

## Определение числа влияющих линий для расчета наведенного напряжения на отключенной воздушной линии электропередачи

ГОРШКОВ А.В.

*Сложившаяся практика субъективного учета в качестве влияющих воздушных линий электропередачи (ВЛ) только одной или нескольких произвольно выбранных ВЛ может привести к существенному занижению расчетного значения наведенного напряжения. Для определения достаточного числа влияющих линий, позволяющего провести достоверный расчет наведенного напряжения на отключенной ВЛ, введено понятие зоны влияния на отключенную ВЛ. В качестве влияющих линий рассматриваются все ВЛ, расположенные в зоне влияния на отключенную линию. Разработан расчетный метод определения размера зоны влияния на отключенную ВЛ, что позволяет на практике определить достаточное число влияющих линий для достоверного расчета наведенного напряжения на отключенной ВЛ. По разработанному методу проведены расчеты размера зоны влияния на реальные ВЛ.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: воздушная линия электропередачи, влияющая линия, число влияющих линий, зона влияния, наведенное напряжение, расчет*

По проблеме наведенного напряжения опубликовано множество работ, значительное число которых посвящено методам расчета. Не оспаривая научной ценности этих работ, все же следует признать, что они малопригодны для практического применения по той причине, что они не дают ответа на вопрос, возникающий еще до проведения расчетов: влияние какого числа воздушных линий электропередачи (ВЛ), расположенных вблизи отключенной ВЛ, следует учесть, чтобы достоверно, т.е. с определенной погрешностью, рассчитать наведенное напряжение?

Казалось бы очевидно, что точность расчета наведенного напряжения, а также пересчета его измеренного значения к максимально возможному значению зависит от того насколько в полной мере учтены все ВЛ, влияющие на рассматриваемую отключенную линию. Однако на настоящий момент какая-либо методика определения числа влияющих ВЛ отсутствует. Тем более удивительным является тот факт, что в НТД отсутствуют не только указания по учету какого-либо определенного числа влияющих ВЛ, но и само определение влияющей линии.

В результате при расчетах наведенного напряжения линии электропередачи принимаются в качестве влияющих субъективно, без всяких обоснований. Как правило, в качестве влияющих рассматриваются одна или несколько самых длинных ВЛ, ближайших к отключенной ВЛ. При этом расстояние от отключенной линии, в пределах которого расположенные ВЛ рассматриваются в качестве «ближайших», принимается произвольно.

Очевидно, что учитывать влияние только тех ВЛ, которые таким способом приняты в качестве влияющих, в общем случае недостаточно для достоверного расчета наведенного напряжения. В результате расчетное значение наведенного напряжения может оказаться сильно заниженным, что может привести к ошибочному выводу об отсутствии на отключенной ВЛ наведенного напряжения недопустимых значений. При этом оценить погрешность расчета наведенного напряжения невозможно в принципе, что не позволяет говорить о какой-либо достоверности полученных таким образом результатов расчета и тем более не позволяет исключить эту погрешность определенной поправкой.

Для демонстрации ошибочности мнения, что самые длинные ВЛ, ближайšie к отключенной ВЛ, являются самыми влияющими, т.е. вносящими наибольший вклад в результирующее значение наведенного напряжения, рассмотрим приведенный на рис. 1 пример расположения отключенной ВЛ 220 кВ и трех влияющих ВЛ 220 кВ.

Расчетная схема замещения отключенной ВЛ для определения значения наведенного напряжения  $U_H$  приведена на рис. 2. В схеме замещения приняты следующие обозначения (точкой сверху обозначены комплексные величины):

$\dot{E}_{A1}, \dot{E}_{B1}, \dot{E}_{C1}$  – ЭДС, наведенные на соответствующих фазных проводах первого участка отключенной ВЛ;  $\dot{E}_{A2}, \dot{E}_{B2}, \dot{E}_{C2}$  – то же второго участка отключенной ВЛ;  $r_{A1}, r_{B1}, r_{C1}, L_{A1}, L_{B1}, L_{C1}$  – активные сопротивления и индуктивности соответствующих фазных проводов первого участка от-

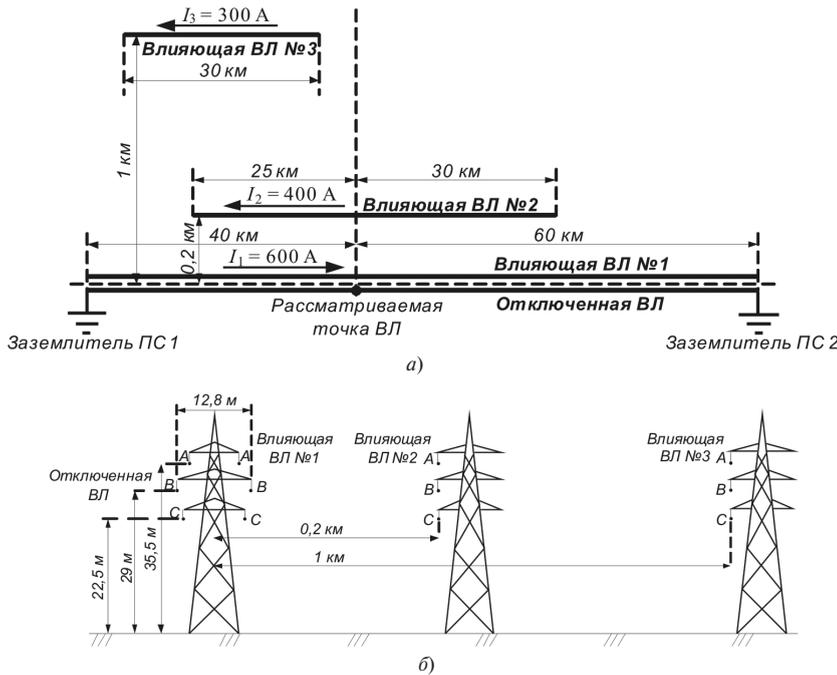


Рис. 1. Пример расположения отключенной и влияющих ВЛ: а – план расположения ВЛ; б – вид ВЛ в плоскости, перпендикулярной их направлениям и поверхности земли

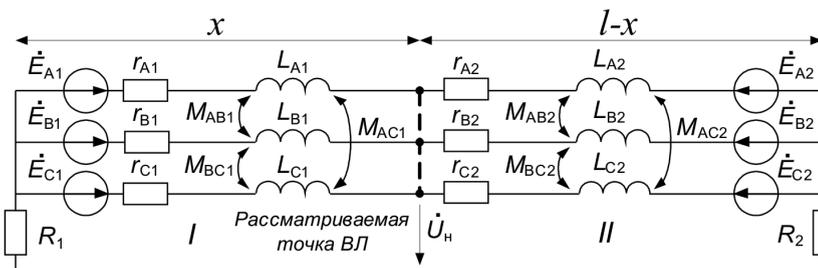


Рис. 2. Расчетная схема замещения отключенной ВЛ: I – первый участок ВЛ; II – второй участок

ключенной ВЛ;  $r_{A2}, r_{B2}, r_{C2}, L_{A2}, L_{B2}, L_{C2}$  – то же второго участка отключенной ВЛ;  $M_{AB1}, M_{AC1}, M_{BC1}$  – взаимные индуктивности между соответствующими фазными проводами первого участка отключенной ВЛ;  $M_{AB2}, M_{AC2}, M_{BC2}$  – то же второго участка отключенной ВЛ;  $R_1, R_2$  – сопротивления заземлителей подстанций на концах отключенной ВЛ.

Рассмотрим установившиеся режимы токов и напряжений в отключенной и влияющих ВЛ. Так как в установившихся режимах все токи и напряжения в ВЛ являются гармоническими функциями времени, то их можно рассматривать как комплексные величины и применять к ним соответствующий математический аппарат.

Для упрощения расчетов в рассматриваемом примере пренебрегаем провесом проводов во всех ВЛ, что позволяет использовать для расчета ЭДС  $\dot{E}$ , наведенную на фазном проводе отключенной ВЛ гармоническим током  $\dot{I}$  в параллельном ему фазном проводе влияющей ВЛ, выражение [1]:

$$\dot{E} = \frac{-j\omega\mu_0 \dot{I} l}{2\pi} \left( \ln \frac{\sqrt{(h+h_i)^2 + y^2}}{\sqrt{(h-h_i)^2 + y^2}} + \int_0^\infty \frac{e^{-\tau(h+h_i)}}{\tau + \sqrt{\tau^2 + k^2}} \cos \nu \tau d\tau \right), \quad (1)$$

где  $l$  – длина провода с током  $\dot{I}$ ;  $h$  – высота провода отключенной ВЛ;  $h_i$  – высота провода с током  $\dot{I}$ ;  $y$  – горизонтальное расстояние между проводами;  $k$  – волновое число грунта:

$$k = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho}}. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  – эквивалентное (для всей территории расположения отключенной и влияющих ВЛ) удельное электрическое сопротивление слоя грунта толщиной, равной глубине проникновения в него электромагнитной волны частотой 50 Гц.

Взаимные индуктивности  $M_{ABi}, M_{ACi}, M_{BCi}$  между соответствующими фазными проводами отключенной ВЛ определяются из выражения, аналогичного (1), как отношение  $\dot{E}/(-j\omega I)$ .

Выражение для расчета наведенного напряжения  $\dot{U}_H$  для рассматриваемого примера в статье не приводится. При этом очевидно, что получить его для приведенной на рис. 2 схемы замещения несложно.

При расчетах принято, что в рассматриваемой точке ВЛ выполнено уравнивание потенциалов фазных проводов без их заземления. Значения сопротивлений заземлителей подстанций приняты равными  $R_1 = R_2 = 0,2$  Ом; значение эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта принято равным  $\rho = 100$  Ом·м; активные сопротивления фазных проводов отключенной ВЛ приняты равными 0,1 Ом/км; индуктивные сопротивления фазных проводов отключенной ВЛ – 0,5 Ом/км.

Расчетные значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ при различных значениях фазных токов во влияющих ВЛ приведены в таблице 1.

Согласно результатам расчетов ВЛ № 1, которая является ближайшей (парной в двухцепной ВЛ) и самой длинной влияющей ВЛ, к тому же с наибольшим рабочим током, вносит наименьший

Таблица 1

Номер п/п	Номер ВЛ	Комплексные значения фазных токов, А/угол			Ток небаланса $3I_0$ , А	Составляющая наведенного напряжения от каждой ВЛ, В	Суммарное наведенное напряжение, В
1	1	600/0	600/120°	600/240°	0	0,49	2,6
	2	400/0	400/120°	400/240°	0	0,92	
	3	300/0	300/120°	300/240°	0	2,2	
2	1	660/0	600/120°	600/240°	60	2,4	29
	2	440/0	400/120°	400/240°	40	13	
	3	330/0	300/120°	300/240°	30	16	

вклад в результирующее значение наведенного напряжения. При этом наибольший вклад в значение наведенного напряжения вносит ВЛ № 3, которая является самой удаленной и короткой влияющей ВЛ, к тому же с наименьшим рабочим током. Такой характер влияния на отключенную ВЛ в данном примере наблюдается как при симметричных, так и несимметричных токовых нагрузках влияющих ВЛ.

Таким образом, учет влияния только произвольно выбранных нескольких ближайших ВЛ и(или) нескольких самых длинных ВЛ и(или) нескольких ВЛ с наибольшими рабочими токами может привести к существенному занижению расчетного значения наведенного напряжения и, следовательно, к необеспечению электробезопасности при проведении работ на отключенной ВЛ. Так, в приведенном примере неучет влияния ВЛ № 3 при несимметричных токовых нагрузках влияющих ВЛ приводит к ошибочному выводу о значении наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ меньше предельно допустимого значения 25 В.

В результате можно сделать вывод, что для достоверного расчета наведенного напряжения требуется обоснованно определенное достаточное, а не некоторое произвольно выбранное, число влияющих ВЛ.

**Основные положения метода определения достаточного числа влияющих ВЛ.** Достаточное число влияющих ВЛ определяется способом, основанным на методе исключения. Сущность данного способа заключается в том, что из множества всех существующих ВЛ исключаются все удаленные (от отключенной ВЛ) линии, как не способные навести сколько-нибудь существенное напряжение на отключенную ВЛ. Оставшиеся линии считаются влияющими ВЛ.

Для подробного раскрытия сущности данного метода рассмотрим две области расположения ВЛ относительно отключенной ВЛ (рис. 3).

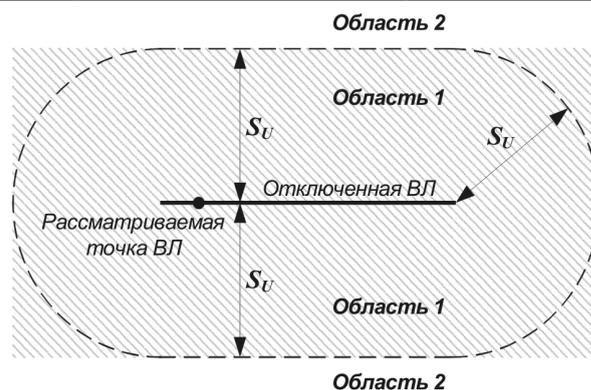


Рис. 3. Области расположения ВЛ относительно отключенной ВЛ

*Область 1* – примыкающая к отключенной ВЛ территория, в пределах расстояния  $S_U$  от отключенной ВЛ. *Область 2* – вся территория (условно бесконечная), расположенная за пределами первой области. При этом размер  $S_U$  области 1 такой, что все ВЛ, расположенные в области 2, наводят суммарно в рассматриваемой точке отключенной ВЛ напряжение не более некоторого пренебрежимо малого значения  $\Delta U$  по сравнению с предельно допустимым значением 25 В.

Тогда влиянием всех ВЛ, расположенных в области 2, можно пренебречь и считать, что наведенное напряжение определяется влиянием только ВЛ, расположенных в области 1. Следовательно, область 1 можно считать зоной влияния на отключенную ВЛ. При этом все ВЛ, расположенные в зоне влияния, следует рассматривать в качестве *влияющих ВЛ*, а все линии, расположенные за ее пределами, следует рассматривать в качестве *удаленных*, а следовательно, *невлияющих ВЛ*, так как они суммарно наводят напряжение пренебрежимо малого значения  $\Delta U$ .

Следует отметить, что из такого определения зоны влияния – как прилегающей к отключенной ВЛ территории, которая характеризуется тем, что все расположенные за ее пределами ВЛ суммарно наводят на отключенной ВЛ напряжение не более некоторого пренебрежимо малого значения  $\Delta U$ , следует, что любая отключенная ВЛ может иметь

для каждой рассматриваемой точки бесконечное множество зон влияния, отличающихся одна от другой геометрической формой.

Для однозначной определенности в статье зона влияния — геометрическое место точек, расположенных на расстоянии не более  $S_U$  от отключенной ВЛ (рис. 3). При этом, как будет показано дальше, для каждой рассматриваемой точки отключенной ВЛ зона влияния имеет различный размер  $S_U$ . Такое определение формы зоны влияния применимо не только для прямолинейной отключенной ВЛ, но и криволинейной линии. В этом случае продольные границы зоны влияния являются эквидистантами трассы отключенной ВЛ, а торцевые границы зоны влияния, как и у прямолинейной ВЛ, являются полуокружностями.

Очевидно, что предлагаемый метод позволяет определить погрешность расчета, а также пересчета измеренного значения наведенного напряжения, обусловленную учетом влияния конечного числа ВЛ, а именно только тех ВЛ, которые расположены в зоне влияния на отключенную линию. Абсолютное значение этой погрешности равно  $\Delta U$ .

Следует отметить, что в зоне влияния на отключенную ВЛ могут отсутствовать ВЛ или наведенное ими напряжение может быть много меньше значения  $\Delta U$ . В данном случае точность расчета наведенного напряжения будет низкой, но с точки зрения обеспечения электробезопасности это допустимо, так как наведенное напряжение будет много меньше предельно допустимого значения 25 В. В любом случае уточнить расчетное значение наведенного напряжения следует прибавлением к нему поправки, равной  $\Delta U$ .

Таким образом, задача определения числа влияющих линий сводится к задаче определения размера  $S_U$  зоны влияния на отключенную ВЛ. При этом предполагается, что вся необходимая для расчетов информация о всех ВЛ, расположенных в зоне влияния, будет предоставлена диспетчерскими службами организаций — владельцев ВЛ.

Очевидно, что определенное таким способом число влияющих ВЛ в общем случае будет избыточным, а следовательно, и достаточным для достоверного расчета наведенного напряжения, а в частных случаях — и необходимым и достаточным числом.

Далее приводится расчетный способ определения размера  $S_U$  зоны влияния на отключенную ВЛ.

**Максимальное значение наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ.** Для начала получим выражение для максимального значения

наведенного напряжения  $U_{nm}$  в некоторой рассматриваемой точке отключенной ВЛ, т.е. для максимально возможного значения, которое модуль наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ может принять при изменении фазных токов в других ВЛ в нормальном режиме в пределах диапазонов их возможных комплексных значений.

Схема замещения отключенной ВЛ для расчета наведенного напряжения приведена на рис. 2. Для упрощения расчетов активными сопротивлениями фазных проводов отключенной ВЛ пренебрегаем. Тогда выполняя эквивалентную развязку взаимноиндуктивных связей (см. рис. 4), а затем замену трехфазной ВЛ эквивалентной однофазной, получаем расчетную схему замещения отключенной линии в виде однофазной ВЛ (см. рис. 5).

Согласно приведенной на рис. 5 схеме замещения наведенное напряжение  $\dot{U}_H$  определяется эквивалентными ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$ , наведенными на первом и втором участках эквивалентной однофазной ВЛ, эквивалентными сопротивлениями фазных проводов этих участков  $\dot{z}_{e1}$  и  $\dot{z}_{e2}$  и сопротивлениями  $R_1, R_2$  заземлителей подстанций на концах отключенной ВЛ.

Приближенное выражение для эквивалентных ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  можно записать как

$$\dot{E}_i \approx \frac{\dot{E}_{Ai} + \dot{E}_{Bi} + \dot{E}_{Ci}}{3}, \tag{3}$$

где  $\dot{E}_{Ai}, \dot{E}_{Bi}, \dot{E}_{Ci}$  — ЭДС, наведенные на соответствующих фазных проводах  $i$ -го (первого или второго) участка отключенной ВЛ.

Выражения для сопротивлений  $\dot{z}_{e1}$  и  $\dot{z}_{e2}$ :

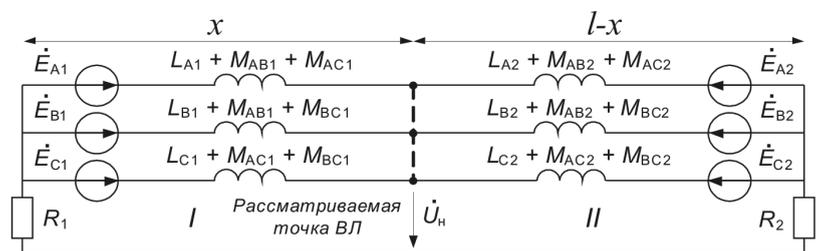


Рис. 4. Эквивалентная замена отключенной ВЛ трехфазной линией с развязанными взаимноиндуктивными связями: I — первый участок ВЛ; II — второй участок

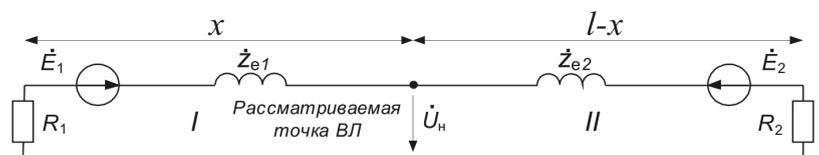


Рис. 5. Расчетная схема замещения отключенной трехфазной ВЛ в виде эквивалентной однофазной: I — первый участок ВЛ; II — второй участок

$$\dot{z}_{ei} = \frac{j\omega}{\frac{1}{L_{Ai} + M_{ABi} + M_{ACi}} + \frac{1}{L_{Bi} + M_{ABi} + M_{BCi}} + \frac{1}{L_{Ci} + M_{ACi} + M_{BCi}}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{L_{Ai} + M_{ABi} + M_{ACi} + L_{Bi} + M_{ABi} + M_{BCi} + L_{Ci} + M_{ACi} + M_{BCi}}. \quad (4)$$

Вводя обозначения:

$$L_i = \frac{L_{Ai} + L_{Bi} + L_{Ci}}{3}, \quad (5)$$

$$M_i = \frac{M_{ABi} + M_{ACi} + M_{BCi}}{3}, \quad (6)$$

выражение (4) можно приближенно записать как

$$\dot{z}_{ei} \approx \frac{j\omega(L_i + 2M_i)}{3}. \quad (7)$$

Принимаем, что эквивалентные ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  имеют положительные направления к рассматриваемой точке отключенной ВЛ. Тогда выражение для наведенного напряжения  $\dot{U}_H$  в зависимости от расстояния  $x$  по трассе отключенной ВЛ до рассматриваемой точки имеет следующий вид:

$$\dot{U}_H(x) = \frac{\frac{\dot{E}_1}{R_1 + \dot{z}_{e1}} + \frac{\dot{E}_2}{R_2 + \dot{z}_{e2}}}{\frac{1}{R_1 + \dot{z}_{e1}} + \frac{1}{R_2 + \dot{z}_{e2}}} = \frac{\frac{\dot{E}_1}{R_1 + \dot{z}'_e x} + \frac{\dot{E}_2}{R_2 + \dot{z}'_e(l-x)}}{\frac{1}{R_1 + \dot{z}'_e x} + \frac{1}{R_2 + \dot{z}'_e(l-x)}}, \quad (8)$$

где  $\dot{z}'_e$  – эквивалентное сопротивление фазных проводов отключенной ВЛ на единицу длины.

Если отключенная ВЛ заземлена на одном конце, то  $R_2 \rightarrow \infty$  и выражение (8) для наведенного напряжения принимает следующий вид:

$$\dot{U}_H(x) = \dot{E}_1. \quad (9)$$

Если отключенная ВЛ заземлена на обоих концах, то выражение (8) для наведенного напряжения при выполнении условий  $x \gg R_1 / \dot{z}'_e$  и  $l-x \gg R_2 / \dot{z}'_e$  можно упростить:

$$\dot{U}_H(x) = \frac{\dot{E}_1(l-x) + \dot{E}_2 x}{l}. \quad (10)$$

При этом наведенное напряжение на концах заземленной с обоих концов ВЛ при выполнении условия  $l \gg (R_1 + R_2) / \dot{z}'_e$  будет определяться следующими выражениями:

$$\dot{U}_H(0) = \dot{E}_2 \frac{R_1}{\dot{z}'_e l} = \dot{E}_2 \frac{3R_1}{\dot{z}'_e l}, \quad (11)$$

$$\dot{U}_H(l) = \dot{E}_1 \frac{R_2}{\dot{z}'_e l} = \dot{E}_1 \frac{3R_2}{\dot{z}'_e l}, \quad (12)$$

где  $\dot{z}'_p$  – сопротивление фазного провода отключенной ВЛ (на единицу длины):

$$\dot{z}'_p \approx j\omega \left( L' + \frac{2M_1}{x} \right) = j\omega \left( L' + \frac{2M_2}{l-x} \right); \quad (13)$$

$L'$  – индуктивность фазного провода отключенной ВЛ (на единицу длины).

Рассмотрим наихудший с точки зрения электробезопасности случай, когда наведенные эквивалентные ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  являются синфазными и при этом имеют равные значения модулей на единицу длины ВЛ. Тогда, вводя значение удельной (на единицу длины) эквивалентной ЭДС  $\dot{E}'$ , выражения (9)–(12) для наведенного напряжения  $\dot{U}_H$  можно записать в следующем обобщенном виде:

$$\dot{U}_H(x) = \dot{E}' \nu(x), \quad (14)$$

где  $\nu(x)$  – безразмерный параметр, определяемый следующим образом:

$$\nu(x) = \begin{cases} 1 - \text{при ВЛ, заземленной} \\ \text{на одном конце;} \\ \frac{2(l-x)}{l} - \text{при ВЛ, заземленной} \\ \text{на обоих концах;} \\ \frac{3R_1}{\dot{z}'_p x} - \text{при } x=0 \text{ и ВЛ, заземленной} \\ \text{на обоих концах;} \\ \frac{3R_2}{\dot{z}'_p x} - \text{при } x=l \text{ и ВЛ, заземленной} \\ \text{на обоих концах.} \end{cases} \quad (15)$$

Соответственно выражение для зависимости максимального значения наведенного напряжения от расстояния  $x$  имеет следующий вид:

$$U_{Hm}(x) = E'_m \nu(x), \quad (16)$$

где  $E'_m$  – максимальное значение удельной эквивалентной ЭДС, наведенной на отключенной ВЛ (максимально возможное значение, которое модуль  $|\dot{E}'|$  может принять при изменении фазных токов в других ВЛ в нормальном режиме в пределах диапазонов их возможных комплексных значений);  $\nu(x)$  – безразмерный параметр, определяемый по (15).

Таким образом, для определения максимального значения наведенного напряжения  $U_{Hm}$  в рассматриваемой точке отключенной ВЛ необходимо получить выражение для максимального значения

удельной эквивалентной ЭДС  $E'_m$ , наведенной на отключенной ВЛ другими линиями.

**Эквивалентная ЭДС, наведенная на отключенной ВЛ удаленным проводником с током.** Рассмотрим отключенную ВЛ и параллельный ей проводник с током. При значительном расстоянии  $y$  между ними наведенная на ВЛ удельная эквивалентная ЭДС  $\dot{E}'$  будет практически равна значениям ЭДС, наведенным на ее фазных проводах. Тогда для расчета ЭДС  $\dot{E}'$  можно использовать выражение из [2], полученное путем преобразования и упрощения выражения (1):

$$\dot{E}' \approx \frac{-j\omega\mu_0 \dot{I}}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{\left(H + h_i + \frac{2}{k}\right)^2 + y^2}}{\sqrt{(H - h_i)^2 + y^2}}, \quad (17)$$

где  $H$  – средняя высота фазных проводов отключенной ВЛ, а остальные обозначения см. (1).

Принимаем, что для удаленного проводника с током выполняется условие

$$y \gg \left| H + h_i + \frac{2}{k} \right|. \quad (18)$$

Тогда выражение (17) можно упростить:

$$\begin{aligned} \dot{E}' &\approx \frac{-j\omega\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \ln \left[ 1 + \frac{\left(H + h_i + \frac{2}{k}\right)^2}{y^2} \right] \approx \\ &\approx \frac{-j\omega\mu_0 \dot{I} \left(H + h_i + \frac{2}{k}\right)^2}{4\pi y^2} = -\frac{\dot{I}\rho}{\pi y^2} \left(1 + k \frac{H + h_i}{2}\right)^2 = -\frac{\dot{I}\rho\dot{\beta}}{\pi y^2}, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\dot{\beta} = \left(1 + k \frac{H + h_i}{2}\right)^2 \approx 1 + k(H + h_i). \quad (20)$$

В результате выражение для удельной эквивалентной ЭДС  $\dot{E}'$ , наведенной на отключенной ВЛ удаленным одиночным проводником с током  $\dot{I}$ , можно записать в следующем виде:

$$\dot{E}' = -\dot{I}\dot{z}', \quad (21)$$

где  $\dot{z}'$  – взаимное сопротивление на единицу длины между отключенной ВЛ и удаленным проводником, определяемое как

$$\dot{z}' = \frac{\rho\dot{\beta}}{\pi y^2}. \quad (22)$$

**Максимальное значение эквивалентной ЭДС, наведенной на отключенной ВЛ трехфазной ВЛ.** В общем случае максимальное значение  $E'_m$  удельной эквивалентной ЭДС, наведенной на отключенной ВЛ одиночной трехфазной ВЛ, определяется по выражению [3]:

$$E'_m = I_{1m} z'_1 + I_{2m} z'_2 + 3I_{0m} z'_0, \quad (23)$$

где  $I_{1m}$ ,  $I_{2m}$ ,  $I_{0m}$  – максимально возможные значения модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в удаленной трехфазной ВЛ при изменении ее фазных токов  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$  в нормальном режиме в пределах диапазонов их возможных комплексных значений;  $z'_1$ ,  $z'_2$ ,  $z'_0$  – модули взаимных сопротивлений на единицу длины прямой, обратной и нулевой последовательностей между отключенной ВЛ и удаленной трехфазной ВЛ:

$$z'_1 = \left| \dot{z}'_A + \dot{z}'_B \dot{a}^2 + \dot{z}'_C \dot{a} \right|; \quad (24)$$

$$z'_2 = \left| \dot{z}'_A + \dot{z}'_B \dot{a} + \dot{z}'_C \dot{a}^2 \right|; \quad (25)$$

$$z'_0 = \left| \frac{\dot{z}'_A + \dot{z}'_B + \dot{z}'_C}{3} \right|. \quad (26)$$

где  $\dot{z}'_A$ ,  $\dot{z}'_B$ ,  $\dot{z}'_C$  – взаимные сопротивления (на единицу длины) между отключенной ВЛ и соответствующими фазными проводами удаленной трехфазной ВЛ;  $\dot{a} = e^{j2\pi/3}$  – оператор поворота.

**Максимальное значение эквивалентной ЭДС, наведенной удаленной ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов.** Рассмотрим отключенную ВЛ и параллельную ей удаленную ВЛ. При вертикальном расположении фазных проводов удаленной ВЛ расстояния  $y_i$  от них до отключенной ВЛ одинаковы и равны  $y$ . Тогда, учитывая, что для высоты подвеса фазных проводов  $h_i$  удаленной ВЛ выполняются соотношения:

$$\left| h_A + h_B \dot{a}^2 + h_C \dot{a} \right| \leq \Delta h_m; \quad (27)$$

$$\left| h_A + h_B \dot{a} + h_C \dot{a}^2 \right| \leq \Delta h_m, \quad (28)$$

где  $\Delta h_m$  – расстояние между крайними фазными проводами удаленной ВЛ:

$$\Delta h_m = h_{\max} - h_{\min}, \quad (29)$$

из (24) и (25) с учетом (22) получаем следующую оценку сверху для модулей взаимных сопротивлений прямой и обратной последовательностей:

$$z'_1 = z'_2 = \frac{\rho\Delta\dot{\beta}_m}{\pi y^2}; \quad (30)$$

$$\Delta\beta_m = k\Delta h_m \left( 1 + \frac{k}{2} \left( H + \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2} \right) \right) \approx k\Delta h_m, \quad (31)$$

где  $k$  – модуль волнового числа грунта, определяемого по (2).

При этом согласно (26) и (22) справедлива следующая оценка сверху для модуля взаимного сопротивления нулевой последовательности:

$$z'_0 = \frac{\rho\beta_{\text{ср}}}{\pi y^2}; \quad (32)$$

$$\beta_{\text{ср}} = 1 + k(H + h_{\text{ср}}) + \frac{k^2}{4} \left( H^2 + 2Hh_{\text{ср}} + \frac{h_A^2 + h_B^2 + h_C^2}{3} \right) \approx 1 + k(H + h_{\text{ср}}); \quad (33)$$

$$h_{\text{ср}} = \frac{h_A + h_B + h_C}{3}. \quad (34)$$

Тогда выражение (23) для максимального значения удельной эквивалентной ЭДС с учетом выражений (30), (32) принимает следующий вид:

$$E'_m = \frac{\rho}{\pi y^2} ((I_{1m} + I_{2m})\Delta\beta_m + 3I_{0m}\beta_{\text{ср}}). \quad (35)$$

Преобразуем выражение (35) к виду, используемому относительные значения токов обратной и нулевой последовательностей:

$$E'_m = \frac{I_{1m}\rho\beta_{\text{ср}}k_m}{\pi y^2}, \quad (36)$$

где  $k_m$  – максимальный коэффициент влияния [3] удаленной ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов на отключенную ВЛ:

$$k_m = (1 + \delta I_{2m}) \frac{\Delta\beta_m}{\beta_{\text{ср}}} + \delta I_{0m}; \quad (37)$$

$\delta I_{2m}$  – максимальный коэффициент обратной последовательности тока (максимальный относительный ток обратной последовательности) удаленной ВЛ в нормальном режиме:

$$\delta I_{2m} = I_{2m} / I_{1m}; \quad (38)$$

$\delta I_{0m}$  – максимальный коэффициент нулевой последовательности тока (максимальный относительный ток небаланса) удаленной ВЛ в нормальном режиме:

$$\delta I_{0m} = 3I_{0m} / I_{1m}. \quad (39)$$

**Максимальное значение эквивалентной ЭДС, введенной удаленной ВЛ с горизонтальным расположением фазных проводов.** Рассмотрим отключенную

ВЛ и параллельную ей удаленную ВЛ с горизонтальным расположением фазных проводов. В этом случае для всех фазных проводов удаленной линии модули коэффициентов  $\beta_i$  одинаковы и равны  $\beta$ . Тогда, учитывая, что для расстояний  $y_i$  от фазных проводов удаленной ВЛ до отключенной ВЛ выполняются соотношения:

$$\left| \frac{1}{y_A^2} + \frac{\dot{a}^2}{y_B^2} + \frac{\dot{a}}{y_C^2} \right| \leq \frac{1}{y_{\min}^2} - \frac{1}{y_{\max}^2}; \quad (40)$$

$$\left| \frac{1}{y_A^2} + \frac{\dot{a}}{y_B^2} + \frac{\dot{a}^2}{y_C^2} \right| \leq \frac{1}{y_{\min}^2} - \frac{1}{y_{\max}^2}, \quad (41)$$

из (24) и (25) с учетом (22) получаем следующую оценку сверху для модулей взаимных сопротивлений прямой и обратной последовательностей:

$$z'_1 = z'_2 = \frac{2\rho\beta\Delta y_m}{\pi y_{\min}^3}, \quad (42)$$

где  $\Delta y_m$  – расстояние между крайними фазными проводами удаленной ВЛ:

$$\Delta y_m = y_{\max} - y_{\min}. \quad (43)$$

При этом согласно (26) и (22) справедлива следующая оценка сверху для модуля взаимного сопротивления нулевой последовательности:

$$z'_0 = \frac{\rho\beta}{\pi y_{\min}^2}. \quad (44)$$

Тогда выражение (23) для максимального значения  $E'_m$  удельной эквивалентной ЭДС с учетом выражений (42) и (44) принимает вид:

$$E'_m = \frac{\rho\beta}{\pi y_{\min}^2} \left( (I_{1m} + I_{2m}) \frac{2\Delta y_m}{y_{\min}} + 3I_{0m} \right). \quad (45)$$

В результате преобразуем выражение для  $E'_m$  к виду, используемому относительные значения  $\delta I_{2m}$  и  $\delta I_{0m}$  токов обратной и нулевой последовательностей:

$$E'_m = \frac{I_{1m}\rho\beta k_{m\Gamma}}{\pi y_{\min}^2}, \quad (46)$$

где  $k_{m\Gamma}$  – максимальный коэффициент влияния [3] удаленной ВЛ с горизонтальным расположением фазных проводов на отключенную ВЛ:

$$k_{m\Gamma} = (1 + \delta I_{2m}) \frac{2\Delta y_m}{y_{\min}} + \delta I_{0m}. \quad (47)$$

Проведенные по выражениям (36) и (46) расчеты показали, что в подавляющем большинстве случаев максимальное значение ЭДС, наведенной удаленной ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов, больше, чем максимальное значение ЭДС, наведенной удаленной ВЛ с горизонтальным расположением фазных проводов, при прочих равных условиях. Более того, ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов выполняются, как правило, двухцепными, что приводит практически к двукратному увеличению наведенной ЭДС, что нельзя сказать о ВЛ с горизонтальным расположением фазных проводов, которые выполняются, как правило, одноцепными. В результате можно сделать вывод, что удаленные ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов более опасны с точки зрения наведенного напряжения, чем удаленные ВЛ с горизонтальным расположением фазных проводов.

Таким образом, далее в качестве наихудшего расчетного случая, при котором наведенное напряжение достигает максимального значения, принимаем случай, когда все удаленные ВЛ являются двухцепными ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов.

**Максимальное значение наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ от множества удаленных ВЛ.** Рассмотрим прямолинейную отключенную ВЛ. Заменим все множество удаленных ВЛ эквивалентными прямолинейными двухцепными ВЛ, параллельными и перпендикулярными отключенной линии, с одинаковым расстоянием  $D$  между соседними ВЛ и одинаковой высотой подвесов соответствующих фазных проводов. Под эквивалентностью в данном случае понимается, что суммарная длина всех эквивалентных ВЛ равна суммарной длине всех реальных ВЛ.

Так как напряжение на отключенной ВЛ наводят только параллельные ей эквивалентные линии, то далее перпендикулярные эквивалентные линии исключаем из числа рассматриваемых удаленных ВЛ. При этом считаем, что параллельные эквивалентные ВЛ вдоль каждой прямой линии расположены без промежутков и не пересекают перпендикулярную отключенной ВЛ плоскость, проходящую через рассматриваемую точку (см. рис. 6).

Для определения максимального значения наведенного напряжения согласно [3] принимаем, что в нормальном режиме во всех удаленных ВЛ токи прямой, обратной и нулевой последовательностей  $I_{1m}$ ,  $I_{2m}$  и  $I_{0m}$  имеют такие значения углов сдвига фаз, при которых эквивалентные ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , наведенные на первом и втором участках отключенной ВЛ (рис. 5), принимают наибольшие по модулю значения и при этом являются синфазными. Последнее условие обеспечивается, упрощенно го-

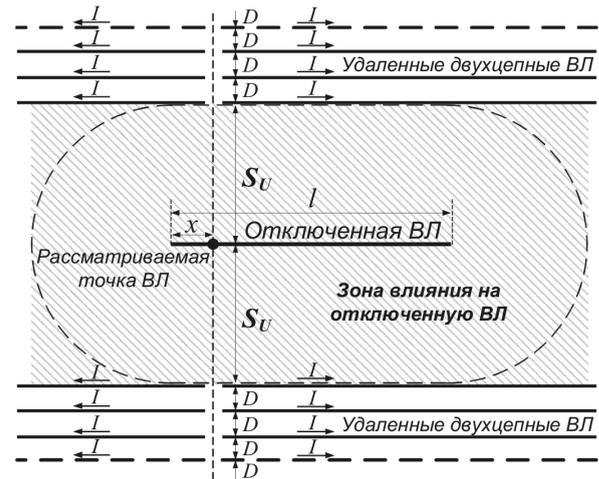


Рис. 6. Расчетная модель для определения размера  $S_U$  зоны влияния на отключенную ВЛ

воря, направлением токов прямой, обратной и нулевой последовательностей во всех удаленных ВЛ в нормальном режиме или в сторону рассматриваемой точки отключенной ВЛ или от нее (рис. 6). При этом принимаем, что во всех удаленных ВЛ модули токов соответствующих симметричных составляющих равны.

Согласно (16) и (36) максимальное значение наведенного напряжения  $U_{nmn}$  в координате  $x$  по трассе отключенной ВЛ от одной —  $n$ -й параллельной ей удаленной ВЛ — определяется по выражению:

$$U_{nmn}(x) = E'_{mn} xv(x) = \frac{I_{1m} \rho \beta_{cp} xv(x) k_m}{\pi y_n^2} = I_{1m} z_{0n}(x) k_m, \tag{48}$$

где  $E'_{mn}$  — максимальное значение удельной эквивалентной ЭДС, наведенной на отключенной ВЛ  $n$ -й удаленной ВЛ;  $y_n$  — расстояние от отключенной ВЛ до  $n$ -й удаленной ВЛ;  $z_{0n}(x)$  — модуль взаимного сопротивления нулевой последовательности (для расчета наведенного напряжения) между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и  $n$ -й удаленной ВЛ [3]:

$$z_{0n}(x) = \frac{\rho \beta_{cp} xv(x)}{\pi y_n^2}, \tag{49}$$

где  $\beta_{cp}$  определяется по (33), а  $v(x)$  — по (15).

Согласно [3] максимальное значение наведенного напряжения  $U_{nm}$  от множества удаленных ВЛ определяется как алгебраическая сумма максимальных значений напряжений  $U_{nmn}$ , наведенных каждой удаленной ВЛ. Тогда учитывая, что удаленные ВЛ расположены с двух сторон от отключенной ВЛ (см. рис. 6), а двухцепные ВЛ удваивают наведенное напряжение, получаем, что максимальное зна-

чение наведенного напряжения от множества удаленных ВЛ определяется как четырехкратная сумма бесконечного ряда, члены которого рассчитываются по выражению (48):

$$U_{nm}(x) = 4 \sum_{n=0}^{\infty} U_{nmn}(x) = 4 \sum_{n=0}^{\infty} I_{1m} z_{0n}(x) k_m = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_{1m} \rho \beta_{cp} x v(x) k_m}{\pi y_n^2}, \quad (50)$$

где начальное значение порядкового номера  $n$  удаленных ВЛ условно принято равным нулю.

Выражение для расстояния  $y_n$  можно записать как

$$y_n = S + nD, \quad (51)$$

где  $S$  – расстояние от отключенной ВЛ до ближайшей к ней удаленной ВЛ.

Тогда выражение (50) для максимального значения наведенного напряжения  $U_{nm}$  принимает вид:

$$U_{nm}(x) = \frac{4I_{1m} \rho \beta_{cp} x v(x) k_m}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(S + nD)^2}. \quad (52)$$

Используя следующее определение тригамма-функции [4]:

$$\psi_1(a) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(a+n)^2}, \quad (53)$$

выражение (52) можно преобразовать к виду:

$$U_{nm}(x) = 4U_d(x) \psi_1\left(\frac{S}{D}\right), \quad (54)$$

где

$$U_d(x) = \frac{I_{1m} \rho \beta_{cp} x v(x) k_m}{\pi D^2}. \quad (55)$$

Тригамма-функцию можно представить в виде степенного ряда [4]:

$$\psi_1(a) = \frac{1}{a} + \frac{1}{2a^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{2n}}{a^{2n+1}}, \quad (56)$$

где  $B_k$  – числа Бернулли.

Для приближенных расчетов можно ограничиться только двумя первыми членами ряда (56):

$$\psi_1(a) \approx \frac{1}{a} + \frac{1}{2a^2}. \quad (57)$$

Тогда, подставляя (57) в (54), получаем упрощенное выражение для максимального значения наведенного напряжения  $U_{nm}$  в рассматриваемой

точке отключенной ВЛ от множества удаленных ВЛ:

$$U_{nm}(x) = 4U_d(x) \frac{D}{S} \left(1 + \frac{D}{2S}\right). \quad (58)$$

**Размер зоны влияния на отключенную ВЛ.** Размер зоны влияния  $S_U$  определяется решением следующего уравнения, полученного из (54), в котором по определению принято  $U_{nm}(x) = \Delta U$ :

$$\psi_1\left(\frac{S_U}{D}\right) = \frac{\Delta U}{4U_d(x)} = \frac{\Delta U \pi D^2}{4I_{1m} \rho \beta_{cp} x v(x) k_m}. \quad (59)$$

Формально решение уравнения (59) можно записать как

$$S_U(x) = D \psi_1^{-1}\left(\frac{\Delta U}{4U_d(x)}\right) = D \psi_1^{-1}\left(\frac{\Delta U \pi D^2}{4I_{1m} \rho \beta_{cp} x v(x) k_m}\right), \quad S_U(x) > 0, \quad (60)$$

где  $\psi_1^{-1}(a)$  – обратная тригамма-функция.

На практике уравнение (59) можно без труда решить численными методами, используя системы компьютерной математики, например Mathcad.

Также уравнение (59) можно решить аналитически, используя приближенное выражение (57). Тогда уравнение (59) принимает следующий вид:

$$\frac{1}{S_U} + \frac{D}{2S_U^2} = \frac{\Delta U}{4U_d(x)D} = \frac{\Delta U \pi D}{4I_{1m} \rho \beta_{cp} x v(x) k_m}. \quad (61)$$

Решение уравнения (61):

$$S_U(x) = S_d(x) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{D}{S_d(x)}}\right); \quad (62)$$

$$S_d(x) = \frac{2U_d(x)}{\Delta U} D = \frac{2I_{1m} \rho \beta_{cp} x v(x) k_m}{\Delta U \pi D}, \quad (63)$$

где  $\beta_{cp}$  определяется по (33),  $v(x)$  – по (15), а  $k_m$  – по (37).

**Максимальный размер зоны влияния на отключенную ВЛ.** Из выражений (60), (62) следует очевидный вывод, что для каждой рассматриваемой точки отключенной ВЛ зона влияния имеет различный размер.

Для однозначности принимаем, что при заземлении отключенной ВЛ только на одном конце заземление всегда выполняется на ближайшем к рассматриваемой точке конце ВЛ. Тогда из выражения (60) с учетом (15) следует, что независимо от способа заземления отключенной ВЛ (на одном или обоих концах) зона влияния на нее имеет максимальный размер  $S_{Um}$  при расположении рассматриваемой точки посередине отключенной ВЛ. При

этом значение  $S_{Um}$  не зависит от способа заземления отключенной ВЛ.

Формально решение уравнения (59) для определения максимального размера  $S_{Um}$  зоны влияния на отключенную ВЛ можно записать как

$$S_{Um} = D\psi_1^{-1}\left(\frac{\Delta U\pi D^2}{2I_{1m}\rho\beta_{cp}lk_m}\right), \quad S_U > 0, \quad (64)$$

где  $\psi_1^{-1}(a)$  – обратная триганма-функция.

Используя для тригаммы-функции  $\psi_1(a)$  приближенное выражение (57), получаем аналитическое решение уравнения (59):

$$S_{Um} = S_{dm}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{D}{S_{dm}}}\right), \quad (65)$$

где

$$S_{dm} = \frac{I_{1m}\rho\beta_{cp}lk_m}{\Delta U\pi D}; \quad (66)$$

$\beta_{cp}$  определяется по (33), а  $k_m$  – по (37).

Очевидно, что для определения размера зоны влияния на отключенную ВЛ необходимы значения следующих величин – эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта  $\rho$ , среднего расстояния  $D$  между соседними эквивалентными удаленными ВЛ, максимально возможных значений модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательностей  $I_{1m}$ ,  $I_{2m}$  и  $I_{0m}$  в нормальном режиме в удаленных ВЛ, средней высоты  $H$  фазных проводов отключенной ВЛ, средней высоты фазных проводов удаленных ВЛ  $h_A$ ,  $h_B$ ,  $h_C$ .

Для проведения практических расчетов эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта  $\rho$  рекомендуется определять по данным [5], где согласно [6] приведены именно эквивалентные для наведенного напряжения значения  $\rho$ . При этом в качестве значения  $\rho$  не следует использовать измеренное локальное значение или среднее нескольких измеренных локальных значений удельного электрического сопротивления грунта в районе расположения отключенной ВЛ.

Расстояние  $D$  между соседними эквивалентными удаленными ВЛ рекомендуется определять как среднее расстояние между всеми реальными ВЛ напряжением 110 кВ и выше, расположенными на некоторой территории, например административной области, по известной суммарной длине этих ВЛ и известной площади территории (влиянием удаленных ВЛ напряжением ниже 110 кВ, т.е. ВЛ сетей с изолированной нейтралью и ВЛ с нулевым рабочим проводником, как правило, можно пре-

небречь). При этом следует условно принять, что все реальные ВЛ являются двухцепными.

Значения токов  $I_{1m}$ ,  $I_{2m}$  и  $I_{0m}$  в удаленных ВЛ рекомендуется определять как средневзвешенные значения максимально возможных для каждого класса напряжения (110 кВ и выше) токов соответствующих симметричных составляющих ВЛ, расположенных на некоторой территории, например административной области. При этом в качестве «веса» в первом приближении можно рассматривать суммарную длину ВЛ каждого класса напряжения на этой территории.

**Примеры расчета максимального размера зоны влияния на отключенную ВЛ.** Рассмотрим примеры определения максимального размера  $S_{Um}$  зоны влияния на отключенную ВЛ путем численного решения уравнения (59). При расчетах принято  $\Delta U = 2,5$  В;  $\rho = 30$  Ом·м (характерные для московского региона значения [5]);  $D = 10$  км;  $H = 30$  м;  $h_A = 40$  м;  $h_B = 30$  м;  $h_C = 20$  м.

Расчетные значения максимального размера зоны влияния на отключенную ВЛ длиной  $l$  при несимметричных и симметричных токовых нагрузках удаленных ВЛ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Длина $l$ отключенной ВЛ, км	Максимальный размер зоны влияния $S_{Um}$ на отключенную ВЛ (км) при токовых нагрузках удаленных ВЛ	
	несимметричных: $I_{1m}=600$ А; $I_{2m}=60$ А; $3I_{0m}=60$ А	симметричных: $I_{1m}=600$ А; $I_{2m}=0$ ; $3I_{0m}=0$
5	2,2	1,4
10	3,2	2,0
15	4,0	2,4
20	4,8	2,8
30	6,1	3,5
40	7,2	4,1
50	8,4	4,7
100	14,0	7,0

Согласно результатам расчетов максимальный размер зоны влияния на реальные ВЛ (для расчета наведенного напряжения с погрешностью  $\Delta U = 2,5$  В) исчисляется в среднем единицами и десятками километров и может достигать сотен километров в районах с большим удельным электрическим сопротивлением грунта.

Выражения (60), (62), (64), (65) помимо определения размера зоны влияния на отключенную ВЛ имеют еще одно важное применение. Они позволяют определить размер зоны опасного влияния  $S_W$  на отключенную ВЛ, которая определяется как прилегающая к отключенной ВЛ территория, которая характеризуется тем, что все расположенные за ее пределами ВЛ суммарно наводят на отключен-

ной ВЛ напряжение не более предельно допустимого значения 25 В. Очевидно, что при отсутствии в зоне опасного влияния действующих ВЛ наведенное напряжение на отключенной ВЛ не превысит предельно допустимого значения 25 В. При этом наличие в зоне опасного влияния действующих ВЛ еще не гарантирует наведение на отключенной ВЛ напряжения больше предельно допустимого значения 25 В. Таким образом, отсутствие в зоне опасного влияния действующих ВЛ является достаточным условием наведения на отключенной ВЛ напряжения не более предельно допустимого значения 25 В.

Рассмотрим примеры расчета максимального размера  $S_{Wm}$  зоны опасного влияния на отключенную ВЛ, в которых приняты те же значения параметров, что и для расчета размера  $S_{Um}$ , за исключением параметра  $\Delta U = 25$  В.

Расчетные значения максимального размера  $S_{Wm}$  зоны опасного влияния на отключенную ВЛ при несимметричных и симметричных токовых нагрузках удаленных ВЛ приведены в таблице 3.

Таблица 3

Длина отключенной линии $l$ , км	Максимальный размер зоны опасного влияния $S_{Wm}$ (км) на отключенную ВЛ при токовых нагрузках удаленных ВЛ	
	несимметричных: $I_{1m}=600$ А; $I_{2m}=60$ А; $3I_{0m}=60$ А	симметричных: $I_{1m}=600$ ; $I_{2m}=0$ ; $3I_{0m}=0$
5	0,7	0,4
10	1,0	0,6
15	1,2	0,7
20	1,4	0,9
30	1,7	1,1
40	2,0	1,2
50	2,2	1,4
100	3,2	2,0

Согласно результатам расчетов максимальный размер  $S_{Wm}$  зоны опасного влияния на реальные ВЛ исчисляется в среднем единицами километров и может достигать десятков километров в районах с большим удельным электрическим сопротивлением грунта.

В заключение следует отметить, что данный метод также применим для определения размера зоны влияния (зоны опасного влияния) в более общем случае расположения эквивалентных удаленных ВЛ: когда они образуют  $N$  параллельных рядов с расстояниями  $D_i$  между соседними ВЛ в пределах  $i$ -го ряда. Для данной расчетной модели, позволяющей более достоверно смоделировать реальные удаленные ВЛ, выражение для максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ имеет следующий вид:

$$U_{nm}(x) = 4U_d(x) \left( \frac{D_1^2}{D_N^2} \psi_1 \left( \frac{S_N}{D_N} \right) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{D_1^2}{D_i^2} \left[ \psi_1 \left( \frac{S_i}{D_i} \right) - \psi_1 \left( \frac{S_{i+1}}{D_i} \right) \right] \right), \quad (67)$$

где  $U_d(x)$  – определяется по (55), в котором  $D = D_1$ ;  $S_i$  – расстояние от отключенной ВЛ до  $i$ -го ряда удаленных ВЛ.

Формально выражение для размера зоны влияния, полученное решением уравнения (67), в котором принято  $U_{nm}(x) = \Delta U$ , можно записать как

$$S_U(x) = D_K \psi_1^{-1} \left( \frac{\Delta U}{4U_d(x)} + \psi_1 \left( \frac{S_{K+1}}{D_K} \right) - \frac{D_K^2}{D_N^2} \psi_1 \left( \frac{S_N}{D_N} \right) - \sum_{i=K+1}^{N-1} \frac{D_K^2}{D_i^2} \left[ \psi_1 \left( \frac{S_i}{D_i} \right) - \psi_1 \left( \frac{S_{i+1}}{D_i} \right) \right] \right), \quad S_U(x) \in \mathbf{R}, \quad (68)$$

$$S_U(x) > 0,$$

где  $K$  – наименьший порядковый номер рядов удаленных ВЛ, при котором вычисляемый размер  $S_U(x)$  является вещественным числом.

Используя для тригаммы-функции  $\psi_1(a)$  приближенное выражение (57), получаем следующее аналитическое решение уравнения (67):

$$S(x) = S_{\Sigma}(x) \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{D_K}{S_{\Sigma}(x)}} \right), \quad S_U(x) \in \mathbf{R}; \quad (69)$$

$$S_{\Sigma}(x) = \frac{S_d(x)}{1 + 2S_d(x)D_K \sum_{i=K+1}^N \frac{D_i - D_{i-1}}{S_i D_i D_{i-1}}}, \quad (70)$$

где  $S_d(x)$  определяется по выражению (63), в котором  $D = D_K$ .

**Выводы.** 1. Отсутствие в НТД указаний по учету какого-либо определенного числа влияющих ВЛ, а также отсутствие определения влияющей ВЛ приводит на практике к субъективному учету в качестве влияющих ВЛ только одной или нескольких произвольно выбранных ВЛ, что может привести к существенному занижению расчетного значения наведенного напряжения и, следовательно, к необеспечению электробезопасности при проведении работ на отключенной ВЛ.

2. Для определения достаточного числа влияющих линий, позволяющего провести достоверный расчет наведенного напряжения на отключенной ВЛ, а также пересчет его измеренного значения к максимальному значению, целесообразно ввести в НТД понятие зоны влияния на отключенную ВЛ и определить ее как прилегающую к отключенной ВЛ

территорию, которая характеризуется тем, что все расположенные за ее пределами ВЛ суммарно наводят на отключенной ВЛ напряжение не более некоторого пренебрежимо малого значения по сравнению с предельно допустимым значением 25 В.

3. Для достоверного расчета наведенного напряжения на отключенной ВЛ, а также пересчета его измеренного значения к максимальному значению следует учитывать влияние всех ВЛ, расположенных в зоне влияния на отключенную ВЛ. Целесообразно ввести в НТД определение влияющей ВЛ, как ВЛ, расположенной в зоне влияния на отключенную ВЛ.

4. Для определения на практике достаточного числа влияющих ВЛ для достоверного расчета наведенного напряжения на отключенной ВЛ, а также пересчета его измеренного значения к максимальному значению целесообразно использовать разработанный расчетный метод определения размера зоны влияния на отключенную ВЛ.

5. Согласно проведенным по разработанному методу расчетам размер зоны влияния на реальные ВЛ исчисляется в среднем единицами и десятками километров и может достигать сотен километров в районах с большим удельным электрическим сопротивлением грунта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. — Bell Systems Technical Journal, vol. 5, iss. 4, 1926, pp. 539—554.
2. Глушко В.И. К решению классической задачи магнитного влияния воздушных линий электропередачи на протяженные проводящие коммуникации. — Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, 2013, № 2, с. 5—10.
3. Горшков А.В. Определение максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи. — Электричество, 2017, № 11, с. 12—21.
4. Абрамович М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. — М.: Наука, 1979, 832 с.
5. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линии электропередачи. Ч. 1. Общие положения. Опасные влияния. — М., Л.: Энергия, 1966, 42 с.
6. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. — М.: Связь, 1979, 264 с.

[04.12.2017]

Автор: Горшков Андрей Вячеславович в 1994 г. окончил Московский энергетический институт (Технический университет) (МЭИ (ТУ)). В 1999 г. защитил кандидатскую диссертацию «Анализ состояния находящихся в эксплуатации заземляющих устройств с точки зрения требований электробезопасности и термической стойкости кабелей вторичных цепей в МЭИ (ТУ).

Elektrichestvo, 2018, No. 6, pp. 4–15

DOI:10.24160/0013-5380-2018-6-4-15

## Determining the Number of Influencing Lines for Calculating the Voltage Induced on the Disconnected Overhead Power Line

GORSHKOV Andrei V. (LLC «NPF ELNAP», Moscow, Russia) — Head of the Project Department, Cand, Sci. (Eng.)

*The existing practice of subjectively taking into account only one or more arbitrarily selected overhead lines as influencing ones may yield an essentially underestimated assessment of the induced voltage. For determining the number of influencing lines sufficient for reliably calculating the voltage induced on the disconnected overhead line, the notion of influencing zone on the disconnected power line is introduced. All overhead power lines located in the zone of influence on the disconnected overhead line are regarded as influencing lines. A numerical method for determining the size of the zone of influence on the disconnected overhead line is developed, which opens the possibility of determining in practice the sufficient number of influencing lines for reliably calculating the voltage induced on the disconnected overhead line. The developed method has been used for calculating the zone of influence on real overhead lines.*

Key words: overhead power line, influencing line, number of influencing lines, influence zone, induced voltage, calculation

## REFERENCES

1. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. — Bell Systems Technical Journal, vol. 5, iss. 4, 1926, pp. 539—554.
2. Glushko V.I. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii...* — in Russ. (Energy. News of higher educational establishment and power associations of the CIS), 2013, No. 2. Pp. 12—21.
3. Gorshkov A.V. *Elektrichestvo* — in Russ. (Electricity), 2017, No. 11, pp. 12—21.
4. Abramovich M., Stigan I. *Spravochnik po spetsial'nykh funktsiyam* — in Russ. (Reference book on the special functions), Moscow, Publ. «Nauka», 1979, 832 p.

5. *Pравила zashchity ustroystv provodnoi svyazi, zheleznodorozhnoi signalizatsii...* Chast' 1. Obshchiye polozheniya. Opasnye vliyaniya. (Rules of defence of devices of wire connection, railway signaling... Part 1. Cererals. Harmfull effects. Moscow, Leningrad, Publ. «Energiya», 1966, 42 p.

6. Mikhailov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. *Elektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi* — in Russ. (Electromagnetic influences on building of connection). Moscow, Publ. «Svyaz'», 1979, 264 p.

[04.12.2017]