

## Определение сопротивления защитного заземлителя по условию обеспечения безопасного проведения работ на отключенной линии электропередачи

ГОРШКОВ А.В.

*Предлагается безопасность проведения работ на отключенной ВЛ обеспечивать защитным заземлением, используя на рабочем месте заземлитель с таким значением сопротивления, которое обеспечит снижение наведенного напряжения до допустимых значений. Для достоверного определения необходимого значения сопротивления заземлителя используются результаты многократных измерений наведенного напряжения и тока на рабочем месте отключенной ВЛ. В результате измерений и решения обратных задач определяются эмпирические формулы для функций наведенного напряжения и тока на рассматриваемом рабочем месте ВЛ. Необходимое значение сопротивления заземлителя рабочего места определяется расчетным путем с помощью полученных эмпирических формул. В итоге разработана методика определения значения сопротивления заземлителя, которое позволяет обеспечить безопасное проведение работ на рассматриваемом рабочем месте отключенной ВЛ при любой комбинации рабочих токов влияющих ВЛ.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, наведенное напряжение, защитное заземление, заземлитель, электробезопасность

При проведении работ на отключенной воздушной линии электропередачи (ВЛ), которая находится под наведенным напряжением, необходимо в соответствии с [1] выполнить на рабочем месте и концах ВЛ заземление всех ее проводов. При этом электробезопасность проведения работ на отключенной ВЛ должна обеспечиваться использованием одной из специальных технологий безопасного производства работ – уравниванием потенциалов или технологией «без снятия напряжения», а в крайнем случае – заземлением отключенной ВЛ на рабочем месте без заземления на концах.

Существенным недостатком этих специальных технологий производства работ является сравнительно невысокая надежность защиты ремонтного персонала от поражения наведенным напряжением. Причиной этого является значительное влияние человеческого фактора, т.е. ошибочных действий ремонтного персонала, на электробезопасность проведения работ на отключенной ВЛ. Действительно, технологии производства работ на отключенной ВЛ состоят из большого числа операций по обеспечению электробезопасности, выполнение которых должен контролировать сам ремонтный персонал без использования автоматики и блокировок ошибочных операций. В результате невыполнение ремонтным персоналом любой из операций по обеспечению электробезопасности приводит к повышенной опасности его поражения наведенным напряжением.

Однако во многих случаях надежность защиты ремонтного персонала от поражения наведенным напряжением можно существенно повысить, если электробезопасность обеспечивать защитным заземлением, т.е. используя на рабочем месте заземлитель с таким значением сопротивления  $R$ , которое обеспечит снижение наведенного напряжения на рабочем месте ниже предельно допустимого значения  $U_{пр}$ . Очевидно, что при этом можно отказаться от использования специальных технологий безопасного производства работ или существенно упростить их за счет исключения некоторых операций.

Отсюда возникает следующая задача: по результатам измерений в некотором месте отключенной ВЛ наведенного напряжения и тока определить значение сопротивления заземлителя  $R$ , которое обеспечит снижение наведенного напряжения в этом месте ВЛ до допустимых значений при любой комбинации рабочих токов влияющих ВЛ.

**Применяемые схемы измерения наведенного напряжения и тока.** Принимаем, что наведенные на проводах отключенной ВЛ ЭДС, напряжения и токи являются синусоидальными функциями времени промышленной частоты, амплитуды которых изменяются скачком в течение времени в зависимости от изменения токовых нагрузок влияющих ВЛ (свободными составляющими переходных процессов пренебрегаем). При этом считается, что амплитуды наведенных ЭДС, напряжений и токов

в интервалах времени между очередными скачками имеют постоянные значения, т.е. являются ступенчатыми функциями времени. Тогда в этих интервалах времени наведенные ЭДС, напряжения и токи можно рассматривать как комплексные величины и применять для их анализа символичный метод (в статье комплексные величины обозначаются точкой сверху).

Для определения необходимого значения сопротивления заземлителя используем две схемы измерения наведенного напряжения на одной и той же отключенной ВЛ – см. рис. 1.

В первой схеме измерения на рабочем месте отключенной и заземленной на обоих концах ВЛ выполняется уравнивание потенциалов всех ее проводов без их заземления (рис. 1,а). Затем в течение некоторого интервала времени  $T_1$  на рабочем месте проводятся многократные синхронные измерения комплексных значений наведенного напряжения  $\dot{U}$  и суммарного по всем проводам ВЛ тока  $\dot{I}$ .

Во второй схеме измерения на рабочем месте той же отключенной и заземленной на обоих концах ВЛ все провода присоединяются к некоторому специально выполненному или существующему обособленному заземлителю (например, к опоре ВЛ с изолированным креплением молниезащитного троса), значение сопротивления  $\dot{Z}_\gamma$  которого в общем случае неизвестно (см. рис. 1,б). Затем в течение некоторого интервала времени  $T_2$  на рабочем месте проводятся многократные синхронные измерения комплексных значений наведенного напряжения  $\dot{U}_\gamma$ , тока  $\dot{I}_\gamma$  и суммарного по всем проводам ВЛ тока  $\dot{I}_\alpha$ .

Следует отметить, что измерения наведенных напряжений  $\dot{U}$  и  $\dot{U}_\gamma$  необходимо проводить относительно одного и того же стационарного измери-

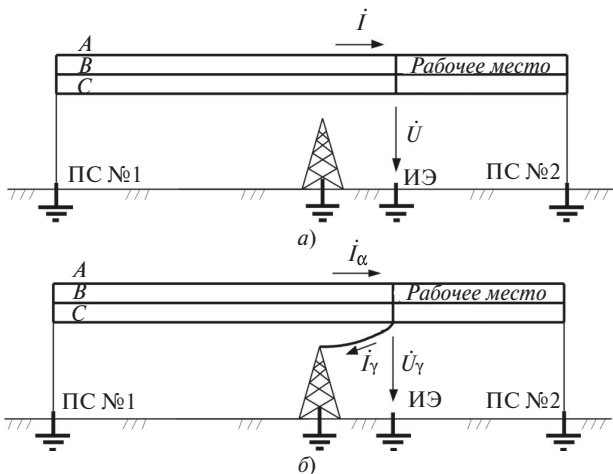


Рис. 1. Схема измерения: а — отключенная ВЛ заземлена только на концах; б — то же на концах и на рабочем месте

тельного электрода (ИЭ), расположенного в зоне нулевого потенциала.

Результатами проведенных серий измерений являются следующие данные. Для первой схемы – массивы из  $M_1$  комплексных значений напряжений  $(\dot{U}_1, \dots, \dot{U}_{M1})$  и токов  $(\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_{M1})$ ; для второй схемы – массивы из  $M_2$  комплексных значений напряжений  $(\dot{U}_{\gamma 1}, \dots, \dot{U}_{\gamma M2})$  и токов  $(\dot{I}_{\alpha 1}, \dots, \dot{I}_{\alpha M2})$  и  $(\dot{I}_{\gamma 1}, \dots, \dot{I}_{\gamma M2})$ .

Расчетные схемы замещения отключенной ВЛ для каждой схемы измерения приведены на рис. 2.

В схемах замещения отключенная ВЛ разделена на два участка относительно рабочего места. Наведенные на проводах обоих участков ВЛ ЭДС моделируются эквивалентными источниками ЭДС  $\dot{E}_\alpha$  и  $\dot{E}_\beta$ . Фазные провода обоих участков отключенной ВЛ и заземлители подстанций моделируются комплексными входными относительно рабочего места сопротивлениями  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$ .

Согласно принятым допущениям амплитуды наведенных ЭДС, напряжений и токов являются ступенчатыми функциями времени, поэтому их комплексные амплитуды также рассматриваются как ступенчатые комплексные функции времени, что не противоречит символическому методу (в данной статье ступенчатые комплексные функции времени обозначаются как  $\dot{F}(t)$ ).

**Определение сопротивления  $R$  заземлителя рабочего места.** Рассмотрим ту же отключенную и заземленную на обоих концах ВЛ, на рассматриваемом рабочем месте которой все провода присоединены к заземлителю с активным сопротивлением  $R$ . Расчетная схема замещения отключенной ВЛ для этого случая приведена на рис. 3. Из данной

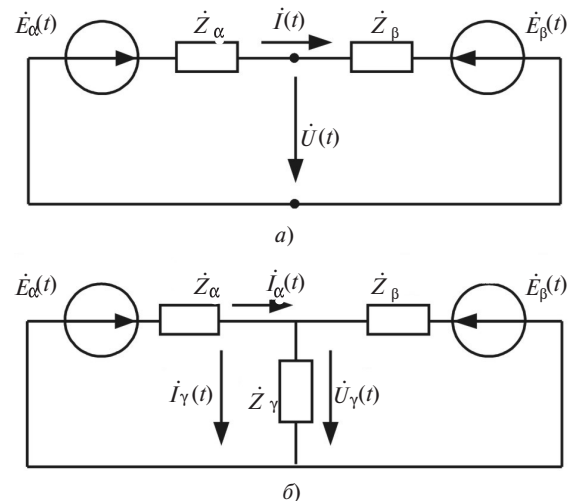


Рис. 2. Расчетная схема замещения: а — первой схемы измерения; б — второй

схемы замещения следует, что при заземлении проводов ВЛ на рабочем месте наведенное напряжение  $\dot{U}_R(t)$  можно выразить следующим образом:

$$\dot{U}_R(t) = \frac{\dot{E}_\alpha(t)\dot{Z}_\alpha + \dot{E}_\beta(t)\dot{Z}_\beta}{\dot{Z}_\alpha + \dot{Z}_\beta + \frac{\dot{Z}_\alpha\dot{Z}_\beta}{R}}. \quad (1)$$

Из постановки задачи следует, что сопротивление заземлителя  $R$  должно обеспечить снижение максимально возможного значения наведенного напряжения на рассматриваемом рабочем месте  $U_m$  ниже предельно допустимого значения  $U_{пр}$ .

При прочих равных условиях максимально возможное по модулю значение  $U_m$  наведенного напряжения возникает при отсутствии заземления проводов ВЛ на рабочем месте. Из схемы замещения на рис. 2,а следует, что в этом случае наведенное на рабочем месте напряжение можно выразить следующим образом:

$$\dot{U}(t) = \frac{\dot{E}_\alpha(t)\dot{Z}_\alpha + \dot{E}_\beta(t)\dot{Z}_\beta}{\dot{Z}_\alpha + \dot{Z}_\beta}. \quad (2)$$

Тогда из выражений (1) и (2) следует, что наведенное напряжение  $\dot{U}_R(t)$  выражается через наведенное напряжение  $\dot{U}(t)$ :

$$\dot{U}_R(t) = \dot{U}(t) \frac{R}{R + \dot{Z}}, \quad (3)$$

где  $\dot{Z}$  – входное сопротивление отключенной ВЛ относительно рабочего места:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{Z}_\alpha\dot{Z}_\beta}{\dot{Z}_\alpha + \dot{Z}_\beta}. \quad (4)$$

Следовательно, наибольшее значение наведенного напряжения  $U_{Rm}$  на рассматриваемом рабочем месте при присоединении проводов ВЛ к заземлителю сопротивлением  $R$  можно определить выражением:

$$U_{Rm} = U_m \frac{R}{R + \dot{Z}}. \quad (5)$$

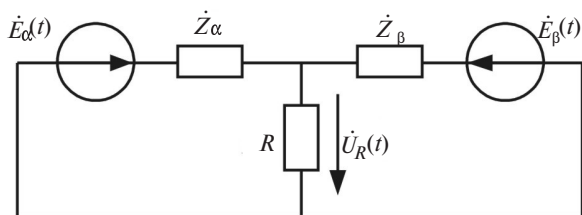


Рис. 3. Расчетная схема замещения для определения сопротивления  $R$  заземлителя рабочего места

Принимая в качестве критерия обеспечения электробезопасности на рабочем месте условие

$$U_{Rm} \leq U_{пр}, \quad (6)$$

получаем неравенство для определения сопротивления  $R$ :

$$U_m \frac{R}{R + \dot{Z}} \leq U_{пр}. \quad (7)$$

Из решения неравенства (7) имеем:

$$R \leq \frac{Z^2}{\sqrt{[\text{Re}(\dot{Z})]^2 + Z^2 \frac{U_m^2 - U_{пр}^2}{U_{пр}^2}} - \text{Re}(Z)}. \quad (8)$$

Выражение (8) правомерно и в том случае, когда сопротивление заземлителя рабочего места имеет индуктивный характер. Тогда значение  $R$  следует рассматривать как модуль сопротивления заземлителя рабочего места.

Из выражений (8) и (4) следует, что для вычисления сопротивления  $R$  заземлителя рабочего места необходимо найти максимально возможное значение наведенного напряжения на рассматриваемом рабочем месте ВЛ  $U_m$  и входные сопротивления участков отключенной ВЛ  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$ .

**Определение максимально возможного значения  $U_m$  наведенного напряжения на рассматриваемом рабочем месте ВЛ.** Максимально возможное значение  $U_m$  наведенного напряжения определим эмпирически, используя результаты измерений наведенного напряжения  $\dot{U}$  по первой схеме измерения.

Зарегистрировать при измерениях наведенного напряжения его максимально возможное значение  $U_m$  крайне маловероятно. Поэтому, если в качестве значения  $U_m$  принять наибольшее по модулю значение из массива измеренных значений  $(\dot{U}_1, \dots, \dot{U}_{M1})$ , то в общем случае оно окажется существенно меньше действительного значения  $U_m$ .

Определить по результатам измерений достоверное значение  $U_m$  можно, если использовать эмпирический метод [2], сущность которого заключается в решении обратной коэффициентной задачи для наведенного напряжения. Данный метод позволяет по результатам многократных измерений наведенного напряжения  $\dot{U}$  и тока  $\dot{I}$  определить их эмпирические формулы как функции времени  $\dot{U}(t)$  и  $\dot{I}(t)$ . Под эмпирической формулой здесь понимается аналитическое выражение для некоторой функции, в котором постоянные величины, т.е. коэффициенты при аргументах функции, считаются априори

неизвестными и определяются по результатам измерений значений функции и ее аргументов путем решения обратной задачи.

Эмпирические формулы для наведенных на рассматриваемом рабочем месте ВЛ напряжения  $\dot{U}$  и тока  $\dot{I}$  имеют следующий вид [2] (индекс «e» означает, что функция выражена эмпирической формулой):

$$\dot{U}_e(t) = \sum_{i=1}^N [\dot{I}_{1i}(t)\dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2i}(t)\dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0i}(t)\dot{z}_{0i}], \quad (9)$$

$$\dot{I}_e(t) = \sum_{i=1}^N [\dot{I}_{1i}(t)\dot{k}_{1i} + \dot{I}_{2i}(t)\dot{k}_{2i} + 3\dot{I}_{0i}(t)\dot{k}_{0i}], \quad (10)$$

где  $\dot{I}_{1i}(t)$ ,  $\dot{I}_{2i}(t)$ ,  $3\dot{I}_{0i}(t)$  – аргументы функций  $\dot{U}_e(t)$  и  $\dot{I}_e(t)$  – комплексные токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в  $i$ -й влияющей ВЛ в момент времени  $t$ ;  $\dot{z}_{1i}$ ,  $\dot{z}_{2i}$ ,  $\dot{z}_{0i}$  – априори неизвестные коэффициенты функций  $\dot{U}_e(t)$  – комплексные взаимные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей между рассматриваемым местом отключенной ВЛ и  $i$ -й влияющей ВЛ;  $\dot{k}_{1i}$ ,  $\dot{k}_{2i}$ ,  $\dot{k}_{0i}$  – априори неизвестные коэффициенты функции  $\dot{I}_e(t)$  – комплексные токовые коэффициенты прямой, обратной и нулевой последовательностей между рассматриваемым местом отключенной ВЛ и  $i$ -й влияющей ВЛ;  $N$  – суммарное число влияющих ВЛ и ВЛ, отходящих от подстанций на концах отключенной ВЛ.

Принимаем, что значения функций  $\dot{I}_{1i}(t)$ ,  $\dot{I}_{2i}(t)$ ,  $3\dot{I}_{0i}(t)$  в моменты времени измерения значений наведенного напряжения и тока по первой схеме измерения известны в результате регистрации токов диспетчерскими службами организаций владельцев влияющих ВЛ. Тогда неизвестные взаимные сопротивления  $\dot{z}_{1i}$ ,  $\dot{z}_{2i}$ ,  $\dot{z}_{0i}$  определяются в результате решения следующей системы линейных алгебраических уравнений [2]:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{1i}\dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2i}\dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0i}\dot{z}_{0i}) &= \dot{U}_1; \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{1ki}\dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2ki}\dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0i}\dot{z}_{0i}) &= \dot{U}_k; \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{1M1i}\dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2M1i}\dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0M1i}\dot{z}_{0i}) &= \dot{U}_{M1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогично, неизвестные токовые коэффициенты  $\dot{k}_{1i}$ ,  $\dot{k}_{2i}$ ,  $\dot{k}_{0i}$  определяются в результате решения следующей системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{1i}\dot{k}_{1i} + \dot{I}_{2i}\dot{k}_{2i} + 3\dot{I}_{0i}\dot{k}_{0i}) &= \dot{I}_1; \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{1ki}\dot{k}_{1i} + \dot{I}_{2ki}\dot{k}_{2i} + 3\dot{I}_{0i}\dot{k}_{0i}) &= \dot{I}_k; \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{1M1i}\dot{k}_{1i} + \dot{I}_{2M1i}\dot{k}_{2i} + 3\dot{I}_{0M1i}\dot{k}_{0i}) &= \dot{I}_{M1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Обратные задачи (11), (12) относятся к классу некорректных задач. Из трех условий [3] корректно поставленной по Адамару задачи для них не выполняется, как минимум, условие устойчивости полученного решения вследствие плохой обусловленности систем уравнений (11) и (12). Поэтому, если системы уравнений (11), (12) решать классическими методами, то значения взаимных сопротивлений  $\dot{z}_{1i}$ ,  $\dot{z}_{2i}$ ,  $\dot{z}_{0i}$  и коэффициентов  $\dot{k}_{1i}$ ,  $\dot{k}_{2i}$ ,  $\dot{k}_{0i}$  будут определены с недопустимой погрешностью. Для решения обратных задач (11) и (12) необходимо применять специальные методы регуляризации [4–11], основанные на использовании дополнительной априорной информации, например о погрешностях измерений токов влияющих ВЛ и наведенных напряжений и токов. Принципиальный алгоритм решения обратных задач (11) и (12) методами регуляризации с использованием дополнительной априорной информации приведен в [2].

Полученная эмпирическая формула (9) позволяет оценить сверху максимально возможное значение наведенного напряжения на рассматриваемом рабочем месте отключенной ВЛ по выражению [12]:

$$U_m = \sum_{i=1}^N (I_{1m_i} z_{1i} + I_{2m_i} z_{2i} + 3I_{0m_i} z_{0i}), \quad (13)$$

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

При этом предполагается, что значения модулей токов  $I_{1m_i}$ ,  $I_{2m_i}$ ,  $3I_{0m_i}$  известны, например, в результате статистической обработки данных, пре-

доставленных диспетчерскими службами организаций владельцев ВЛ.

**Определение входных сопротивлений  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  участков отключенной ВЛ.** Значения входных сопротивлений  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  участков отключенной ВЛ определим эмпирически, используя результаты измерений наведенных напряжений и токов по обеим схемам измерения.

Из схемы замещения для первой схемы измерения (рис. 2,а) следует, что в любой момент времени  $t_1 \in T_1$  справедливы следующие равенства ( $T_1$  – интервал времени проведения серии измерений по первой схеме измерения):

$$\dot{E}_\alpha(t_1) = \dot{U}(t_1) + \dot{I}(t_1)\dot{Z}_\alpha; \quad (14)$$

$$\dot{E}_\beta(t_1) = \dot{U}(t_1) - \dot{I}(t_1)\dot{Z}_\beta. \quad (15)$$

Определить сопротивления  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  непосредственно из системы уравнений (14) и (15) невозможно, так как значения ЭДС  $\dot{E}_\alpha(t_1)$  и  $\dot{E}_\beta(t_1)$ , наведенных на участках отключенной ВЛ в момент времени  $t_1$ , неизвестны.

В свою очередь, из схемы замещения для второй схемы измерения (рис. 2,б) следует, что в любой момент времени  $t_2 \in T_2$  справедливы следующие равенства ( $T_2$  – интервал времени проведения серии измерений по второй схеме измерения):

$$\dot{E}_\alpha(t_2) = \dot{U}_\gamma(t_2) + \dot{I}_\alpha(t_2)\dot{Z}_\alpha; \quad (16)$$

$$\dot{E}_\beta(t_2) = \dot{U}_\gamma(t_2) - (\dot{I}_\alpha(t_2) - \dot{I}_\gamma(t_2))\dot{Z}_\beta. \quad (17)$$

Определить сопротивления  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  непосредственно из системы уравнений (16) и (17) также невозможно, так как значения ЭДС  $\dot{E}_\alpha(t_2)$  и  $\dot{E}_\beta(t_2)$ , наведенных в момент времени  $t_2$ , тоже неизвестны.

В общем случае ЭДС  $\dot{E}_\alpha(t)$  в интервалах времени  $T_1$  и  $T_2$  имеет различные значения вследствие суточных изменений токовых нагрузок влияющих ВЛ:

$$\dot{E}_\alpha(t_1) \neq \dot{E}_\alpha(t_2). \quad (18)$$

Аналогично, ЭДС  $\dot{E}_\beta(t)$  в общем случае тоже имеет различные значения в этих интервалах времени:

$$\dot{E}_\beta(t_1) \neq \dot{E}_\beta(t_2). \quad (19)$$

Следовательно, определить сопротивления  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  решением совокупной системы уравнений (14)–(17) также невозможно.

Однако входные сопротивления  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  можно найти, например, из системы уравнений (16) и (17), если неизвестные значения  $\dot{E}_\alpha(t_2)$  и  $\dot{E}_\beta(t_2)$  найти как значения функций  $\dot{E}_\alpha(t)$  и  $\dot{E}_\beta(t)$  в момент времени  $t_2$ . Разумеется, что для этого необходимо достоверно определить функции времени  $\dot{E}_\alpha(t)$  и  $\dot{E}_\beta(t)$ .

Из схемы замещения для первой схемы измерения (рис. 2,б) следует, что функции времени  $\dot{E}_\alpha(t)$  и  $\dot{E}_\beta(t)$  можно определить следующим образом:

$$\dot{E}_\alpha(t) = \dot{U}(t) + \dot{I}(t)\dot{Z}_\alpha; \quad (20)$$

$$\dot{E}_\beta(t) = \dot{U}(t) - \dot{I}(t)\dot{Z}_\beta. \quad (21)$$

Входящие в (20) и (21) функции  $\dot{U}(t)$  и  $\dot{I}(t)$  выразим эмпирическими формулами (9) и (10):

$$\dot{U}(t) = \dot{U}_e(t); \quad (22)$$

$$\dot{I}(t) = \dot{I}_e(t). \quad (23)$$

Тогда выражения (20) и (21) принимают следующий вид:

$$\dot{E}_\alpha(t) = \dot{U}_e(t) + \dot{I}_e(t)\dot{Z}_\alpha; \quad (24)$$

$$\dot{E}_\beta(t) = \dot{U}_e(t) - \dot{I}_e(t)\dot{Z}_\beta. \quad (25)$$

Следовательно, неизвестные значения ЭДС  $\dot{E}_\alpha(t_2)$  и  $\dot{E}_\beta(t_2)$  определяются следующим образом:

$$\dot{E}_\alpha(t_2) = \dot{U}_e(t_2) + \dot{I}_e(t_2)\dot{Z}_\alpha; \quad (26)$$

$$\dot{E}_\beta(t_2) = \dot{U}_e(t_2) - \dot{I}_e(t_2)\dot{Z}_\beta. \quad (27)$$

Тогда из выражений (16), (17), (26) и (27) следует, что входные сопротивления участков отключенной ВЛ  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  можно определить по следующим выражениям:

$$\dot{Z}_\alpha = \frac{\dot{U}_e(t_2) - \dot{U}_\gamma(t_2)}{\dot{I}_\alpha(t_2) - \dot{I}_e(t_2)}; \quad (28)$$

$$\dot{Z}_\beta = \frac{\dot{U}_e(t_2) - \dot{U}_\gamma(t_2)}{\dot{I}_e(t_2) - \dot{I}_\alpha(t_2) + \dot{I}_\gamma(t_2)}. \quad (29)$$

Выражения (28), (29) позволяют определить значения входных сопротивлений  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  по результатам однократных измерений наведенного напряжения  $\dot{U}_\gamma(t_2)$  и токов  $\dot{I}_\gamma(t_2)$  и  $\dot{I}_\alpha(t_2)$  в некоторый конкретный момент времени  $t_2 \in T_2$ . Для повышения точности определения входных сопротивлений  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  следует использовать результаты многократных измерений наведенного напряжения и токов по второй схеме измерения, т.е. вычислять по выражениям (28) и (29) значения входных сопротивлений для каждого момента времени измерения  $t_2$  и в результате статистической обработки определять средние значения входных сопротивлений  $\bar{Z}_\alpha$  и  $\bar{Z}_\beta$ .

Следует особо отметить, что существует принципиальная возможность определения достоверных значений входных сопротивлений  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  (или  $\dot{Z}$ ) путем их натуральных измерений с помощью измерителей иммитанса. Однако при этом возникает следующая трудность – применяемые средства измерения должны исключать или учитывать в виде поправки влияние наведенных на провода отключенной ВЛ ЭДС, в том числе их высших и низших гармоник, на результат измерения. При использовании же средств измерения, не удовлетворяющих данному требованию, значения входных сопротивлений  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  (или  $\dot{Z}$ ) в общем случае будут определены с недопустимой погрешностью.

**Определение уровня снижения наведенного напряжения при заземлении проводов отключенной ВЛ на рабочем месте.** Возможность практического применения защитного заземления для обеспечения электробезопасности проведения работ на отключенной ВЛ определяется наличием или возможностью выполнения на рабочем месте ВЛ заземлителя с необходимым значением сопротивления  $R$ . Действительно, необходимое значение сопротивления  $R$  может оказаться настолько малым, что потребуются заземлитель сравнительно больших размеров, выполнение которого станет практически невозможным или экономически нецелесообразным. В этом случае рациональным будет обеспечение электробезопасности не защитным заземлением, а одной из специальных технологий безопасного производства работ на отключенной ВЛ.

В любом случае на рабочем месте отключенной ВЛ согласно ПОТЭЭ необходимо выполнить заземление всех ее проводов, что приведет к снижению наведенного напряжения. Если известно значение сопротивления  $\dot{Z}_\gamma$  заземлителя, который ис-

пользуется для заземления проводов ВЛ на рабочем месте, то коэффициент снижения наведенного напряжения  $k_U$  можно определить по следующему выражению, полученному из выражения (3):

$$k_U = \left| \frac{\dot{Z}_\alpha \dot{Z}_\beta}{\dot{Z}_\gamma (\dot{Z}_\alpha + \dot{Z}_\beta)} + 1 \right|. \quad (30)$$

Тогда наибольшее значение  $U_{\gamma m}$  наведенного напряжения при заземлении проводов ВЛ на рабочем месте можно определить следующим образом:

$$U_{\gamma m} = U_m / k_U. \quad (31)$$

Следует отметить, что значения наведенного напряжения  $U_m$  и  $U_{\gamma m}$  подлежат обязательному определению в соответствии с ПОТЭЭ и должны быть указаны в перечне ВЛ, находящихся под наведенным напряжением.

Если для заземления проводов ВЛ используется тот же заземлитель, что и для второй схемы измерения, то его сопротивление  $\dot{Z}_\gamma$  можно определить, используя результаты измерений наведенного напряжения и тока:

$$\dot{Z}_\gamma = \frac{\dot{U}_\gamma(t_2)}{\dot{I}_\gamma(t_2)}. \quad (32)$$

Выражение (32) позволяет определить значение сопротивления заземлителя  $\dot{Z}_\gamma$  по результатам однократных измерений наведенного напряжения  $\dot{U}_\gamma(t_2)$  и тока  $\dot{I}_\gamma(t_2)$ , проведенных в некоторый конкретный момент времени  $t_2 \in T_2$ . Для повышения точности определения сопротивления  $\dot{Z}_\gamma$  следует использовать результаты многократных измерений по второй схеме измерения и в результате статистической обработки определять среднее значение сопротивления заземлителя  $\bar{Z}_\gamma$ . Очевидно, что если  $\left| \bar{Z}_\gamma \right| \leq R$ , то заземлитель из второй схемы измерения можно использовать в качестве заземлителя рабочего места.

**Методика определения сопротивления заземлителя рабочего места.** В итоге можно изложить методику определения значения сопротивления заземлителя  $R$ , которое позволяет обеспечить снижение наведенного напряжения на рабочем месте отключенной ВЛ ниже предельно допустимого значения  $U_{\text{пр}}$ .

1. На рассматриваемом рабочем месте отключенной и заземленной на обоих концах ВЛ выполняется уравнивание потенциалов всех ее проводов

без их заземления, затем на рабочем месте проводится серия из  $M_1$  синхронных измерений комплексных значений наведенного напряжения  $\dot{U}$  и суммарного по всем проводам ВЛ тока  $\dot{I}$  (рис. 1,а).

2. Далее на рабочем месте ВЛ все провода присоединяются к некоторому специально выполненному или существующему обособленному заземлителю (например к опоре ВЛ с изолированным креплением молниезащитного троса), затем на рабочем месте проводится серия из  $M_2$  измерений комплексных значений наведенного напряжения  $\dot{U}_\gamma$ , тока  $\dot{I}_\gamma$  и суммарного по всем проводам ВЛ тока  $\dot{I}_\alpha$  (рис. 1,б).

3. Путем решения обратных задач (11) и (12) определяются эмпирические формулы (9) и (10) для функций наведенного напряжения  $\dot{U}(t)$  и тока  $\dot{I}(t)$  на рассматриваемом рабочем месте отключенной и заземленной на обоих концах ВЛ (алгоритм формирования обратных задач (11) и (12) приведен в [2]).

4. По выражению (13) определяется максимально возможное значение наведенного напряжения  $U_m$  на рассматриваемом рабочем месте отключенной и заземленной на обоих концах ВЛ.

5. По (28) и (29) вычисляются значения входных сопротивлений  $\dot{Z}_\alpha$  и  $\dot{Z}_\beta$  для каждого момента времени измерения напряжения  $\dot{U}_\gamma$  и токов  $\dot{I}_\alpha$  и  $\dot{I}_\gamma$ , затем в результате статистической обработки вычисляются средние значения входных сопротивлений  $\bar{\dot{Z}}_\alpha$  и  $\bar{\dot{Z}}_\beta$ .

6. По выражению (8) вычисляется значение сопротивления заземлителя  $R$ , которое позволяет обеспечить безопасное проведение работ на рассматриваемом рабочем месте заземленной на обоих концах ВЛ. Если на рабочем месте предполагается

использовать заземлитель, сопротивление которого имеет индуктивный характер, то определенное по выражению (8) значение  $R$  следует рассматривать как модуль сопротивления заземлителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** по охране труда при эксплуатации электроустановок. Приказ Минтруда России от 24.07.2013 г. N 328н (в ред. Приказа Минтруда России от 15.11.2018 N 704н).
2. **Горшков А.В.** Эмпирический метод определения максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи. — *Электричество*, 2019, № 11, с. 23–32.
3. **Hadarnard J.** Sur les problemes aux d'rivies partielles et leur signification physique. — *Princeton University Bulletin*, 1902, 13, pp. 49–52.
4. **Тихонов А.Н.** Решение некорректно поставленных задач и метод регуляризации. — *Доклады АН СССР*, 1963, т. 151, № 3, с. 501–504.
5. **Тихонов А.Н.** О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения. — *Доклады АН СССР*, 1965, т. 163, № 3, с. 591–594.
6. **Тихонов А.Н.** О приближенных системах линейных алгебраических уравнений. — *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 1980, т. 20, № 6, с. 1373–1383.
7. **Тихонов А.Н.** О нормальных решениях приближенных систем линейных алгебраических уравнений. — *Доклады АН СССР*, 1980, т. 254, № 3, с. 549–554.
8. **Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.** Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983, 200 с.
9. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986, 288 с.
10. **Tikhonov A.N., Arsenin V.Y.** Solutions of ill-posed problems. New York: Winston, 1977, 258 p.
11. **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.
12. **Горшков А.В.** Определение максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи. — *Электричество*, 2017, № 11, с. 12–21.

[09.07.2020]

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

## Determining the Protective Grounding Conductor Impedance to Ensure Safety in Carrying out Work on the Disconnected Power Line

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

*It is proposed to ensure safety in carrying out work on a disconnected overhead power line by using a grounding conductor at the workplace having the impedance at which the induced voltage will be decreased down to permissible values. For reliably determining the necessary grounding conductor impedance, the results from multiple measurements of the induced voltage and current at the overhead power line point in which the work is carried out are used. Based on the results of measurements and solution of the inverse*

problems, empirical formulas for the functions of induced voltage and current in the considered place at which work on the overhead power line is carried out are determined. The necessary impedance of the grounding conductor at the workplace is determined using the obtained empirical formulas. As a result, a procedure has been developed using which it is possible to determine the grounding conductor impedance that ensures safety of work carried out at the considered place of the disconnected overhead power line whatever the combination of operating currents through the influencing overhead power lines.

**К е у w o r d s:** power line, induced voltage, protective grounding, grounding conductor, electric safety

---

REFERENCES

---

1. **Pravila po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok.** *Prikaz Mintruda Rossii ot 24.07.2013 g. N 328n (v red. Prikaza Mintruda Rossii ot 15.11.2018 N 704n)* (Rules for labor protection during the operation of electrical installations. Order of the Ministry of Labor of Russia of July 24, 2013 N 328n (as amended by the Order of the Ministry of Labor of Russia of November 15, 2018 N 704n).

2. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 11, pp. 23–32.

3. **Hadamard J.** Sur les problemes aux d'rivies partielles et leur signification physique (Sur les problemes aux d'rivies partielles et leur signification physique). *Princeton University Bulletin*, 1902, 13, pp. 49–52.

4. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ. (Reports of the USSR Academy of Sciences)*, 1963, vol. 151, No. 3, pp. 501–504.

5. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ. (Reports of the USSR Academy of Sciences)*, 1965, vol. 163, No. 3, pp. 591–594.

6. **Tikhonov A.N.** *Journal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki – in Russ. (Journal of Computational*

*Mathematics and Mathematical Physics)*, 1980, vol. 20, No. 6, pp. 1373–1383.

7. **Tikhonov A.N.** *Doklady AN SSSR – in Russ. (Reports of the USSR Academy of Sciences)*, 1980, vol. 254, No. 3, pp. 549–554.

8. **Tikhonov A.N., Goncharskiy A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.** *Regulyariziruyushchiye algoritmy i apriornaya informatsiya* (Regularizing algorithms and a priori information). M.: Nauka, 1983, 200 p.

9. **Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.** *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* (Methods for solving ill-posed problems). M.: Nauka, 1986, 288 pp.

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

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

12. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 11, pp. 12 – 21.

[09.07.2020]