\pi} \oint_l \frac{[d\vec{l} \cdot \vec{r}]}{r^2}, \quad (2)$$

где $d\vec{l}$ – длина элемента проводника, направление этого вектора совпадает с положительным направлением тока I ; \vec{r} – единичный вектор, направленный из рассматриваемого элемента в точку наблюдения A ; r – расстояние от этого элемента до указанной точки.

Когда проводящий контур имеет сложную конфигурацию, применение выражения (2) для получения аналитического решения связано с известными затруднениями при вычислении интеграла [19]. Эти затруднения заставляют переходить к численным методам нахождения интеграла, основанным на разбиении контура на элементарные отрезки и вычислении создаваемых ими электромагнитных полей, реализованным в специализированном программном обеспечении, например COMSOL Multiphysics [20].

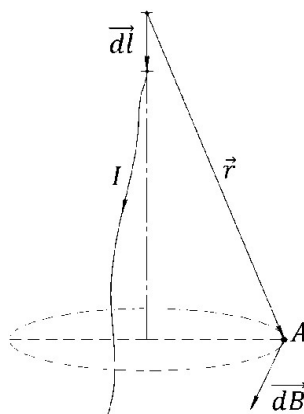


Рис. 4. Иллюстрация применения закона Био – Савара – Лапласа для криволинейного проводника с током

В проекции на плоскость YOZ провода цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ и грозотрос T_1 ВЛ 220 кВ отображаются кривыми (рис. 5, *a*), описываемыми уравнением (1).

Для получения аналитического решения выражения (2), описывающего вектор магнитной индукции поля ВЛ 220 кВ с учетом провисания проводов фаз, перейдем от декартовой системы координат к криволинейной системе координат. Неизвестные криволинейные координаты могут быть получены из набора декартовых координат с помощью преобразования, которое локально обратимо (имеет взаимно-однозначное отображение) в каждой точке пространства. Это означает, что можно преобразовать точку, заданную в декартовой системе координат, в ее криволинейные координаты и обратно [17].

Примем, что в криволинейной системе координат ось OZ отображается в виде кривой, описываемой уравнением:

$$y = -h_i \cdot ch \left(\frac{1}{h_i} \left(z - \frac{d}{2} \right) \right).$$

Тогда в криволинейной системе координат провода цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ и грозотрос T_1 в проекции на плоскость YOZ будут отображаться прямолинейными, а проводник T_2 – кривой, описываемой уравнением

$$y = -h_i \cdot ch\left(\frac{1}{h_i}\left(z - \frac{d}{2}\right)\right) - y_{T_1}.$$

Иллюстрация, поясняющая переход от декартовой системы координат к криволинейной, для одного пролета ВЛ длиной d приведена на рис. 5, б.

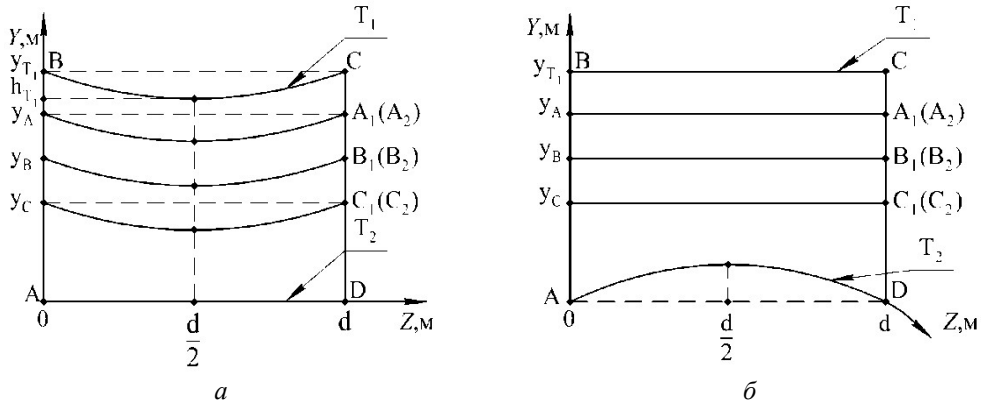


Рис. 5. Проекция проводов цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$, грозотроса T_1 и проводника T_2 двухцепной ВЛ 220кВ в плоскости YOZ в декартовой (а) и криволинейной (б) системах координат

В криволинейной системе координат каждый провод цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ ВЛ 220 кВ представляется в виде длинного прямолинейного проводника с током I , создающего в точке A окружающего пространства свое магнитное поле (рис. 6), вектор магнитной индукции \vec{B} которого определяется по выражению [18, 21]

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r},$$

где $r^2 = (x_c - x)^2 + (y - y_c)^2$.

Из подобия треугольников ABC и ADE получим:

$$\frac{B_x}{B} = \frac{AB}{r} = \frac{y - y_c}{r}, \quad \frac{B_y}{B} = \frac{BC}{r} = \frac{x_c - x}{r}. \quad (3)$$

Составляющие вектора магнитной индукции поля \vec{B} по оси X в точке A , принадлежащей отрезку $[y_{T_1}, y_{T_2}]$ (рис. 2), создаваемые токами цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ ВЛ 220 кВ, определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{xA_1} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_A}{2\pi} \cdot \frac{y - y_a}{(a_1 - x)^2 + (y - y_a)^2}; \\ \dot{B}_{xB_1} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_B}{2\pi} \cdot \frac{y - y_b}{(b_1 - x)^2 + (y - y_b)^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{B}_{XB_1} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_c}{2\pi} \cdot \frac{y - y_c}{(c_1 - x)^2 + (y - y_c)^2}; \\ \dot{B}_{XA_2} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_A}{2\pi} \cdot \frac{y - y_a}{(a_2 - x)^2 + (y - y_a)^2}; \\ \dot{B}_{XB_2} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_B}{2\pi} \cdot \frac{y - y_b}{(b_2 - x)^2 + (y - y_b)^2}; \\ \dot{B}_{XB_2} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_c}{2\pi} \cdot \frac{y - y_c}{(c_2 - x)^2 + (y - y_c)^2}.\end{aligned}$$

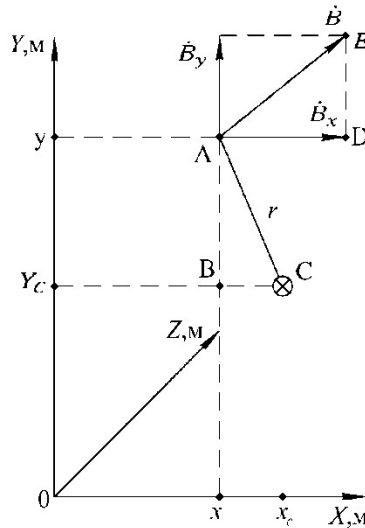


Рис. 6. Вектор магнитной индукции поля \dot{B} в т. A от тока в проводнике C

Вектор магнитной индукции результирующего электромагнитного поля \dot{B}_{XA} в точке A определяется суммой векторов магнитных индукций (принцип суперпозиции), создаваемых током каждого проводника ВЛ 220 кВ в отдельности:

$$\dot{B}_{XA} = \sum_{i=1}^6 \dot{B}_{Xi}.$$

Элементарный магнитный поток $d\dot{\Phi}_X$, проходящий через элементарную поверхность плоскости $ABCD$ площадью $dS = d \cdot dr$, можно определить по формуле:

$$d\dot{\Phi}_X = \dot{B}_{XA} dS.$$

Полный магнитный поток $\dot{\Phi}_{Xd}$, созданный электромагнитными полями токов каждой фазы двухцепной ВЛ 220 кВ и пронизывающий перпендикулярно плоскость контура $T_1 - T_2$ длиной d (рис. 2), определяется выражением

$$\dot{\Phi}_{Xd} = \dot{\Phi}_{XABCD} - \dot{\Phi}_{XT_2},$$

$$\dot{\Phi}_{XABCD} = \int_0^{y_{T_1}} \dot{B}_{XA} \int_0^d dz dy = d \int_0^{y_{T_1}} \dot{B}_{XA} dy ,$$

$$\dot{\Phi}_{XT_2} = \int_0^d \int_0^{y_{T_2}(z)} \dot{B}_{XA} dz dy .$$

С учетом выражения (3) в замкнутом контуре $T_1 - T_2$ длиной d наводится ЭДС \dot{E}_d :

$$\dot{E}_d = -\frac{d\dot{\Phi}_{Xd}}{dt} = -j\omega \left(d \int_0^{y_{T_1}} \dot{B}_{XA} dy - \int_0^d \int_0^{y_{T_2}(z)} \dot{B}_{XA} dz dy \right) .$$

ЭДС \dot{E}_k , наведенная в замкнутом контуре $T_1 - T_2$ длиной \dot{E}_k , состоящем из n промежуточных пролетов ВЛ 220 кВ, определится по выражению

$$\dot{E}_k = n\dot{E}_d .$$

Для нахождения индуктивного сопротивления \dot{X}_k замкнутого плоского контура $T_1 - T_2$, приведенного на рис. 2, определим его собственную индуктивность L по выражению [22, 23]

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2S}{l} - 0,15 \right) - G ,$$

где l – периметр контура; S – площадь контура; G – индуктивность провода круглого сечения при частоте 50 Гц, при которой ток распределен равномерно по сечению провода, определяется выражением

$$G = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\ln r - 0,25) ,$$

где r – радиус проводника T_1, T_2 .

С учетом (19) выражение для определения L примет вид:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2S}{l} + 0,1 \right) .$$

Площадь контура S (рис. 2) определяется по выражению

$$S = y_{T_1} l_k - n S_{ABCD} ,$$

в котором площадь S_{ABCD} криволинейной трапеции $ABCD$ (рис. 5, а) вычисляется по формуле

$$S_{ABCD} = h_{T_1} l_{BC} = 2h_{T_1}^2 \operatorname{sh} \frac{d}{2h_{T_1}} ,$$

где l_{BC} – длина дуги BC (рис. 5, а) определяется выражением

$$l_{BC} = 2h_{T_1} \operatorname{sh} \frac{d}{2h_{T_1}} .$$

Периметр контура l (рис. 2) определяется выражением

$$l = 2y_{T_1} + l_k + n l_{BC} .$$

Активное сопротивление проводника грозотроса T_1 с учетом его провисания на участке длиной l_k , состоящем из n промежуточных пролетов ВЛ 220 кВ:

$$R_{T_1} = r_0 n l_{BC},$$

где r_0 – погонное активное сопротивление грозотроса, Ом/км.

Ток \dot{I}_k , протекающий в замкнутой электрической цепи контура $T_1 - T_2$ (рис. 2), определяется по выражению

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{E}_k}{R_{T_1} + R_{T_2} + jX_k}.$$

Значение тока \dot{I}_k возможно увеличить компенсацией индуктивности контура X_k , достигаемой включением в цепь контура емкости C , величина которой определяется из условия создания резонанса напряжения.

Выводы

Разработана математическая модель для определения параметров электромагнитного поля и схемы замещения «грозотрос – дополнительный проводник» с учетом провисания проводов и грозотроса в промежуточном пролете двухцепной ВЛ 220 кВ. Применение математической модели позволяет определить величину наведенного тока для последующей оценки возможности предотвращения гололедообразования на грозозащитном тросе двухцепной ВЛ 220 кВ в рабочем режиме.

Для повышения эффективности индукционного способа подогрева грозотроса на двухцепной ВЛ 220 кВ целесообразно компенсировать индуктивность контура «грозотрос – дополнительный проводник» включением в цепь контура конденсаторной установки, величина емкости которой определяется из условия создания резонанса напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреевский В.Н. Эксплуатация воздушных линий электропередачи. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 616 с.
2. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: Учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. 494 с.
3. Masoud Farzaneh. Atmospheric Icing of Power Networks // Springer Science Business Media B.V., 2008. 388 p.
4. Шовкопляс С.С. Плавка гололеда на заземленном грозозащитном тросе индуктированным током от наложенного реактивного тока в фазных проводах // Изв. вузов. Электромеханика. Спецвыпуск «Диагностика энергооборудования». 2008. С. 23–24.
5. Шовкопляс С.С. Плавка гололеда на грозозащитных тросах индуктированным током повышенной частоты // Изв. вузов. Электромеханика. Спецвыпуск «Электроснабжение». 2010. С. 17–18.
6. Бальбердин Л.Л., Галанов В.И., Крайчик Ю.С., Краснова Б.П., Лозинова Н.Г., Мазуров М.И. Индукционная плавка гололеда на грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи // Электрические станции. 2002. № 1. С. 31–37.
7. Шовкопляс С.С. Способ предотвращения гололедообразования на грозозащитных тросах воздушной линии электропередачи сверхвысокого напряжения наведенными токами без вывода ее из работы // Энергетик. 2018. № 8. С. 13–20.
8. Засыпкин А.С., Засыпкин А.С. (мл.). Профилактический обогрев грозозащитных тросов воздушных линий наведенным током // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 2. С. 99–106.
9. Carson J.R. Wave propagation in over head wires with ground return // The Bell System Technical Journal, 1926. Vol. 5, No. 4. P. 539–554.
10. Хаяси С. Волны в линиях электропередачи. М.: Госэнергоиздат, 1960. 343 с.

11. СТО 56947007-29.240.01.189-2014. Методические указания по применению альбомов карт климатического районирования территории по субъектам РФ. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». Приказ ОАО «ФСК ЕЭС» от 03.10.2014. № 444. 95 с.
12. СТО 56947007-29.240.55.255-2018. Стальные решетчатые опоры новой унификации ВЛ 220 кВ. Указания по применению опор новой унификации при проектировании ВЛ 220 кВ. Филиал АО «НТЦ ФСК ЕЭС». СибНИИЭ. 2018. 323 с.
13. *Дмитриев М.В., Родчихин С.В.* Грозозащитные тросы ВЛ 35-750 кВ. Выбор мест заземления // Новости электротехники. 2017. № 2(104). С. 2–5.
14. *Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю.* Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов: монография. 2-е изд. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 508 с.
15. *Меркин Д.Р.* Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.
16. *Бошнякович А.Д.* Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
17. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.
18. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Учеб. пособие для студентов вузов в 3 т. 2-е изд., перераб. Т. 2. М.: Наука, 1982. 273 с.
19. *Краснитский Ю.А.* Магнитное поле цепной линии на низких частотах // Transport and Telecommunication. 2003. Vol. 4, No 1. С. 9–15.
20. COMSOL Multiphysics. Платформа для создания расчетных моделей и приложений. [Электронный ресурс] [2022]. <https://www.comsol.ru> (дата обращения 11.01.2022).
21. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3 т. Учебник для вузов. Т. 3. Теория электромагнитного поля. СПб.: Питер, 2003. 377 с.
22. *Цейтлин Л.А.* Индуктивности проводов и контуров. Л.: Госэнергоиздат, 1950. 229 с.
23. *Цицикян Г.Н., Баранов Ю.Д.* Сопоставительный анализ выражений по расчету индуктивностей прямоугольных проводов и контуров // Электричество. 2018. № 2. С. 59–63.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2021 г.

ACCOUNTING FOR WIRE SAGGINGTON SPAN OF 220 KV OHL WHEN DETERMINING CURRENT, INDUCED IN GROUND WIRE BY PHASE CURRENT MAGNETIC FIELDS

*E.A. Krotkov, N.V. Bezmenova, A.A. Shchobak**

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

E-mail: krotkov.e.a@gmail.com, saidova_nadezhda@mail.ru, shonSamara@gmail.com

Abstract. Overhead ground-wire cable (GW) is more prone to ice formation compared to 220 kV overhead lines. Ice-melting methods for GW using special power source have certain engineering constraints and required is connection of overhead line. Preventive heating of GW to above-zero temperature is an equivalent method to ice-melting. Preventive heating shall be provided by induction from electromagnetic field (EMF) of 220 kV overhead lines while in service. Induction methods of 220 kV OHL GW heating have been summarized and briefly described. Mathematical models of GW inductive heating do not consider the influence of wire and GW sagging on EMF parameters and equivalent circuit "ground wire-earth". Therefore, sufficient mathematical model is required to use induction method of GW heating at 220 kV OHL segment. We propose induction heating for GW of double-circuit 220 kV OHL inclosed circuit "ground wire-additional conductor" top prevent ice formation. Mathematical model have been developed to calculate current, induced in circuit "ground wire-additional conductor" by magnetic fields of 220 kV OHL current while in service. Influence of wire and GW sagging on EMF parameters and equivalent circuit "ground wire-additional conductor" has been estimated. Due to mathematical model we could estimate induced current to prevent ice formation on GW of double-circuit 220 kV OHL while in service. Closed circuit "ground wire-additional conductor" is recommended for practical use, with capacitor loop included into circuit, its capacitance to be determined based on voltage resonance conditions.

Keywords: overhead line, wire sagging, ground wire, glaze-ice and rime deposition, electromagnetic field, inductive resistance of closed circuit, induced current, preventive heating.

REFERENCES

1. *Andrievskij V.N.* Eksploataciya vozdušnyh linij elektroperedachi. M.: Energiya, 1976. 616 pp.
2. *Levchenko I.I., Zasyplin A.S., Alliluev A.A., Sacuk E.I.* Diagnostika, rekonstrukciya ieksploataciya vozdušnyh linij elektroperedachi v golodnyh rajonah. Novočerkassk: YURGTU, 2006. 494 pp.
3. *Masoud Farzaneh.* Atmospheric Icing of Power Networks // Springer Science Business Media B.V. 2008. 388 p.
4. *Šovkoplyas S.S.* Ice melting on a grounded lightning protection cable by induced current from superimposed reactive current in phase conductors // *Izv. vuzov. Elektromekhanika. Specvypusk «Diagnostika energooborudovaniya».* 2008. P. 23–24.
5. *Šovkoplyas S.S.* Ice melting on ground wires by induced high frequency current // *Izv. vuzov. Elektromekhanika. Specvypusk «Elektrosnabzhenie».* 2010. P. 17–18.
6. *Balyberdin L.L., Galanov V.I., Krajchik YU.S., Krasnova B.P., Lozinova N.G., Mazurov M.I.* Induction melting of ice on lightning protection cables of overhead power lines // *Elektricheskie stancii.* 2002. No 1. P. 31–37.

* *Evgenij A. Krotkov (PhD (Tech.)), Associate Professor.*
Nadezhda V. Bezmenova (PhD (Tech.)), Associate Professor.
Aleksandr A. Shchobak, Postgraduate Student

7. *Shovkopyas S.S.* A method for preventing icing on lightning protection cables of an overhead power transmission line of ultra-high voltage by induced currents without taking it out of operation // *Energetik*. 2018. No 8. P. 13–20.
8. *Zasyplin A.S., Zasyplin A.S. (jr.)*. Preventive heating of lightning protection cables of overhead lines by induced current // *Izv. vuzov. Elektromekhanika*. 2018. Vol. 61, no 2. P. 99–106.
9. *Carson J.R.* Wave propagation in over head wires with round return // *The Bell System Technical Journal*, 1926. Vol. 5, No. 4. P. 539–554.
10. *Hayasi S.* Volny v liniyah elektroperedachi. M.: Gosenergoizdat, 1960, 343 pp.
11. STO 56947007-29.240.01.189-2014. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu al'bomov kart klimaticheskogo rajonirovaniya territorii po subektam RF. OAO «NTC FSK EES». Prikaz OAO «FSK EES» ot 03.10.2014. No 444. 95 pp.
12. STO 56947007-29.240.55.255-2018. Stal'nye reshetchatye opory novoj unifikacii VL 220 kV. Ukazaniya po primeneniyu opornovoj unifikacii pri proektirovanii VL 220 kV. Filial AO «NTC FSK EES» – SibNIIIE. 2018. 323 pp.
13. *Dmitriev M.V., Rodchihin S.V.* Lightning protection cables VL 35-750 kV. Choice of grounding locations // *Novosti Elektrotehniki*. 2017. No 2(104). P. 2–5.
14. *Misrihanov M.Sh., Rubcova N.B., Tokarskij A.Yu.* Obespechenie elektromagnitnoj bezopasnosti elektrosetevyh obektov. M., Vologda: Infra-Inzheneriya, 2019. 508 pp.
15. *Merkin D.R.* Vvedenie v mekhaniku gibkoj niti. M.: Nauka, 1980. 240 pp.
16. *Boshnyakovich A.D.* Raschet provodov podstanciji bolshih perekhodov LEP. L.: Energiya, 1975. 248 pp.
17. *Korn G., Korn T.* Spravochnik po matematike (dlya nauchnyh rabotnikov I inzhenerov). M.: Nauka, 1974. 832 pp.
18. *Savel'ev I.V.* Kurs obshchej fiziki . Ucheb. Posobie dlya studentov vtuzov v 3-h t. 2-e izd., pererab. Vol 2. M.: Nauka, 1982. 273 pp.
19. *Krasnitskij Yu.A.* Catenary magnetic field at low frequencies // *Transport and Telecommunication*. 2003. Vol. 4, no 1. P. 9–15.
20. COMSOL Multiphysics – Platform for creation of computational models and applications. <https://www.comsol.ru> (accessed Januar11, 2022).
21. *Demirchyan K.S., Nejman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.* Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Vol. 3. Teoriya elektromagnitnogo polya. Sankt-Peterburg: Piter, 2003. 377 pp.
22. *Cejtlin L.A.* Induktivnosti provodov i konturov. L.: Gosenergoizdat. 1950. 229 pp.
23. *Cicikyan G.N., Baranov Yu.D.* Comparative analysis of expressions for calculating the inductances of rectangular wires and circuits // *Elektrichestvo*. 2018. No 2. P. 59–63.