

Оценка выноса потенциалов с заземлителей подстанций при определении наведенного напряжения на отключенной воздушной линии электропередачи

ГОРШКОВ А. В.

Показано, что в нормальном режиме работы энергосистемы на отключенной и заземленной воздушной линии помимо индуктивной и емкостной составляющих может возникнуть кондуктивная составляющая наведенного напряжения, обусловленная выносом потенциалов с заземлителей подстанций, на которые заземлена отключенная линия. Установлено, что в нормальном режиме значение кондуктивной составляющей может многократно превысить предельно допустимое значение для наведенного напряжения. Для определения в некоторой точке отключенной линии максимально возможного значения наведенного напряжения, в том числе и его кондуктивной составляющей, предложен эмпирический метод, основанный на натурных измерениях наведенного напряжения. Сущность метода заключается в построении эмпирической формулы для функции наведенного напряжения при решении обратной задачи и последующем определении максимально возможного значения наведенного напряжения путем решения прямой задачи. В итоге разработана методика определения максимально возможного значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной линии с учетом его кондуктивной составляющей.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, наведенное напряжение, вынос потенциалов, заземлитель подстанции, измерение наведенного напряжения, методика измерения, влияющая линия электропередачи

Наведенное напряжение на отключенной воздушной линии электропередачи (ВЛ) принято рассматривать как суперпозицию двух составляющих:

индуктивной (электромагнитной) u_M , обусловленной токами, протекающими по фазным проводникам влияющих ВЛ;

емкостной (электростатической) u_E , обусловленной зарядами (напряжениями) фазных проводников влияющих ВЛ.

Согласно «Правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок»¹ при проведении ремонтных работ на отключенной ВЛ она подлежит заземлению на обоих концах (иногда – на одном) путем непосредственного присоединения ее фазных проводников к заземлителям подстанций. В этом случае возможен третий механизм возникновения наведенного напряжения на отключенной и заземленной ВЛ – вынос потенциалов с заземлителей подстанций в нормальном (неаварийном) режиме их работы. Следует пояснить, что в данной статье термин «наведенное напряжение» понимается не буквально, а в широком смысле, т.е. как напряжение, возникающее на отключенной ВЛ по любым причинам, за исключением ошибочных действий персонала. Такой подход к решению за-

дачи наведенного напряжения является обоснованным, так как позволяет достичь ее основной цели – обеспечить электробезопасность при проведении работ на отключенной ВЛ.

Таким образом, в нормальном режиме на отключенной и заземленной ВЛ помимо индуктивной и емкостной составляющих возникает кондуктивная составляющая наведенного напряжения, обусловленная выносом потенциалов с заземлителей подстанций, на которые заземлена отключенная ВЛ (необходимо отметить, что при заземлении ВЛ емкостная составляющая хотя и уменьшается во много раз, но не достигает нуля). Следовательно, в общем случае наведенное напряжение определяется как суперпозиция трех составляющих:

$$u = u_M + u_E + u_V. \quad (1)$$

Причиной возникновения в нормальном режиме кондуктивной составляющей u_V являются напряжения U_1 и U_2 на заземлителях подстанций, на которые заземлена отключенная ВЛ. В свою очередь, причиной возникновения в нормальном режиме напряжений U_1 и U_2 являются токи, постоянно стекающие с заземлителей подстанций в результате несимметрии нагрузок отходящих от подстанций ВЛ сетей с заземленной нейтралью [1, 2]. При этом согласно [1] значения стекающих в грунт

¹ Приказ Минтруда России от 19.02.2016, № 74н.

в нормальном режиме токов несимметрии могут достигать нескольких сотен ампер. Учитывая, что значения сопротивлений заземлителей подстанций составляют, как правило, десятые доли Ом, токи несимметрии могут создавать на заземлителях подстанций напряжения U_1 и U_2 в десятки и сотни вольт.

Для отключенной ВЛ длиной l , удовлетворяющей условию

$$\gamma_{(0)}l < 1, \quad (2)$$

где $\gamma_{(0)}$ – модуль коэффициента распространения электромагнитной волны по нулевому волновому каналу многопроводной ВЛ, оценить верхнее значение кондуктивной составляющей u_V наведенного напряжения в некоторой рассматриваемой точке ВЛ можно следующим образом:

$$u_V = U_1 \frac{l-l_0}{l} + U_2 \frac{l_0}{l}, \quad (3)$$

где l_0 – расстояние от начала ВЛ до рассматриваемой точки.

Из (3) следует, что в нормальном режиме при значениях U_1 и U_2 в десятки и сотни вольт кондуктивная составляющая также может достигать таких значений и, следовательно, превысить предельно допустимое для наведенного напряжения значение 25 В. Очевидно, кондуктивная составляющая значением в сотни вольт может вносить наибольший вклад в результирующее наведенное напряжение. Следовательно, ее неучет при расчетах наведенного напряжения может привести к существенному занижению его расчетного значения по сравнению с истинным.

Более того, «Правила по охране труда» предписывают эксплуатирующим организациям определять ВЛ, находящиеся под наведенным напряжением, не расчетом, а путем выполнения измерений наведенного напряжения с последующим пересчетом измеренных значений на наибольшие рабочие токи влияющих ВЛ. Очевидно, целью пересчета измеренного в некоторой точке отключенной ВЛ значения наведенного напряжения является определение максимально возможного в этой же точке ВЛ значения U_m . Это значение наведенное напряжение может иметь вследствие возникновения наиболее опасной комбинации токов влияющих ВЛ (далее понятия «максимально возможное значение» и «максимальное значение» являются равнозначными).

Однако для достоверного пересчета именно на наибольшие рабочие токи влияющих ВЛ необходимо знать, какой вклад в результирующее наведенное напряжение вносит индуктивная составляющая u_M . Следовательно, для определения максималь-

ного значения U_m наведенного напряжения необходимо знать соотношения всех его составляющих и пересчитывать на наиболее опасные условия измеренные значения каждой составляющей в отдельности. Отсюда возникает потребность в некотором эмпирическом, т.е. основанном на натуральных измерениях, методе определения максимального значения U_m наведенного напряжения, позволяющем учесть все его составляющие, в том числе и кондуктивную.

В [3] предложен и обоснован эмпирический метод определения максимального значения U_m наведенного напряжения, имеющего только индуктивную составляющую u_M . В данной статье этот метод обобщен для случая, когда наведенное напряжение помимо индуктивной составляющей имеет и кондуктивную составляющую u_V , обусловленную выносом потенциалов с заземлителей подстанций в нормальном режиме их работы.

Сущность эмпирического метода определения значения U_m . Принимаем, что токи и напряжения в отключенной и влияющих ВЛ являются синусоидальными функциями времени промышленной частоты. Тогда их можно рассматривать как комплексные величины и применять к ним соответствующий математический аппарат (далее комплексные величины и матрицы обозначаются точкой сверху). Следует отметить, что данный эмпирический метод применим и для высших гармоник наведенного напряжения, частота которых не превышает некоторого предельного значения.

Сущность данного эмпирического метода определения максимального значения U_m наведенного напряжения заключается в трех основных операциях.

На первом этапе в рассматриваемой точке отключенной ВЛ в течение некоторого сравнительно длительного интервала времени, например в течение суток, проводится серия синхронных измерений комплексных значений наведенного напряжения, комплексных значений $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_i \dots$ фазных токов влияющих ВЛ, комплексных значений напряжений \dot{V}_1, \dot{V}_2 и токов \dot{J}_1, \dot{J}_2 на концах отключенной ВЛ.

На втором этапе в результате решения обратной задачи вычисляются значения коэффициентов при всех аргументах $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_i, \dots, \dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{J}_1, \dot{J}_2$ функции наведенного напряжения \dot{u} , что позволяет построить эмпирическую формулу для функции \dot{u} в рассматриваемой точке отключенной ВЛ.

На третьем этапе в результате решения прямой задачи определяется максимальное значение U_m напряжения, возникающего в рассматриваемой

точке ВЛ, путем вычисления максимума эмпирической функции \dot{u} .

Эмпирический метод имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами (подробнее см. [3]).

Общий вид эмпирической формулы функции \dot{u} .

Под эмпирической формулой функции \dot{u} будем понимать аналитическое выражение, в котором постоянные величины – коэффициенты при аргументах функции считаются априори неизвестными и определяются по результатам измерений значений функции и ее аргументов.

Далее все ВЛ, которые во включенном состоянии индуцируют на отключенной ВЛ отличное от нуля напряжение, будем называть действующими ВЛ. Все действующие ВЛ, учитываемые на практике для определения индуктивной составляющей наведенного напряжения, будем называть влияющими ВЛ.

Рассмотрим нормальный (неаварийный) режим работы действующих ВЛ, фазные токи которых в общем случае несимметричны. При этом считаем, что распределенные параметры и нагрузки всех ВЛ являются линейными элементами, в результате чего токи и напряжения всех ВЛ являются синусоидальными функциями времени промышленной частоты.

Принимаем, что отключенная ВЛ удовлетворяет условию (2) и заземлена с обоих концов на заземлители подстанций. В этом случае емкостной составляющей \dot{u}_E наведенного напряжения можно пренебречь, следовательно, наведенное напряжение определяется как суперпозиция только индуктивной и кондуктивной составляющих:

$$\dot{u} = \dot{u}_M + \dot{u}_V. \tag{4}$$

В [3] показано, что индуктивную составляющую наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ можно выразить линейной функцией

$$\dot{u}_M = \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1_i} \dot{z}_{1_i} + \dot{I}_{2_i} \dot{z}_{2_i} + 3\dot{I}_{0_i} \dot{z}_{0_i}), \tag{5}$$

где n – число действующих ВЛ; $\dot{I}_{1_i}, \dot{I}_{2_i}, \dot{I}_{0_i}$ – аргументы функции \dot{u}_M – комплексные токи прямой, обратной и нулевой последовательности действующих ВЛ; $\dot{z}_{1_i}, \dot{z}_{2_i}, \dot{z}_{0_i}$ – априори неизвестные коэффициенты функции \dot{u}_M – комплексные взаимные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й действующей ВЛ [3–5]:

$$\dot{z}_{1_i} = \dot{z}_{A_i} + \dot{z}_{B_i} \dot{a}^2 + \dot{z}_{C_i} \dot{a}; \tag{6}$$

$$\dot{z}_{2_i} = \dot{z}_{A_i} + \dot{z}_{B_i} \dot{a} + \dot{z}_{C_i} \dot{a}^2; \tag{7}$$

$$\dot{z}_{0_i} = \frac{\dot{z}_{A_i} + \dot{z}_{B_i} + \dot{z}_{C_i}}{3}, \tag{8}$$

где $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ – комплексные взаимные сопротивления между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и фазными проводами i -й действующей ВЛ; $\dot{a} = e^{j2\pi/3}$ – комплексный оператор поворота (j – мнимая единица).

Для того чтобы найти выражение для функции кондуктивной составляющей наведенного напряжения рассмотрим приведенную на рис. 1 схему замещения отключенной и заземленной трехфазной ВЛ. На ней отключенная трехфазная ВЛ моделируется многопроводной длинной линией с распределенными параметрами, которая условно показана пассивным четырехполюсником. Собственные заземлители подстанций, на которые непосредственно заземлена отключенная ВЛ, моделируются сопротивлениями \dot{z}_1 и \dot{z}_2 . Отходящие от каждой подстанции ЛЭП с заземленными нейтральными моделируются эквивалентными сопротивлениями \dot{z}_{W1} и \dot{z}_{W2} . Фазные напряжения всех отходящих от подстанций ЛЭП с заземленной нейтралью моделируются эквивалентными ЭДС \dot{E}_{W1} и \dot{E}_{W2} . Принимаем, что в общем случае в результате несимметрии нагрузок ЛЭП ЭДС \dot{E}_{W1} и \dot{E}_{W2} отличны от нуля:

$$\dot{E}_{W1} \neq 0 \wedge \dot{E}_{W2} \neq 0, \tag{9}$$

в результате на заземлителях подстанций возникают напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

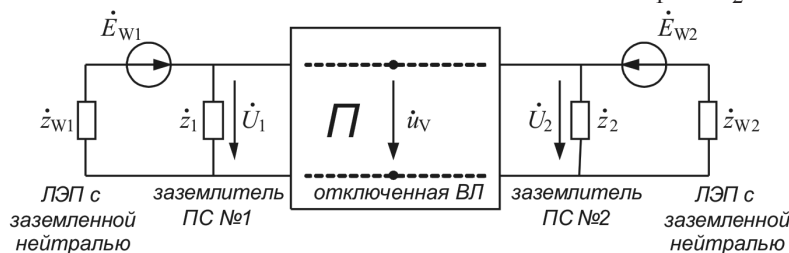


Рис. 1. Схема замещения отключенной и заземленной ВЛ для определения кондуктивной составляющей наведенного напряжения расчетным путем

Рассмотрим общий случай, когда отключенная ВЛ является неоднородной длинной линией. Согласно теории телеграфных уравнений в этом случае кондуктивную составляющую наведенного напряжения в некоторой точке любого провода отключенной ВЛ можно выразить линейной функцией

$$\dot{i}_V = \dot{U}_1 \dot{C}_1 + \dot{U}_2 \dot{C}_2, \quad (10)$$

где \dot{U}_1, \dot{U}_2 – аргументы функции \dot{i}_V – комплексные напряжения на заземлителях подстанций на концах отключенной и заземленной ВЛ; \dot{C}_1, \dot{C}_2 – некоторые априори неизвестные комплексные коэффициенты.

Однако в качестве эмпирической формулы для функции \dot{i}_V выражение (10) непригодно, так как для определения неизвестных коэффициентов \dot{C}_1 и \dot{C}_2 необходимо при измерениях наведенного напряжения также изменять напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 (которые создаются только эквивалентными ЭДС \dot{E}_{W3} и \dot{E}_{W2}), что в общем случае невозможно. Причиной невозможности прямых измерений напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 являются помехи, создаваемые ЭДС, индуцированными на проводах отключенной ВЛ токами действующих ВЛ. При заземлении отключенной ВЛ индуцированные ЭДС создают в ее проводах (наряду с индуктивной составляющей \dot{i}_M) индукционные токи, в результате чего на заземлителях подстанций возникают напряжения \dot{V}_1 и \dot{V}_2 , отличные от напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 . Схема замещения для этого случая приведена на рис. 2, отключенная ВЛ показана уже не пассивным, а активным четырехполюсником, а индуцированные на ней ЭДС условно показаны как \dot{E}_{M1} и \dot{E}_{M2} .

Заменим в функции \dot{i}_V (10) аргументы \dot{U}_1 и \dot{U}_2 другими аргументами, значения которых можно определить прямыми измерениями. Для этого учтем, что напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 в силу линейности распределенных параметров отключенной ВЛ и

всех сопротивлений на ее концах (рис. 1) являются линейными функциями ЭДС \dot{E}_{W1} и \dot{E}_{W2} :

$$\dot{U}_1 = \dot{A}_{11} \dot{E}_{W1} + \dot{A}_{12} \dot{E}_{W2}, \quad (11)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{A}_{21} \dot{E}_{W1} + \dot{A}_{22} \dot{E}_{W2}, \quad (12)$$

где \dot{A}_{ij} – некоторые комплексные коэффициенты.

При этом граничные условия на концах отключенной ВЛ при наличии на ней индуцированных ЭДС (рис. 2) имеют вид:

$$\dot{E}_{W1} = \left(1 + \frac{\dot{z}_{W1}}{\dot{z}_1}\right) \dot{V}_1 + \dot{z}_{W1} \dot{J}_1; \quad (13)$$

$$\dot{E}_{W2} = \left(1 + \frac{\dot{z}_{W2}}{\dot{z}_2}\right) \dot{V}_2 + \dot{z}_{W2} \dot{J}_2, \quad (14)$$

где $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{J}_1, \dot{J}_2$ – напряжения и токи на концах отключенной ВЛ при наличии на ней индуцированных ЭДС.

Тогда из (10)–(14) следует, что кондуктивная составляющая наведенного напряжения является линейной функцией комплексных напряжений \dot{V}_1, \dot{V}_2 и токов \dot{J}_1, \dot{J}_2 на концах отключенной ВЛ:

$$\dot{i}_V = \dot{V}_1 \dot{\alpha}_1 + \dot{V}_2 \dot{\alpha}_2 + \dot{J}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{J}_2 \dot{\beta}_2, \quad (15)$$

где $\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2$ – некоторые комплексные коэффициенты.

Допустим, что значения коэффициентов $\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2$ известны, например, в результате расчетов. Тогда из (15) следует, что для определения кондуктивной составляющей \dot{i}_V наведенного напряжения при наличии индуцированных ЭДС достаточно провести прямые измерения напряжений \dot{V}_1, \dot{V}_2 и токов \dot{J}_1, \dot{J}_2 на концах отключенной ВЛ. При этом токи \dot{J}_1 и \dot{J}_2 в общем случае следует определять как суммы измеренных на концах отключенной ВЛ комплексных токов во всех ее заземленных фазных проводниках и молниезащитных тросах:

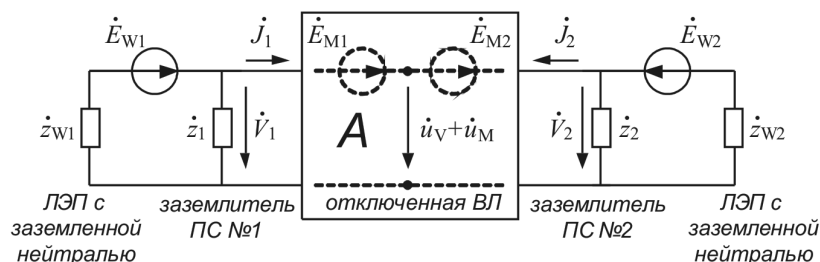


Рис. 2. Схема замещения отключенной и заземленной ВЛ для определения кондуктивной составляющей наведенного напряжения путем измерений

$$\dot{J}_1 = \dot{J}_{1A} + \dot{J}_{1B} + \dot{J}_{1C} + \dot{J}_{1T}; \quad (16)$$

$$\dot{J}_2 = \dot{J}_{2A} + \dot{J}_{2B} + \dot{J}_{2C} + \dot{J}_{2T}. \quad (17)$$

Подставляя (5) и (15) в (4), получаем эмпирическую формулу для функции наведенного напряжения в общем виде:

$$\begin{aligned} \dot{u} = & \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1i} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2i} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0i} \dot{z}_{0i}) + \\ & + \dot{V}_1 \dot{\alpha}_1 + \dot{V}_2 \dot{\alpha}_2 + \dot{J}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{J}_2 \dot{\beta}_2. \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, возникающее на отключенной и заземленной ВЛ напряжение можно выразить линейной функцией \dot{u} , аргументами которой являются комплексные токи симметричных составляющих \dot{I}_{1i} , \dot{I}_{2i} , \dot{I}_{0i} действующих ВЛ, а также комплексные напряжения \dot{V}_1 , \dot{V}_2 и токи \dot{J}_1 , \dot{J}_2 на концах отключенной ВЛ. При этом коэффициентами линейной функции являются априори неизвестные величины – комплексные взаимные сопротивления \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} и комплексные коэффициенты $\dot{\alpha}_1$, $\dot{\alpha}_2$, $\dot{\beta}_1$, $\dot{\beta}_2$.

Теоретические основы эмпирического метода. В [4] показано, что максимальное значение U_{Mm} модуля индуктивной составляющей \dot{u}_M наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ определяется как сумма максимально возможных значений модулей составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности индуцированных напряжений от всех влияющих ВЛ:

$$U_{Mm} = \sum_{i=1}^N (I_{1m_i} z_{1i} + I_{2m_i} z_{2i} + 3I_{0m_i} z_{0i}), \quad (19)$$

где N – число влияющих ВЛ; I_{1m_i} , I_{2m_i} , I_{0m_i} – максимально возможные значения модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательности в i -й влияющей ВЛ в нормальном режиме ее работы; z_{1i} , z_{2i} , z_{0i} – модули взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} .

Аналогично можно показать, что максимальное значение U_m модуля результирующего наведенного напряжения определяется как сумма максимально возможных значений U_{Mm} и U_{Vm} модулей его индуктивной и кондуктивной составляющих:

$$\begin{aligned} U_m = U_{Mm} + U_{Vm} = & \sum_{i=1}^N (I_{1m_i} z_{1i} + I_{2m_i} z_{2i} + 3I_{0m_i} z_{0i}) + \\ & + U_{Vm}. \end{aligned} \quad (20)$$

Принимаем, что значения токов I_{1m_i} , I_{2m_i} , I_{0m_i} известны, например, в результате статистиче-

ской обработки данных, предоставленных диспетчерскими службами организаций-владельцев ВЛ. Также принимаем, что известно и максимально возможное значение U_{Vm} кондуктивной составляющей наведенного напряжения (далее будет приведен способ определения U_{Vm}). Тогда неизвестными в (20) являются $3N$ величины – модули взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} , которые определим в результате решения обратной задачи. Для этого проведем серию из M измерений (в общем случае $M \neq 3N$) комплексных значений \dot{u}_k наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ:

$$\dot{u}_k = u_{x_k} + j u_{y_k}, \quad (21)$$

где u_{x_k} , $j u_{y_k}$ – вещественная и мнимая части \dot{u}_k ; j – мнимая единица.

При этом синхронно с измерениями значений \dot{u}_k наведенного напряжения будем измерять комплексные значения \dot{I}_{1ki} , \dot{I}_{2ki} , \dot{I}_{0ki} токов прямой, обратной и нулевой последовательности в действующих ВЛ и комплексные значения \dot{V}_1 , \dot{V}_2 , \dot{J}_1 , \dot{J}_2 напряжений и токов на концах отключенной ВЛ. Тогда согласно (18) получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для определения неизвестных комплексных взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1ki} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2ki} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0ki} \dot{z}_{0i}) + \dot{V}_1 \dot{\alpha}_1 + \dot{V}_2 \dot{\alpha}_2 + \\ + \dot{J}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{J}_2 \dot{\beta}_2 = \dot{u}_1; \\ \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1ki} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2ki} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0ki} \dot{z}_{0i}) + \dot{V}_1 \dot{\alpha}_1 + \dot{V}_2 \dot{\alpha}_2 + \\ + \dot{J}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{J}_2 \dot{\beta}_2 = \dot{u}_k; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1Mi} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2Mi} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0Mi} \dot{z}_{0i}) + \dot{V}_1 \dot{\alpha}_1 + \\ \dot{V}_2 \dot{\alpha}_2 + \dot{J}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{J}_2 \dot{\beta}_2 = \dot{u}_M, \end{aligned}$$

которую можно представить в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{I}} \dot{\mathbf{z}} + \dot{\mathbf{v}}_1 \dot{\alpha}_1 + \dot{\mathbf{v}}_2 \dot{\alpha}_2 + \dot{\mathbf{i}}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{\mathbf{i}}_2 \dot{\beta}_2 = \dot{\mathbf{u}}, \quad (23)$$

где $\dot{\mathbf{I}}$ – матрица размером $M \times 3n$ измеренных комплексных значений \dot{I}_{1ki} , \dot{I}_{2ki} , $3\dot{I}_{0ki}$ токов симметричных составляющих действующих ВЛ в моменты измерений значений \dot{u}_k наведенного напряжения; $\dot{\mathbf{z}} = (\dot{z}_{11}, \dot{z}_{21}, \dot{z}_{01}, \dots, \dot{z}_{1n}, \dot{z}_{2n}, \dot{z}_{0n})^T$ – вектор разме-

ром $3n$ неизвестных комплексных взаимных сопротивлений $\dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_0$; $v_1 = (\dot{V}_1, \dots, \dot{V}_k, \dots, \dot{V}_M)^T$ и $v_2 = (\dot{V}_1, \dots, \dot{V}_k, \dots, \dot{V}_M)^T$ – векторы размером M измеренных комплексных значений напряжений на концах отключенной ВЛ; $i_1 = (\dot{J}_1, \dots, \dot{J}_k, \dots, \dot{J}_M)^T$; $i_2 = (\dot{J}_1, \dots, \dot{J}_k, \dots, \dot{J}_M)^T$ – векторы размером M измеренных комплексных значений токов на концах отключенной ВЛ; $\dot{u}_1 = (\dot{u}_1, \dots, \dot{u}_k, \dots, \dot{u}_M)^T$ – вектор размером M измеренных комплексных значений наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ.

Обратная задача определения взаимных сопротивлений $\dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_0$ путем решения СЛАУ (23) относится к классу некорректных задач вследствие недообусловленности или переобусловленности СЛАУ (23) и наличия погрешностей задания элементов матрицы \dot{I} и векторов $\dot{v}_1, \dot{v}_2, i_1, i_2, \dot{u}$. Если решение некорректной задачи, полученное классическими методами его поиска, существует и единственно, то, как правило, оно неустойчиво и, следовательно, непригодно для применения.

Однако для решения некорректных задач разработаны специальные методы регуляризации [6–11], основанные на использовании дополнительной априорной информации, например значений погрешностей задания матрицы левой части и вектора правой части СЛАУ. На основе этих методов разработаны регуляризирующие алгоритмы, позволяющие на практике найти устойчивые ненулевые решения СЛАУ. В статье регуляризирующие алгоритмы рассматривать не будем, ограничимся только формированием СЛАУ для решения обратной задачи эмпирического метода. При этом будем считать, что решение сформированной СЛАУ будет получено некоторым методом регуляризации.

Для практического применения разработаны регуляризирующие алгоритмы только для вещественных СЛАУ. По этой причине вместо комплексной СЛАУ (23) будем рассматривать вещественную СЛАУ, полученную путем разделения действительной и мнимой частей СЛАУ (23). Для формирования этой системы уравнений представим СЛАУ (23) в следующем виде, используя алгебраическую форму записи матриц с комплексными элементами:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{I}_x + j\mathbf{I}_y)(z_x + jz_y) + (v_{1x} + jv_{1y})(\alpha_{1x} + j\alpha_{1y}) + \\ & + (v_{2x} + jv_{2y})(\alpha_{2x} + j\alpha_{2y}) + (i_{1x} + ji_{1y})(\beta_{1x} + j\beta_{1y}) + \\ & + (i_{2x} + ji_{2y})(\beta_{2x} + j\beta_{2y}) = u_x + ju_y. \end{aligned} \quad (24)$$

Разделяя в (24) действительную и мнимую части, получаем систему из двух вещественных СЛАУ:

$$\begin{aligned} & \mathbf{I}_x z_x - \mathbf{I}_y z_y + v_{1x} \alpha_{1x} - v_{1y} \alpha_{1y} + v_{2x} \alpha_{2x} - \\ & - v_{2y} \alpha_{2y} + i_{1x} \beta_{1x} - i_{1y} \beta_{1y} + i_{2x} \beta_{2x} - i_{2y} \beta_{2y} = u_x; \\ & \mathbf{I}_y z_x - \mathbf{I}_x z_y + v_{1y} \alpha_{1x} - v_{1x} \alpha_{1y} + v_{2y} \alpha_{2x} + \\ & + v_{2x} \alpha_{2y} + i_{1y} \beta_{1x} + i_{1x} \beta_{1y} + i_{2y} \beta_{2x} + i_{2x} \beta_{2y} = u_y, \end{aligned} \quad (25)$$

которую можно представить в компактной матричной форме:

$$\mathbf{I}' z' = u', \quad (26)$$

где \mathbf{I}' – расширенная матрица размером $2M \times (6n+8)$, элементами которой являются матрицы и векторы вещественных и мнимых частей – матрицы токов \dot{I} действующих ВЛ и векторов $\dot{v}_1, \dot{v}_2, i_1, i_2$ напряжений и токов в начале и конце отключенной ВЛ:

$$\mathbf{I}' = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_x & -\mathbf{I}_y & v_{1x} & -v_{1y} & v_{2x} & -v_{2y} & i_{1x} & -i_{1y} & i_{2x} & -i_{2y} \\ \mathbf{I}_y & \mathbf{I}_x & v_{1y} & v_{1x} & v_{2y} & v_{2x} & i_{1y} & i_{1x} & i_{2y} & i_{2x} \end{pmatrix}; \quad (27)$$

z' – расширенный вектор неизвестных величин размером $6n+8$, элементами которого являются векторы вещественных и мнимых частей вектора взаимных сопротивлений \dot{z} и вещественные и мнимые части коэффициентов $\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \beta_1, \beta_2$:

$$z' = (z_x \ z_y \ \alpha_{1x} \ \alpha_{1y} \ \alpha_{2x} \ \alpha_{2y} \ \beta_{1x} \ \beta_{1y} \ \beta_{2x} \ \beta_{2y})^T; \quad (28)$$

u' – расширенный вектор размером $2M$, элементами которого являются векторы вещественных и мнимых частей вектора \dot{u} измеренных комплексных значений наведенного напряжения:

$$u' = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Допустим, что в результате регуляризации получено устойчивое ненулевое решение z' СЛАУ (26). Тогда модули z_1, z_2, z_0 взаимных сопротивлений $\dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_0$ определяются по выражениям:

$$z_{1i} = \sqrt{z_{1x_i}^2 + z_{1y_i}^2}; \quad (30)$$

$$z_{2i} = \sqrt{z_{2x_i}^2 + z_{2y_i}^2}; \quad (31)$$

$$z_{0i} = \sqrt{z_{0x_i}^2 + z_{0y_i}^2}. \quad (32)$$

Таким образом, для определения модулей взаимных сопротивлений z_1, z_2, z_0 вместо обратной задачи (23) достаточно решить обратную задачу (26).

Однако для практического использования СЛАУ (26) непригодна, так как для ее формирова-

ния необходимо в моменты измерений наведенного напряжения знать значения токов всех действующих ВЛ, число n которых крайне велико. В то же время очевидно, что для достоверного определения максимального значения U_m наведенного напряжения учитывать влияние всех действующих ВЛ нет необходимости. Достаточно ограничиться только некоторыми обоснованно выбранными ВЛ числом N

$$N \ll n, \quad (33)$$

которые следует считать влияющими ВЛ, а влиянием остальных ВЛ можно пренебречь. Именно по этим соображениям в (19) учтено влияние только N ВЛ, рассматриваемых в качестве влияющих ВЛ, а не всех n действующих ВЛ.

Допустим, что все ВЛ, рассматриваемые в качестве влияющих, известны и их число равно N . Тогда для практического использования вместо точной СЛАУ (26), учитывающей все действующие ВЛ, будем рассматривать следующую приближенную СЛАУ, учитывающую только влияющие ВЛ:

$$\mathbf{I}'_h \mathbf{z}'_N = \mathbf{u}', \quad (34)$$

где \mathbf{I}'_h – матрица размером $2M \times (6N+8)$, элементами которой являются приближенные, т.е. измеренные с некоторой точностью, вещественные и мнимые части токов влияющих ВЛ и векторов $\dot{v}_1, \dot{v}_2, \dot{i}_1, \dot{i}_2$; \mathbf{z}'_N – вектор неизвестных величин размером $6N+8$, элементами которого являются вещественные и мнимые части взаимных сопротивлений $\dot{z}_{1_i}, \dot{z}_{2_i}, \dot{z}_{0_i}$ и коэффициентов $\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2$; \mathbf{u}' – тот же вектор, что и в СЛАУ (26).

Строгое обоснование перехода от СЛАУ (26) к СЛАУ (34) приведено в [3].

Допустим, что в результате регуляризации получено устойчивое ненулевое решение \mathbf{z}'_N СЛАУ (34). Тогда модули $z_{1_i}, z_{2_i}, z_{0_i}$ взаимных сопротивлений $\dot{z}_{1_i}, \dot{z}_{2_i}, \dot{z}_{0_i}$ определяются по (30)–(32).

Система уравнений при приближенном измерении напряжений \dot{V}_1 и \dot{V}_2 . Напряжения \dot{V}_1 и \dot{V}_2 представляют собой потенциалы заземлителей подстанций относительно нулевого потенциала на поверхности земли. Измерение их для подстанций, заземлители которых занимают большую площадь, на практике довольно затруднительно, так как в этом случае зона условного нулевого потенциала может располагаться на расстоянии до нескольких километров от подстанций.

Для устранения этой трудности будем вместо напряжений \dot{V}_1 и \dot{V}_2 измерять потенциалы \dot{V}_1^* и \dot{V}_2^* относительно некоторых опорных точек на поверхности земли, расположенных вблизи заземлителей

подстанций. В этом случае расстояние от заземлителя подстанции до соответствующей опорной точки должно быть таким, чтобы чувствительность средства измерения позволяла регистрировать изменение значений \dot{V}_1^* и \dot{V}_2^* в процессе измерений наведенных напряжений. Данный способ позволяет существенно уменьшить длину измерительных проводов и при этом достоверно определить неизвестные модули взаимных сопротивлений $z_{1_i}, z_{2_i}, z_{0_i}$ в результате решения обратной задачи.

Можно показать, что напряжения \dot{V}_1^* и \dot{V}_2^* линейно зависят от напряжений \dot{V}_1 и \dot{V}_2 :

$$\dot{V}_1^* = k_{11} \dot{V}_1 + k_{12} \dot{V}_2; \quad (35)$$

$$\dot{V}_2^* = k_{21} \dot{V}_1 + k_{22} \dot{V}_2, \quad (36)$$

где k_{ij} – некоторые комплексные коэффициенты.

Тогда выражение (15) для кондуктивной составляющей наведенного напряжения запишем в виде:

$$\dot{u}_V = \dot{V}_1^* \alpha_1^* + \dot{V}_2^* \alpha_2^* + \dot{J}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{J}_2 \dot{\beta}_2, \quad (37)$$

где $\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2$ – некоторые комплексные коэффициенты.

В результате эмпирическая формула (18) для функции наведенного напряжения принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{u} = & \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1_i} \dot{z}_{1_i} + \dot{I}_{2_i} \dot{z}_{2_i} + 3\dot{I}_{0_i} \dot{z}_{0_i}) + \\ & + \dot{V}_1^* \alpha_1^* + \dot{V}_2^* \alpha_2^* + \dot{J}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{J}_2 \dot{\beta}_2, \end{aligned} \quad (38)$$

где n – число всех действующих ВЛ.

Тогда для определения неизвестных взаимных сопротивлений $\dot{z}_{1_i}, \dot{z}_{2_i}, \dot{z}_{0_i}$ необходимо решить следующую СЛАУ:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1_{li}} \dot{z}_{1_i} + \dot{I}_{2_{li}} \dot{z}_{2_i} + 3\dot{I}_{0_{li}} \dot{z}_{0_i}) + \\ & + \dot{V}_1^* \alpha_1^* + \dot{V}_2^* \alpha_2^* + \dot{J}_{1_l} \dot{\beta}_1 + \dot{J}_{2_l} \dot{\beta}_2 = \dot{u}_l; \\ & \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1_{ki}} \dot{z}_{1_i} + \dot{I}_{2_{ki}} \dot{z}_{2_i} + 3\dot{I}_{0_{ki}} \dot{z}_{0_i}) + \\ & + \dot{V}_1^* \alpha_1^* + \dot{V}_2^* \alpha_2^* + \dot{J}_{1_k} \dot{\beta}_1 + \dot{J}_{2_k} \dot{\beta}_2 = \dot{u}_k; \\ & \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1_{Mi}} \dot{z}_{1_i} + \dot{I}_{2_{Mi}} \dot{z}_{2_i} + 3\dot{I}_{0_{Mi}} \dot{z}_{0_i}) + \\ & + \dot{V}_1^* \alpha_1^* + \dot{V}_2^* \alpha_2^* + \dot{J}_{1_M} \dot{\beta}_1 + \dot{J}_{2_M} \dot{\beta}_2 = \dot{u}_M, \end{aligned} \quad (39)$$

которую можно представить в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{I}}\mathbf{z} + \dot{v}_1^* \dot{\alpha}_1^* + \dot{v}_2^* \dot{\alpha}_2^* + \dot{\mathbf{i}}_1 \dot{\beta}_1 + \dot{\mathbf{i}}_2 \dot{\beta}_2 = \dot{\mathbf{u}}. \quad (40)$$

Выполняя те же преобразования, что и для СЛАУ (23), приходим к следующей вещественной СЛАУ:

$$\mathbf{I}^* \mathbf{z}^* = \mathbf{u}', \quad (41)$$

где \mathbf{I}^* – расширенная матрица размером $2M \times (6n+8)$:

$$\mathbf{I}^* = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_x & -\mathbf{I}_y & v_{1x}^* & -v_{1y}^* & v_{2x}^* & -v_{2y}^* & \mathbf{i}_{1x} & -\mathbf{i}_{1y} & \mathbf{i}_{2x} & -\mathbf{i}_{2y} \\ \mathbf{I}_y & \mathbf{I}_x & v_{1y}^* & v_{1x}^* & v_{2y}^* & v_{2x}^* & \mathbf{i}_{1y} & \mathbf{i}_{1x} & \mathbf{i}_{2y} & \mathbf{i}_{2x} \end{pmatrix}, \quad (42)$$

\mathbf{z}^* – расширенный вектор неизвестных величин размером $6n \times 8$:

$$\mathbf{z}^* = (\mathbf{z}_x \mathbf{z}_y \alpha_{1x}^* \alpha_{1y}^* \alpha_{2x}^* \alpha_{2y}^* \beta_{1x} \beta_{1y} \beta_{2x} \beta_{2y})^T; \quad (43)$$

\mathbf{u}' – тот же вектор, что и в СЛАУ (26).

Допустим, что все ВЛ, рассматриваемые в качестве влияющих, известны и их число равно N . Тогда для практического использования вместо СЛАУ (41), учитывающей все действующие ВЛ, будем рассматривать приближенную СЛАУ, учитывающую только влияющие ВЛ:

$$\mathbf{I}_h^* \mathbf{z}_N^* = \mathbf{u}', \quad (44)$$

где \mathbf{I}_h^* – матрица размером $2M \times (6N+8)$, элементами которой являются приближенные, т.е. измеренные с некоторой точностью, вещественные и мнимые части токов влияющих ВЛ и векторов \dot{v}_1^* , \dot{v}_2^* , $\dot{\mathbf{i}}_1$, $\dot{\mathbf{i}}_2$; \mathbf{z}_N^* – вектор неизвестных величин размером $6N+8$, элементами которого являются вещественные и мнимые части взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} и коэффициентов $\dot{\alpha}_1^*$, $\dot{\alpha}_2^*$, $\dot{\beta}_1$, $\dot{\beta}_2$; \mathbf{u}' – тот же вектор, что и в СЛАУ (26).

Сформированная СЛАУ (44) является уже окончательным представлением обратной задачи данного эмпирического метода с учетом кондуктивной составляющей наведенного напряжения.

Допустим, что в результате регуляризации получено устойчивое ненулевое решение \mathbf{z}_N^* СЛАУ (44), тогда модули взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} определяются по (30)–(32). При этом максимальное значение U_{Mm} модуля индуктивной составляющей наведенного напряжения определится по (19).

Оценить максимальное значение U_{Vm} модуля кондуктивной составляющей наведенного напряжения можно по уравнению:

$$U_{Vm} = U_{1m} \frac{l-l_0}{l} + U_{2m} \frac{l_0}{l}, \quad (45)$$

где U_{1m} , U_{2m} – максимально возможные значения напряжений на заземлителях подстанций в нормальном режиме:

$$U_{km} = z_k \sum_{i=1}^{N_k} 3I_{0mi}, \quad k=1,2, \quad (46)$$

где z_k – модуль сопротивления собственного заземлителя подстанции на k -м конце отключенной ВЛ; $3I_{0mi}$ – максимально возможные в нормальном режиме значения модулей токов нулевой последовательности в i -й ЛЭП с заземленной нейтралью, отходящей от подстанции на k -м конце отключенной ВЛ; N_k – число ЛЭП с заземленной нейтралью, отходящих от подстанции на k -м конце отключенной ВЛ, за исключением отключенной ВЛ.

В итоге максимальное значение U_m модуля результирующего наведенного напряжения определится как сумма максимальных значений U_{Mm} и U_{Vm} модулей его индуктивной и кондуктивной составляющих (см. (20)).

Следует отметить, что для определения значения по выражению (20) необходимы только значения модулей взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} . При этом определенные в результате регуляризации СЛАУ (44) коэффициенты $\dot{\alpha}_1^*$, $\dot{\alpha}_2^*$, $\dot{\beta}_1$, $\dot{\beta}_2$ для определения значения U_m не используются.

Необходимо особо отметить, что для достоверного определения эмпирическим методом значения U_m требуется помимо обратной и прямой задач решить вспомогательную задачу: обоснованно выбрать в качестве влияющих ВЛ только некоторую часть из всего множества действующих ВЛ.

Решение вспомогательной задачи определения числа N влияющих ВЛ. Зона влияния на рассматриваемую точку отключенной ВЛ [3, 5] является прилегающая со всех сторон к отключенной ВЛ территория таких размеров, при которой все ВЛ, расположенные за ее границами, суммарно наводят в рассматриваемой точке напряжение не более некоторого значения ΔU , пренебрежимо малого по сравнению с некоторым базовым значением U_F . Согласно [3] для данного эмпирического метода в качестве базового значения U_F принимается среднеквадратичное значение u_σ модулей измеренных комплексных значений \dot{u}_k наведенного напряжения.

Для однозначной определенности принимаем, что зона влияния представляет собой геометрическое место точек, расположенных на расстоянии не более S_U от отключенной ВЛ (рис. 3).

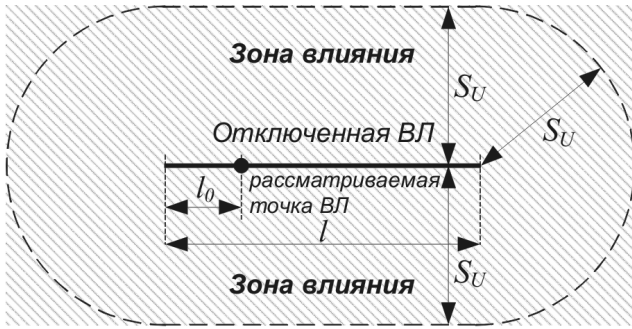


Рис. 3. Зона влияния на рассматриваемую точку прямолинейной ВЛ

Все ВЛ, расположенные за границами зоны влияния, называются удаленными ВЛ. Так как все они суммарно индуцируют в рассматриваемой точке отключенной ВЛ напряжение не более пренебрежимо малого значения ΔU , то их влиянием на рассматриваемую точку отключенной ВЛ можно пренебречь. Тогда можно считать, что индуктивная составляющая \dot{u}_M наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ определяется влиянием только тех ВЛ, которые расположены в зоне влияния.

Все ВЛ, расположенные в зоне влияния, рассматриваются в качестве влияющих ВЛ, а точнее, в качестве ВЛ, влияющих на рассматриваемую точку отключенной ВЛ. Следовательно, число N влияющих ВЛ определяется как число всех ВЛ, расположенных в зоне влияния.

Таким образом, задача определения числа N влияющих ВЛ сводится к задаче определения размера S_U зоны влияния на рассматриваемую точку отключенной ВЛ. Разумеется, при этом предполагается, что информация о числе расположенных в зоне влияния ВЛ и значениях их токов будет предоставлена диспетчерскими службами организаций-владельцев ВЛ.

Необходимо отметить, что введенное понятие зоны влияния и данное выше определение влияющей ВЛ как линии, расположенной в зоне влияния, позволяют определить абсолютную погрешность ΔU_m расчета максимального значения U_m наведенного напряжения, обусловленную учетом влияния только тех ВЛ, которые расположены в зоне влияния. Значение погрешности ΔU_m равно ΔU .

Методика определения размера S_U зоны влияния на рассматриваемую точку отключенной ВЛ приведена в [3]. Согласно этой методике

$$S_U = D\psi_1^{-1}\left(\frac{\varepsilon u_\sigma}{4U_d}\right), \quad S_U > 0, \quad (47)$$

где $\psi_1(a)$ – обозначение тригамма-функции от аргумента a , которая определяется по выражению из [11]:

$$\psi_1(a) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(a+n)^2}; \quad (48)$$

$\psi_1^{-1}(a)$ – обозначение обратной тригамма-функции от аргумента a ;

$$U_d = \frac{I_{1m}\rho\beta_{cp}l_0v(l_0)k_m}{\pi D^2}; \quad (49)$$

$$\beta_{cp} = 1 + k_\omega(1 + h_{cp}); \quad (50)$$

$$k_\omega = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho}}; \quad (51)$$

$$v(l_0) = \begin{cases} 1 & \text{для ВЛ, заземленной на одном конце;} \\ \frac{2(l-l_0)}{l} & \text{для ВЛ, заземленной на обоих концах;} \end{cases} \quad (52)$$

$$k_m = \left(1 + \frac{I_{2m}}{I_{1m}}\right) \frac{k_\omega(h_{\max} - h_{\min})}{\beta_{cp}} + \frac{3I_{0m}}{I_{1m}}; \quad (53)$$

D – среднее расстояние между соседними эквивалентными удаленными ВЛ; u_σ – среднеквадратичное значение модулей u_k измеренных значений наведенных напряжений; $\varepsilon < 0$ – параметр, задающий предельно допустимую погрешность $\Delta U_m = \varepsilon u_\sigma$; I_{1m} , I_{2m} , $3I_{0m}$ – максимально возможные значения модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательности в удаленных ВЛ в нормальном режиме их работы; ρ – эквивалентное удельное электрическое сопротивление слоя грунта толщиной, равной глубине проникновения в него электромагнитной волны частотой 50 Гц; k_ω – модуль волнового числа грунта; H – средняя высота фазных проводов отключенной ВЛ; h_{cp} – средняя высота фазных проводов удаленных ВЛ; h_{\max} и h_{\min} – средние значения максимальной и минимальной высоты подвеса фазных проводов удаленных ВЛ.

Методика определения максимального значения наведенного напряжения эмпирическим методом. В итоге можно изложить методику определения максимального значения U_m наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ с учетом кондуктивной составляющей (см. также [3]).

1. В рассматриваемой точке отключенной и заземленной ВЛ в течение некоторого интервала времени проводится серия из M измерений комплексных значений $(\dot{u}_1, \dots, \dot{u}_k, \dots, \dot{u}_M)$ наведенного напряжения. Параллельно измеряются значения напряжений $(\dot{V}_{1_1}^*, \dots, \dot{V}_{1_k}^*, \dots, \dot{V}_{1_M}^*)$ и $(\dot{V}_{2_1}^*, \dots, \dot{V}_{2_k}^*, \dots, \dot{V}_{2_M}^*)$ и токов $(\dot{J}_{1_1}, \dots, \dot{J}_{1_k}, \dots, \dot{J}_{1_M})$ и $(\dot{J}_{2_1}, \dots, \dot{J}_{2_k}, \dots, \dot{J}_{2_M})$ на концах отключенной ВЛ.

2. Вычисляется среднеквадратичное значение u_σ модулей u_k измеренных комплексных значений \dot{u}_k наведенного напряжения.

3. Задается допустимая абсолютная погрешность $\Delta U_m < u_\sigma$ определения максимально возможного значения U_m наведенного напряжения и вычисляется параметр $\varepsilon = \Delta U_m / u_\sigma$.

4. По (47) определяется размер S_U зоны влияния на рассматриваемую точку отключенной ВЛ.

5. Диспетчерскими службами организаций-владельцев ВЛ предоставляется следующая информация:

число всех ВЛ, расположенных в зоне влияния размером S_U ;

комплексные значения $\dot{I}_{1ki}, \dot{I}_{2ki}, \dot{I}_{0ki}$ токов прямой, обратной и нулевой последовательности (или комплексные значения $\dot{I}_{Aki}, \dot{I}_{Bki}, \dot{I}_{Cki}$ фазных токов) всех N ВЛ, расположенных в зоне влияния размером S_U , в моменты проведения измерений наведенного напряжения;

значения погрешностей измерения токов $\dot{I}_{1ki}, \dot{I}_{2ki}, \dot{I}_{0ki}$ (или токов $\dot{I}_{Aki}, \dot{I}_{Bki}, \dot{I}_{Cki}$);

максимально возможные значения $I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi}$ модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательности всех N ВЛ, расположенных в зоне влияния размером S_U , в нормальном режиме их работы.

6. Формируется СЛАУ (44) из $2M$ уравнений с $6N+8$ неизвестными величинами, в том числе вещественными $z_{1xi}, z_{2xi}, z_{0xi}$ и мнимыми $z_{1yi}, z_{2yi}, z_{0yi}$ частями неизвестных комплексных взаимных сопротивлений $\dot{z}_{1i}, \dot{z}_{2i}, \dot{z}_{0i}$ прямой, обратной и нулевой последовательности между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и линией, расположенными в зоне влияния.

7. Методом регуляризации находится численное устойчивое ненулевое решение \mathbf{z}_N^* СЛАУ (44). Априорной информацией для регуляризации являются погрешность h задания матрицы токов \mathbf{I}_h^* и погрешность $\delta = \sqrt{M} \Delta U_m$ задания вектора \mathbf{u}' СЛАУ (44) – см. [3]. Кроме того, априорной информацией являются следующие условия: $z_{1i} \ll z_{0i}$ и $z_{2i} \ll z_{0i}$ – см. [4].

8. По (30) – (32) вычисляются модули z_{1i}, z_{2i}, z_{0i} взаимных сопротивлений между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и ВЛ, расположенными в зоне влияния.

9. По (19) вычисляется максимальное значение U_{Mm} модуля индуктивной составляющей наведенного напряжения.

10. По (45) вычисляется максимальное значение U_{Vm} модуля кондуктивной составляющей наведенного напряжения.

11. По (20) вычисляется максимально возможное значение U_m модуля результирующего наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ. Абсолютная погрешность полученного значения U_m , обусловленная учетом влияния только тех ВЛ, которые расположены в зоне влияния размером S_U , равна ΔU_m .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Целебровский Ю.В. Заземляющие устройства электроустановок высокого напряжения: Учебное пос. Изд. Новосибирского электротехнического института, 1987, 79 с.

2. Целебровский Ю.В. Заземляющие системы промышленных предприятий. Особенности нормирования, проектирования, эксплуатации. – Новости электротехники, 2005, № 4, с. 39–42.

3. Горшков А.В. Эмпирический метод определения максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи. – Электричество, 2019, № 11, с. 23–32.

4. Горшков А.В. Определение максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи. – Электричество, 2017, № 11, с. 12–21.

5. Горшков А.В. Определение числа влияющих линий для расчета наведенного напряжения на отключенной воздушной линии электропередачи. – Электричество, 2018, № 6, с. 4–15.

6. Тихонов А.Н. Решение некорректно поставленных задач и метод регуляризации. – Доклады АН СССР, 1963, т. 151, № 3, с. 501–504.

7. Тихонов А.Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения. – Доклады АН СССР, 1965, т. 163, № 3, с. 591–594.

8. Тихонов А.Н. О приближенных системах линейных алгебраических уравнений. – Журнал вычислительной математики и математической физики. 1980, т. 20, № 6, с. 1373–1383.

9. Тихонов А.Н. О нормальных решениях приближенных систем линейных алгебраических уравнений. – Доклады АН СССР, 1980, т. 254, № 3, с. 549 – 554.

10. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983, 200 с.

11. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979, 832 с.

[13.01.2020]

А в т о р: Горшков Андрей Вячеславович – кандидат техн. наук, начальник проектного отдела ООО «НПФ ЭЛНАП» (Москва), диссертацию защитил в 1999 г.

Estimating the Spread of Potentials from the Substation Grounding Electrodes in Determining the Voltage Induced on the Disconnected Overhead Power Line

GORSHKOV Andrey V. (LLC «NPF ELNAP», Moscow, Russia) – Head of Design Dept., Cand. Sci. (Eng.)

It is shown that during normal operation of a power system, a conductive component of induced voltage may arise apart from its inductive and capacitive components, which is caused by the spread of potentials from the substation grounding conductors to which the disconnected line is grounded. It has been established that under normal operation conditions the conductive voltage component may be several times higher than the maximum permissible induced voltage value. For determining the maximum possible induced voltage value at a certain point of the disconnected line, including its conductive component, an empirical method based on full-scale induced voltage measurements is proposed. The idea of the method consists in constructing an empirical formula for the induced voltage function in solving the inverse problem with subsequently determining the maximum possible induced voltage value by solving the direct problem. As a result, a procedure for determining the maximum possible value of the voltage induced at the considered point of the disconnected line with taking into account its conductive component has been developed.

Key words: overhead power line, induced voltage, spread of potentials, substation grounding conductor, induced voltage measurements, measurement procedure, influencing power line, overhead power line, influencing overhead power line

REFERENCES

1. **Tselebrovsky Yu.V.** *Zazemlyayushchiye ustroystva elektroustanovok vysokogo napryazheniya: Uchebnoe pos. (Grounding devices of high voltage installations Textbook). Publ. of Novosibirsk Electrotechnical Institute, 1987, 79 p.*
2. **Tselebrovsky Yu.V.** *Novosti elektrotehniki – in Russ. (Ntws of Electrical Engineering), 2005, No. 4, pp. 39–42.*
3. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2019, No. 11, pp. 23–32.*
4. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2017, No. 11, pp. 12–21.*
5. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2018, No. 6, pp. 4–15.*
6. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ. (Reports of USSR Academy of Sciences), 1963, vol. 151, No. 3, pp. 501–504.*
7. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ. (Reports of USSR Academy of Sciences), 1965, vol. 163, No. 3, pp. 591–594.*
8. **Tikhonov A.N.** *Zhurnal vuchislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki – in Russ. Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics), 1980, vol. 20, №. 6, pp. 1373 – 1383.*
9. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ (Reports of USSR Academy of Sciences), 1990, vol. 254, No. 3, pp. 549–554.*
10. **Tikhonov A.N., Goncharov A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.** *Regulyariziruyushchiye algoritmy i apriornaya informatsiya. (Yagola A.G. Regularizing algorithms and a priori information). M.: Nauka, 1983, 200 p.*
11. **Abramovits M., Stigan I.** *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam (Handbook of special functions). M.: Nauka, 1979, 832 p.*

[13.01.2020]