

* * *

Электричество, 2016, № 2, с. 28–38.

Электромагнитное влияние высоковольтных линий электропередачи

КОЛЕЧИЦКИЙ Е.С., КОРОЛЕВ И.В.

Излагается систематический подход к рассмотрению всех аспектов расчета наведенных напряжений. Проанализирована возможность появления наведенных токов и напряжений на различных инженерных сооружениях, расположенных вблизи ВЛ. На примере физической модели рассматриваются два характерных случая: провода двух ВЛ одного класса напряжения подвешены на двухцепной опоре или две ВЛ проходят на некотором расстоянии друг от друга. Предложенная инженерная методика позволяет рассчитывать наведенные продольные и емкостные токи при любых способах заземления ремонтируемой ВЛ, как при заземлении по ее концам или при заземлении РВЛ только лишь в одной точке РВЛ (или на двух соседних опорах). Методика включает в себя как отдельный элемент расчеты емкостных токов и соответствующих наведенных напряжений. Показана возможность появления наведенных токов и напряжений на различных инженерных сооружениях, расположенных вблизи ВЛ. Разработанная методика проиллюстрирована на характерных примерах в виде программ в среде Mathcad. Показано, что для ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов целесообразно заземление всех проводов в одной точке, а для ВЛ с горизонтальным расположением проводов – каждого провода отдельно. На основании анализа результатов показано, что совпадения для продольных параметров ВЛ и индуцированных продольных токов для ВЛ с горизонтальным расположением проводов лежит в рамках инженерной точности.

Ключевые слова: линии электропередачи, наведенные напряжения, токи, метод расчета

Современная промышленность, а также города с многомиллионным населением требуют электро-снабжения в колоссальных объемах. Электроэнергия поставляется потребителям преимущественно по воздушным линиям электропередачи (ВЛ), по

проводам которых протекают токи до нескольких кА, а провода могут находиться под напряжением до нескольких сотен кВ (наибольшее номинальное напряжение ВЛ в РФ равно 750 кВ). В некоторых случаях электроснабжение может осуществ-

вляться по кабельным линиям (КЛ) высокого напряжения (до 500 кВ).

Такие сооружения как ВЛ и КЛ оказывают на окружающую среду самое разнообразное воздействие. Наибольшее внимание привлекает воздействие электромагнитных полей на биосферу. Этому вопросу уделяется большое внимание, и он детально рассматривается в большом числе статей, учебников и монографий.

В статье рассматривается другой технический аспект воздействий ВЛ и КЛ – влияние электромагнитных полей на технические сооружения, расположенные вблизи линий электропередачи.

Как известно, магнитное поле может индуцировать токи в проводниках, а электрическое – создает токи смещения (так называемые «емкостные токи»), которые замыкаются от проводов ВЛ на заземленные проводники, входящие в состав различных технических устройств.

В РФ в пятидесятые годы прошлого столетия большое внимание уделялось влиянию ВЛ на линии связи [1]. Однако с развитием беспроводных средств связи эта проблема перестала быть актуальной и привлекать к себе внимание. Однако влияние ВЛ на самих себя в связи с непрекращающимся развитием электрических сетей остается актуальным.

Необходимость строительства сети высоковольтных линий потребовала решения принципиальных теоретических вопросов, связанных с определением параметров ВЛ [2–5], что обеспечило принципиальную возможность адекватных оценок влияния ВЛ.

Наиболее важным представляется вопрос влияния одних ВЛ на другие линии электропередачи, находящиеся в ремонте. Введем определения: ВВЛ – линия электропередачи, оказывающая электромагнитное влияние на другие ВЛ (влияющая линия); РВЛ – ремонтируемая ВЛ, проходящая в зоне влияния ВВЛ.

Ремонт ВЛ осуществляется либо под рабочим напряжением, либо с отключением ВЛ и последующим заземлением проводов, который называется «ремонт под наведенным напряжением». Вопросы электробезопасности при проведении ремонта под наведенным напряжением рассматриваются достаточно давно, что отражено в нормативных документах под общим названием «Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок», которые периодически обновляются, причем последняя редакция утверждена в 2013 г. [6]. Оценки наведенных напряжений частично отражаются в специальных «Методических указаниях» ФСК РФ [7].

Однако несмотря на большое внимание к этой проблеме, нельзя сказать, что имеется полная яс-

ность при оценках наведенных напряжений, в том числе из-за возможности появления наведенных напряжений и в других сходных случаях. В статье представлен подход к рассмотрению всех аспектов расчета наведенных напряжений.

Основные физические параметры ВЛ. В современной физической модели линии электропередачи (включая кабельные) [1–5] предполагается, что ток, протекающий по проводу линии, возвращается через землю, причем магнитное поле «обратного тока» может быть эквивалентировано полем одного провода, лежащего на глубине

$$H_{\text{э}} \approx 1,3d = 654 \sqrt{\frac{r}{f}}, \quad (1)$$

где $d = 503,3 \sqrt{\frac{r}{f}}$ – толщина скин-слоя; r – удельное сопротивление грунта по трассе ВЛ, Ом·ж; f – частота, рад/с.

Векторный потенциал отрезка провода с током I описывается формулой

$$dA = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}. \quad (2)$$

Интегрирование (2) по длине линии с учетом обратного тока (протекающего в земле) позволяет получить формулу для индуктивности линии:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2},$$

где r_1 и r_2 – расстояния до провода в воздухе и в земле.

С учетом того, что $H_{\text{э}}$ много больше высоты подвеса проводов над землей для точки на поверхности провода, получим выражение для его индуктивности, а если рассматривать другой провод ВЛ, то – взаимной индуктивности между проводами:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1,3d}{r_{\text{э}}}; \quad M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1,3d}{d_{12}}, \quad (3)$$

где d_{12} – расстояние между проводами в воздухе.

Для расщепленных проводов радиус провода в (3) заменяют на эквивалентный радиус, вычисляемый по известной формуле [4]:

$$r_{\text{э}} = r_{\text{р}} \sqrt[n]{\frac{nr_{\text{пр}}}{r_{\text{р}}}} = \sqrt[n]{nr_{\text{р}}^{n-1} r_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где $r_{\text{р}}$ – радиус расщепления; n – число проводов в фазе.

Для случая синусоидального тока по (3) и (4) можно вычислить реактивные сопротивления самоиндукции провода и взаимной индукции при умножении выражений (3) на угловую частоту ω .

Следует заметить, что при вычислении L и M необходимо учитывать взаимное расположение

проводов ВЛ (точнее угол между ними). Также отметим, что при анализе реальных ВЛ формулы (3) следует рассматривать как приближенные. Это вызвано как допущениями при построении расчетной модели линии, в которой высота линии над землей постоянна, так и неполнотой информации о грунте и конструкции реальной ВЛ. Здесь имеется в виду, что строение грунта по длине линии может изменяться в достаточно широких пределах. Кроме того, даже в паспорте линии не указывается информация по расчетам стрел провеса. Реальную погрешность (3) следует оценивать значением около 10%, тем не менее формулы (3) являются основными при расчете параметров ВЛ.

Необходимо также заметить, что (1)–(3) в представленном виде были получены Рюденбергом для упрощенной модели, а в дальнейшем были развиты и для более сложных случаев, в том числе и для двухслойной земли, что неизбежно привело к их усложнению. Учитывая, что уровень погрешности 10% вполне приемлем для задач, рассматриваемых в статье, сложные случаи далее не рассматриваются.

Именно из (3) следует, что фактическая индуктивность провода в режиме прямой последовательности равна $L_{\text{пр}} = L - M$, а в режиме нулевой последовательности $L_0 = L + 2M$.

Активное сопротивление проводов учитывает протекание обратного тока в земле сложением сопротивления собственно провода (внешнего повива с учетом потерь в сердечнике) и «добавки», равной 0,05 Ом/км, не зависящей от радиуса провода [4].

Отметим также, что КЛ, так же как и ВЛ, создают сильные магнитные поля, которые также могут наводить соответствующие ЭДС. При этом алгоритм расчета наведенных ЭДС практически совпадает с изложенным ранее, если речь идет о системе токов нулевой последовательности в КЛ.

Влияние ВЛ, находящейся в работе, на провода проходящей параллельно РВЛ. На практике чаще всего встречаются два характерных случая, когда провода двух ВЛ одного класса напряжения подвешены на двухцепной опоре (ВЛ номинального напряжения до 330 кВ) или когда две ВЛ проходят на некотором расстоянии друг от друга (ВЛ от 330 до 750 кВ).

Рассмотрим две ВЛ, проходящие параллельно (рис. 1).

Для анализа типичной картины влияния одной ВЛ на другую рассмотрим две ВЛ, расположенные на одной (так называемой двухцепной) опоре (рис. 1, а). Для проведения ремонта на одной из цепей (на одной из линий) ее обязательно заземляют [6, 7]. Причем в нормативных документах рассматриваются как возможные два способа заземления

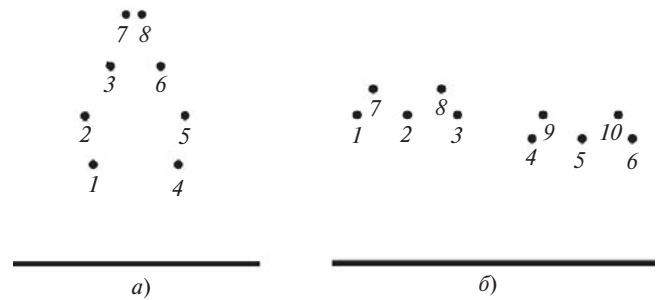


Рис. 1. Схема взаимного расположения проводов и тросов двух ВЛ: а — на двухцепной опоре с вертикальным расположением фазных проводов; б — двух ВЛ с горизонтальным расположением фазных проводов; 1–3 — провода ВВЛ; 2–4 — провода РВЛ; 7–10 — молниезащитные заземленные тросы

РВЛ. По первому способу РВЛ заземляется по ее концам (на конечных подстанциях или распределительных устройствах) и, возможно, еще в одной точке на линии. Заземление РВЛ по второму способу проводится только лишь в одной точке РВЛ (или на двух соседних опорах), концы ВВЛ в этом случае не заземляются.

Очевидно, при первом способе заземления РВЛ по ее проводам будет протекать ток, индуцированный наведенной ЭДС от тока ВВЛ (наведенный «магнитный» продольный ток), а также ток за счет емкостной связи обеих линий («емкостный» поперечный ток).

В случае заземления РВЛ в одной точке контур для протекания продольного тока «разрывается», а через устройства заземления будет протекать только емкостный поперечный ток, причем этот ток определяется полной длиной РВЛ.

Для упрощения рассмотрим расчеты продольного и поперечного токов в РВЛ отдельно. Поскольку формулы (1) и (3) позволяют вычислить все параметры линий, расчет продольного тока в РВЛ можно проводить методами теории цепей.

Прежде чем переходить к схеме замещения (рис. 2), назовем общепринятые допущения:

1) влияние токов, наведенных в РВЛ на токи в ВВЛ, не учитывается; это объясняется тем, что это влияние (можно легко показать) не превосходит единиц процента и поэтому может не рассматриваться;

2) схема замещения для РВЛ не содержит емкостей ее проводов (при необходимости нет никаких препятствий для использования формул длинной линии).

Заземлитель r_3 делит РВЛ на два контура, расчет схемы может быть проведен, например, методом контурных токов, которые показаны на рис. 2.

Воздушные линии напряжением 110 кВ и выше оборудованы грозозащитными заземленными тросами. Как правило, они делятся на отдельные участки, которые заземляются только на одном конце

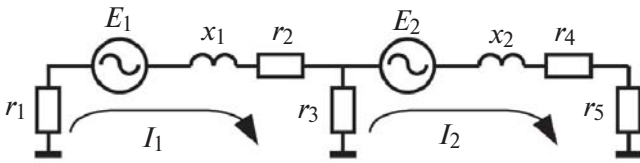


Рис. 2. Типичная однолинейная схема замещения РВЛ, заземленной по ее концам и в средней точке: r_1, r_3, r_5 – заземлители; E_1 и E_2 – ЭДС, индуцированные в проводах РВЛ токами в ВВЛ; x_1, x_2, r_2, r_4, r_5 – индуктивные сопротивления и сопротивления проводов РВЛ с учетом взаимных индуктивностей между ними

(второй конец разомкнут). Поэтому тросы целесообразно рассматривать как отдельные провода с длиной, равной длине ВЛ. Также ясно, что продольные токи при наличии разрыва (или разрывов) тросов по ним не протекают.

Таким образом, для схемы рис. 2 нужно решить задачу: рассчитать шесть контурных токов (два участка по три фазных провода в каждом) и напряжения на заземлителях $r_{3y1}, r_{3y2}, r_{3y3}$, которые и определяют условия проведения ремонтных работ по требованиям электробезопасности.

Запишем матрицы ЭДС для каждого провода и матрицу комплексных сопротивлений. Запись матриц должна проводиться в комплексной форме для того, чтобы учесть сдвиги по фазе токов во влияющей линии.

Наведенная i -м проводом ВВЛ в j -м проводе РВЛ ЭДС

$$E_{ij} = I_{\text{ВВЛ}} \omega M_{ij} l_i, \quad (5)$$

где l_i – длина ВВЛ.

Матрица ЭДС является вектором из шести элементов одинаковой структуры. Обозначим провода ВВЛ индексами $i = 1, 2, 3$; провода РВЛ индексами $j = 4, 5, 6, 7, 8, 9$. В каждой строке матрицы E записывается сумма ЭДС, наведенных проводами ВВЛ в каждом из проводов РВЛ. Токи в проводах ВВЛ сдвинуты по фазе на 120° (эл.), что учитывается введением оператора фазового сдвига ($a = -0,5 - j0,866$).

Пусть ток ВВЛ одинаков по всей ее длине и равен $I_{\text{ВВЛ}}$ (что в общем случае неверно, поскольку РВЛ может находиться в зоне влияния двух и более линий), тогда матрица будет иметь вид:

$$E = jI_{\text{ВВЛ}} \omega \begin{vmatrix} M_{14}l_1 + aM_{24}l_1 + a^2M_{34}l_1 \\ \dots \\ M_{18}l_2 + M_{28}l_2 + M_{38}l_2 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Здесь в явном виде прописаны только 1-я и 5-я строки.

Матрица комплексных сопротивлений Z , необходимая для расчета продольных токов в проводах и тросах 4, 5...7, 8 для схемы рис. 1 – квадратная, размерностью 5×5 . Ее структура зависит от схемы

соединения заземлений на концах РВЛ и в ее средней точке. Имеется в виду, что провода РВЛ могут заземляться на заземлитель опоры (в большинстве случаев) или же каждый провод может быть заземлен на отдельный заземлитель. Для решения задачи используем метод контурных токов.

В явном виде матрица Z имеет вид:

$$Z = \begin{vmatrix} r_{3y} + r_{2a} + jXM_{4,4} & jXM_{4,5} + 3r_{3y} \\ jXM_{5,4} + 2r_{3y} & 2r_{3y} + jXM_{5,5} + r_{2b} \\ jXM_{6,4} + 2r_{3y} & jXM_{6,5} + 2r_{3y} \\ jXM_{7,4} & jXM_{7,5} \\ jXM_{8,4} & jXM_{8,5} \\ + 2r_{3y} & jXM_{8,7} & jXM_{8,8} \\ + 2r_{3y} & jXM_{5,7} & jXM_{5,8} \\ \textcircled{R} 2r_{3y} + r_{2c} + jXM_{6,6} & jXM_{6,7} & jXM_{6,8} \\ jXM_{7,6} & r_{\text{TP}} + jXM_{7,7} & jXM_{7,8} \\ jXM_{8,6} & jXM_{8,7} & r_{\text{TP}} + jXM_{8,8} \end{vmatrix} \quad \textcircled{R}$$

где $X_{ij} = \omega L_{ij} l_1$ – индуктивное сопротивление j -го провода РВЛ первого участка; $XM_{ij} = \omega M_{ij} l_1$ – сопротивление взаимной индукции i -го провода от тока в j -м проводе; r_{3y} – сопротивление заземлителей, на которые заземлены 4, 5 и 6-й провода; r_a, r_b, r_c – активные сопротивления этих проводов; r_{TP} – сопротивление тросов.

Ток в проводах РВЛ вычисляется по формуле (записанной в матричном виде):

$$I = (XZ)^{-1} E. \quad (7)$$

В выражения (6) и (7) входят собственные и взаимные индуктивности проводов с учетом длины участков схемы рис. 1. На первый взгляд, алгоритм вычисления продольных токов в заземленной РВЛ представляется громоздким для практических расчетов. Однако использование современных вычислительных программ (например Mathcad) позволяет программировать расчет в такой степени, что самым трудоемким процессом является ввод исходных данных задачи (координаты проводов, их радиусы, номинальные напряжения и токи в ВВЛ). Примеры использования Mathcad приведены в Приложении.

Очевидно, что алгоритм расчета продольного тока в РВЛ легко моделируется при изменении схемы заземления, длины ВВЛ, ее расположения относительно РВЛ, что отражается в изменении исходных данных задачи.

Кроме рассмотренной на практике встречаются и другие схемы. В первую очередь нужно назвать так называемый «пофазный ремонт», когда для ремонта отключается только одна фаза [11], а по двум оставшимся протекает ток.

В таком случае в первую очередь изменяются значения наведенных напряжений. Так как при пофазном ремонте заземляется только один (ремонтируемый) провод, то, естественно, рассчитывать наведенный ток нужно в нем, а наведенная ЭДС записывается в простейшей форме:

$$E_{п.ф} = I_{ВВЛ} \omega l (M_{13} + aM_{23}), \quad (8)$$

где по проводам 1 и 2 протекает ток $I_{ВВЛ}$, а провод 3 – отключен и заземлен по концам.

Наведенный ток

$$I_3 = E_{п.ф} / (r_3 + j\omega L_3), \quad (9)$$

где r_3 – сопротивление грунта, провода 3 и сопротивление заземлителя растеканию тока по концам провода 3.

Главное различие алгоритмов (7) и (9) состоит в том, что в (9) наведенная ЭДС создается двумя проводами, а не тремя, как в (7), поэтому значение продольной ЭДС, вычисленное по (6), значительно больше, чем по (8).

Следует также заметить, что формулы (6)–(9) позволяют также рассчитать продольную ЭДС и ток в проводе, подвешенном параллельно ВЛ высокого напряжения (при условии, что длина провода много больше высоты подвеса, а также известна схема его заземления). При наличии угла между трассой ВЛ и проводом следует вводить поправки (в простейшем случае – косинусы соответствующих углов).

В данном случае имеются в виду провода любого назначения, включая, например, провода охранной или какой-то другой сигнализации. Необходимо только помнить, что продольные ЭДС по (6) или (9) вычисляются на единицу длины. Примеры расчета наведенных ЭДС и продольных токов – см. Приложение.

Далее перейдем к рассмотрению электрических зарядов, наводимых (индуцированных) на РВЛ (или других заземленных проводниках), и соответствующих токов, стекающих в землю.

Как известно, система, состоящая из нескольких проводников, часть которых находится под напряжением, а другая – заземлена, может быть описана с помощью так называемых частичных емкостей.

Вид формул для расчета потенциальных коэффициентов и соответствующих частичных емкостей зависит от формы проводников и их расположения в пространстве. В случае, если проводники являются тонкими (длина много больше радиуса) параллельными проводниками, формулы для потенциальных коэффициентов можно записать в явном

виде. В дальнейшем матрицу потенциальных коэффициентов будем обозначать как A_{ij} .

Токи, стекающие в землю с заземленных проводников, могут быть определены как сумма токов смещения между заземленными и находящимися под напряжением проводниками (суммирование проводится по всем проводникам, находящимся под напряжением):

$$I_{ci} = \omega \sum_{j=1}^k U_j C_{ij}, \quad (10)$$

где C_{ij} – частичная емкость между i -м заземленным проводником и j -м проводником, находящимся под напряжением \bar{U}_{ij} (в комплексной форме),

круговая частота ω вынесена за знак суммы, так как формула написана для случая, когда напряжения на проводниках меняются с одинаковой частотой.

Формула (10) как таковая очевидна и не требует дополнительных пояснений. Однако ее применение может показаться сложным из-за необходимости вычислений частичных емкостей, которые, в свою очередь, определяются путем обращения матрицы потенциальных коэффициентов. Применительно к проводам ВЛ следует иметь в виду, что электрические векторы напряжений на фазных проводах сдвинуты на 120° (эл.), что обычно учитывается введением оператора $a = -0,5 - j0,866$.

В развернутом виде формула (10) может быть представлена в следующем:

$$C_{ij} = (A_{ij})^{-1}, \quad I_{ck} = \omega U_{ф} l (C_{1k} + aC_{2k} + a^2 C_{3k}), \quad (11)$$

где частичные емкости C_{ij} являются элементами обращенной матрицы потенциальных коэффициентов, а ток на k -й заземленный провод равен сумме токов смещения от проводов 1–3 ВВЛ; ω – круговая частота; $U_{ф}$ – модуль фазного напряжения; l – длина РВЛ.

Расчет по (11) при использовании любой программы (например Mathcad) позволяет свести его фактически к описанию геометрического расположения проводов влияющей и ремонтируемой ВЛ, поскольку вычислительная часть требует сравнительно малых затрат времени даже по сравнению с подготовкой исходных (см. Приложение).

Результирующий (полный) наведенный ток в общем случае равен сумме продольного и емкостного тока. Заранее указать угол сдвига между продольным и емкостным током затруднительно, поскольку режим работы (передаваемая мощность по ВВЛ) априори не известен. В качестве первого приближения можно считать, что продольный и емкостный токи находятся в квадратуре (сдвинуты на 90° (эл.)).

Однако практика расчетов показывает, что при прочих равных условиях емкостный ток значительно меньше продольного и при заземлении РВЛ в нескольких точках им можно пренебречь. Но если РВЛ заземляется в одной точке (или на двух соседних опорах), то при определении наведенного напряжения продольный ток равен нулю и емкостный ток определяет условия электробезопасности. При этом следует иметь в виду, что в случае заземления РВЛ в одной точке стекающий в землю ток определяется полной длиной РВЛ.

Также следует отметить, что емкостные токи, наводимые в проводах, натянутых под ВЛ (ограждения, различного рода охранные системы и т.п.), могут достигать опасных значений. Например, если провод длиной 1 км натянут на высоте 3 м под крайней фазой ВЛ 500 кВ (что вполне реально), то стекающий в землю через него емкостный ток может достигать 30–40 мА. Если такой провод будет «заземлен» через тело человека (например, в процессе его натяжки), то ток 30 мА будет превышать так называемый «неотпускающий ток», что может вызвать более чем неприятные последствия.

Альтернативные методы расчета наведенных напряжений. В первую очередь нужно назвать использование известной программы ATPDraw, которая распространяется открыто для применения в решении задач некоммерческого характера (а также ее аналоги, распространяемые на коммерческой основе), а также Matlab Simulink [8].

Использование этих программ дает результаты, различающиеся в подобных задачах при использовании изложенного в статье метода не более чем на 10–15%, что вызывается некоторыми расхождениями в алгоритмах.

Трудозатраты при использовании программ (ATPDraw или других) представляются примерно одинаковыми при сравнении с изложенным в статье методом.

Вторым альтернативным методом следует назвать применение методики [7]. В этом документе «для предварительной оценки и пересчета полученных в результате измерений значений наведенного напряжения используется упрощенная расчетная методика».

Ее особенностью является приведение трехфазной схемы к однофазной для расчета наведенной продольной ЭДС и определения напряжения на заземлителях РВЛ. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Комплексные ЭДС и эквивалентное сопротивление можно определить по известной формуле теории цепей, позволяющей заменить параллельные ветви с ЭДС одной:

$$\bar{E}_\ominus = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{a}_i E_i \bar{Y}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{Y}_i}; \quad \bar{Z}_\ominus = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{Y}_i}. \quad (12)$$

Воздушная линия напряжения обладает высокой добротностью, поэтому комплексные сопротивления проводов ВЛ можно рассматривать как чисто реактивные, т.е.

$$\bar{Z}_{\ominus ij} = w \sum_{j=1}^3 \bar{a}_i L_{ij},$$

где L_{ij} равна собственной индуктивности ветви при $i = j$ и взаимной индуктивности при $i \neq j$.

Расчеты, проведенные для ВЛ разных конструкций, показывают, что реактивные сопротивления фазных проводов отличаются друг от друга (см. Приложение) не более чем на 2–3%, поэтому (12) можно существенно упростить:

$$\bar{E}_\ominus = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{E}_i; \quad \bar{Z}_\ominus = \frac{\sum_{i=1}^3 \bar{Z}_{\ominus i}}{3}. \quad (13)$$

Таким образом формулы преобразования трехфазной цепи в однофазную приводятся к простейшему виду. Это дает возможность провести сравнение результатов расчетов наведенных продольных токов по методике [7] и по методике, изложенной в статье.

В [7] рассматриваются как основные две расчетные схемы, одна из которых имеет простейший вид рис. 3.

Подлежат сравнению собственно два параметра схемы рис. 3 – эквивалентные ЭДС и сопротивление участка. Численные значения этих параметров по данным [7] и Приложения приведены далее:

$U_{\text{ном}}$ ВЛ, расстояние S	Параметр*	g, Ом/км	\bar{E}_\ominus , В/кАжм
220 кВ, 10 м		0,493/0,434	48,8/2,81
500 кВ, 30 м		0,402/0,36	64,2/48,3

*В числителе данные [7], в знаменателе – данные Приложения к статье; значения \bar{E}_\ominus вычислялись при токе в ВВЛ 1000 А и длине параллельного следования 100 км, эквивалентные сопротивления в Приложении приведены для длины РВЛ 100 км.

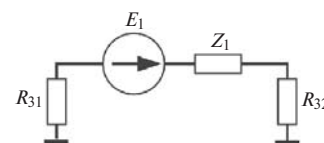


Рис. 3. Схема замещения для расчета наведенных напряжений на участке ВЛ, заземленном в двух точках (рис. 4 в [7]): E_1 – продольная эквивалентная ЭДС; Z_1 – эквивалентное сопротивление ВЛ; R_{31} , R_{32} – сопротивление заземлителей по концам участка

Приведенные данные показывают, что удельные эквивалентные сопротивления для ВЛ 220 и 500 кВ различаются не более чем на 13%, что вполне допустимо, поскольку [7] распространяется на ВЛ любых конструкций.

Практическое отсутствие расхождений по этому параметру является подтверждением корректности расчетной методики статьи. Также можно сказать, что при использовании программы АТР имеет место примерно такое же расхождение по данному параметру.

Однако данные по эквивалентным продольным ЭДС расходятся гораздо сильнее. Для ВЛ 500 кВ расхождение в значениях E_z составляют около 30%, что также может быть принято как верхний предел допустимой погрешности. Для ВЛ 220 кВ имеет место расхождение на порядок величин (точнее в 17 раз).

Для того чтобы понять причины имеющегося значительного расхождения результатов, следует проанализировать результаты проведенных авторами расчетов. С этой целью в Приложении приведен во всех деталях алгоритм расчета (формулы с (1) по (13)). Специально один и тот же алгоритм приведен для расчета наведенных продольных и емкостных токов для ВЛ 220 и 500 кВ. Единственным принципиальным различием является расположение проводов этих ВЛ в пространстве (рис. 1, а и б).

Различие этих ВЛ с точки зрения расчета наведенных напряжений состоит в том, что фазные провода ВЛ 220 кВ расположены один над другим (вертикально или «бочкой»), а провода ВЛ 500 кВ расположены на одной высоте (горизонтально).

При номинальных напряжениях до 330 кВ используются ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов, с горизонтальным – от 220 кВ («старые» ВЛ, находящиеся в эксплуатации много десятков лет) до 750 кВ.

Расчеты показывают, что индуцированные продольные ЭДС для ВЛ с вертикальным расположением имеют специфические соотношения между собой: индуцированные ЭДС в верхнем и нижнем проводах РВЛ примерно одинаковы по амплитуде, а сдвиг фаз между ними близок к 180° (эл.); индуцированная ЭДС в средней по высоте фазе много меньше, чем в двух других.

Такой результат зафиксирован как в [9], так и при расчетах по программе АТР. Результатом является неравенство индуцированных в фазных проводах токов, а также то, что сумма этих токов при заземлении в одной точке (на опору) меньше наибольшего из них.

Для линий с горизонтальным расположением проводов имеет место другая картина. Индуциро-

ванные в проводах РВЛ ЭДС различаются между собой, но фазовый сдвиг между ними минимален; то же можно сказать и об индуцированных токах. Наибольший индуцированный ток имеет место в фазном проводе РВЛ, ближайшем к ВВЛ.

Токи в заземлителях проводов РВЛ практически одинаковы по фазе, но неодинаковы по амплитуде. В результате сумма продольных токов при заземлении в одной точке равна сумме продольных токов в фазных проводах РВЛ.

Также укажем на то, что емкостные токи ведут себя так же, как и продольные: для ВЛ с вертикальным расположением проводов их сумма меньше наибольшего, а для ВЛ с горизонтальным расположением фазных проводов сумма емкостных токов больше любого из них.

При увеличении расстояния S между ВВЛ и РВЛ до значений, много больших значений расстояния между фазными проводами $s \ll S$, наведенные ЭДС и токи становятся практически одинаковыми в фазных проводах РВЛ [10].

Приведенный краткий обзор результатов показывает совпадения (в рамках инженерной точности) для продольных параметров ВЛ и индуцированных продольных токов для ВЛ с горизонтальным расположением проводов, вычисленных по [6] и по предлагаемой методике.

Существенное различие в расчетах наведенных продольных токов для ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов может объясняться, по всей видимости, не совсем аккуратным приведением трехфазной системы проводов к однофазной.

Из проведенных расчетов вытекает, что для ВЛ с горизонтальным расположением проводов наведенное напряжение на отдельных фазах РВЛ может быть снижено при их заземлении на отдельные заземлители. Например, фазный провод РВЛ, ближайший к влияющей ВЛ, может быть заземлен на одной опоре, а два других фазных провода – на следующей. Для случая, рассмотренного в Приложении (пример 2), наибольшее напряжение на ближайшей фазе будет определяться продольным током 126 А вместо 135, а на других фазах – 26 А вместо 135 при заземлении всех трех фазных проводов на один заземлитель. Аналогичный результат имеет место и при расчете емкостного тока.

В заключении обзора результатов расчетов можно сказать, что расчеты трехфазных схем дают гораздо больше информации, чем однофазных схем.

Приложение. Пример 1. Расчет наведенного тока в отключенной и заземленной по концам ВЛ 220 кВ. Рассматриваются две ВЛ 220 кВ, расположенные на двухцепной опоре, одна из которых является влияющей, вторая – ремонтируемая – отключена и заземлена по концам. Требуется рассчитать наведенный продольный ток и напряжение на заземлителях РВЛ.

Представленный далее текст является программой расчета в среде Mathcad с включением комментариев, поясняющих назначение отдельных элементов программы.

Программа содержит последовательно используемые элементы: исходные данные общего характера; блок информации по геометрии ВЛ; блок расчета собственных и взаимных индуктивностей; формирование матриц продольной ЭДС и сопротивлений; блок расчета токов в проводах и напряжений на заземлителях РВЛ; блок расчета частичных емкостей и токов смещения (Фрагменты программы приведены в редакции Mathcad.)

Исходные данные общего характера:

$$a := (-0,5 - 0,866i) \quad r := 100 \text{ Ом} \quad \text{ORIGIN} := 1$$

$$j := \sqrt{-1} \quad f = 50 \text{ Гц} \quad U_{\text{НОМ}} := 220 \times 10^3 \text{ В}$$

$$r_{2a} := 8,85 \text{ Ом} \quad \eta_0 := 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м} \quad U_f := \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} \cdot 1,1$$

$$r_{2b} := 8,85 \text{ Ом} \quad \epsilon := 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$r_{2c} := 8,85 \text{ Ом} \quad w := 2\pi f \quad U_f = 1,397 \times 10^5 \text{ В}$$

$$r_{\text{ТР}} := 8,85 \text{ Ом} \quad l = 100 \times 10^3 \text{ м} \quad I_1 := 1000 \text{ А}$$

$$r_{3y} := 8,85 \text{ Ом}$$

Блок информации по геометрии ВЛ (X и H – координаты проводов в м; R – радиусы проводов, м; U – напряжение относительно земли на проводах, В; нумерация проводов – сверху вниз):

$$X := \begin{pmatrix} 4,6 \\ -6,4 \\ -4,6 \\ 4,6 \\ 6,4 \\ 4,6 \\ -0,2 \\ 0,2 \end{pmatrix} \quad H := \begin{pmatrix} 26,5 \\ 20,0 \\ 13,5 \\ 26,5 \\ 20,0 \\ 13,5 \\ 35,0 \\ 35,0 \end{pmatrix} \quad R := \begin{pmatrix} 0,0108 \\ 0,0108 \\ 0,0108 \\ 0,0108 \\ 0,0108 \\ 0,0108 \\ 0,008 \\ 0,008 \end{pmatrix} \quad U := \begin{pmatrix} 1,397 \times 10^5 \\ 1,397 \times 10^5 \\ a^2 \cdot 1,397 \times 10^5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Блок расчета собственных и взаимных индуктивностей:

$$k := 1, \dots, 8 \quad n := 1, \dots, 8$$

$$r_{k,n} := \sqrt{(X_k - X_n)^2 + (H_k - H_n)^2}$$

$$rh_{k,n} := \sqrt{(X_k - X_n)^2 + (H_k + H_n)^2}$$

$$\alpha := 503 \sqrt{\frac{r}{f}} \text{ м} \quad H_{\text{об}} := 1,3 \text{ д м}$$

$$M8_{k,n} := \begin{cases} \frac{\eta_0}{2\pi} \ln \frac{H_{\text{об}}}{R_k} & \text{if } k = n \\ \frac{\eta_0}{2\pi} \ln \frac{H_{\text{об}}}{r_{k,n}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$XM8_{k,n} := wM8_{k,n} \quad XM8_{1,1} = 71,363 \text{ Ом}$$

$$XM8_{1,4} = 28,968 \text{ Ом}$$

$M8_{k,n}$ – матрица собственных и взаимных индуктивностей (размерность ее элементов Гн/м); $XM8_{1,1}$ и $XM8_{1,4}$ – индуктивное сопротивление первого провода и сопротивление взаимной индукции первого и четвертого проводов, Ом на 100 км ВЛ при параллельном следовании ВВЛ и РВЛ.

Матрица продольной ЭДС $E8$ и сопротивлений $Z8$:

$$E8 := \begin{pmatrix} jXM8_{1,4} + ajXM8_{2,4} + a^2jXM8_{3,4} \\ jXM8_{1,5} + ajXM8_{2,5} + a^2jXM8_{3,5} \\ jXM8_{1,6} + ajXM8_{2,6} + a^2jXM8_{3,6} \\ jXM8_{1,7} + ajXM8_{2,7} + a^2jXM8_{3,7} \\ jXM8_{1,8} + ajXM8_{2,8} + a^2jXM8_{3,8} \end{pmatrix}$$

$$E8_1 = 1,991 \times 10^3 + 2,757i \times 10^3$$

$$E8_2 = -9,815 + 6,851i$$

$$E8_3 = -1,787 \times 10^3 - 2,415i \times 10^3$$

$$|E8_1| = 3,006 \times 10^3 \text{ В} \quad |E8_2| = 11,060 \text{ В} \quad |E8_3| = 3,004 \times 10^3 \text{ В}$$

Модули $E8_1$, $E8_2$ и $E8_3$ – наведенные ЭДС в проводах РВЛ. Комплексная форма записи показывает, что ЭДС в верхнем и нижнем проводах РВЛ практически в противофазе, а ЭДС в среднем по высоте проводе много меньше, чем в двух других:

$$Z8 := \begin{pmatrix} 2r_{3y} + r_{2a} + jXM8_{4,4} & jXM8_{4,5} + 2r_{3y} \\ jXM8_{5,4} + 2r_{3y} & 2r_{3y} + jXM8_{5,5} + r_{2b} \\ jXM8_{6,4} + 2r_{3y} & jXM8_{6,5} + 2r_{3y} \\ jXM8_{7,4} & jXM8_{7,5} \\ jXM8_{8,4} & jXM8_{8,5} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} jXM8_{4,6} + 2r_{3y} & jXM8_{4,7} & jXM8_{4,8} \\ jXM8_{5,6} + 2r_{3y} & jXM8_{5,7} & jXM8_{5,8} \\ 2r_{3y} + r_{2c} + jXM8_{6,6} & jXM8_{6,7} & jXM8_{6,8} \\ jXM8_{7,6} & r_{\text{ТР}} + jXM8_{7,7} & jXM8_{7,8} \\ jXM8_{8,6} & jXM8_{8,7} & r_{\text{ТР}} + jXM8_{8,8} \end{pmatrix}$$

Матрица $Z8$ записана для случая, когда грозозащитные тросы заземлены (как и фазные провода РВЛ) по концам на отдельные сопротивления. На практике тросы могут иметь разрывы и заземляются только с одной стороны на каждом отрезке. В этом случае продольный ток в них не протекает.

Расчет токов в проводах РВЛ и напряжений на ее заземлителях:

$$I8 := Z8^{-1} E8$$

$$I8_1 = 52,193 - 25,667i \quad |I8_1| = 58,163 \text{ А}$$

$$I8_2 = -8,723 - 8,982i \quad |I8_2| = 12,521 \text{ А}$$

$$I8_3 = -67,592 + 20,747i \quad |I8_3| = 70,704 \text{ А}$$

$$|I8_1 + I8_2 + I8_3| = 27,842$$

Согласно правилам индексации Mathcad в данном случае проводам РВЛ присвоены индексы 1, 2, 3. Расчет показал, что продольные токи в верхнем и нижнем проводах РВЛ значительно больше, чем в среднем (по высоте) проводе, что вытекает из явной несимметрии продольных ЭДС $E8_1$, $E8_2$ и $E8_3$. Вместе с тем векторная (измеряемая) сумма токов меньше наибольшего из них, что имеет место при заземлении всех фазных проводов РВЛ на один заземлитель (что и отражено в строении матрицы $Z8$).

Напряжение U_{zu} на заземлителе проводов РВЛ (В):

$$U_{zu} = r_{3y} |I8_1 + I8_2 + I8_3| \quad U_{zu} = 13,921 \text{ В}$$

Расчет емкостного тока на провода РВЛ: используется исходная информация по ВЛ, приведенная ранее.

Матрица потенциальных коэффициентов:

$$A8_{k,n} := \begin{cases} \frac{\ln \frac{2}{e} \frac{H_k}{R_k} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}}}{2\pi e} & \text{if } k = n \\ \frac{\ln \frac{2}{e} \frac{r_{k,n}}{r_{k,n}} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}}}{2\pi e} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Расчет емкостных токов на провода РВЛ:

$$\begin{aligned} IC8 &:= A8^{-1} U_{w\ddot{\circ}} \\ IC8_4 &= -1,998 + 0,709i \quad |IC8_4| = 2,12 \text{ A} \\ IC8_5 &= -0,206 + 0,089i \quad |IC8_5| = 0,224 \text{ A} \\ IC8_6 &= 1,202 - 1,11i \quad |IC8_6| = 1,636 \text{ A} \\ |IC8_4 + IC8_5 + IC8_6| &= 1,049 \end{aligned}$$

Токи смещения на заземленные провода РВЛ $IC8_4, IC8_5, IC8_6$, так же как продольные токи, сильно различаются по амплитуде, причем их векторная сумма меньше наибольшего из них. Также необходимо отметить, что ток смещения меньше продольного тока в заземлителе.

Рассмотрим также случай, когда тросы на обеих ВЛ не замкнуты и продольный ток в них не протекает. В этом случае матрица продольных ЭДС сокращается с пяти до трех первых строк (по соображениям экономии места она здесь не приводится). Матрица сопротивлений $Z6$ (по общему числу проводов) также сокращается и принимает вид:

$$Z6 := \begin{pmatrix} 2r_{3y} + r_{2a} + jXM_{8,4,4} & jXM_{8,4,5} + 2r_{3y} \\ jXM_{8,5,4} + 2r_{3y} & 2r_{3y} + jXM_{8,5,5} + r_{2b} \\ jXM_{8,6,4} + 2r_{3y} & jXM_{8,6,5} + 2r_{3y} \end{pmatrix} \textcircled{C}$$

$$\textcircled{C} \begin{pmatrix} jXM_{8,4,6} + 2r_{3y} \\ jXM_{8,5,6} + 2r_{3y} \\ 2r_{3y} + r_{2c} + jXM_{8,6,6} \end{pmatrix} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}}$$

Продольные токи в проводах РВЛ принимают значения:

$$|I6_1| = 65,981 \text{ A} \quad |I6_2| = 3,792 \text{ A} \quad |I6_3| = 65,769 \text{ A}$$

Если же в матрице $Z6$ оставить только индуктивные сопротивления и сопротивления взаимной индукции, то при этом продольные токи изменяются мало:

$$|I6_1| = 67,17 \text{ A} \quad |I6_2| = 3,902 \text{ A} \quad |I6_3| = 67,153 \text{ A}$$

Различия между разными вариантами расчета не превышают 10 %.

Преобразование трехфазной схемы РВЛ в однофазную. Формула преобразования:

$$E_e := \frac{(E6_1 Y_4 + E6_2 Y_5 + E6_3 Y_6)}{(Y_4 + Y_5 + Y_6)}$$

где $E6_i$ – продольные ЭДС в проводах РВЛ; Y_i – проводимости проводов РВЛ, равные обратной сумме элементов i -й строки матрицы $Z6$:

$$\begin{aligned} Y_4 &:= (Z6_{1,1} + Z6_{1,2} + Z6_{1,3})^{-1} \\ Y_5 &:= (Z6_{2,1} + Z6_{2,2} + Z6_{2,3})^{-1} \end{aligned}$$

$$Y_6 := (Z6_{3,1} + Z6_{3,2} + Z6_{3,3})^{-1}$$

Численно Y_4, Y_5, Y_6 отличаются не более чем на 3% или одинаковы в пределах погрешности 10%. Следовательно формулу преобразования трехфазной схемы в однофазную можно представить в виде:

$$\begin{aligned} Z_e &= 43,653 \text{ Ом} \\ E_{ee} &= \frac{(E6_1 + E6_2 + E6_3)}{3} = -199,376 + 116,307i \\ |E_{ee}| &= 230,821 \text{ В} \end{aligned}$$

Эквивалентное сопротивление 100 км проводов РВЛ равно 43,65 Ом, эквивалентная ЭДС при длине параллельного следования ВВЛ и РВЛ 100 км и токе в ВВЛ 1000 А равна 280,8 281 В или 2,81 В/км.

Пример 2. Расчет наведенных токов на проводах ВЛ 500 кВ. Рассмотрение данного примера вызывается тем, что для ВЛ с горизонтальным фазных проводов наведенные продольные и емкостные токи сфазированы совершенно иначе, чем в ВЛ с вертикальным (одна фаза под дугой) расположением фазных проводов. В результате соотношение токов, стекающих в заземлители с отдельных фазных проводов, значительно отличается для ВЛ с горизонтальным расположением.

Две ВЛ 500 кВ имеют горизонтальное расположение фазных проводов. Расстояние между осями ВЛ равно 30 м. Провода РВЛ заземлены по концам на заземлители ПС с сопротивлением 0,5 Ом. Тросы заземлены, но имеют разрывы по длине ВЛ, поэтому продольный ток в них равен нулю.

Исходные данные и описание представлены, так же как и в приложении 1, для ВЛ 220 кВ. Алгоритм расчета наведенных продольных и емкостных токов точно такой же как и в Примере 1, поэтому матрицы расчета собственных и взаимных индуктивностей и потенциальных коэффициентов – не приводятся.

Блок исходных данных:

$$\begin{aligned} r_2 &:= 8,85 \text{ Ом} & \epsilon &:= 8,85 \times 10^{12} \text{ Ф/м} \\ r_3 &:= 10,0 \text{ Ом} & \mu_0 &:= 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м} \\ r_{33} &:= 0,5 \text{ Ом} & r &:= 100 \text{ Ом} & I &:= 1000 \text{ A} \\ f &:= 50 \text{ Гц} & l &:= 100 \times 10^3 \text{ м} \end{aligned}$$

Блок информации по геометрии ВЛ (X и H – координаты проводов, м; R – радиусы проводов, м; U – напряжение на проводах относительно земли, В; нумерация проводов сверху вниз):

$$X := \begin{pmatrix} 11 \\ 0 \\ 11 \\ 19 \\ 30 \\ 41 \\ 6,7 \\ 6,7 \\ 22,3 \\ 38,7 \end{pmatrix} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}} \quad H := \begin{pmatrix} 5 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 22 \\ 22 \\ 22 \\ 22 \end{pmatrix} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}} \quad R := \begin{pmatrix} 13 \\ 0,13 \\ 0,13 \\ 0,13 \\ 0,13 \\ 0,13 \\ 0,01 \\ 0,01 \\ 0,01 \\ 0,01 \end{pmatrix} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}} \quad U := \begin{pmatrix} 303 \times 10^3 \\ a303 \times 10^3 \\ a^2 303 \times 10^3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}}$$

Блок расчета собственных и взаимных индуктивностей:

$$k := 1, \dots, 10 \quad n := 1, \dots, 10$$

$$r_{k,n} := \sqrt{(X_k - X_n)^2 + (H_k - H_n)^2}$$

$$rh_{k,n} := \sqrt{(X_k - X_n)^2 + (H_k + H_n)^2}$$

$$\alpha = 503 \sqrt{\frac{r}{f}} \text{ м} \quad H_{об} := 1,3d \text{ м}$$

$$M10_{k,n} := \begin{cases} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{e H_{об}}{R_k} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} & \text{if } k = n \\ \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{e H_{об}}{r_{k,n}} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$XM10_{k,n} := 2\pi 50 M10_{k,n} \times \quad XM10_{1,1} = 55,73 \text{ Ом}$$

$$XM10_{1,2} = 27,845 \text{ Ом} \quad XM10_{1,3} = 23,49 \text{ Ом}$$

Матрица продольной ЭДС E3 и сопротивлений Z3 (без учета тросов):

$$E3 := \begin{pmatrix} \frac{\mu_0}{2\pi} j XM10_{1,4} + aj XM10_{2,4} + a^2 j XM10_{3,4} \\ \frac{\mu_0}{2\pi} j XM10_{1,5} + aj XM10_{2,5} + a^2 j XM10_{3,5} \\ \frac{\mu_0}{2\pi} j XM10_{1,6} + aj XM10_{2,6} + a^2 j XM10_{3,6} \end{pmatrix} \cdot 1000$$

$$|E3_1| = 7,305 \times 10^3 \text{ В} \quad |E3_2| = 4,209 \times 10^3 \text{ В} \quad |E3_3| = 3,001 \times 10^3 \text{ В}$$

Выводы. 1. Разработанная инженерная методика позволяет рассчитывать наведенные продольные и емкостные токи при любых способах заземления ремонтируемой ВЛ. Методика включает в себя как отдельный элемент расчеты емкостных токов и соответствующих наведенных напряжений.

Для ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов целесообразно заземление всех проводов в одной точке, а для ВЛ с горизонтальным расположением проводов – каждого провода отдельно.

На различных инженерных сооружениях, расположенных вблизи ВЛ, возможно появление наведенных токов и напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов М.И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия. – М.: Связьиздат, 1959, 583 с.

2. Костенко М.В. Расчет взаимного сопротивления в проводах линий электропередачи. – Электричество, 1955, № 10, с. 29–34.

3. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973, 272 с.

4. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренце А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330 – 500 кВ. – М.: Энергия, 1974, 472 с.

5. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011, 286 с.

6. СТО 56947007-29.240.55.018–2009. Методическое указание по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ (Стандарт организации). – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.

7. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. Утверждены приказом министерства труда и социальной защиты РФ 24 июля 2013 г. № 328н.

8. Чернов И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, Sim Power System и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008, 290 с.

9. Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Залесова О.В., Селиванов В.Н., Якубович М.В. Повышение безопасности работ на линиях под наведенным напряжением. – Труды КНЦ РАН. Энергетика. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010, 179 с.

10. Колечицкий Е.С., Харламова Ю.А. Расчет наведенных напряжений на проводах ВЛ высокого напряжения. – Электро, 2014, № 4, с. 34–39.

11. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. Л–М.: Энергоатомиздат, 2000, 290 с.

[29.04.15]

Авторы: Колечицкий Егор Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1957 г. В 1983 г. защитил докторскую диссертацию. Профессор кафедры инженерной экологии и охраны труда (ИЭ и ОТ) Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»).

Королев Илья Викторович окончил МЭИ в 1998 г. В 2011 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методов и средств, снижающих воздействие электрических полей промышленной частоты на человека» в МЭИ. Доцент кафедры ИЭ и ОТ НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 2, pp. 28–38.

The Electromagnetic Influence of Power Lines

KOLECHITSKII Yegor Sergeyevich (Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

KOROLEV Ilya Victorovich (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

A systematic approach to considering all aspects relating to calculation of induced voltages is outlined. The possibility of induced voltages to occur on various engineering structures located near an overhead power line (OPL) is analyzed. Two typical cases are considered taking a physical model as an example: the wires of two OPLs of the same voltage rating are suspended on a two-circuit tower, or two OPLs running at some distance from each other. By using the proposed engineering procedure it is possible to calculate the induced longitudinal and capacitive currents with any grounding arrangements of an OPL taken out for repair: either with grounding it at both ends or at only one point (or at two neighboring towers). The procedure includes, as a separate element, calculations of capacitive currents and the corresponding

induced voltages. The possibility of induced currents and voltages to occur on various engineering structures located near an OPL is shown. The use of the developed procedure is illustrated on typical examples in the form of computer programs in the MathCAD environment. It is shown that for an OPL with vertically arranged wires it is advisable to ground all its wires at one point, whereas in the case of an OPL with horizontally arranged wires, each of its conductors should be grounded individually. It is shown based on an analysis of the results that the predictions obtained for the longitudinal parameters of OPLs and for the induced longitudinal currents in OPLs with horizontally arranged wires coincide within the engineering accuracy limits.

Key words: *power lines, induced voltages, currents, calculation method*

REFERENCES

1. **Mikhailov M.I.** *Vlijaniye vneshnikh elektromagnitnykh polei na tsepi provodnoi svyazi i zashchitnye meropriyatiya* (The influence of external electromagnetic fields on the circuit wired). Moscow, Publ. «Svyaz'izdat», 1959, 583 p.
2. **Kostenko V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1955, No. 10, pp. 29–34.
3. **Kostenko M.V., Perel'man L.S., Shkarin Yu.P.** *Volnovye protsessy i elektricheskiye pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* (Wave processes and electric interference in multiwire high-voltage power lines). Moscow, Publ. «Energiya», 1973, 272 p.
4. **Mel'nikov N.A., Rokotyan S.S., Sherentsis A.N.** *Proyektirovaniye elektricheskoi chasti vozdukhnykh linii elektroperedach 330–500 kV* (Designing the electric part of 330–500 kV overhead power lines). Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 472 p.
5. **Yevdokunin G.A.** *Elektricheskiye sistemy i seti* (Electrical systems and networks). St. Petersburg, Publ. Polytechnic University, 2011, 286 p.
6. **STO 56947007-29.240.55.018–2009** (*Standart organizatsii. Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu navedennogo napryazheniya na otklyuchennykh vozdukhnykh liniyakh, nahodyashchikhsya vblizi*

deistvuyushchikh VL (Methodical Guidelines for Determining the Voltage Induced on Disconnected Overhead Lines Passing Near Operating Overhead Power Lines (an Enterprise Standard). Moscow, Publ. JSC «FSK EEC», 2009.

7. **Pravila po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok. Prikaz Ministerstva truda i sotsial'noi zashchity RF 24.07.1013 No. 328n.** (Labor protection rules in using electrical installations. Approved by Order of the RF Ministry for Labor and Social Protection No. 328n dated July 24, 2013).

8. **Chernov I.V.** *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab Sim Power System i Simulink* (Simulation of electrical devices in Matlab, Sim Power System and Simulink). Moscow, Publ. DMK Press; St. Petersburg, Publ. «Piter», 2008, 290 p.

9. **Danilin A.N., Yefimov B.V., Zalesova O.V., Selivanov V.N., Yakubovich M.V.** *Trudy Kol'skogo Nauchnogo Tsentra Rossiiskoi Akademii nauk* (Proc. of the Col'skii Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences). Apatity, 2010, 179 p.

10. **Kolechnitskii Ye.S., Kharlamova Yu.A.** *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2014, No. 4. pp. 34–39.

11. **Dolin P.A.** *Osnovy tekhniki besopasnosti v elektroustanovkakh* (Basics of safety in electrical installations). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 2000, 290 p.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать (желательно и на английском языке):

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.