

УДК 621.315.1:621.3.064.241

Особенности расчета наведенного напряжения на отключенной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи*

А.А. МЮЛЬБАЕР¹

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент кафедры ТЭВН. E-mail: mss_nstu@mail.ru

Разработана математическая модель воздушной линии электропередачи, находящейся под наведенным напряжением. Наведенное напряжение обусловлено электромагнитным полем близко расположенной линии электропередачи, находящейся в работе. Математическая модель позволяет определять значения наведенного напряжения на отключенных проводах воздушных линий электропередачи и значения ожидаемого напряжения прикосновения к опорам, на которые выполнено заземление отключенных проводов и грозозащитных тросов. Провода и грозозащитные тросы отключенной линии представлены звеньевой схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Влияние электрического и магнитного полей моделируется включением в схему эквивалентных поперечных и продольных ЭДС. Продольные ЭДС, обусловленные влиянием переменного магнитного поля, определяются через взаимную индуктивность проводов. Предложен алгоритм, позволяющий с помощью численного интегрирования определить взаимную индуктивность между парой проводов, расположенных над неоднородной землей, приведенной к горизонтально-слоистой структуре. Математическая модель учитывает наличие транспозиции проводов, влияющей и подверженной влиянию воздушных линий, режим заземления грозозащитных тросов, несимметрию и несинусоидальность влияющих токов и напряжений, изменение геометрии расположения проводов по длине воздушных линий, различные значения сопротивлений заземляющих устройств опор. В разработанной модели воздушную линию можно моделировать отдельными пролетами или укрупненными блоками, например, анкерными участками. Также возможно смоделировать любую схему заземления отключенных проводов и грозозащитных тросов в любых точках рассматриваемой воздушной линии электропередачи. Приведены примеры расчетов наведенных напряжений и ожидаемых напряжений прикосновения при выполнении работ на проводах отключенной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи. В примерах рассмотрены все схемы заземления проводов отключенной цепи, возникающие при выполнении работ, согласно требованиям Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок.

Ключевые слова: двухцепные воздушные линии электропередачи, наведенное напряжение, электробезопасность работ, проведение работ под наведенным напряжением, электрическое влияние, магнитное влияние, электромагнитное поле, расчет наведенного напряжения

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-146-160

* Статья получена 04 июля 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение электромонтажных работ на проводах отключенной цепи двухцепных и многоцепных линий электропередачи сопряжено с опасностью для здоровья и жизни обслуживающего персонала из-за угрозы поражения наведенным электрическим током. Определение наведенных токов и напряжений на проводах воздушных линий электропередачи (ВЛ) возможно двумя способами – практическим и расчетным. В данной статье остановимся только на расчетных методах определения наведенного напряжения. Федеральной сетевой компанией утверждены методические указания (МУ) по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ [1]. Данные МУ применимы только к одноцепным ВЛ и позволяют определить ожидаемое напряжение прикосновения в местах заземления проводов отключенной ВЛ без учета транспозиций, режима заземления грозозащитного троса и других факторов, существенных для значений наведенных напряжений и токов.

В периодической литературе представлено множество различных методов расчета наведенного напряжения на отключенных проводах ВЛ. Данные методы расчета можно разделить на группы по физическому представлению исследуемых объектов.

В работе [2], а также в МУ ФСК [1] подверженную влиянию ВЛ представляют однопроводной линией, которая замещается одно- или двухконтурной схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Данная расчетная схема подходит для простейших инженерных расчетов влияния магнитного и электрического полей ВЛ по отдельности (в МУ ФСК учитывается только влияние магнитного поля). В этих моделях имеется серьезный ряд ограничений. При электрическом влиянии можно определить индуцированное напряжение на незаземленной или заземленной в одной точке однопроводной линии небольшой длины. В этом случае однопроводная линия рассматривается в поперечном сечении. При магнитном влиянии можно рассчитать наведенное напряжение на однопроводной линии, заземленной в двух или трех точках. В данном случае однопроводная линия рассматривается в продольном направлении. Для обоих случаев влияющая ВЛ и подверженная влиянию линия должны следовать параллельно.

Определение наведенных токов и напряжений возможно также при моделировании влияющей и подверженной влиянию ВЛ схемой замещения с распределенными параметрами. В данном случае нахождение токов и напряжений будет осуществляться по уравнениям длинной линии [3, 4]. При изменениях геометрии опор, марки проводов и тросов, разделении двухцепных ВЛ в одноцепные и обратно и прочих изменениях исследуемую ВЛ необходимо разбить на однородные участки. Для этого на каждом участке провод и тросы заменяются подвешенными над землей бесконечно длинными проводниками, диаметры которых, расстояния между ними и высоты подвеса над землей принимаются равными соответствующим параметрам, используемым при расчетах. Далее расчет выполняется на основе многополюсников [5]. Данный метод позволяет учитывать как электрическое, так и магнитное влияния одновременно. При наличии большого числа неоднородных участков значительно усложняется расчет токов и напряжений в интересующих нас точках ВЛ.

В работах [6, 7] используется метод симметричных составляющих для определения магнитного влияния одной ВЛ на другую. Заземление в нескольких местах одной, двух или трех фаз на отключенной ВЛ рассматривают как соответствующие виды короткого замыкания, имеющего магнитную связь с действующей ВЛ. Наличие нескольких несимметрий приводит к резкому усложнению схемы замещения, что накладывает большие ограничения на возможные случаи применения метода симметричных составляющих.

Наиболее эффективным способом расчета электромагнитного влияния ВЛ являются алгоритмы, основанные на методе фазных координат. Использование фазных координат целесообразно при необходимости учета параметрической и режимной несимметрии. Основой метода фазных координат является естественное пофазное представление электрических схем. Метод фазных координат использовался в работах [8, 9]. Данный метод обладает огромными возможностями. Однако, при использовании метода фазных координат попутно придется решить «сетевую задачу» по определению установившегося режима и проверке соответствия найденных токов и напряжений во влияющей ВЛ с требуемыми. Это значительно усложняет расчет, и во многих случаях в этом нет необходимости.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель настоящей работы – создание математической модели на основе метода фазных координат для определения электромагнитного влияния работающей цепи на провода отключенной цепи двухцепной ВЛ без решения «сетевой задачи». Разработанная математическая модель должна учитывать реальное положение проводов и грозозащитных тросов (ГТ), режимы заземления отключенных проводов и ГТ, наличие транспозиции фазных проводов и скрещивание ГТ, различие сопротивления заземляющего устройства опор по длине ВЛ, несимметрию, несинусоидальность токов и напряжений, неоднородность геологического строения грунта по трассе ВЛ.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Отключенная цепь ВЛ находится в зоне влияния электромагнитного поля работающей цепи. Для определения индуцированных токов и напряжений на проводах отключенной цепи целесообразно электромагнитное поле рассматривать по составляющим – электрическое и магнитное поля (это возможно, так как расстояние между влияющими и подверженными влиянию проводами много меньше длины волны электромагнитного поля на промышленной частоте).

Переменное электрическое поле оказывает влияние в основном на изолированные от земли провода в непосредственной близости от источника поля. Появление напряжения обусловлено распределением зарядов между проводами рабочей и отключенной цепей. Наведенное напряжение зависит в основном от класса напряжения ВЛ, расстояния между проводами ВЛ, а также от режима работы (нормальный или аварийный).

Определить наведенное напряжение на одном из проводов отключенной цепи (провод I) при электрическом влиянии работающей цепи (провода A, B, C) можно используя схему замещения, представленную на рис. 1, a .

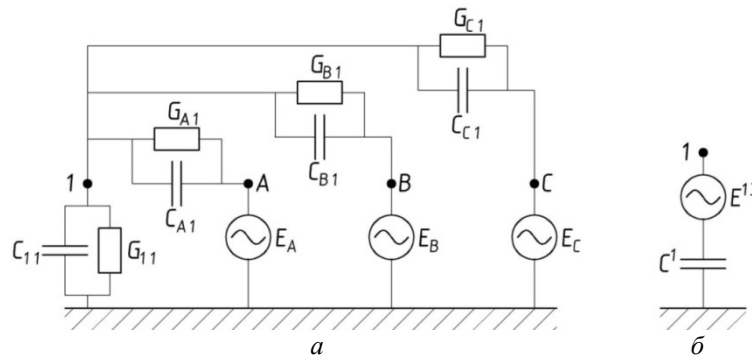


Рис. 1. Цепная схема замещения электрического влияния

На рис. 1, a E_A, E_B, E_C – фазные ЭДС, приложенные к проводам A, B, C ; C_{11} – собственная емкость провода I на землю, G_{11} – активная проводимость воздуха на участке провод I – земля, также может включать в себя проводимость по поверхности изолятора; C_{A1}, C_{B1}, C_{C1} и G_{A1}, G_{B1}, G_{C1} – емкости и активные проводимости воздуха между отключенным проводом I и проводами A, B, C .

При рассмотрении электрического влияния работающей цепи на отключенную цепь двухцепной ВЛ и тем более на цепь, расположенную на других опорах, активной проводимостью можно пренебречь из-за ее чрезвычайно малого значения по сравнению с реактивной составляющей. Собственные и взаимные емкости проводов определяются методом зеркальных отображений [10]. При определении емкостей также необходимо учитывать наличие заземленного ГТ, так как заземленный ГТ приводит к увеличению емкости между проводами и землей.

Для определения наведенного напряжения на проводе I расчетную схему на рис. 1, a необходимо привести к виду, приведенному на рис. 1, b . Эквивалентное напряжение влияющей цепи $E^{1Э}$ определяется по формуле (1). Эквивалентная емкость C^1 определяется как сумма всех емкостей:

$$\underline{E}^{1Э} = \frac{\underline{E}_A \cdot C_{A1} + \underline{E}_B \cdot C_{B1} + \underline{E}_C \cdot C_{C1}}{C_{11} + C_{A1} + C_{B1} + C_{C1}}, \text{ В.} \quad (1)$$

Представленная расчетная схема подходит только для определения наведенного напряжения в однородной системе, т. е. емкости проводов неизменны по длине ВЛ, отсутствуют кондуктивная связь между землей и проводами, транспозиции фазных проводов и скрещивание ГТ.

Переменное магнитное поле приводит к появлению ЭДС в расположенных в нем контурах согласно закону электромагнитной индукции. Изменяющийся магнитный поток возбуждает электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями. В замкнутом контуре наведенное поле проявляется как работа

сторонних сил, т. е. ЭДС. Наведенная ЭДС на фазный провод определяется как векторная сумма ЭДС от каждой влияющей фазы ВЛ в отдельности:

$$\underline{E}^{1M} = -j\underline{I}_A \cdot \omega M_{1A} - j\underline{I}_B \cdot \omega M_{1B} - j\underline{I}_C \cdot \omega M_{1C}, \text{ В/м}, \quad (2)$$

где $\underline{I}_A, \underline{I}_B$ – токи в соответствующих фазах ВЛ, А;

ω – круговая частота, рад/с;

M_{1A}, M_{1B} – взаимоиנדукция между проводами работающей цепи и проводами отключенной цепи, Гн/м.

Определение взаимной индуктивности между проводами ВЛ связано с большими трудностями ввиду того, что земля является средой с весьма неоднородной проводимостью. Последняя зависит от состава пород, находящихся в земле, их влажности и засоленности, а также от климатических условий. Эти факторы в значительной степени влияют на распространение тока в земле, что, в свою очередь, определяет значение взаимной индуктивности. С приемлемой погрешностью (0...+20 %) взаимную индуктивность можно определить по формуле М.В. Костенко [11] (3), что можно считать достаточным, если учесть точность исходных данных:

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \sqrt{\frac{a^2 + \left(h_\Phi + h_1 + \frac{800}{\sqrt{\sigma_3 f}} \right)^2}{a^2 + (h_\Phi - h_1)^2}}, \text{ Гн/м}, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость;

a – расстояние по горизонтали между проводами, м;

h_Φ – высота подвеса фазного провода, м;

h_1 – высота подвеса отключенного провода, м;

σ_3 – удельная проводимость грунта, См/м;

f – частота переменного тока, Гц.

Расчетная высота подвеса проводов определяется как минимальная высота провода над землей плюс одна треть стрелы провеса.

Формула (3) для определения взаимной индуктивности справедлива только при однородном строении земли. При сложной структуре земли результаты измерений совпадают с результатами расчета только в том случае, если эквивалентное удельное сопротивление неоднородной земли считать величиной переменной, зависящей в том или ином виде от частоты.

Значение взаимной индуктивности M между расположенными над поверхностью N -слойной земли влияющим и подверженному влиянию проводами описывается интегральным выражением (4) [12, 13]:

$$\underline{M} = \frac{\mu_0}{\pi} \int_0^\infty F(m) \cos(ym) dm, \text{ Гн/м}, \quad (4)$$

$$F(m) = \frac{1}{2m} \left(e^{-m|h_\Phi - h_1|} + \frac{m - \chi_1/R_N(m)}{m + \chi_1/R_N(m)} e^{-m(h_\Phi + h_1)} \right), \quad (5)$$

где y – кратчайшее расстояние между проводами, м;
 χ_i определяется по выражению

$$\chi_i = \sqrt{m^2 + k_i^2}, \text{ м}^{-1}, \quad (6)$$

k_i – волновое число i -го слоя N -слоистого геологического разреза:

$$k_i = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_i}, \text{ м}^{-1}, \quad (7)$$

σ_i – удельная проводимость i -го слоя, См/м;

R_N – формула Липской, отражает многослойный характер геологического разреза:

$$R_N(m) = \text{cth} \left(\chi_1 h_1 + \text{arcth} \left(\frac{\chi_1}{\chi_2} \text{cth} \left(\chi_2 h_2 + \dots + \text{arcth} \left(\frac{\chi_{N-1}}{\chi_n} \right) \right) \right) \right), \quad (8)$$

h_i – мощность i -го слоя, м.

В общем виде для многослойной среды расчеты по формуле (4) не получили практического применения. Основной причиной этого является сложный комплексный характер подынтегрального выражения, отличающегося медленной сходимостью и являющегося к тому же знакопеременной функцией. Попытки по созданию алгоритма для ЭВМ ранее были предприняты в СибНИИЭ [14]. Успешной попыткой численного интегрирования можно признать алгоритм, предложенный в работе [12]. Отправным пунктом тогда послужил способ приближенного интегрирования, примененный Л.Л. Ваньяном для расчета теоретических кривых вертикального электрического зондирования на постоянном токе [15].

Для расчета наведенного напряжения на отключенных проводах при совместном влиянии электрического и магнитного полей с учетом транспозиций фазных проводов, скрещивания ГТ, наличия заземления проводов ВЛ необходимо представить звеньевой схемой замещения на основе метода фазных координат (рис. 2). Для простоты звеньевая схема замещения на рис. 2 приведена для двухпроводной цепи, подверженной влиянию n -фазной ВЛ без ГТ. Рассматриваемые провода отключенной фазы разбиваются на однородные участки. Однородным участком может выступать пролет ВЛ или более длинный участок, объединяющий в себя несколько пролетов.

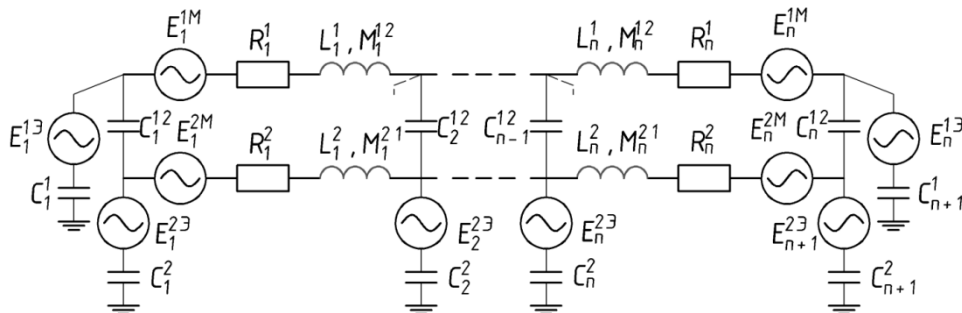


Рис. 2. Звеньевая схема замещения электромагнитного влияния работающей цепи на провода отключенной цепи

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

$\underline{E}_i^{kЭ}$ – эквивалентное напряжение влияющей цепи, приложенное к k -му проводу на i -м участке, обусловленное электрическим влиянием работающей цепи, В;

\underline{E}_i^{kM} – наведенная продольная ЭДС на k -й провод на i -м участке, обусловленная магнитным влиянием работающей цепи, В;

R_i^k, L_i^k – активное сопротивление, Ом, и индуктивность k -го провода, Гн, на i -м участке;

M_i^{kj} – взаимная индуктивность между k -м и j -м проводом на i -м участке (определяется по формуле (3) или (4), Гн;

C_i^{kj} – межфазная емкость между k -м и j -м проводом на i -м участке, Ф;

C_i^k – собственная эквивалентная емкость k -го провода на i -м участке, Ф.

Если на некотором участке i имеется заземление отключенного провода k , то эквивалентное напряжение влияющей цепи рассчитывается по формуле (9), а собственная эквивалентная емкость заменяется комплексной проводимостью (формула (10)).

$$\underline{E}_i^{kЭ} = \frac{\underline{E}_i^A \cdot j\omega C_i^{Ak} + \underline{E}_i^B \cdot j\omega C_i^{Bk} + \underline{E}_i^C \cdot j\omega C_i^{Ck}}{Y_i^k}, \text{ В}; \quad (9)$$

$$\underline{Y}_i^k = G_i^k + j\omega C_i^{Ak} + j\omega C_i^{Bk} + j\omega C_i^{Ck}, \text{ См}; \quad (10)$$

где G_i^k – активная проводимость заземления k -го провода на i -м участке, См.

Расчет наведенных токов и напряжений по схеме замещения, представленной на рис. 2, целесообразно выполнить, используя теорию графов, методом узловых напряжений (формула (11)), так как для данной конфигурации схемы число независимых контуров N всегда больше числа узлов схемы q [16].

$$U_0(q, 1) = -(A \cdot Y \cdot A')^{-1} A(Y \cdot E). \quad (11)$$

В формуле 11 приняты следующие обозначения:

$A(q, p)$ – матрица узловых соединений схемы;

$Y(p, p)$ – матрица проводимостей ветвей схемы;

$E(p, 1)$ – матрица ЭДС ветвей схемы.

Матрица ЭДС ветвей схемы $E(p, 1)$ формируется путем размещения соответствующей ЭДС ветви в соответствующей строчке матрицы. За положительное направление ЭДС принято направление от узла с меньшим номером к большему.

Матрицу проводимости ветвей схемы $Y(p, p)$ получают путем обращения матрицы сопротивлений $Z(p, p)$. В матрице $Z(p, p)$ на главной диагона-

ли расположены собственные сопротивления соответствующих ветвей. Взаимные сопротивления k и i ветвей расположены соответственно на местах (i, k) и (k, i) . Матрица $Y(p, p)$ симметрична относительно главной диагонали.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

На основе разработанной математической модели определим значения наведенных напряжений на проводах отключенной ВЛ и ожидаемых напряжений прикосновения к опорам, на которые заземлены отключенные провода.

Объектом исследования выбрана двухцепная ВЛ 220 кВ. Первая цепь в работе (провода 1, 2, 3), вторая цепь выведена в ремонт (провода 4, 5, 6). Длина ВЛ 180 км, число опор 680, преобладающий тип опор 2П220-2-5,0. Марка провода АС-240/32, марка ГТ С90, ГТ заземлен в одной точке каждого анкерного участка и электрически не связан с тросом соседнего анкерного участка. На ВЛ выполнен полный цикл транспозиции (60 км и 120 км). Сопротивление заземления опор, на которые выполнено заземление переносного заземлителя (ПЗ), принято равным 10 Ом, сопротивление заземляющих устройств подстанций – 0,5 Ом. По трассе ВЛ грунт имеет следующую электрическую структуру: верхний слой – мощность 1,5 м, удельное сопротивление 250 Ом·м; средний слой – мощность 520 м, удельное сопротивление 1500 Ом·м; нижний слой – удельное сопротивление 300 Ом·м.

Напряжение фазных проводов влияющей цепи при расчетах принимались равным $1,1 \cdot U_{\text{НОМ}} / \sqrt{3}$. Токи по фазам влияющей цепи принимались равными максимальному рабочему – 300 А. Угол сдвига между током и напряжением влияющей цепи может быть разным. В зависимости от угла сдвига наведенное напряжение на незаземленных проводах отключенной цепи меняется в пределах 10 %. В расчетах был принят угол $\varphi = 37^\circ$, что соответствует $\cos(\varphi) = 0,8$.

При выполнении работ на отключенной цепи двухцепной ВЛ значения наведенных напряжений и ожидаемых напряжений прикосновения изменяются в зависимости от схемы заземления отключенных проводов. Рассмотрим эти схемы в порядке их возникновения.

Одна из цепей двухцепной ВЛ выводится в ремонт. После отключения линейных выключателей на подстанциях ПС1 и ПС2 провода отключенной цепи изолированы от земли (рис. 3, а).

Далее согласно требованиям [17] выполняется заземление проводов отключенной цепи заземляющими ножами линейных разъединителей на подстанциях ПС1 и ПС 2 (рис. 3, б).

Затем на месте производства работ осуществляется поочередное заземление отключенных проводов, начиная с нижнего (рис. 4, а).

Также правилами [17] в особых случаях допускается последующее разземление проводов отключенной цепи на подстанциях, в этом случае провода будут заземлены только на месте производства работ (рис. 4, б).

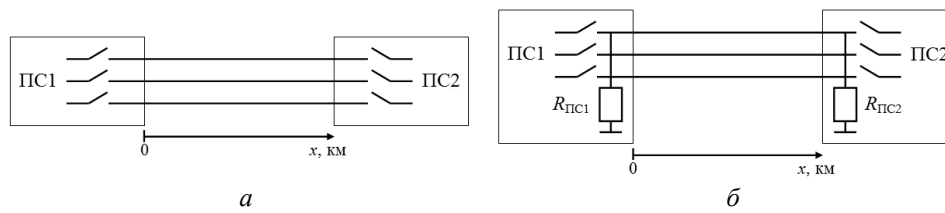


Рис. 3. Схема заземления проводов отключенной цепи двухцепной ВЛ при определении значений наведенного напряжения:

a – провода отключенной цепи не заземлены; *б* – провода отключенной цепи заземлены стационарными заземлителями на подстанциях

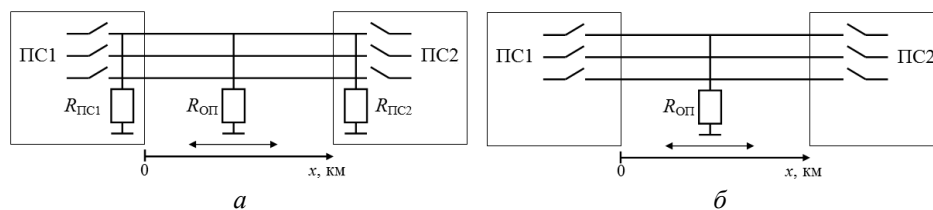


Рис. 4. Схема заземления проводов отключенной цепи двухцепной ВЛ при определении значений ожидаемого напряжения прикосновения:

a – провода отключенной цепи заземлены стационарными заземлителями на подстанциях и на месте проведения работ; *б* – провода отключенной цепи заземлены только на месте проведения работ

Распределение напряжения по длине проводов, разземленных с обеих сторон, приведено на рис. 5. В данном случае основное влияние оказывает электрическое поле. Наличие заземленного ГТ и транспозиций приводит к существенному снижению значений наведенного напряжения на верхнем проводе с 14 кВ до 4 кВ.

Заземление проводов отключенной цепи на подстанциях стационарными заземлителями приводит к значительному снижению наведенного напряжения. Напряжения на проводах в этом случае снизилось с 4 кВ до 0,45 кВ. Это можно увидеть из рис. 6. В случае заземления проводов отключенной цепи основной вклад уже вносит напряжение, наведенное магнитным полем. Однако с увеличением длины ВЛ абсолютное значение емкостной составляющей напряжения будет увеличиваться из-за увеличения проводимости между проводами отключенной и работающей цепей.

По Правилам [17], для обеспечения безопасного проведения работ отключенные провода необходимо заземлять, кроме подстанций, еще на месте производства работ. Стеkanie индуцированных токов через заземление на месте производства приводит к возможности попадания персонала под напряжение прикосновения. Индуцированные токи, стекающие через заземление, в основном обусловлены магнитным полем рабочей цепи. Так как напряжение прикосновения зависит от множества факторов, таких как удельное сопротивление грунта, сопротивление основания, тип заземлителя, то в нашем случае разумно определять ожидаемое напряжение прикосновения. Значения ожидаемого напряжения прикосновения изменяются в зависимости от места заземления проводов отключенной цепи (см. рис. 7). Наибольшие значения ожидаемого напряжения на транспонированной ВЛ будут при установке ПЗ на транспози-

ционных опорах (кривые *a*, *b*, *в*), на ВЛ без транспозиции, при установке ПЗ рядом с подстанциями (кривая *г*). Также на значение ожидаемого напряжения прикосновения влияет число проводов, заземленных на месте проведения работ. При заземлении одного из проводов (кривая *a*) напряжение прикосновения будет наибольшим. Последующее заземление еще одного из проводов приводит к снижению напряжения прикосновения (кривая *b*), наименьшее же напряжение будет при заземлении всех трех проводов (кривая *в*). Объясняется это тем, что токи, индуцированные в проводах отключенной цепи, отличаются по фазе; соответственно, при соединении проводов токи частично компенсируются и, как следствие, уменьшается ток, стекающий в землю через ПЗ.

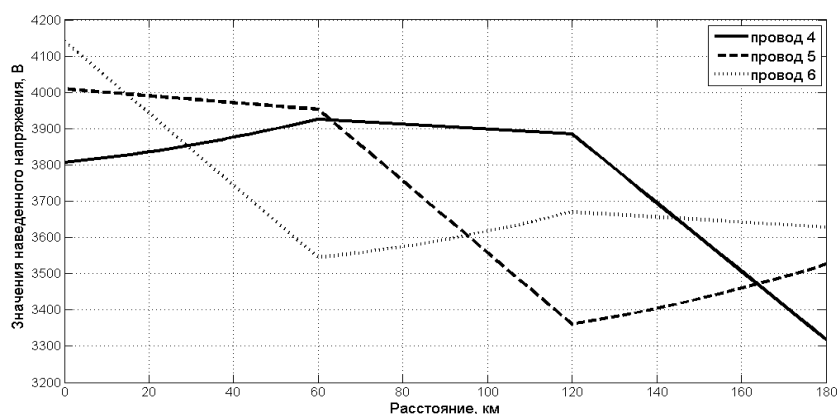


Рис. 5. Распределение по длине ВЛ значений напряжения, наведенного электромагнитным полем, на проводах отключенной и незаземленной цепи

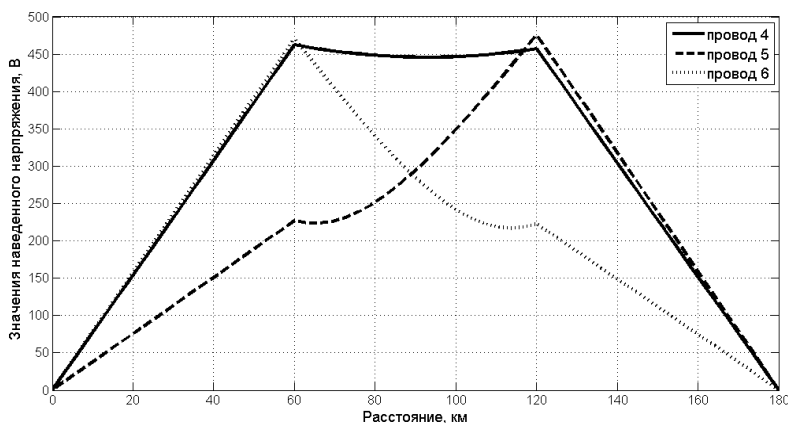


Рис. 6. Распределение по длине ВЛ значений напряжения, наведенного электромагнитным полем, на проводах отключенной и заземленной на подстанциях цепи

Заземление отключенных проводов в трех точках не всегда позволяет добиться снижения ожидаемого напряжения прикосновения до безопасного уровня. В этом случае Правилами [17] допускается разземлить отключенные провода на подстанциях, оставив заземление только на месте выполнения работ.

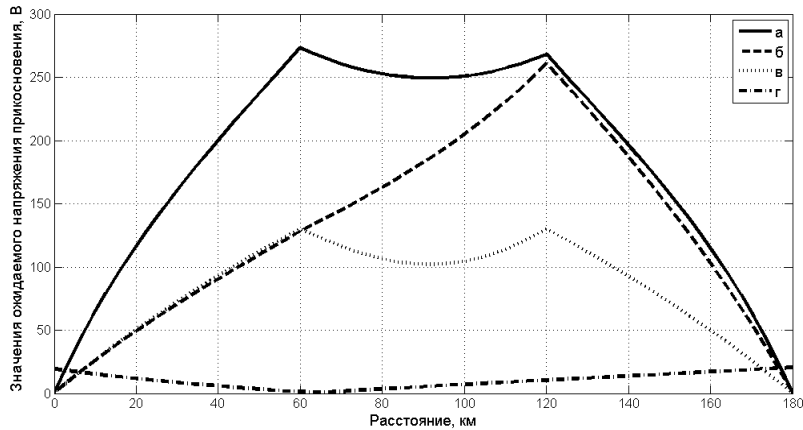


Рис. 7. Изменение значений ожидаемого напряжения прикосновения при перемещении места установки ПЗ по длине отключенных и заземленных на подстанциях проводов (кривые *а*, *б*, *в* – транспонированная ВЛ; кривая *г* – ВЛ без транспозиции, ПЗ установлено на все отключенные провода)

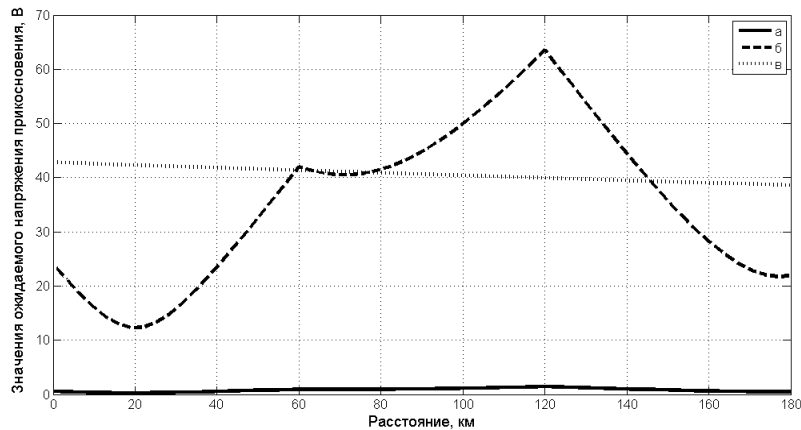


Рис. 8. Изменение значений ожидаемого напряжения прикосновения при перемещении места установки ПЗ по длине отключенных и незаземленных на подстанциях проводов (кривая *а* – транспонированная ВЛ, сопротивление заземления ПЗ 10 Ом; кривая *б* – транспонированная ВЛ, сопротивление заземления ПЗ 500 Ом; кривая *в* – ВЛ без транспозиций, сопротивление заземления ПЗ 500 Ом)

При такой схеме заземления напряжение прикосновения в основном определяется токами смещения, вызванными электрическим полем рабочей цепи и стекающими через ПЗ. Однако такая схема заземления сильно критикуется, так как, например, при сбивании ПЗ персонал может оказаться под наведенным напряжением (см. рис. 5). В рассматриваемом примере наибольшее значение ожидаемого напряжения прикосновения составит не более 2 В (см. рис. 8, кривая *а*). Значительное увеличение значений ожидаемого напряжения прикосновения будет в том случае, если ПЗ заземлить не на опору с относительно малым сопротивлением заземления, а на одиночный электрод. На рис. 8 кривая *б*

рассчитана при сопротивлении заземлителя 500 Ом. Наибольшее напряжение прикосновения возникает при установке ПЗ рядом с транспозиционными опорами. На линии без транспозиций ожидаемое напряжение прикосновения увеличится по сравнению с транспонированной ВЛ (рис. 8 кривая *в*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенность расчета наведенных напряжений на проводах отключенной цепи двухцепной ВЛ заключается в том, что необходимо учитывать влияние магнитного и электрического полей как при определении значений наведенного напряжения на проводах, так и при определении ожидаемого напряжения прикосновения к опоре.

Обязательным является учет транспозиций и режима заземления ГТ, так как эти факторы оказывают значительное влияние на значения наведенного напряжения и напряжения прикосновения. Обратим внимание, что в единственном документе, регламентирующем способ расчета в данный момент, не учитываются ни наличие ГТ, ни наличие транспозиций на линии.

Ожидаемое напряжение прикосновения к опоре, на которую выполнено заземление отключенных проводов, будет наибольшим при заземлении только одного провода, наименьшим при заземлении всех трех проводов. Данная закономерность характерна для двухцепных ВЛ, у одноцепных ВЛ, расположенных на значительном расстоянии друг от друга, зависимость обратная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО ОАО «ФСК ЕС» 56947007-29.240.55.018–2009. Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ. – М.: ФСК ЕС, 2009. – 35 с. – (Стандарт организации).
2. Gouda O.E., El Dein A.Z., El-Gabalawy M.A.H. Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipe-lines // Electric Power Systems Research. – 2013. – N 103. – P. 129–136.
3. РД-17.220.00-КТН-034-08. Методика определения воздействия ВЛ-110 кВ и выше на коррозию нефтепровода и мероприятия по защите трубопровода. – М., 2008. – 76 с. – (Руководящий документ).
4. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Связь, 1979. – 264 с.
5. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
6. A simulator for calculating normal induced voltage on communication line / J.-Y. Heo, H.-C. Seo, S.-J. Lee, Y.S. Kim, C.-H. Kim // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 9, iss. 4. – P. 1394–1400.
7. Якубович М.В. Исследование наведенных напряжений на отключенных воздушных линиях, находящихся в зоне влияния разветвленной высоковольтной сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.12. – Апатиты, 2007. – 135 с.
8. Influence of neighboring transmission lines on the measurement transmission line UVN options at the operating frequency / S. Wang, W. Hu, G. Zou, Z. Wu, S. Li, Z. Sun // Dianwang Jishu. – 2014. – Vol. 38, N 5. – P. 1162–1168.
9. О безопасности производства работ на ВЛ, находящихся под наведенным напряжением / А.Н. Висящев, С.А. Клепиков, А.В. Щербаков, Б.Н. Каратаев // Энергетик. – 2010. – № 2. – С. 18–22.

10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник. – 10-е изд., стер. – М.: Гардарики, 2013. – 317 с.
11. Костенко М.В. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. – 1955. – № 10. – С. 29–34.
12. Труды СибНИИЭ. Вып. 33 / под ред. Ю.В. Целебровского, Э.П. Каскевича. – М.: Энергия, 1976. – 120 с.
13. Гасаненко Л.Б. Импеданс поля низкочастотного прямолинейного тока, приподнятого над горизонтально слоистой землей // Электромагнитное зондирование и магнитотеллурические методы разведки. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1968. – С. 47–58.
14. Костиков В.У., Пучков Г.Г. Алгоритм и программа расчета на ЭЦВМ коэффициента взаимной индукции провод – диполь на поверхности горизонтально-слоистой земли // Влияние внешних электромагнитных полей на линии связи. Эксплуатационные показатели связи. – Омск, 1973. – С. 18–24. – (Научные труды / Омский институт инженеров железнодорожного транспорта; т. 149).
15. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. – М.: Недра, 1965. – 109 с.
16. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1 / К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2014. – 463 с.
17. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. – М.: Омега-Л, 2014. – 139 с.

Мюльбаер Александр Александрович, аспирант, ассистент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электромагнитная совместимость воздушных линий электропередачи переменного тока. E-mail: mss_nstu@mail.ru

Specificity of induced voltage calculation in the disconnected circuit of a double-circuit overhead electric power transmission line*

*A.A. MYUL'BAER*¹

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, assistant lecture, Department of High Voltage Engineering and Electrophysics. E-mail: mss_nstu@mail.ru*

A mathematical model of an overhead electric power transmission line under induced voltage has been developed. The voltage is induced by an electromagnetic field of a closely located working power line. The mathematical model allows finding values of the induced voltage on wires of disconnected overhead electric power transmission lines and expected voltage values of touching towers on which disconnected wires and protective earth wires are grounded. The wires and protective earth wires of the disconnected line are represented by a sectional equivalent circuit with lumped parameters. The interference of electric and magnetic fields is represented by equivalent transverse and longitudinal EMFs. Longitudinal EMFs, which are caused by an alternating magnetic field, are determined via mutual inductance of wires. An algorithm allowing by means of numerical integration to find inductance between two wires located over the heterogeneous soil presented as a horizontally layered structure is proposed. The mathematical model takes into account the presence of transposition of affecting and affected lines, the grounding mode of protective earth wires, asymmetry and unsinusoidality of inducing currents and voltages, the location geometry changing with the length of lines, different resistance values of the grounding arrangement of towers. In the developed model a power line

* *Received 04 July 2016.*

can be modeled by spans or larger blocks like anchor sections. It is also possible to model any scheme of grounding of disconnected wires and protective earth wires at any points of an overhead power transmission line in question. Some examples of induced voltage calculations and possible touch voltages during the execution of work on wires of a disconnected circuit of a two-circuit overhead electric power transmission line are given. These examples cover all grounding schemes of disconnected circuit wires, which occur in work execution accordingly to the Rules of labor protection in the operation of electrical installations.

Keywords: Double-circuit overhead power transmission lines, induced voltage, operation electrical safety, carrying out work under the induced voltage, electric interference, magnetic interference, electromagnetic field, calculation of induced voltage

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-146-160

REFERENCES

1. *STO OAO "FSK ES" 56947007-29.240.55.018–2009. Metodicheskie ukazaniya po opredele-niyu navedennogo napryazheniya na otklyuchennykh vozduzhnykh liniyakh, nakhodyashchikhsya vblizi deistvuyushchikh VL* [Standart organizatsii Federal Grid Company STO 56947007-29.240.55.018–2009. Guidelines for determination of the induced voltage of disconnected overhead lines near existing overhead line]. Moscow, FSK ES Publ., 2009. 35 p.
2. Gouda O.E., El Dein A.Z., El-Gabalawy M.A.H. Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipe-lines. *Electric Power Systems Research*, 2013, no. 103, pp. 129–136.
3. *RD-17.220.00-KTN-034-08. Metodika opredeleniya vozdeistviya VL-110 kV i vyshe na kor-roziyu nefteprovoda i meropriyatiya po zashchite truboprovoda* [Guidance Document RD-17.220.00-KTN-034-08. Methods of determining the impact overhead line 110 kV and above on the corrosion of the pipeline and measures to protect the pipeline]. Moscow, 2008. 76 p.
4. Mikhailov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. *Elektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi* [Electromagnetic impact on communication facilities]. Moscow, Svyaz' Publ., 1979. 264 p.
5. Kostenko M.V., Perel'man L.S., Shkarin Yu.P. *Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* [Wave processes and electrical disturbances in multiwire high voltage lines]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 272 p.
6. Heo J.-Y., Seo H.-C., Lee S.-J., Kim Y.S., Kim C.-H. A simulator for calculating normal induced voltage on communication line. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2014, vol. 9, iss. 4, pp. 1394–1400.
7. Yakubovich M.V. *Issledovanie navedennykh napryazhenii na otklyuchennykh vozduzhnykh liniyakh, nakhodyashchikhsya v zone vliyaniya razvetvlennoi vysokovol'tnoi seti*. Diss. kand. tekhn. nauk [The study of induced voltages on the disconnected overhead lines, located in zone of influence of the branched out high-voltage network. Dr. eng. sci. diss.]. Apatity, 2007. 135 p.
8. Wang S., Hu W., Zou G., Wu Z., Li S., Sun Z. Influence of neighboring transmission lines on the measurement transmission line UVN options at the operating frequency. *Dianwang Jishu*, 2014, vol. 38, no. 5, pp. 1162–1168.
9. Visyashchev A.N., Klepikov S.A., Shcherbakov A.V., Karataev B.N. O bezopasnosti pro-izvodstva rabot na VL, nakhodyashchikhsya pod navedennym napryazheniem [About safety of works execution on overhead lines under induced voltage]. *Energetik*, 2010, no. 2, pp. 18–22.
10. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical bases of electrical engineering. Electromagnetic field]. Moscow, Gardariki Publ., 2013. 317 p.
11. Kostenko M.V. Vzaimnye soprotivleniya mezhdu vozduzhnymi liniyami s uchetom pov-erkhnostnogo effekta v zemle [The mutual resistance between overhead lines considering skin effect in the ground]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 1955, no. 10, pp. 29–34. (In Russian)
12. Tselebrovskii Yu.V., Kaskevich E.P. *Trudy SibNIIIE. Vyp. 33* [Proceedings SibNIIIE. Iss. 33]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 120 p.

13. Gasanenko L.B. Impedans polya nizkochastotnogo pryamolineinogo toka, pripodnyatogo nad gorizonta'no sloistoi zemlei [The impedance of the field of low-frequency current of rectilinear, elevated above a horizontally layered earth]. *Elektromagnitnoe zondirovanie i magnetotelluricheskie metody razvedki* [An electromagnetic sounding and magnetotelluric survey methods]. Leningrad, LSU Publ., 1968, pp. 47–58.

14. Kostikov V.U., Puchkov G.G. Algoritm i programma rascheta na ETsVM koeffitsienta vzaimoinduktсии provod – dipol' na poverkhnosti gorizonta'no-sloistoi zemli [The algorithm and program for computer for calculating the coefficient of mutual induction wire – dipole on the surface of a horizontally layered earth]. *Vliyanie vneshnikh elektromagnitnykh polei na linii svyazi. Eksploatatsionnye pokazateli svyazi* [The influence of external electromagnetic fields on the communication lines. Performance indicators of communication]. Omsk, 1973, pp. 18–24.

15. Van'yan L.L. *Osnovy elektromagnitnykh zondirovanii* [Fundamentals of electromagnetic soundings]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 109 p.

16. Demirchan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. V 3 t. T. 1 [Theoretical bases of electrical engineering. In 3 vol. Vol. 1]. St. Petersburg, Piter Publ., 2014. 463 p.

17. *Pravila po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok* [Rules for labor protection in the operation of electrical installations]. Moscow, Omega-L Publ., 2014. 139 p.