

О проблеме достоверного определения наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи

ГОРШКОВ А.В.

ООО «НПФ ЭЛНАП», Москва, Россия

КОРОЛЁВ И.В., ЩЕРБАЧЁВА О.С.

НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Анализ действующих нормативных документов по электробезопасности показывает, что методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях электропередачи (ВЛ), находящиеся вблизи действующих ВЛ, содержат методологические и методические ошибки, которые могут привести к существенному занижению определяемого наведенного напряжения. Установлено, что применяемый в нормативных документах способ определения максимально возможного значения наведенного напряжения путем однократного измерения с последующим умножением измеренного значения на некоторый коэффициент пересчета не позволяет в принципе определить его достоверно. Для определения в некоторой точке отключенной ВЛ достоверного значения в общем случае необходимы измерения наведенного напряжения в этой же точке ВЛ при различных значениях токов влияющих ВЛ. В статье сформулированы основные и вспомогательные задачи определения достоверных значений максимально возможного наведенного напряжения. Рассмотрены основные положения методов решения поставленных задач.

К л ю ч е в ы е с л о в а: наведенное напряжение, измерение наведенного напряжения, пересчет наведенного напряжения, отключенная линия электропередачи, влияющая линия электропередачи, отключенная ВЛ, влияющая ВЛ, цифровая подстанция

Для обеспечения электробезопасности проведения ремонтных работ на отключенной (обесточенной) воздушной линии электропередачи (ВЛ) большое значение имеет точность определения наведенного на ней напряжения, возникающего в результате воздействия электромагнитного поля, создаваемого расположенными рядом ВЛ, находящимися под напряжением (влияющими ВЛ). Очевидно, что неверное определение наведенного напряжения может привести к ложному заключению об отсутствии на отключенной ВЛ напряжений опасных значений и, как следствие, поражению ремонтного персонала электрическим током.

Общий вид аналитического выражения для наведенного напряжения. Рассмотрим наиболее распространенную схему заземления отключенной ВЛ – на обоих концах на заземлители подстанций. Данная схема в соответствии с Правилами по охране труда при эксплуатации электроустановок (ПОТЭЭ) [1] применяется как для определения значения наведенного напряжения на рабочем месте, так и для обеспечения безопасного проведения работ на отключенной ВЛ (при дополнительном заземлении ВЛ на рабочем месте). При использовании этой схемы заземления, как правило, можно пренебречь емкостной составляющей наведенного напряжения и рассматривать только ее индуктивную составляющую, обусловленную фазными токами влияющих ВЛ.

Рассмотрим нормальный (неаварийный) режим работы влияющих ВЛ, фазные токи которых в общем случае несимметричны. Принимаем, что фазные токи влияющих ВЛ и наведенное напряжение являются синусоидальными функциями времени, что позволяет рассматривать их как комплексные величины и применять для их расчета символьный метод (далее комплексные величины обозначаются точкой сверху).

Тогда из решения уравнений Максвелла для электромагнитного поля следует, что в некоторой рассматриваемой точке отключенной ВЛ наведенное напряжение \dot{u} является линейной функцией фазных токов влияющих ВЛ:

$$\dot{u} = \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{A_i} \dot{z}_{A_i} + \dot{I}_{B_i} \dot{z}_{B_i} + \dot{I}_{C_i} \dot{z}_{C_i}), \quad (1)$$

где N – число влияющих ВЛ; $\dot{I}_{A_i}, \dot{I}_{B_i}, \dot{I}_{C_i}$ – комплексные фазные токи i -й влияющей ВЛ (аргументы функции \dot{u}); $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ – комплексные взаимные сопротивления между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и соответствующими фазными проводами i -й влияющей ВЛ (коэффициенты функции \dot{u}).

По своей сути комплексные взаимные сопротивления $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ являются передаточными функциями между фазными токами влияющих ВЛ и наведенными ими напряжениями в рассматриваемой точке отклю-

ченной ВЛ. В общем случае взаимные сопротивления определяются не только взаимоиндуктивными связями между проводами отключенной и влияющих ВЛ, но и сопротивлениями проводов и заземлителей отключенной ВЛ. Разумеется, что каждой точке отключенной ВЛ соответствуют свои значения взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$.

При симметричной токовой нагрузке всех влияющих ВЛ выражение для функции наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ принимает следующий вид:

$$\dot{u} = \sum_{i=1}^N \dot{I}_i \dot{z}_i, \quad (2)$$

где $\dot{I}_i = \dot{I}_{A_i}$ – комплексный ток (в фазе A) i -й влияющей ВЛ; \dot{z}_i – комплексное взаимное сопротивление прямой последовательности между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й влияющей ВЛ.

$$\dot{z}_i = \dot{z}_{A_i} + \dot{z}_{B_i} \dot{a}^2 + \dot{z}_{C_i} \dot{a}, \quad (3)$$

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

Следует отметить, что выражения для расчета взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ зависят от схемы заземления отключенной ВЛ и математической модели, принятой для описания физического явления наведенного напряжения. Однако при дальнейшем анализе выражений взаимных сопротивлений не потребуется, достаточно только аналитических выражений функции \dot{u} , записанных в общем виде (1) и (2). Поэтому все полученные в данной работе результаты справедливы при любой математической модели расчета взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$.

Методологическая ошибка ПОТЭЭ. Наведенное в любой точке отключенной и заземленной ВЛ напряжение является переменной величиной, изменяющейся циклично в течение времени в зависимости от суточных и сезонных изменений токовых нагрузок влияющих ВЛ. Следовательно, при некоторой наиболее опасной комбинации токов влияющих ВЛ модуль наведенного напряжения достигает максимально возможного значения U_m . При этом для каждой точки по длине отключенной ВЛ в общем случае существуют своя наиболее опасная комбинация токов влияющих ВЛ и свое максимально возможное значение U_m . Очевидно, что для обеспечения электробезопасности ремонтных работ необходимо во всех рассматриваемых точках отключенной ВЛ, в которых планируется проведение ремонтных работ, определить именно максимально возможные значения наведенного напряжения.

Среди специалистов исторически распространено ошибочное мнение, что в любой точке отключенной ВЛ максимально возможное значение наведенного напряжения возникает не иначе как при наибольших по модулю рабочих токах влияющих ВЛ. На основе этого мнения сложилась ошибочная методология расчета

наведенного напряжения именно при наибольших рабочих токах I_{m_i} влияющих ВЛ. Данное представление об условиях возникновения максимально возможного значения U_m наведенного напряжения также легло в основу указания ПОТЭЭ, предписывающего определять значение U_m путем выполнения измерения наведенного напряжения с последующим пересчетом измеренного значения U_n именно на наибольшие (по модулю) рабочие токи влияющих ВЛ.

На первый взгляд представление о том, что наиболее опасной комбинацией токов влияющих ВЛ является совокупность их наибольших рабочих токов, кажется разумным. Например, для случая одной влияющей ВЛ с симметричной токовой нагрузкой такое представление не вызывает сомнений. Однако в реальных условиях число влияющих ВЛ практически всегда больше одной, и в этом случае значение U_m может возникнуть при далеко не наибольших токах влияющих ВЛ. Более того, как показано в приведенном ниже примере, максимально возможное значение наведенного напряжения U_m может возникнуть даже при наименьших рабочих токах некоторых влияющих ВЛ.

Рассмотрим приведенный на рис. 1 пример, в котором две одинаковые влияющие ВЛ расположены симметрично относительно отключенной ВЛ. В этом случае взаимные сопротивления прямой последовательности \dot{z}_i между некоторой рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и каждой влияющей ВЛ в силу симметрии равны друг другу:

$$\dot{z}_1 = \dot{z}_2 = \dot{z}. \quad (4)$$

Допустим, что влияющие ВЛ имеют симметричные токовые нагрузки (рис. 1). Тогда из выражения (2) и принятых положительных направлений токов следует, что наведенное напряжение в рассматриваемой точке отключенной ВЛ определяется следующим образом:

$$\dot{u} = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \dot{z}, \quad (5)$$

где \dot{I}_1 и \dot{I}_2 – комплексные токи в фазах A влияющих ВЛ.

Рассмотрим два случая передачи энергии по влияющим ВЛ.

В первом случае токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 влияющих ВЛ всегда являются синфазными:

$$\arg(\dot{I}_1) = \arg(\dot{I}_2), \quad (6)$$

и, следовательно, энергия по обоим влияющим ВЛ всегда передается в одном и том же направлении.

Во втором случае токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 влияющих ВЛ всегда находятся в противофазе:

$$\arg(\dot{I}_1) = \arg(\dot{I}_2) + \pi, \quad (7)$$

и, следовательно, энергия по влияющим ВЛ всегда передается в разных направлениях.

Для определенности принимаем, что наибольший рабочий ток I_{m_1} первой влияющей ВЛ не меньше наибольшего рабочего тока I_{m_2} второй влияющей ВЛ:

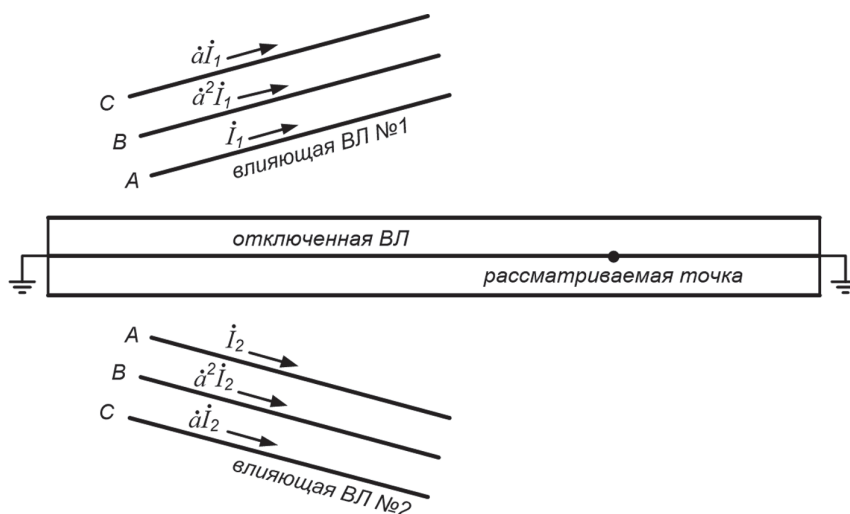


Рис. 1. Топографический план расположения отключенной и влияющих ВЛ (стрелками показаны условные положительные направления токов ВЛ)

Fig. 1. Topographic plan of the location of the disconnected and affected overhead lines (arrows show the conditional positive directions of the overhead lines currents)

$$I_{m1} \geq I_{m2}. \tag{8}$$

Тогда из выражения (5) следует, что в первом случае модуль U наведенного напряжения в рассматриваемой точке определяется как сумма модулей наведенных напряжений от каждой влияющей ВЛ:

$$U = (I_1 + I_2)z, \tag{9}$$

а во втором случае – как разность модулей наведенных напряжений от каждой влияющей ВЛ:

$$U = (I_1 - I_2)z. \tag{10}$$

Нет сомнения в том, что в первом случае рассчитанное при наибольших рабочих токах влияющих ВЛ наведенное напряжение U_T , определяемое как

$$U_T = (I_{m1} + I_{m2})z, \tag{11}$$

равно максимально возможному значению наведенного напряжения U_m , определяемому тем же выражением:

$$U_m = (I_{m1} + I_{m2})z. \tag{12}$$

Однако во втором случае рассчитанное при наибольших рабочих токах влияющих ВЛ наведенное напряжение U_T , определяемое как

$$U_T = (I_{m1} - I_{m2})z, \tag{13}$$

всегда меньше максимально возможного значения наведенного напряжения U_m , которое возникает при наибольшем рабочем токе первой влияющей ВЛ и наименьшем, т.е. равном нулю, рабочем токе второй влияющей ВЛ:

$$U_m = I_{m1}z. \tag{14}$$

При этом из выражения (13) следует, что чем ближе друг к другу значения наибольших рабочих токов влияющих ВЛ I_{m1} и I_{m2} , тем меньше значение U_T по сравнению со значением U_m . При равных значениях токов I_{m1} и I_{m2} значение U_T равно нулю. Следовательно, во втором случае определение наведенного напряжения при наибольших рабочих токах влияющих ВЛ может привести к многократному занижению полученного значения U_T по сравнению с действительным максимально возможным значением U_m .

Приведенный пример показывает, что на значение наведенного напряжения влияют не только модули комплексных токов \dot{I}_i влияющих ВЛ, но и значения их начальных фаз $\varphi_{0i} = \arg(\dot{I}_i)$. Если начальные фазы токов φ_{0i} таковы, что в любой момент времени наведенные напряжения от некоторых влияющих ВЛ (или групп влияющих ВЛ) находятся практически в противофазе, то результирующее наведенное напряжение достигает максимально возможного значения U_m при наименьшей токовой нагрузке некоторых из этих ВЛ, т.е. при их отключении. В этом случае выполненный в соответствии с ПОТЭЭ пересчет измеренного значения наведенного напряжения на наибольшие рабочие токи влияющих ВЛ приведет к занижению полученного значения U_T наведенного напряжения по сравнению с его действительным максимально возможным значением U_m .

Таким образом, указание ПОТЭЭ о пересчете измеренного значения наведенного напряжения на наибольшие рабочие токи влияющих ВЛ в общем случае неверно и поэтому является методологической ошибкой. Выполнение данного указания может привести к многократному занижению полученного значения U_T наведенного напряжения по сравнению с его действительным максимально возможным значением U_m . Очевидно, что результатом этого может быть неверное заключение об

отсутствии на отключенной ВЛ наведенных напряжений опасных значений и, как следствие, поражение ремонтного персонала электрическим током.

Методические ошибки стандарта ПАО «ФСК ЕЭС». В ПОТЭЭ нет конкретных указаний, каким образом следует проводить пересчет измеренного значения наведенного напряжения $U_{\text{и}}$ с целью определения его максимально возможного значения $U_{\text{м}}$. Однако исторически в научной и методической литературе под пересчетом подразумевается способ определения значения $U_{\text{м}}$ путем умножения значения $U_{\text{и}}$ на некоторый коэффициент пересчета k :

$$U_{\text{м}} = U_{\text{и}} k. \quad (15)$$

При таком подходе задача определения $U_{\text{м}}$ сводится к задаче определения выражения для коэффициента k , который в общем случае зависит от токов влияющих ВЛ и других параметров, характеризующих отключенную и влияющие ВЛ и окружающую их физическую среду.

Аналитические выражения для такого способа пересчета измеренного значения наведенного напряжения $U_{\text{и}}$ приведены в действующем стандарте организации (СТО) ПАО «ФСК ЕЭС» [2]. Однако эти выражения имеют парадоксальную особенность: рассчитанное по ним максимально возможное значение наведенного напряжения $U_{\text{м}}$ не зависит ни от измеренного значения наведенного напряжения $U_{\text{и}}$, ни от значений токов $I_{\text{и}i}$ влияющих ВЛ в момент измерения $U_{\text{и}}$ (на эту особенность также указывается в [3]).

Действительно, в СТО ПАО «ФСК ЕЭС» величины $U_{\text{и}}$ и $I_{\text{и}i}$ присутствуют в выражении величины $U_{\text{м}}$. Но они также присутствуют и в выражении для параметра K_i , входящего в выражение величины $U_{\text{м}}$. После подстановки выражения параметра K_i в выражение $U_{\text{м}}$ величины $U_{\text{и}}$ и $I_{\text{и}i}$ сокращаются. В результате развернутая формула для величины $U_{\text{м}}$ не содержит величин $U_{\text{и}}$ и $I_{\text{и}i}$ и имеет следующий вид:

$$U_{\text{м}} = \sum_{i=1}^N I_{\text{м}i} z_{0i} l_i, \quad (16)$$

где N – число влияющих ВЛ; $I_{\text{м}i}$ – модуль наибольшего рабочего тока i -й влияющей ВЛ; z_{0i} – определяемое по приведенным в СТО ПАО «ФСК ЕЭС» таблицам значение модуля погонного взаимного сопротивления между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й влияющей ВЛ; l_i – длина влияющего участка i -й влияющей ВЛ.

Из выражения (16) следует, что процедура пересчета в СТО ПАО «ФСК ЕЭС» по своей сути является прямым расчетом наведенного напряжения при наибольших рабочих токах $I_{\text{м}i}$ влияющих ВЛ без использования результатов натурных измерений.

Таким образом, в СТО ПАО «ФСК ЕЭС» содержится следующая методическая ошибка: в процедуре

пересчета измеренного значения $U_{\text{и}}$ наведенного напряжения не используются ни само значение $U_{\text{и}}$, ни значения токов $I_{\text{и}i}$ влияющих ВЛ в момент измерения значения $U_{\text{и}}$, что не позволяет в принципе определить значение $U_{\text{м}}$ по результатам натурных измерений.

Кроме того, в СТО ПАО «ФСК ЕЭС» содержится еще одна методическая ошибка: отсутствуют указания о том, какие ВЛ числом N из всего множества действующих ВЛ следует принять в качестве влияющих, что не позволяет применять выражение (16) на практике.

Методические ошибки нормативного документа ПАО «Россети». В Сборнике директивных указаний (СДУ) ПАО «Россети» [4] приведено следующее выражение для пересчета измеренного значения $U_{\text{и}}$ наведенного напряжения для случая нескольких влияющих ВЛ:

$$U_{\text{м}} = U_{\text{и}} \frac{\sum_{i=1}^N I_{\text{м}i}}{\sum_{i=1}^N I_{\text{и}i}}, \quad (17)$$

где N – число влияющих ВЛ; $I_{\text{м}i}$ – модуль наибольшего рабочего тока i -й влияющей ВЛ; $I_{\text{и}i}$ – модуль тока i -й влияющей ВЛ в момент измерения значения $U_{\text{и}}$.

Выражение (17) имеет следующую особенность: оно не содержит величин взаимных сопротивлений z_i между отключенной и влияющими ВЛ, которые по своей сути являются весовыми коэффициентами, учитывающими вклад каждой влияющей ВЛ в значение наведенного напряжения.

Весовые коэффициенты – взаимные сопротивления z_i в общем случае должны учитывать следующие параметры:

- длину отключенной и влияющих ВЛ;
- расстояние от отключенной ВЛ до влияющих ВЛ;
- высоту подвеса проводов отключенной и влияющих ВЛ;
- сопротивление проводов и заземлителей отключенной ВЛ;
- электрическую проводимость грунта;
- экранирующее действие различных металлоконструкций и коммуникаций, расположенных вблизи ВЛ.

Из выражений (1) и (2) функции наведенного напряжения следует, что выражение (17) определения значения $U_{\text{м}}$ является верным только при совместном выполнении следующих условий:

- 1) все влияющие ВЛ всегда имеют симметричную токовую нагрузку;
- 2) комплексные токи I_i всех влияющих ВЛ всегда являются синфазными;
- 3) все влияющие ВЛ имеют равные значения комплексных взаимных сопротивлений прямой последовательности z_i .

Можно показать, что вероятность равенства (с некоторой допустимой точностью) взаимных сопротивлений прямой последовательности z_i даже для двух

реальных влияющих ВЛ практически равна нулю. Следовательно, вероятность возникновения вышеуказанных условий, при которых выполненный по выражению (17) пересчет будет достоверным, также практически равна нулю. В результате можно утверждать, что практически во всех случаях определенное по выражению (17) значение U_m будет недостоверным и может быть многократно занижено по сравнению с действительным максимально возможным значением наведенного напряжения.

Так, для влияющих ВЛ с симметричной токовой нагрузкой и синфазными токами I_i оценить относительную погрешность δ_z определения U_m по выражению (17), обусловленную пренебрежением учета взаимных сопротивлений \dot{z}_z , можно следующим образом:

$$\delta_z \leq \max \left(\frac{I_{m_i}}{I_{n_i}} \right) - 1. \quad (18)$$

Без сомнения, токи I_{n_i} некоторых влияющих ВЛ в момент измерения U_{n_i} могут быть на порядок меньше наибольших рабочих токов I_{m_i} этих же ВЛ. Тогда из выражения (18) следует, что в этом случае определенное по выражению (17) значение U_m также может быть заниженным на порядок по сравнению с действительным максимально возможным значением наведенного напряжения.

Таким образом, приведенное в СДУ ПАО «Россети» выражение (17) в общем случае неверно, поэтому пренебрежение учетом взаимных сопротивлений \dot{z}_i при пересчете измеренного значения наведенного напряжения U_{n_i} является методической ошибкой.

Следует отметить, что в СДУ ПАО «Россети» содержится еще одна методическая ошибка: отсутствуют указания о том, какие ВЛ числом N из всего множества действующих ВЛ следует принять в качестве влияющих, что не позволяет применять выражение (17) на практике.

Также следует отметить, что выражение (17) не учитывает существующую в реальных условиях несимметрию фазных токов влияющих ВЛ в нормальном режиме их работы. В [5] показано, что в нормальном режиме токи нулевой последовательности влияющих ВЛ, которые составляют, как правило, всего несколько процентов токов прямой последовательности, могут вносить решающий вклад в значение наведенного напряжения. Таким образом, выражение для достоверного пересчета должно учитывать наличие даже сравнительно небольшой несимметрии фазных токов влияющих ВЛ в нормальном режиме их работы.

Постановка задач для определения достоверных значений U_m . В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что содержащиеся в нормативных документах [1, 2, 4] методологические и методические ошибки могут привести к определению недостоверных, в том числе и многократно заниженных, значений

наведенных напряжений на отключенных ВЛ. Следствием этого является возникновение опасности поражения электрическим током ремонтного персонала, проводящего работы на отключенных ВЛ.

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время существует актуальная проблема определения достоверных, т. е. вычисленных с допустимой точностью, максимально возможных значений наведенного напряжения по результатам натурных измерений.

Отсюда следует постановка основной задачи: разработать методику расчета максимально возможного значения U_m наведенного напряжения в некоторой точке отключенной ВЛ, использующую в качестве исходных данных результаты измерений наведенного напряжения в этой же точке ВЛ.

В результате анализа выражения (1) можно сделать вывод о необходимости учета в этой методике следующих величин и факторов:

комплексных значений фазных токов $\dot{I}_{A_i}, \dot{I}_{B_i}, \dot{I}_{C_i}$ влияющих ВЛ;

комплексных значений взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ – весовых коэффициентов, учитывающих вклад каждой влияющей ВЛ в значение наведенного напряжения;

несимметрии фазных токов $\dot{I}_{A_i}, \dot{I}_{B_i}, \dot{I}_{C_i}$ влияющих ВЛ в нормальном режиме их работы;

высших гармонических составляющих фазных токов $\dot{I}_{A_i}, \dot{I}_{B_i}, \dot{I}_{C_i}$ влияющих ВЛ.

Для корректного применения такой методики специалистам необходимо иметь научно обоснованное представление о том, какие именно ВЛ следует рассматривать в качестве влияющих. Следует понимать, что учет в качестве влияющих ВЛ только некоторых произвольно выбранных действующих ВЛ может привести к существенному занижению полученного значения U_m .

Отсюда следует постановка вспомогательной задачи: разработать методику научно обоснованного отбора в качестве влияющих ВЛ только некоторых ВЛ из всего множества действующих ВЛ.

Методы решения поставленных задач. Из выражения (1) следует, что максимально возможное значение U_m наведенного напряжения в общем случае несимметричной токовой нагрузки влияющих ВЛ определяется следующим образом:

$$U_m = \left| \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{UA_i} \dot{z}_{A_i} + \dot{I}_{UB_i} \dot{z}_{B_i} + \dot{I}_{UC_i} \dot{z}_{C_i}) \right|, \quad (19)$$

где N – число влияющих ВЛ; $\dot{I}_{UA_i}, \dot{I}_{UB_i}, \dot{I}_{UC_i}$ – комплексные значения токов, образующих наиболее опасную комбинацию фазных токов влияющих ВЛ; $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ – взаимные сопротивления между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и фазными проводами i -й влияющей ВЛ.

При известных значениях взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ задача определения U_m является задачей оптимизации, точнее максимизации, модуля функции наведе-

денного напряжения \dot{u} при известных ограничениях на вариации фазных токов влияющих ВЛ:

$$\left| \dot{u}(\bar{I}) \right| \rightarrow \max_{\bar{I} \in J}, \quad (20)$$

где \bar{I} – вектор комплексных фазных токов всех влияющих ВЛ; J – множество возможных значений вектора \bar{I} .

По своей сути задача оптимизации (20) сводится к задаче определения наиболее опасной комбинации токов влияющих ВЛ, которая должна решаться методами математического программирования.

В любом случае оценить сверху значение U_m можно по следующему алгебраическому выражению для верхней границы максимально возможного значения наведенного напряжения [5]:

$$U_m \leq \sum_{i=1}^N (I_{1mi} z_{1i} + I_{2mi} z_{2i} + 3I_{0mi} z_{0i}), \quad (21)$$

где I_{1mi} , I_{2mi} , I_{0mi} – максимально возможные значения модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательностей 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}_{3i} прямой, обратной и нулевой последовательностей между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й влияющей ВЛ:

$$\dot{z}_{1i} = \dot{z}_{A_i} + \dot{z}_{B_i} \dot{a}^2 + \dot{z}_{C_i} \dot{a}; \quad (22)$$

$$\dot{z}_{2i} = \dot{z}_{A_i} + \dot{z}_{B_i} \dot{a} + \dot{z}_{C_i} \dot{a}^2; \quad (23)$$

$$\dot{z}_{0i} = \frac{\dot{z}_{A_i} + \dot{z}_{B_i} + \dot{z}_{C_i}}{3}. \quad (24)$$

Из выражения (19) следует, что для определения достоверного значения U_m необходимы достоверные значения взаимных сопротивлений \dot{z}_{A_i} , \dot{z}_{B_i} , \dot{z}_{C_i} . Согласно современной методологии науки достоверность значений взаимных сопротивлений должна быть подтверждена на практике, в данном случае – адекватностью измеренных и рассчитанных по выражению (1) значений наведенного напряжения. Следовательно, в качестве критерия достоверности значений сопротивлений \dot{z}_{A_i} , \dot{z}_{B_i} , \dot{z}_{C_i} необходимо принять условие равенства (с некоторой допустимой точностью) измеренных и рассчитанных значений наведенного напряжения. Тогда из данного критерия следует, что достоверные значения взаимных сопротивлений \dot{z}_{A_i} , \dot{z}_{B_i} , \dot{z}_{C_i} можно определить эмпирически, используя результаты синхронных измерений наведенного напряжения и фазных токов влияющих ВЛ. Для этого выражение (1) следует рассматривать как линейную регрессионную зависимость, а взаимные сопротивления \dot{z}_{A_i} , \dot{z}_{B_i} , \dot{z}_{C_i} – как коэффициенты регрессии, значения которых определяются в результате решения обратной коэффициентной задачи методом наименьших квадратов. Очевидно, что

критерий достоверности для полученных таким образом (т. е. эмпирически) значений взаимных сопротивлений будет выполнен автоматически в отличие от значений взаимных сопротивлений, полученных теоретически.

Согласно выражению (19) общее число неизвестных взаимных сопротивлений равно $3N$. Следовательно, для их однозначного определения в общем случае необходимо не менее $3N$ уравнений, для формирования которых, в свою очередь, необходимо не менее $3N$ измерений наведенного напряжения при различных значениях токов влияющих ВЛ. При этом чем больше измерений наведенного напряжения используется для определения взаимных сопротивлений, тем точнее полученные значения \dot{z}_{A_i} , \dot{z}_{B_i} , \dot{z}_{C_i} . При числе измерений наведенного напряжения менее $3N$ определить достоверные значения взаимных сопротивлений \dot{z}_{A_i} , \dot{z}_{B_i} , \dot{z}_{C_i} в общем случае невозможно.

В результате можно сделать важный вывод о том, что однократного измерения наведенного напряжения в некоторой точке отключенной ВЛ в общем случае недостаточно для определения достоверного значения U_m наведенного напряжения в этой же точке ВЛ. Следовательно, применяемый в СТО ПАО «ФСК ЕЭС» и СДУ ПАО «Россети» способ определения U_m путем однократного измерения наведенного напряжения с последующим умножением его измеренного значения U_n на некоторый коэффициент пересчета k не позволяет в принципе определить достоверное значение U_m и поэтому является методологической ошибкой.

Таким образом, в общем случае для определения в некоторой точке отключенной ВЛ достоверного значения U_m необходимо провести ряд измерений наведенного напряжения в этой же точке ВЛ при различных значениях токов влияющих ВЛ, т. е. провести динамические измерения наведенного напряжения в течение некоторого интервала времени. При этом необходимые для определения значения U_m неизвестные значения взаимных сопротивлений \dot{z}_{A_i} , \dot{z}_{B_i} , \dot{z}_{C_i} следует определить в результате решения обратной коэффициентной задачи, т. е. путем решения методом наименьших квадратов следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{A_i} \dot{z}_{A_i} + \dot{I}_{B_i} \dot{z}_{B_i} + \dot{I}_{C_i} \dot{z}_{C_i}) = \dot{u}_1; \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{A_{ki}} \dot{z}_{A_i} + \dot{I}_{B_{ki}} \dot{z}_{B_i} + \dot{I}_{C_{ki}} \dot{z}_{C_i}) = \dot{u}_k; \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{A_{Mi}} \dot{z}_{A_i} + \dot{I}_{B_{Mi}} \dot{z}_{B_i} + \dot{I}_{C_{Mi}} \dot{z}_{C_i}) = \dot{u}_M, \end{cases} \quad (25)$$

где $\dot{I}_{Ak_i}, \dot{I}_{Bk_i}, \dot{I}_{Ck_i}$ – измеренные значения фазных токов i -й влияющей ВЛ в момент k -го дискретного измерения наведенного напряжения; \dot{u}_k – измеренное значение наведенного напряжения в k -м дискретном измерении; M – число дискретных измерений наведенного напряжения ($M \geq 3N$).

Обратная задача (25) относится к классу некорректных задач. Из трех условий [6] корректно поставленной (по Адамару) задачи для нее возможно невыполнение условия устойчивости полученного решения вследствие плохой обусловленности системы уравнений (25). Поэтому, если систему уравнений (25) решать классическими методами, то значения взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ могут быть определены с очень большой погрешностью. Для получения устойчивого решения обратной задачи (25) необходимо применять методы регуляризации [7 – 14], основанные на использовании дополнительной априорной информации, например о погрешностях измерений фазных токов влияющих ВЛ и наведенного напряжения. Алгоритм решения обратной задачи (25) методами регуляризации с использованием дополнительной априорной информации приведен в [15].

Что касается учета высших гармонических составляющих токов влияющих ВЛ, то в общем случае необходимо определять максимально возможные значения $U_m(f_n)$ наведенного напряжения для каждой его n -й гармоники частотой f_n . Тогда результирующее максимально возможное значение U_m наведенного напряжения определится как геометрическая сумма значений $U_m(f_n)$:

$$U_m = \sqrt{\sum_n U_m^2(f_n)}. \quad (26)$$

Что касается вспомогательной задачи отбора в качестве влияющих ВЛ только некоторых ВЛ из всего множества действующих ВЛ, то способ ее решения приведен в [15, 16]. В данном способе в качестве влияющих ВЛ рассматриваются все ВЛ, расположенные в примыкающей к отключенной ВЛ зоне влияния, размер которой определяется расчетом.

Практическая реализация методов решения поставленных задач. Для определения взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ путем решения обратной задачи (25) необходимы комплексные значения наведенных напряжений \dot{u}_k и фазных токов $\dot{I}_{Ak_i}, \dot{I}_{Bk_i}, \dot{I}_{Ck_i}$ влияющих ВЛ, что требует проведения измерений не только действующих значений напряжений и токов, но и их углов сдвига фаз. При этом для определения достоверных значений взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ необходима достаточно высокая точность синхронизации времени измерений наведенных напряжений и фазных токов влияющих ВЛ.

Принципиальных трудностей для выполнения этих условий не возникает: широко внедряемые в электроэнергетике цифровые технологии позволяют проводить измерения мгновенных значений токов и напряжений с высокой частотой дискретизации, достаточной для определения любых характеристик гармонических сигналов, и обеспечивают точность синхронизации времени измерений до 1 мкс.

Так, реализовать на практике процедуру регистрации комплексных значений $\dot{I}_{Ak_i}, \dot{I}_{Bk_i}, \dot{I}_{Ck_i}$ фазных токов всех влияющих ВЛ в моменты измерений значений \dot{u}_k наведенного напряжения можно в рамках концепции «Цифровая подстанция», согласно которой информация от трансформаторов тока должна передаваться в цифровом виде по протоколу *Sampled Values* в соответствии со стандартами МЭК 61850-9-2 [17] и МЭК 61869-9 [18]. При этом реализовать на практике процедуру проведения динамических измерений комплексных значений наведенного напряжения, процедуру решения обратной задачи (25) методами регуляризации и процедуру определения U_m путем оптимизации модуля функции наведенного напряжения \dot{u} можно в рамках более общей концепции «Цифровая трансформация 2030».

Следует отметить, что при использовании для определения достоверного значения U_m цифровых технологий достаточно будет провести динамические измерения наведенных напряжений \dot{u}_k в интервале времени продолжительностью всего несколько минут.

Выводы. Указание ПОТЭЭ о пересчете измеренного значения наведенного напряжения U_n на наибольшие рабочие токи влияющих ВЛ является методологической ошибкой, так как его выполнение может привести к многократному занижению полученного значения U_T наведенного напряжения по сравнению с его действительным максимально возможным U_m .

Применяемый в СТО ПАО «ФСК ЕЭС» и СДУ ПАО «Россети» способ определения максимально возможного значения наведенного напряжения U_m путем однократного измерения наведенного напряжения с последующим умножением измеренного значения U_n на некоторый коэффициент пересчета k является методологической ошибкой, так как не позволяет в принципе определить достоверное значение U_m .

В СТО ПАО «ФСК ЕЭС» содержатся следующие методические ошибки, не позволяющие в принципе определить максимально возможное значение U_m наведенного напряжения по результатам натурных измерений: 1) измеренное значение U_n наведенного напряжения и значения I_{ni} токов влияющих ВЛ в момент измерения значения U_n не используются для определения значения U_m ; 2) отсутствуют указания о том, какие ВЛ из всего множества действующих ВЛ следует принять в качестве влияющих.

В СДУ ПАО «Россети» содержатся следующие методические ошибки, не позволяющие определить достоверное значение U_m наведенного напряжения по результатам натурных измерений: 1) при пересчете измеренного значения U_n наведенного напряжения не используются значения взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ – весовых коэффициентов, учитывающих вклад каждой влияющей ВЛ в значение наведенного напряжения; 2) отсутствуют указания о том, какие ВЛ из всего множества действующих ВЛ следует принять в качестве влияющих; 3) не учитывается наличие несимметрии фазных токов влияющих ВЛ в нормальном режиме их работы.

Для определения в некоторой точке отключенной ВЛ достоверного значения U_m недостаточно однократного измерения наведенного напряжения. В общем случае для определения достоверного значения U_m необходим ряд динамических измерений наведенного напряжения в этой же точке ВЛ при различных значениях токов влияющих ВЛ.

Для определения достоверного значения U_m наведенного напряжения необходимо учитывать комплексные значения следующих величин: фазных токов $\dot{I}_{A_i}, \dot{I}_{B_i}, \dot{I}_{C_i}$ влияющих ВЛ; взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и фазными проводами влияющих ВЛ.

Достоверные значения взаимных сопротивлений $\dot{z}_{A_i}, \dot{z}_{B_i}, \dot{z}_{C_i}$ необходимо определять эмпирически в результате решения обратной коэффициентной задачи, используя результаты динамических измерений наведенного напряжения при различных значениях токов влияющих ВЛ.

В результате проведенного анализа выполнена постановка основной и вспомогательной задач проблемы определения достоверных значений U_m наведенного напряжения. Сформулированы основные положения методов решения поставленных задач. Предложено практическую реализацию методов решения поставленных задач выполнить на базе цифровых технологий в рамках концепций «Цифровая трансформация 2030» и «Цифровая подстанция».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** по охране труда при эксплуатации электроустановок. Утв. Приказом Минтруда России от 24.07.2013 г. № 328н (в ред. Приказа Минтруда России от 15.11.2018 № 704н).
2. **СТО 56947007-29.240.55.018-2009**. Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС», 2008, 27с.
3. **Мюльбаер А.А., Соколовский А.О., Целебровский Ю.В.** О недостатках действующих нормативных документов по определению наведенного напряжения. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2016, № S1(1), с. 50–52.
4. **Сборник** директивных указаний по повышению надежности и безопасности эксплуатации электроустановок в электросетевом комплексе ПАО «Россети». Часть II «Эксплуатация оборудова-

ния электроустановок распределительных устройств 6 кВ и выше и ВЛ 35 кВ и выше», 2016.

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

6. **Hadamard J.** Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. – Princeton University Bulletin, 1902, 13, pp. 49–52.

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

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

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

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

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

12. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986, 288 с.

13. **Tikhonov A.N., Arsenin V.Y.** Solutions of ill-posed problems. New York: Winston, 1977, 258 p.

14. **Tikhonov A.N., Goncharky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.** Numerical methods for the solution of ill-posed problems. – Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 1995, 253 p.

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

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

17. **IEC 61850-9-2:2011.** Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3, International Standard, Ed. 2, 2020.

18. **IEC 61869-9:2016.** Instrument transformers – Part 9: Digital interface for instrument transformers, International Standard, Ed. 1, 2016.

[16.11.2020]



А в т о р ы: Горшков Андрей Вячеславович – кандидат техн. наук, начальник проектного отдела ООО «НПФ ЭЛНАП».



Королёв Илья Викторович – кандидат техн. наук, доцент кафедры инженерной экологии и охраны труда Национального исследовательского университета «МЭИ».



Щербачёва Ольга Сергеевна – аспирант кафедры инженерной экологии и охраны труда Национального исследовательского университета «МЭИ».

On the Problem of Reliably Determining the Induced Voltage on a Disconnected Power Line

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

KOROLEV Ilya V. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) – Associate Professor of the Environmental Engineering and Labor Protection Dept., Cand. Sci. (Eng.).

SHCHERBACHEVA Olga S. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) – Postgraduate student of the Environmental Engineering and Labor Protection Dept.

An analysis of the current regulatory documents on electrical safety shows that the methodological guidelines for determining the induced voltage on disconnected overhead power lines (OHL) located near the operating OHL contain methodological and methodological errors. These errors can lead to a significant underestimation of the determined induced voltage. It has been established that the method specified in the regulatory documents for determining the maximum possible value of the induced voltage by means of a single measurement with subsequently multiplying the measured value by a certain recalculation factor k does not allow in principle to determine it reliably. To determine a reliable value at a certain point of the disconnected overhead line, in general, it is necessary to measure the induced voltage at the same point of the overhead line at different values of the currents affecting the overhead line. The article formulates the main and auxiliary tasks of determining the reliable values of the maximum possible induced voltage. The main principles of the methods for solving the stated tasks are considered.

Key words: induced voltage, induced voltage measurement, induced voltage recalculation, disconnected overhead line, affecting overhead line, digital substation

REFERENCES

1. **Pravila** po ohrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok. Utv. Prikazom Mintruda Rossii ot 24.07.2013 g. N 328n (v red. Prikaza Mintruda Rossii ot 15.11.2018 N 704n) (Rules for labor protection in the operation of electrical installations).
2. **STO 56947007-29.240.55.018-2009**. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu navedennogo napryazheniya na otklyuchennykh vozduzhnykh liniyah, nahodyashchihся vblizi deystvuyushchih VL. Standart organizatsii PAO «FSK EES»* (Guidelines for determining the induced voltage on disconnected overhead lines located near operating overhead lines. Standard of the organization of PJSC “FGC UES”), 2008, 27p.
3. **Mulbaer A.A., Sokolovsky A.O., Tselebrovsky Yu.V.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electric Power. Transmission and Distribution)*, 2016, No. S1(1), pp. 50–52.
4. **Sbornik direktivnykh ukazaniy po povysheniyu nadezhnosti i bezopasnosti ekspluatatsii elektroustanovok v elektrosетevom komplekse PAO «Rosseti». ch. II «Ekspluatatsiya oborudovaniya elektroustanovok raspredelitel'nykh ustroystv 6 kV i vyshe i VL 35 kV i vyshe»** (Collection of guidelines for improving the reliability and safety of electrical installations in the power grid complex of PJSC «Rosseti». Part II «Operation of equipment for electrical installations of switchgears 6 kV and above and overhead lines 35 kV and above»), 2016.
5. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 11, pp. 12–21.
6. **Hadamard J.** Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. – Princeton University Bulletin, 1902, 13, pp. 49–52.
7. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ. (The USSR AS Reports)*, 1963, vol. 151, No. 3, pp. 501–504.
8. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ. (The USSR AS Reports)*, 1965, vol. 163, No. 3, pp. 591–594.
9. **Tikhonov A.N.** *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki – in Russ. (Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics)*, 1980, vol. 20, No. 6, pp. 1373–1383.
10. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ. (The USSR AS Reports)*, 1980, vol. 254, No. 3, pp. 549–554.
11. **Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.** *Regulyariziruyushchie algoritmy i apriornaya informatsiya* (Regularizing algorithms and a priori information). M.: Nauka, 1983, 200 p.
12. **Tikhonov A.N., Arsenin V.Y.** *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* (Methods for solving incorrect problems). M.: Nauka, 1986, 288 p.
13. **Tikhonov A.N., Arsenin V.Y.** Solutions of ill-posed problems. New York: Winston, 1977, 258 p.
14. **Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.** Numerical methods for the solution of ill-posed problems. – Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 1995, 253 p.
15. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 11, pp. 23–32.
16. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 6, pp. 4–15.
17. **IEC 61850-9-2:2011**. Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3, International Standard, Ed. 2, 2020.
18. **IEC 61869-9:2016**. Instrument transformers – Part 9: Digital interface for instrument transformers, International Standard, Ed. 1, 2016.