

Определение максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи

ГОРШКОВ А.В.

Указание «Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» о выполнении измерений значений наведенного напряжения с последующим их пересчетом на наибольший рабочий ток влияющих воздушных линий (ВЛ) не позволяет достоверно определить максимальное значение наведенного напряжения в любой точке отключенной ВЛ. Для расчета этого значения использован метод симметричных составляющих. Сформулирован критерий наведения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ напряжения максимального значения и определена наихудшая комбинация токов во влияющих ВЛ, удовлетворяющая данному критерию. Установлено, что решающее влияние на максимальное значение наведенного напряжения оказывает несимметрия фазных токов во влияющих ВЛ в нормальном режиме. Также установлено, что для достоверного пересчета измеренного значения наведенного напряжения необходимо знать математическое выражение для функции наведенного напряжения в каждой рассматриваемой точке отключенной ВЛ и комплексные значения фазных токов во влияющих ВЛ в момент проведения измерения. Разработаны методы достоверного определения максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ расчетным путем и путем пересчета его измеренного значения.

Ключевые слова: линия электропередачи, наведенное напряжение, максимальное значение, расчет, пересчет измеренного значения

Задача определения максимального значения наведенного напряжения в некоторой рассматриваемой точке отключенной ВЛ возникла много десятилетий тому назад. За это время по проблеме наведенного напряжения опубликовано множество работ, но эта задача остается актуальной до сих пор.

Объясняется это тем, что основное внимание в работах уделяется методам расчета наведенного напряжения и анализу результатов его расчета и измерений. При этом задача определения именно максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ, т.е. максимально возможного значения, которое наведенное напряжение может принять при изменении токов во влияющих ВЛ в пределах диапазонов их возможных значений, авторами работ практически не рассматривается. Как правило, в работах только упоминается о необходимости проведения расчета значений наведенного напряжения при наибольших рабочих токах во влияющих ВЛ или проведения пересчета измеренных значений наведенного напряжения на наибольшие рабочие токи во влияющих ВЛ.

На первый взгляд, такой способ определения максимального значения наведенного напряжения логичен и поэтому не вызывает сомнений. По этой

причине этот способ утвержден новой редакцией [1], где п. 38.43 гласит: «Эксплуатирующим организациям необходимо определить линии (участки линий), находящиеся под наведенным напряжением, путем выполнения измерений с последующим перерасчетом значений на наибольший рабочий ток влияющей ВЛ».

Такой же подход к определению максимальных значений наведенного напряжения был принят и в предыдущих редакциях правил по охране труда.

В действительности, этот способ не позволяет определить именно максимально возможное значение наведенного напряжения в любой точке отключенной ВЛ и, следовательно, может привести к ошибочному выводу об отсутствии на отключенной ВЛ наведенного напряжения недопустимых значений. Очевидно, что такой ошибочный вывод может привести к серьезным последствиям.

Для обоснования этого утверждения рассмотрим реальный пример расположения отключенной и влияющих ВЛ.

Отключенная и заземленная только на своих концах ВЛ 220 кВ имеет длину 20 км. Влияющие на нее две ВЛ 220 кВ являются одной двухцепной ВЛ, которая имеет параллельный отключенной ВЛ участок длиной 10 км, расположенный от нее на расстоянии 500 м (рис. 1). Рассматриваемая точка

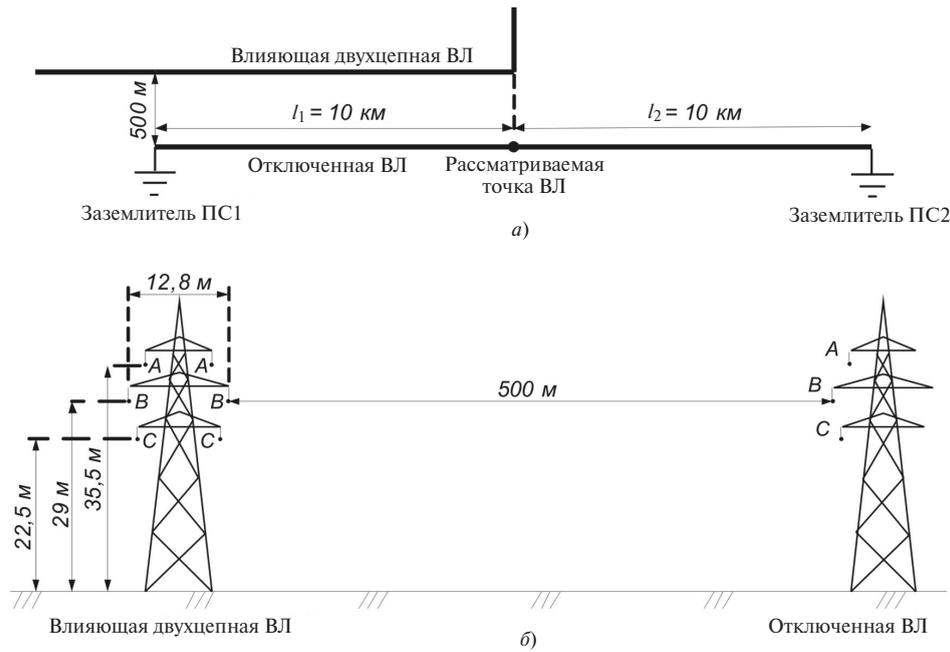


Рис. 1. Пример расположения отключенной и влияющей двухцепной ВЛ: а — план расположения отключенной и влияющей двухцепной ВЛ; б — вид ВЛ в плоскости, перпендикулярной их направлениям и поверхности земли

отключенной ВЛ, в которой требуется определить максимальное значение наведенного напряжения, расположена посередине отключенной ВЛ. В данной точке выполнено уравнивание потенциалов фазных проводов без их заземления.

Следует отметить, что наличие двухцепной ВЛ не является принципиальным условием. В данном случае она приведена как наиболее распространенный тип влияющей ВЛ.

Расчетная схема замещения отключенной ВЛ для определения значения наведенного напряжения U_H представлена на рис. 2, где $\dot{E}_{A1}, \dot{E}_{B1}, \dot{E}_{C1}$ — ЭДС, наведенные на соответствующих фазных проводах первого участка отключенной ВЛ; $\dot{E}_{A2}, \dot{E}_{B2}, \dot{E}_{C2}$ — то же второго участка; x_{A1}, x_{B1}, x_{C1} — индуктивные сопротивления соответствующих фазных проводов первого участка отключенной ВЛ; x_{A2}, x_{B2}, x_{C2} — то же второго участка; $M_{AB1}, M_{AC1}, M_{BC1}$ — взаимные индуктивности между соответствующими фазными проводами первого участка отключенной ВЛ; $M_{AB2}, M_{AC2}, M_{BC2}$ — то же второго

участка; 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 в отключенной и влияющих ВЛ, что позволяет применить для расчета ЭДС \dot{E} , наведенной на некотором проводе отключенной ВЛ гармоническим током \dot{I} в параллельном ему проводе влияющей ВЛ, выражение [2]:

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

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 проводниками; k — волновое число грунта:

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

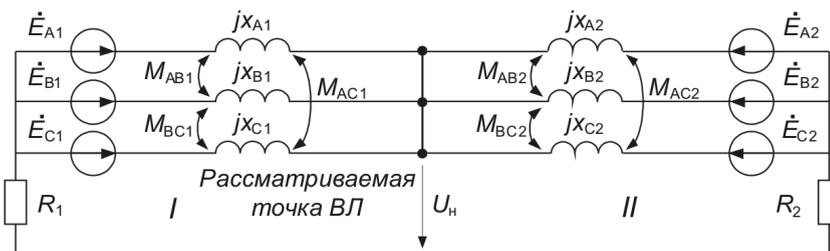


Рис. 2. Расчетная схема замещения отключенной ВЛ: I — первый участок ВЛ; II — второй участок

Здесь ρ – 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.

Взаимная индуктивность M между фазными проводами отключенной ВЛ определяются из выражения, аналогичного (1), как отношение $\dot{E} / (-j\omega \dot{I})$.

Выражение для расчета наведенного напряжения U_H для рассматриваемого примера в статье не приводится. При этом очевидно, что получить его для приведенной на рис. 2 схемы замещения не представляет никакого труда.

При расчетах значения сопротивлений заземлителей подстанций приняты равными $R_1 = R_2 = 0,1$ Ом; значение эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта $\rho = 250$ Ом·м; индуктивные сопротивления фазных проводов отключенной ВЛ – 0,5 Ом/км. Также принято, что в одноименных фазных проводах обеих влияющих ВЛ протекают токи равных комплексных значений.

Результаты расчета значений наведенного напряжения U_H в рассматриваемой точке отключенной ВЛ при различных значениях фазных токов во влияющих ВЛ приведены в таблице.

Приведенные в таблице результаты расчетов позволяют провести следующий «теоретический» эксперимент. Допустим, что измеренное значение наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ из приведенного примера равно 2,6 В при симметричных токовых нагрузках влияющих ВЛ в 600 А.

Известно, что наибольшие рабочие токи во влияющих ВЛ равны 1200 А. Тогда согласно [1] максимальное значение наведенного напряжения, т.е. его значение при наибольших рабочих токах во влияющих ВЛ, в рассматриваемой точке отключенной ВЛ составит 5,2 В, что меньше предельно допустимого значения 25 В. Следовательно, данная

ВЛ согласно [1] не является «ВЛ под наведенным напряжением» (можно показать, что в остальных точках данной ВЛ наведенное напряжение будет еще меньше, чем на рассматриваемой точке).

Однако, если в нормальном режиме во влияющей ВЛ возникает даже сравнительно небольшой ток небаланса $3I_0 = |\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C|$, что на практике всегда имеет место, то значение наведенного напряжения может во много раз превысить его значение при симметричной токовой нагрузке влияющей ВЛ. Так, в приведенном примере при возникновении в обеих влияющих ВЛ токов небаланса, равных 10 % наибольшего рабочего тока 1200 А, наведенное напряжение в рассматриваемой точке ВЛ увеличивается в 20 раз и достигает 104 В, что превышает предельно допустимое значение 25 В.

Более того, наведенное напряжение может во много раз превысить измеренное значение даже при уменьшении токовых нагрузок влияющих ВЛ. Так, в том же примере при уменьшении токов во влияющих ВЛ в 2 раза по сравнению с токами при проведении измерения – до 300 А и возникновении 10%-х токов небаланса – наведенное напряжение увеличивается в 10 раз и достигает 26 В, что превышает предельно допустимое значение 25 В. Таким образом, отключенная ВЛ из приведенного примера должна быть вопреки [1] отнесена к «ВЛ под наведенным напряжением».

Следует отметить, что приведенный пример не является исключением из правил. Напротив, он демонстрирует неучтенную в [1] реальную ситуацию наличия несимметрии фазных токов во влияющих ВЛ в нормальном режиме и влияние этой несимметрии на значение наведенного напряжения.

Таким образом, указание [1] о пересчете измеренного значения наведенного напряжения на наибольший рабочий ток влияющих ВЛ не соответствует требованиям электробезопасности, так как не позволяет достоверно определить максимальное значение наведенного напряжения в любой точке

Номер п/п	Комплексные значения фазных токов			Ток небаланса $3I_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C $, А	Наведенное напряжение, В
	I_A , А/Угол	I_B , А/Угол	I_C , А/Угол		
1	600/0	600/120°	600/240°	0	2,6
2	1200/0	1200/120°	1200/240°	0	5,2
3	300/0	300/120°	300/240°	0	1,3
4	300/0	270/120°	270/240°	30	26
5	300/0	300/116,7°	300/243,3°		
6	315/0	285/120°	285/240°		
7	1200/0	1080/120°	1080/240°	120	104
8	1200/0	1200/116,7°	1200/243,3°		
9	1260/0	1140/120°	1140/240°		

отключенной ВЛ. При этом приведенное в п. 4.4 [1] определение «ВЛ под наведенным напряжением» также не соответствует требованиям электробезопасности и требует изменения формулировки.

Далее рассматриваются два метода достоверного определения максимального значения наведенного напряжения – расчетом и пересчетом его измеренного значения.

Определение максимального значения наведенного напряжения расчетом. Принимаем, что продольные электрические сопротивления и поперечные проводимости всех проводов отключенной и влияющих ВЛ являются линейными элементами, не зависящими от токов и напряжений.

Тогда, учитывая, что рассматриваются установившиеся гармонические режимы изменения токов и напряжений, из уравнений электромагнитного поля в комплексной форме записи следует, что наведенное напряжение \dot{U}_H всегда прямо пропорционально создающим его токам во влияющих ВЛ:

$$\dot{U}_H = \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{Ai} \dot{z}_{Ai} + \dot{I}_{Bi} \dot{z}_{Bi} + \dot{I}_{Ci} \dot{z}_{Ci}), \quad (3)$$

где N – число влияющих ВЛ; \dot{I}_{Ai} , \dot{I}_{Bi} , \dot{I}_{Ci} – фазные токи в i -й влияющей ВЛ; \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} – взаимные сопротивления между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и фазными проводами i -й влияющей ВЛ.

Для каждой точки отключенной и заземленной некоторым образом ВЛ взаимные сопротивления \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} являются постоянными величинами – параметрами функции \dot{U}_H , аргументами которой являются токи \dot{I}_{Ai} , \dot{I}_{Bi} , \dot{I}_{Ci} . Для определения максимума функции вид выражений для расчета ее параметров не принципиален, поэтому выражения для расчета взаимных сопротивлений \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} в данной статье не приводятся (считается, что они известны).

Для определения максимального значения наведенного напряжения преобразуем выражение (3), используя метод симметричных составляющих [3]. Тогда выражение для наведенного напряжения

$$\begin{aligned} \dot{U}_H &= \sum_{i=1}^N (\dot{U}_{1i} + \dot{U}_{2i} + \dot{U}_{0i}) = \\ &= \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{1i} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2i} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0i} \dot{z}_{0i}), \end{aligned} \quad (4)$$

где \dot{U}_{1i} , \dot{U}_{2i} , \dot{U}_{0i} – составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности наведенного напряжения от i -й влияющей ВЛ; \dot{I}_{1i} , \dot{I}_{2i} , \dot{I}_{0i} – токи

прямой, обратной и нулевой последовательности в i -й влияющей ВЛ в нормальном режиме; \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} – взаимные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й влияющей ВЛ.

Токи и взаимные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности определяются по следующим выражениям:

$$\dot{I}_{1i} = \frac{\dot{I}_{Ai} + \dot{I}_{Bi} \dot{a} + \dot{I}_{Ci} \dot{a}^2}{3}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_{2i} = \frac{\dot{I}_{Ai} + \dot{I}_{Bi} \dot{a}^2 + \dot{I}_{Ci} \dot{a}}{3}; \quad (6)$$

$$\dot{I}_{0i} = \frac{\dot{I}_{Ai} + \dot{I}_{Bi} + \dot{I}_{Ci}}{3}; \quad (7)$$

$$\dot{z}_{1i} = \dot{z}_{Ai} + \dot{z}_{Bi} \dot{a}^2 + \dot{z}_{Ci} \dot{a}; \quad (8)$$

$$\dot{z}_{2i} = \dot{z}_{Ai} + \dot{z}_{Bi} \dot{a} + \dot{z}_{Ci} \dot{a}^2; \quad (9)$$

$$\dot{z}_{0i} = \frac{\dot{z}_{Ai} + \dot{z}_{Bi} + \dot{z}_{Ci}}{3}, \quad (10)$$

где $\dot{a} = e^{j2\pi/3}$ – оператор поворота.

Выражения (8) – (10) позволяют оценить вклад каждой составляющей \dot{U}_{1i} , \dot{U}_{2i} , \dot{U}_{0i} в результирующее значение наведенного напряжения \dot{U}_H .

Согласно (8) и (9) взаимные сопротивления прямой и обратной последовательности \dot{z}_{1i} и \dot{z}_{2i} определяются как геометрические суммы взаимных фазных сопротивлений \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} , сдвинутых в комплексной плоскости на 120° относительно друг друга с помощью оператора поворота \dot{a} . В большинстве случаев сопротивления \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} примерно равны по модулю и аргументу (исключением является случай, когда расстояние между отключенной и влияющей ВЛ сравнимо с расстояниями между фазными проводами ВЛ; например, когда отключенная и влияющая ВЛ являются одной двухцепной ВЛ). Следовательно, в результате геометрического сложения модули z_{1i} и z_{2i} взаимных сопротивлений прямой и обратной последовательности оказываются много меньше модулей взаимных фазных сопротивлений z_{Ai} , z_{Bi} , z_{Ci} .

При этом взаимное сопротивление нулевой последовательности \dot{z}_{0i} , согласно (10) является средним значением взаимных фазных сопротивлений \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} . Следовательно, модуль взаимного сопротивления нулевой последовательности сравним с модулями взаимных фазных сопротивлений, из чего следует, что модуль z_{0i} много больше модулей

взаимных сопротивлений прямой и обратной последовательности \dot{z}_{1i} и \dot{z}_{2i} :

$$\dot{z}_{0i} \gg \dot{z}_{1i}, \quad \dot{z}_{0i} \gg \dot{z}_{2i}. \quad (11)$$

Следует отметить, что в любом случае для реальных ВЛ модуль \dot{z}_{0i} , как минимум, на порядок больше модулей \dot{z}_{1i} и \dot{z}_{2i} .

При симметричных токовых нагрузках влияющих ВЛ токи обратной и нулевой последовательности в них равны нулю и наведенное напряжение создается только токами прямой последовательности. В этом случае выражение для определения наведенного напряжения в соответствии с (4) имеет вид:

$$\dot{U}_H = \sum_{i=1}^N \dot{U}_{1i} = \sum_{i=1}^N \dot{I}_{1i} \dot{z}_{1i}, \quad (12)$$

где взаимные сопротивления прямой последовательности \dot{z}_{1i} определяются по (8).

Выражение (12) позволяет сделать вывод, что для расчета наведенного напряжения при симметричных токовых нагрузках некоторых влияющих ВЛ каждую из этих трехфазных ВЛ можно заменить эквивалентной однофазной ВЛ с током \dot{I}_{1i} и взаимным сопротивлением \dot{z}_{1i} , модуль которого много меньше модулей взаимных фазных сопротивлений \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} .

При несимметрии фазных токов во влияющих ВЛ в нормальном режиме значения токов прямой последовательности \dot{I}_{1i} много больше значений токов обратной и нулевой последовательности \dot{I}_{2i} и \dot{I}_{0i} . Тогда из (4) с учетом (11) следует, что в нормальном режиме наименьший вклад от каждой влияющей ВЛ в результирующее значение наведенного напряжения \dot{U}_H вносит составляющая обратной последовательности $\dot{U}_{2i} = \dot{I}_{2i} \dot{z}_{2i}$.

Что касается соотношения вклада составляющих прямой и нулевой последовательности \dot{U}_{1i} и \dot{U}_{0i} наведенного напряжения, то для каждой влияющей ВЛ оно различно и зависит от соотношения значений тока прямой последовательности \dot{I}_{1i} и тока небаланса $3\dot{I}_{0i}$ для данной ВЛ.

Чем больше значение тока небаланса $3\dot{I}_{0i}$ во влияющей ВЛ, тем больше по модулю составляющая нулевой последовательности наведенного напряжения \dot{U}_{0i} по сравнению с составляющей прямой последовательности \dot{U}_{1i} . Так, при значении тока нулевой последовательности \dot{I}_{0i} , равном всего нескольким процентам тока прямой последовательности \dot{I}_{1i} , составляющая нулевой последовательности наведенного напряжения $\dot{U}_{0i} = 3\dot{I}_{0i} \dot{z}_{0i}$ может во много раз превысить по модулю состав-

ляющую прямой последовательности $\dot{U}_{1i} = \dot{I}_{1i} \dot{z}_{1i}$ (см. данные таблицы) за счет многократного превышения модуля сопротивления \dot{z}_{0i} модуля сопротивления \dot{z}_{1i} (см. (11)).

Таким образом, во влияющих ВЛ при значениях токов небаланса $3\dot{I}_{0i}$ больше некоторых предельных значений составляющими наведенных напряжений прямой и, тем более, обратной последовательности можно пренебречь, и результирующее наведенное напряжение будет определяться практически только составляющими нулевой последовательности:

$$\dot{U}_H = \sum_{i=1}^N \dot{U}_{0i} = \sum_{i=1}^N 3\dot{I}_{0i} \dot{z}_{0i}, \quad (13)$$

где взаимные сопротивления нулевой последовательности \dot{z}_{0i} определяются по (10).

Полученное выражение (13) позволяет сделать вывод, что для расчета наведенного напряжения при протекании в некоторых влияющих ВЛ значительных токов небаланса каждую из этих трехфазных ВЛ можно заменить эквивалентной однофазной ВЛ с током $3\dot{I}_{0i}$ и взаимным сопротивлением \dot{z}_{0i} , которое является средним значением взаимных фазных сопротивлений \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} .

Выражение (4) в отличие от (3) позволяет сформулировать критерий наведения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ напряжения максимального значения: наведенное напряжение принимает максимально возможное значение U_{Hm} тогда, когда его составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности \dot{U}_{1i} , \dot{U}_{2i} и \dot{U}_{0i} от всех влияющих ВЛ принимают максимально возможные по модулю значения и при этом являются синфазными. В этом случае результирующее наведенное напряжение определяется как алгебраическая сумма модулей всех составляющих \dot{U}_{1i} , \dot{U}_{2i} и \dot{U}_{0i} , что и предопределяет максимум наведенного напряжения.

Тогда выражение для максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Hm} &= \sum_{i=1}^N (U_{1mi} + U_{2mi} + U_{0mi}) = \\ &= \sum_{i=1}^N (I_{1mi} \dot{z}_{1i} + I_{2mi} \dot{z}_{2i} + 3I_{0mi} \dot{z}_{0i}), \end{aligned} \quad (14)$$

где U_{1mi} , U_{2mi} , U_{0mi} – максимально возможные значения модулей составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности наведенного напряжения от i -й влияющей ВЛ; I_{1mi} , I_{2mi} , I_{0mi} –

максимально возможные значения модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательности в i -й влияющей ВЛ при изменении ее фазных токов \dot{I}_{Ai} , \dot{I}_{Bi} , \dot{I}_{Ci} в нормальном режиме в пределах диапазонов их возможных значений.

При этом значения I_{1mi} , I_{2mi} , I_{0mi} должны быть определены либо в результате статистической обработки данных диспетчерских служб о диапазонах возможных значений фазных токов ВЛ, либо расчетом при известной схеме электрической сети.

Выражения (4) и (14) с учетом сформулированного ранее критерия позволяют определить наилучшую комбинацию фазных токов \dot{I}_{Ai} , \dot{I}_{Bi} , \dot{I}_{Ci} во влияющих ВЛ в нормальном режиме, при которой в рассматриваемой точке отключенной ВЛ наводится напряжение максимального значения U_{nm} .

Этой комбинацией является такая совокупность фазных токов \dot{I}_{Ai} , \dot{I}_{Bi} , \dot{I}_{Ci} , при которой во всех влияющих ВЛ токи прямой, обратной и нулевой последовательности имеют максимально возможные по модулю значения I_{1mi} , I_{2mi} , I_{0mi} и такие значения углов сдвига фаз, при которых в рассматриваемой точке отключенной ВЛ составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности наведенного напряжения от всех влияющих ВЛ \dot{U}_{1i} , \dot{U}_{2i} и \dot{U}_{0i} являются синфазными.

Следует отметить, что такая комбинация токов во влияющих ВЛ вполне возможна, хотя, может быть, и имеет небольшую вероятность ее возникновения, особенно при большом числе влияющих ВЛ. В любом случае определенное по выражению (14) максимальное значение наведенного напряжения является наибольшим теоретически возможным значением наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ, которое может возникнуть при изменении фазных токов \dot{I}_{Ai} , \dot{I}_{Bi} , \dot{I}_{Ci} во влияющих ВЛ в пределах диапазонов их возможных значений.

Для удобства проведения расчетов выражение (14) можно преобразовать к виду, который позволяет определить максимальное значение наведенного напряжения по максимально возможным значениям относительных токов обратной и нулевой последовательности (по максимально возможной несимметрии фазных токов) во влияющих ВЛ в нормальном режиме:

$$U_{nm} = \sum_{i=1}^N I_{1mi} z_{0i} k_{mi}, \quad (15)$$

где k_{mi} — максимальный коэффициент влияния i -й влияющей ВЛ:

$$k_{mi} = \delta z_{1i} + \delta I_{2mi} \delta z_{2i} + \delta I_{0mi}. \quad (16)$$

Здесь δz_{1i} — относительное взаимное сопротивление прямой последовательности между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й влияющей ВЛ:

$$\delta z_{1i} = z_{1i} / z_{0i}; \quad (17)$$

δz_{2i} — относительное взаимное сопротивление обратной последовательности между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й влияющей ВЛ:

$$\delta z_{2i} = z_{2i} / z_{0i}; \quad (18)$$

δI_{2mi} — максимальный коэффициент обратной последовательности тока (максимальный относительный ток обратной последовательности) i -й влияющей ВЛ в нормальном режиме:

$$\delta I_{2mi} = I_{2mi} / I_{1mi}; \quad (19)$$

δI_{0mi} — максимальный коэффициент нулевой последовательности тока (максимальный относительный ток небаланса) i -й влияющей ВЛ в нормальном режиме:

$$\delta I_{0mi} = 3I_{0mi} / I_{1mi}. \quad (20)$$

Отметим, что максимальный коэффициент влияния влияющей ВЛ k_{mi} имеет определенный физический смысл — он показывает, насколько максимальное значение напряжения, наведенного i -й влияющей трехфазной ВЛ, отличается от напряжения, наведенного эквивалентной ей однофазной ВЛ с током \dot{I}_{1mi} и взаимным сопротивлением z_{0i} , равным среднему значению взаимных фазных сопротивлений z_{Ai} , z_{Bi} , z_{Ci} .

Рассмотрим пример определения максимального значения наведенного напряжения по выражению (15).

Для некоторой влияющей ВЛ в нормальном режиме максимально возможное значение тока прямой последовательности составляет $I_{1m} = 1200$ А, максимальный коэффициент обратной последовательности тока равен $\delta I_{2m} = 0,1$, максимальный относительный ток небаланса равен $\delta I_{0m} = 0,2$. Расчетные значения модулей сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и влияющей ВЛ составляют $z_1 = 0,01$ Ом, $z_2 = 0,01$ Ом, $z_0 = 0,5$ Ом. Тогда рассчитанный по (16) максимальный коэффициент несимметрии влияющей ВЛ составит $k_m = 0,222$, а максимальное значение наведенного напряжения в рассматриваемой точке ВЛ согласно (15) составит $U_{nm} = 1200 \times 0,5 \times 0,222 = 133$ В.

Следует отметить, что при расчете в соответствии с [1], т.е. с учетом только наибольшего рабочего тока во влияющей ВЛ при ее симметричной токовой нагрузке, максимальное значение наведенного напряжения на рассматриваемом рабочем месте ВЛ составит

$1200 \times 0,01 = 12$ В, что на порядок меньше значения, определенного с учетом максимально возможной несимметрии фазных токов во влияющей ВЛ.

Очевидно, что при наличии нескольких влияющих ВЛ максимальное значение наведенного напряжения U_{nm} определяется как алгебраическая сумма максимальных значений напряжений U_{nmi} , наведенных каждой ВЛ.

Определение максимального значения наведенного напряжения пересчетом его измеренного значения.

Указание [1] на пересчет измеренного значения наведенного напряжения $U_{н.изм}$ подразумевает, что он должен проводиться с помощью коэффициента K_{max} , который определяется как отношение наибольшего рабочего тока во влияющей ВЛ к току в ней в момент проведения измерения.

Очевидно, что такой способ определения коэффициента пересчета K_{max} , даже если не учитывать влияние несимметрии фазных токов на значение наведенного напряжения, в принципе, возможен либо при наличии всего одной влияющей ВЛ, либо для случая нескольких влияющих ВЛ, рабочие токи в которых в момент проведения измерения были в одинаковое число раз меньше их наибольших рабочих токов.

В общем случае при наличии нескольких влияющих ВЛ и несимметрии их фазных токов коэффициент пересчета K_{max} представляет собой сложное выражение, определяемое как отношение модуля значения некоторой известной комплексной функции наведенного напряжения $\dot{U}_H(\dot{I}_{1i}, \dot{I}_{2i}, \dot{I}_{0i})$ в рассматриваемой точке ВЛ, аргументы которой – комплексные токи прямой, обратной и нулевой последовательности – во влияющих ВЛ в нормальном режиме принимают максимально возможные по модулю значения $\dot{I}_{1mi}, \dot{I}_{2mi}, \dot{I}_{0mi}$ и такие значения углов сдвига фаз, при которых наведенное напряжение будет максимальным, к модулю значения этой же функции при аргументах, равных комплексным значениям $\dot{I}_{1измi}, \dot{I}_{2измi}, \dot{I}_{0измi}$ токов во влияющих ВЛ в момент проведения измерения.

Выражение для коэффициента пересчета K_{max} с учетом синфазности всех составляющих функции $\dot{U}_H(\dot{I}_{1mi}, \dot{I}_{2mi}, \dot{I}_{0mi})$ (т.е. наведенное напряжение принимает максимальное значение) имеет следующий вид:

$$K_{max} = \frac{|\dot{U}_H(\dot{I}_{1mi}, \dot{I}_{2mi}, \dot{I}_{0mi})|}{|\dot{U}_H(\dot{I}_{1измi}, \dot{I}_{2измi}, \dot{I}_{0измi})|} =$$

$$= \frac{U_{nm}(I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi})}{|\dot{U}_H(\dot{I}_{1измi}, \dot{I}_{2измi}, \dot{I}_{0измi})|}, \quad (21)$$

где $U_{nm}(I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi})$ – вещественная функция максимального значения наведенного напряжения, вещественными аргументами которой являются максимально возможные значения модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательности во влияющих ВЛ в нормальном режиме.

Необходимым условием для корректного пересчета является равенство модуля значения функции наведенного напряжения $\dot{U}_H(\dot{I}_{1i}, \dot{I}_{2i}, \dot{I}_{0i})$ при аргументах, равных значениям токов во влияющих ВЛ в момент проведения измерения, измеренному значению наведенного напряжения:

$$|\dot{U}_H(\dot{I}_{1измi}, \dot{I}_{2измi}, \dot{I}_{0измi})| = U_{н.изм}. \quad (22)$$

Невыполнение равенства (22) будет означать, что либо функция $\dot{U}_H(\dot{I}_{1i}, \dot{I}_{2i}, \dot{I}_{0i})$ недостоверно описывает зависимость наведенного напряжения, либо ее аргументы и параметры имеют недостоверные значения.

Тогда максимальное значение наведенного напряжения в результате пересчета с учетом (21) и (22) должно определяться как

$$U_{н.пер} = K_{max} U_{н.изм} = U_{nm}(I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi}). \quad (23)$$

В результате приходим к очевидному и в то же время парадоксальному, на первый взгляд, выводу, что максимальное значение наведенного напряжения $U_{н.пер}$ в рассматриваемой точке отключенной ВЛ при пересчете должно определяться как значение некоторой известной функции $U_{nm}(I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi})$ при максимально возможных значениях модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательности во всех влияющих ВЛ.

Парадоксальным в данном случае представляется тот факт, что в итоговой части выражения (23) для пересчета измеренного значения наведенного напряжения отсутствует собственно измеренное значение наведенного напряжения $U_{н.изм}$.

В действительности ничего парадоксального в этом нет. Согласно (4) и (14) функции $\dot{U}_H(\dot{I}_{1i}, \dot{I}_{2i}, \dot{I}_{0i})$ и $U_{nm}(I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi})$, помимо своих аргументов – токов во влияющих ВЛ – содержат и параметры – взаимные сопротивления $\dot{z}_{1i}, \dot{z}_{2i}, \dot{z}_{0i}$, которые, в свою очередь, содержат другие параметры – топографические и геометрические размеры отключенной и влияющих ВЛ, сопротивления заземлителей и проводов отключен-

ной ВЛ и удельное электрическое сопротивление грунта (например, выражения (1), (2)). Следовательно, для проведения пересчета измеренного значения наведенного напряжения $U_{н.изм}$ необходимо знать значения этих параметров. При этом, если топографию ВЛ, их геометрические размеры и значения сопротивлений можно определить в результате соответствующих изысканий и по справочным данным, то определить достоверное значение удельного электрического сопротивления грунта ρ не представляется возможным.

Объясняется это тем, что в функциях $\dot{U}_н(I_{1i}, I_{2i}, I_{0i})$ и $U_{нм}(I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi})$ параметром ρ является 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, которая согласно проведенным расчетам составляет от нескольких сотен метров до нескольких километров.

При этом можно утверждать, что существующими методами измерений невозможно достоверно определить эквивалентное удельное сопротивление слоя грунта толщиной до нескольких километров для территории таких размеров. Тем более нет никаких оснований полагать, что некоторое измеренное локальное значение или среднее нескольких локальных значений удельного сопротивления грунта будут соответствовать его эквивалентному значению для всей территории расположения отключенной и влияющих ВЛ.

Тогда очевидным остается только один вариант достоверного определения значения ρ – по измеренному значению наведенного напряжения $U_{н.изм}$ решением уравнения (22), которое для наглядности запишем в следующем виде:

$$\left| \dot{U}_н(\rho_{изм}, \dot{I}_{1измi}, \dot{I}_{2измi}, \dot{I}_{0измi}) \right| = U_{н.изм}, \quad (24)$$

где $\rho_{изм}$ – корень данного уравнения.

Такой способ определения значения ρ позволяет объяснить описанный ранее парадокс отсутствия в итоговой части выражения (23) для пересчета измеренного значения наведенного напряжения собственно измеренного значения $U_{н.изм}$. В действительности в выражении (23) значение $U_{н.изм}$ присутствует в функции $U_{нм}(I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi})$ в неявном виде – в значении ее параметра $\rho = \rho_{изм}$.

В результате выражение (23) для пересчета измеренного значения наведенного напряжения $U_{н.изм}$ в максимальное значение $U_{н.пер}$ с учетом (15) имеет вид:

$$U_{н.пер} = \sum_{i=1}^N I_{1mi} z_{0i}(\rho_{изм}) k_{mi}(\rho_{изм}), \quad (25)$$

где $k_{mi}(\rho_{изм})$ – максимальный коэффициент влияния i -й ВЛ, рассчитываемый при $\rho = \rho_{изм}$:

$$k_{mi}(\rho_{изм}) = \delta z_{1i}(\rho_{изм}) + \delta I_{2mi} \delta z_{2i}(\rho_{изм}) + \delta I_{0mi}, \quad (26)$$

где $\delta z_{1i}(\rho_{изм})$ и $\delta z_{2i}(\rho_{изм})$ – относительные взаимные сопротивления прямой и обратной последовательности между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й влияющей ВЛ, рассчитываемые по выражениям (17) и (18) при $\rho = \rho_{изм}$; δI_{2mi} и δI_{0mi} – максимальные значения коэффициентов обратной и нулевой последовательности тока i -й влияющей ВЛ в нормальном режиме по выражениям (19) и (20).

При этом значение $\rho_{изм}$ эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта определяется численным решением следующего уравнения в неявном виде:

$$\left| \sum_{i=1}^N \left[\dot{I}_{Аизмi} \dot{z}_{Ai}(\rho_{изм}) + \dot{I}_{Визмi} \dot{z}_{Bi}(\rho_{изм}) + \dot{I}_{Сизмi} \dot{z}_{Ci}(\rho_{изм}) \right] \right| = U_{н.изм}, \quad (27)$$

где $\dot{I}_{Аизмi}$, $\dot{I}_{Визмi}$, $\dot{I}_{Сизмi}$ – комплексные значения фазных токов во влияющих ВЛ в момент проведения измерения значения $U_{н.изм}$; $\dot{z}_{Ai}(\rho)$, $\dot{z}_{Bi}(\rho)$, $\dot{z}_{Ci}(\rho)$ – комплексные функции взаимных сопротивлений между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и фазными проводами влияющих ВЛ от эквивалентного удельного сопротивления грунта ρ .

Для удобства в уравнении (27) функция наведенного напряжения $\dot{U}_н$ приведена в виде выражения (3), в котором аргументами функции являются значения фазных токов во влияющих ВЛ в момент проведения измерения.

Полученные выражения (25)–(27) позволяют сделать вывод, что для пересчета измеренного значения наведенного напряжения в общем случае необходимы следующие данные:

- 1) математические выражения для взаимных сопротивлений \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} ;
- 2) значения параметров, входящих в выражения для взаимных сопротивлений \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} (топографические и геометрические размеры ВЛ и значения сопротивлений заземлителей и проводов отключенной ВЛ);
- 3) комплексные значения фазных токов $\dot{I}_{Аизмi}$, $\dot{I}_{Визмi}$, $\dot{I}_{Сизмi}$ во влияющих ВЛ в момент проведения измерения;

4) максимально возможные значения токов прямой, обратной и нулевой последовательности $I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi}$ во влияющих ВЛ.

Таким образом, в общем случае провести пересчет измеренного значения наведенного напряжения, ограничиваясь только модулями рабочих токов во влияющих ВЛ, не представляется возможным.

Типичные кривые зависимостей наведенного напряжения U_H от эквивалентного удельного сопротивления грунта ρ приведены на рис. 3. Следует пояснить, что при симметричных токовых нагрузках влияющих ВЛ кривая $U_H(\rho)$ может иметь убывающие участки или даже практически не зависеть от значения ρ (кривые 1–3, рис. 3). Но уже при некоторой сравнительно небольшой несимметрии фазных токов во влияющих ВЛ кривая $U_H(\rho)$ начинает монотонно возрастать. При этом, чем больше несимметрия фазных токов во влияющих ВЛ, тем быстрее возрастает кривая $U_H(\rho)$ (кривые 4–7, рис. 3) за счет увеличения вклада составляющей нулевой последовательности, которая возрастает с увеличением ρ .

Таким образом, при симметричных токовых нагрузках влияющих ВЛ или незначительной их несимметрии уравнение (27) может иметь несколько корней $\rho_{изм}$ или не иметь их вовсе. В этом случае можно сделать вывод, что достоверно определить эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта и, следовательно, провести пересчет измеренного значения наведенного напряжения $U_{H,изм}$ невозможно. Для определения максимального значения наведенного напряжения в этом случае необходимо провести дополнительные измерения при несимметричных токовых нагрузках некоторых влияющих ВЛ.

В результате можно сделать вывод, что пересчет измеренного значения наведенного напряжения $U_{H,изм}$ к максимальному значению $U_{H,пер}$ по сути сводится к расчету наведенного напряжения по его некоторой известной функции при максимально

возможных значениях $I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi}$ токов прямой, обратной и нулевой последовательности во влияющих ВЛ. При этом измеренное значение наведенного напряжения $U_{H,изм}$ необходимо только для достоверного определения эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта ρ . Значения же остальных параметров, характеризующих отключенную и влияющие ВЛ, следует определить в результате соответствующих изысканий и по справочным данным.

Вывод. 1. Приведенные в [1] определение «ВЛ под наведенным напряжением» и указание о выполнении измерений значений наведенного напряжения с последующим их пересчетом на наибольший рабочий ток влияющих ВЛ не позволяют достоверно определить, а точнее, занижают максимальное значение наведенного напряжения в любой точке отключенной ВЛ и, следовательно, не позволяют обеспечить электробезопасность при проведении работ на отключенных ВЛ.

Причиной этого является неучет в требованиях [1] решающего влияния несимметрии фазных токов во влияющих ВЛ в нормальном режиме на максимальное значение наведенного напряжения.

2. Для достоверного пересчета измеренного значения наведенного напряжения к максимальному значению необходимо знать математическое выражение для функции наведенного напряжения в рассматриваемой каждой точке отключенной ВЛ и комплексные значения фазных токов во влияющих ВЛ в момент проведения измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** по охране труда при эксплуатации электроустановок. — Приказ No. 74н Минтруда России от 19.02.2016.
2. **Carson I.R.** Wave propagation in overhead wires with ground return. — Bell Systems Technical Journal, 1926, vol. 5, iss. 4, pp. 539 — 554.
3. **Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д.** Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей. — Л.; М.: ОНТИ, 1936, 407 с.

[12.04.2017]

А в т о р: Горшков Андрей Вячеславович окончил Московский энергетический институт (Технический университет — ныне «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» — «НИУ «МЭИ») в 1994 г. В 1999 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Анализ состояния находящихся в эксплуатации заземляющих устройств с точки зрения требований электробезопасности и термической стойкости кабелей вторичных цепей». Начальник проектного отдела ООО «НПФ ЭЛНАП».

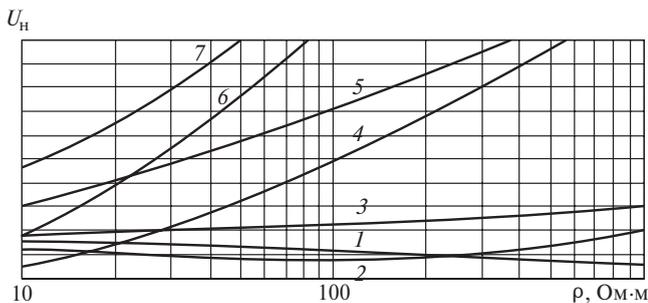


Рис. 3. Примеры зависимостей значения наведенного напряжения U_H от эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта ρ

Determining the Maximal Induced Voltage Value in the Examined Point of a Disconnected Overhead Power Line

GORSHKOV Andrei V. (LLC «NPF ELNAP». Moscow, Russia) – The Head of the project department, Cand. Sci. (Eng.)

The statement given in the regulatory document «Labor Protection Rules in Using Electrical Installations» regarding the measurements of induced voltage values with subsequently recalculating them for the highest operating current of the influencing overhead power lines (OPLs) does not make it possible to determine the maximal induced voltage value at the workplace of the disconnected OPL. The symmetrical component method is used for calculating this value. A criterion for inducing the maximal voltage at the workplace of the disconnected OPL is formulated, and the worst combination of currents through the influencing OPLs satisfying this criterion is determined. It is shown that the imbalance of phase currents through the influencing OPLs during the normal mode of their operation has a decisive influence on the induced voltage value. It has also been shown that, in order to reliably recalculate the measured induced voltage value, it is necessary to know the mathematical expression for the function of induced voltage at the considered workplace of the disconnected OPL and the complex values of phase currents through the influencing OPLs at the measurement moment. Methods for reliably determining the maximal induced voltage value at the workplace of the disconnected OPL by calculation and by recalculating its measured value have been developed.

Key words: power line, induced voltage, maximal value, calculation, recalculation of the measured value

REFERENCES

1. **Pravila po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok.** – *Prikaz No. 74n Mintruda ot 19.02.2016* (Rules for labor in the operation of electrical installation. – Order No.74n of the Ministry of labor dated 19.02.2016)

2. **Carson I.R.** Wave propagation in overhead wires with ground return. – *Bell Systems Technical Journal*, 1926, vol. 5, iss. 4, pp. 539–554.

3. **Vagner K.F., Evans R.D.** *Metod simmetrichnykh sostavlyayushchikh v primeneni k analizu nesimmetrichnykh elektricheskikh tsepei* (Method of symmetrical components in application to the analysis of asymmetrical electric circuits). – Leningrad; Moscow, Publ. «ONTI», 1936, 407 p.

[12.04.2017]