

Защитные функции переносного заземления на воздушных линиях электропередачи

А.Л. Куликов¹, А.О. Мирзаабдуллаев²

¹ Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

² ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС», г. Москва, Российская Федерация

Авторское резюме

Состояние вопроса: Анализ опыта применения и условий функционирования защитного заземления, устанавливаемого на ВЛ в соответствии с требованиями «Межотраслевых Правил по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок», показывает его низкую эффективность, что не позволяет в полной мере обеспечить безопасность при производстве ремонтных работ на ВЛ. В связи с этим вопрос обеспечения безопасности производства ремонтных работ и исследования условий повышения эффективности заземляющего устройства на ВЛ в настоящее время являются актуальными.

Материалы и методы: Результаты получены на основании анализа условий организации и проведения практической работы на ремонтируемых ВЛ 110–500 кВ, натурных испытаний заземляющих устройств опор на действующих линиях путем схемного и математического моделирования.

Результаты: Исследована возможность применения заземляющих устройств опор ВЛ и одиночного штыря в качестве коллективного защитного средства (переносного заземления) при работах на ВЛ. Обоснована неэффективность переносного заземления на ВЛ в связи с наличием реальной опасности напряжения прикосновения для персонала при выносе потенциала на заземленные провода ВЛ. Предложено ввести понятие «зоны выравнивания потенциала заземляющего устройства» на ВЛ и впервые показано, что только в пределах этой зоны заземляющее устройство может являться эффективным защитным средством при работах на ВЛ.

Выводы: Введение понятия «зоны выравнивания потенциала заземляющего устройства» позволит конкретизировать применяемые технические мероприятия по обеспечению безопасности работ на ВЛ, корректно определить зону эффективной защиты заземляющего устройства и гарантированно обеспечить безопасность при производстве работ на ВЛ.

Ключевые слова: заземляющее устройство, напряжение прикосновения, зона растекания, зона нулевого потенциала, зоны выравнивания потенциала.

Protective functions of portable grounding devices of overhead transmission lines

A.L. Kulikov¹, A.O. Mirzaabdullaev²

¹ Branch of JSC FGC UES – Nizhny Novgorod PMES, Nizhny Novgorod, Russian Federation

² JSC Technical inspection UES, Moscow, Russian Federation

Abstract

Background: Analysis of experience in the application and operating conditions of protective grounding installed on overhead transmission lines in accordance with the requirements of the «Inter-branch Rules on Labour Safety (Safety Rules) for Operation of Electrical Equipment» shows its low efficiency, which makes it impossible to ensure complete safety of renovation works on overhead lines. In this regard, it is now urgent to study the conditions of increasing the efficiency of the overhead lines grounding devices in order to ensure repair work security.

Materials and methods: The results obtained by the analysis of the conditions of the organizing and conducting practical work on 110–500 kV HVL under repair, full-scale tests of the supports of the grounding devices on the lines in operation by circuit and mathematical modeling.

Results: We have studied the possibility of applying grounding devices of overhead lines supports and a single pin as a collective protective means (portable grounding) when working on overhead lines. We proved the inefficiency of portable grounding devices of overhead lines and the real danger of touch voltage for the staff when the capacity is put on the earthed power lines. We suggested introducing the notion of «a grounding device potential balancing area» on the overhead lines and for the first time showed that it is within this zone that grounding devices can be an effective deterrent on overhead lines.

Conclusions: The introduction of the concept of «a grounding device potential balancing area» allows us to specify the applied technical measures ensuring the overhead lines safety, to correctly determine the area of effective protection of the grounding device and to ensure safety of overhead lines repairing.

Key words: grounding device, touch voltage, area of spreading, zero potential area, potential balancing area.

В соответствии с требованиями «Межотраслевых правил по охране труда (Правила безопасности) при эксплуатации электроустановок»¹ (далее ПОТ РМ), допуск линейных бригад для производства работ на ВЛ с при-

новок»¹ (далее ПОТ РМ), допуск линейных бригад для производства работ на ВЛ с при-

¹ Межотраслевые правила по охране труда (Правила безопасности) при эксплуатации электроустановок, ПОТ РМ-016-2001.

косновением или приближением к токоведущим частям на недопустимое расстояние осуществляется после отключения и заземления этих линий. Схема заземления ВЛ определена в ПОТ РМ критерием: заземляться ВЛ должна со всех сторон, откуда может быть подано напряжение, а также зависит от того, находится данная линия под наведенным напряжением или нет.

В ПОТ РМ не используются принятые в Правилах устройства электроустановок² понятия защиты персонала от прямого прикосновения, от косвенного прикосновения. Однако габариты опор (высота, междуфазные и изоляционные расстояния) при строгом выполнении требований организационно-технических мероприятий, предусмотренных в ПОТ РМ, гарантируют защиту работника от опасности прямого прикосновения к токоведущим частям (проводам) ВЛ, находящихся под напряжением. Но при этом защита от опасности косвенного прикосновения при производстве работ на ВЛ в ПОТ РМ не рассматривается, так как считается, что ошибочная или самопроизвольная подача напряжения на отключенную ВЛ исключается организационно-техническими мероприятиями, предусмотренными при выводе ВЛ в ремонт. Однако непредвиденными обстоятельствами (обрыв и падение проводов пересекающихся ВЛ, находящихся под напряжением; короткое замыкание на влияющих ВЛ; вынос опасного потенциала с заземляющих устройств ПС через заземляющие ножи на провода отключенной ВЛ) пренебрегать как маловероятными событиями нельзя. По опубликованным данным [1], в Нижегородской энергосистеме таких коротких замыканий ежегодно происходит от 150 до 200. В основах техники безопасности [2] рассмотрена опасность косвенного прикосновения только для локальных электроустановок. В большинстве работ, в том числе в [3, 4], касающихся проблем обеспечения безопасности работ на ВЛ, рассматривается в основном опасность наведенного напряжения на ВЛ. При этом все принимаемые для этой цели меры направлены исключительно на снижение на рабочем месте действующего значения напряжения до безопасных (малоопасных) величин, т.е. до 25 В.

Необходимо подчеркнуть, что в ПОТ РМ также речь идет именно о действующем значении напряжения на рабочем месте и, следовательно, о «напряжении прикосновения» не упоминается.

В последнее время большинство работ по проблемам заземляющих устройств посвящено исследованию характеристик электромагнитных полей вблизи протяженных заземлителей [5] при воздействии на них импульсных и синусоидальных токов, а также созданию их математических моделей [6]. Результаты

этих работ могут быть широко использованы при расчетах эксплуатационных параметров заземляющих устройств, требуемых на стадии проектирования, когда необходимо учитывать влияние естественных заземлителей. Однако влиянию характерных зон заземляющих устройств опор на обеспечение безопасности работ на ВЛ уделено недостаточное внимание.

Ниже проводится анализ характерных зон заземляющего устройства на ВЛ, условий реализации защитных функций заземления на рабочем месте без учета стационарного заземления (заземляющие ножи линейных разъединителей) ВЛ со стороны электрических станций и подстанций.

Заземляющее устройство как эффективное защитное средство от поражения электрическим током при работе в электроустановках исследовано достаточно глубоко, результаты этих исследований отражены в действующих технических регламентах. Однако эффективность защитных функций заземляющего устройства на ВЛ не столь очевидна ввиду того, что поверхность земли вблизи заземляющего устройства опор не является эквипотенциальной и просто установка переносного заземления (ПЗ) на ВЛ не обеспечивает снижение напряжения прикосновения до допустимых пределов.

Как правило, провода ВЛ заземляются на рабочем месте на ПЗ, устанавливаемое между проводами и заземляющим устройством (ЗУ) опор, или на одиночное ЗУ «штырь» в соответствии с ПОТ РМ. Для определения безопасных зон заземляющих устройств отдельных типов опор ВЛ и одиночного штыря проведено измерение распределения потенциала на поверхности земли и ожидаемого напряжения прикосновения при протекании через них тока промышленной частоты величиной 10 А. Предварительно определены сопротивления заземляющих устройств для четырех типов ЗУ. Результаты проведенных измерений внесены в таблицу.

№ п/п	Тип опор и заземляющего устройства	Потенциал земли и ожидаемое напряжение прикосновения V , на расстоянии от ЗУ, м						
		0,0	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
1	Металлическая АУ опоры с ЗУ прямоугольной формы, 5 Ом	50	45	30	20	5	2	0
		0	5	20	30	45	48	50
2	Многогранная опора с вертикальным ЗУ, 7 Ом	70	60	45	30	10	3	0
		0	10	25	40	60	67	70
3	Железобетонная опора с вертикальным ЗУ, 10 Ом	100	80	60	50	20	5	0
		0	20	40	50	80	95	100
4	Одиночное ЗУ, штырь, глубиной 1,0 м, 70 Ом	700	200	75	20	5	0	0
		0	500	625	680	695	700	700

² Правила устройства электроустановок (седьмое издание). СО 153-34.20.120. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.

Защитные функции заземляющего устройства реализуются двумя способами:

1) уменьшением напряжения прикосновения путем шунтирования (проводником с малым сопротивлением) доступных для одновременного прикосновения токопроводящих частей электроустановок;

2) созданием искусственного короткого замыкания на месте заземления токоведущих частей (проводов ВЛ) и тем самым приведением в действие устройств релейной защиты и автоматики на отключение электроустановки от источника питания (напряжения). Эффективность первой функции (шунтирование малым сопротивлением) очевидна только в локальных электроустановках: на электрических станциях, подстанциях, а также в электроустановках 0,4 кВ распределительных электрических сетей, где с помощью развитого контура заземляющего устройства реализовано выравнивание потенциала.

Так же бесспорна эффективность второй функции защитного заземления в локальных электроустановках, когда речь идет об организации защиты людей от напряжения прикосновения к токопроводящим частям (корпусам), нормально находящимся без напряжения и оказывающимся под опасным напряжением только при нарушениях изоляции (аварийных случаях). При этом, учитывая кратковременность процесса отключения (0,1–0,3 с), подразумевается, что вероятность прикосновения человека за это время мала. Если человек все же прикоснется в этот промежуток времени, действие тока будет кратковременным и, вероятно, малоопасным, так как, в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81³, между величиной напряжения прикосновения и длительностью воздействия установлена определенная взаимосвязь.

На основании вышеизложенных утверждений, заземляющее устройство признано защитным средством для всех видов электроустановок, в том числе и для воздушных линий электропередачи, что отражено в государственных стандартах (ГОСТ 12.1.038-82⁴). В отличие от локальных электроустановок, ЗУ ВЛ практически не имеют развитый контур и выполняют несколько иные функции, отличные от целей электробезопасности. ЗУ ВЛ предназначены прежде всего для защиты изоляции от грозовых перенапряжений и обеспечения селективности работы релейной защиты и автоматики при повреждении или снижении уровня изоляции. Для обеспечения должного уровня грозоупорности ВЛ необходимо нормирование сопротивления каждой опоры независимо от

наличия гальванической (через землю) или металлической связи (по грозозащитному тросу) ее с другими опорами.

Поэтому требуется контроль сопротивления заземляющего устройства каждой опоры в отдельности. А для обеспечения селективности работы релейной защиты и автоматики при повреждении или снижении уровня изоляции в ПУЭ предусматривается заземление грозозащитного троса на каждой опоре и тем самым снижение результирующего сопротивления. Для анализа схемы ВЛ или ее участка, где имеется грозозащитный трос, заземленный на каждой опоре, рассмотрим цепочку из n звеньев (рис. 1).

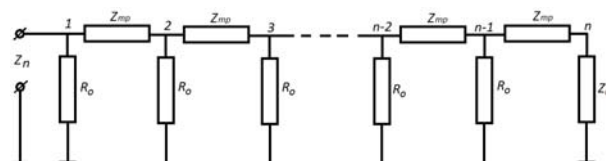


Рис. 1. Однородная цепочка из « n » элементов

Входное сопротивление такой однородной цепочки Z_n , состоящей из n звеньев, образованных сопротивлениями заземляющих устройств опор и грозозащитного троса, определяется, согласно [7], по выражению

$$Z(n) = \frac{Z_0 Z_c + Z_c^2 \operatorname{th}(nk)}{Z_c + Z_n \operatorname{th}(nk)}, \quad (1)$$

где Z_0 – сопротивление, на которое замкнута однородная цепочка, Ом; n – количество звеньев–пролетов однородного участка ВЛ; $\operatorname{th}(nk)$ – гиперболический тангенс; Z_c , k – параметры ВЛ, значения которых определяются как $Z_c = (Z_{\text{тр}}/R_0)^{1/2}$ и $k = (Z_{\text{тр}}/R_0)^{1/2}$; $Z_{\text{тр}}$ – комплексное сопротивление участка грозозащитного троса длиной l :

$$Z_{\text{тр}} = l \sqrt{(0,35 + \rho_T)^2 + 0,021 \left(\lg \frac{D_3}{r} + 2 \sum_i \lg \frac{D_3}{d_i} \right)^2}, \quad (2)$$

где l – длина пролета, км; ρ_T – удельное активное сопротивление грозозащитного троса, Ом/км; D_3 – эквивалентная глубина возврата тока нулевой последовательности через землю, ~ 1000 м; r – радиус грозозащитного троса, м; d_i – расстояние от i -го провода ВЛ до ГТ, м.

Эквивалентное сопротивление $Z_{\text{экв}}$ любой опоры с учетом влияния грозозащитного троса и других опор можно определить по схеме рис. 2.

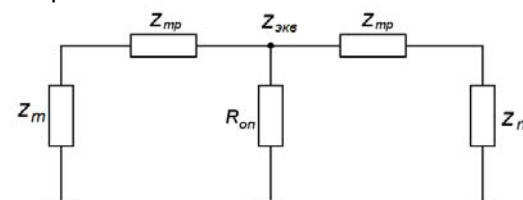


Рис. 2. Расчетная схема для определения эквивалентного сопротивления системы, состоящей из грозозащитного троса и опор

³ ГОСТ 12.1.030-81. ССБТ, Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.

⁴ ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

В соответствии со схемой рис. 2, эквивалентное сопротивление системы ГТ и опор ($Z_{\text{экв}}$) в рассматриваемой точке ВЛ определяется по следующему соотношению:

$$Z_{\text{экв}} = \frac{R_0(Z_{\text{тр}} + Z_m)}{R_0 \frac{(Z_{\text{тр}} + Z_m)}{(Z_{\text{тр}} + Z_n)} + (R_0 + Z_{\text{тр}} + Z_m)}, \quad (3)$$

где значения $Z_n = Z(n)$ и $Z_m = Z(m)$ определяются по соотношению (1), а значение $Z_{\text{тр}}$ по (2).

Для случаев, когда количество пролетов более 20, т.е. при $m > 20$ и $n > 20$ в [2], приводится упрощенное выражение для приближенного расчета эквивалентного (результатирующего) сопротивления опоры:

$$Z_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{R_0 Z_{\text{тр}}}{a}}, \quad (4)$$

где a – число грозозащитных тросов (лучей) на рассматриваемой опоре.

Из выражения (3) следует, что в целях грозозащиты необходимо нормирование не эквивалентного сопротивления системы грозозащитного троса и опор, а конкретного сопротивления каждой опоры. В самом деле, учитывая кратковременное воздействие грозового разряда на эту систему, т.е. воздействие электрического импульса и соответствующее ему волновое сопротивление грозозащитного троса $Z_{\text{тр}}$, подставим в (3) $Z_{\text{тр}}$ вместо $Z_{\text{тр}}$ и тогда, учитывая $Z_{\text{тр}} \gg Z_n$, $Z_{\text{тр}} \gg Z_m$, $Z_{\text{тр}} \gg R_0$,

$$\lim_{Z_{\text{тр}} \rightarrow \infty} (Z_{\text{экв}}) = R_0. \quad (5)$$

Следовательно, эквивалентное сопротивление системы грозозащитного троса и опор для импульсного воздействия приравнивается к сопротивлению самой опоры. Отсюда и требование ПУЭ о нормировании в целях обеспечения необходимого уровня грозоупорности ВЛ сопротивления каждой опоры. В целях же обеспечения селективности релейной защиты и автоматики и т.д., в том числе и в целях электробезопасности, предусмотренных в рамках ПОТРМ, достаточно, чтобы на рассматриваемой опоре эквивалентное сопротивление системы ГТ и опор было в нормируемых пределах.

В данном случае цели заземления для РЗиА и для обеспечения электробезопасности совпадают, так как в обоих случаях предусматривается уменьшение времени существования аварийного режима путем отключения выключателей данной ВЛ от источника. Однако для обеспечения надлежащего уровня электробезопасности этого недостаточно, так как существует, как указывалось выше, определенная связь между величиной (предельно допустимой) напряжения прикосновения и временем действия этого напряжения. Поскольку при минимальных значениях времени действия РЗиА (менее 0,1 с) предельно допустимое напряжение прикосновения для электроустановок напряжением свыше 1000 В со-

ставляет всего 500 В⁴, а на ВЛ 110 кВ и выше вероятное напряжение прикосновения может превышать даже 10 кВ, то наличие проблемы электробезопасности на ВЛ становится более чем очевидным.

Таким образом, даже в благоприятных условиях: с низким удельным сопротивлением грунта (менее 50 Ом·м), минимальным сопротивлением ЗУ опор 10 Ом (а на переходных опорах высотой более 100 м и для опор на двухцепных подходах к ПС эта величина должна быть в два раза меньше, т.е. 5 Ом), не может быть обеспечено коротковременное напряжение прикосновения вблизи опор ВЛ в допустимых пределах, т.е. до 500 В. В самом деле, даже при результирующем сопротивлении системы грозозащитного троса и опоры ВЛ в 1 Ом ожидаемое напряжение прикосновения будет превышать предельно допустимое 500 В при токе КЗ, превышающем 500 А. На ВЛ 110 кВ и выше токи КЗ практически всегда превышают 1000 А.

Известно, что нормированное сопротивление ЗУ определяется относительно точки земли, расположенной за пределами зоны растекания тока ЗУ (т.е. относительно зоны нулевого потенциала). Поэтому проведем анализ возможных ситуаций вблизи ЗУ опор (рис. 3).

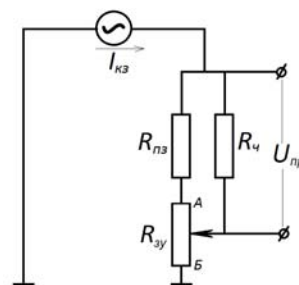


Рис. 3. К определению напряжения прикосновения вблизи ЗУ опор: $U_{\text{пр}}$ – напряжение прикосновения; $R_{\text{пз}}$ – сопротивление переносного заземления; $R_{\text{зз}}$ – сопротивление заземляющего устройства; $R_{\text{ч}}$ – сопротивление человека; $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания

В результате проведенного анализа (рис. 3) установлено, что ожидаемое напряжение прикосновения $U_{\text{опр}}$ (до прикосновения человека) будет иметь различные значения и зависеть от места нахождения человека, т.е. от места его прикосновения.

Нахождение человека за пределами зоны растекания ЗУ опоры (на расстоянии более 20 м) эквивалентно передвигному контакту, находящемуся в точке Б (рис. 3). При этом значение напряжения прикосновения может быть рассчитано как

$$U_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{кз}}(R_{\text{зз}} + R_{\text{пз}})R_{\text{ч}}}{(R_{\text{зз}} + R_{\text{пз}} + R_{\text{ч}})}. \quad (6)$$

Поскольку $R_{\text{пз}}$ должно быть намного меньше $R_{\text{зз}}$, т.е. $R_{\text{пз}} \ll R_{\text{зз}}$ и $(R_{\text{пз}} + R_{\text{зз}}) \sim R_{\text{зз}}$, то из (6) получим

$$U_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{кз}}R_{\text{зз}}R_{\text{ч}}}{(R_{\text{зз}} + R_{\text{ч}})}. \quad (7)$$

Из (7), с учетом соотношения $R_{3y} \ll R_4$ ожидаемое напряжение прикосновения определяется равенством

$$\lim_{R_4 \rightarrow \infty} (U_{пр}) = \lim_{R_4 \rightarrow \infty} \left(\frac{I_{кз} R_{3y} R_4}{R_{3y} + R_4} \right) = I_{кз} R_{3y}. \quad (8)$$

Это напряжение прикосновения равно величине вынесенного потенциала на опору при протекании тока КЗ через ЗУ [8] и представляет серьезную опасность для линейного персонала.

При нахождении человека в непосредственной близости к месту заземления, т.е. в пределах ЗУ опоры (положение передвижного контакта в точке А (рис. 3)), напряжение прикосновения будет равно

$$U_{пр} = \frac{I_{кз} R_{пз} R_4}{(R_{пз} + R_4)}. \quad (9)$$

С учетом $R_{пз} \ll R_4$, $R_{пз} \ll 1$

$$\lim_{R_{пз} \rightarrow 0} (U_{пр}) = \lim_{R_{пз} \rightarrow 0} \left(\frac{I_{кз} R_{пз} R_4}{R_{пз} + R_4} \right) = 0. \quad (10)$$

Соотношение (10) означает, что напряжение прикосновения будет минимальным и безопасным только в пределах зоны выравнивания потенциала переносного заземления, т.е. в пределах самой опоры. В связи с этим в качестве зоны эффективной защиты заземляющего устройства на ВЛ необходимо принять такую зону, в границах которой напряжение прикосновения и напряжение шага будут в допустимых ГОСТом пределах при любых значениях протекающего через это заземляющее устройство тока КЗ, молнии и т.д. В связи с ограниченностью зоны выравнивания потенциала одиночного заземляющего устройства «штыря» целесообразно исключить применение его в качестве защитного заземления (коллективного защитного средства) на ВЛ. При необходимости применения штыря в качестве заземляющего устройства требуется принимать меры по расширению зоны выравнивания потенциала посредством металлических сеток, металлических площадок и т.д.

Заключение

На основании анализа эквивалентной схемы ЗУ, результатов проведенных измерений распределения потенциалов на заземляющих устройствах опор ВЛ 110–500 кВ и условий производства работ на ВЛ сформулированы следующие выводы:

1. Для оценки эффективности устанавливаемого на рабочем месте на ВЛ заземления необходимо учитывать различие напряжений прикосновения в разных зонах заземляющего устройства: в зоне растекания тока; в зоне нулевого потенциала.

2. Для заземляющего устройства на ВЛ помимо определенных в ПУЭ «зоны растекания», «зоны нулевого потенциала» необходимо выделить еще одну характерную зону – «зону выравнивания потенциала».

3. Заземление на ВЛ может быть полноценным защитным средством только в зоне выравнивания потенциала ЗУ, т.е. в пределах эквипотенциальной поверхности самого заземляющего устройства.

Список литературы

1. Тураев В.А., Базанов В.П. О наведенных напряжениях на воздушных линиях при однофазных коротких замыканиях // Электрические станции. – 1998. – № 3. – С. 40–42.
2. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Кузнецов А.П. Наведенное напряжение: мифы и реальность // Энергетик. – 2009. – № 1. – С. 14–16.
4. Вантеев А.И. Проблемы обеспечения безопасности работ на ВЛ, находящихся под наведенным напряжением // Энергетик. – 2008. – № 11. – С. 5–7.
5. Слышалов В.К., Киселева Ю.А. Электромагнитное поле протяженного заземлителя, проложенного параллельно границе раздела воздух-грунт // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 1. – С. 62–69.
6. Киселева Ю.А., Тихомиров М.С. Полевая математическая модель протяженного заземлителя // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 4. – С. 187–188.
7. Генов Л., Сиромахов Б. Определение сечений грозозащитных тросов линий электропередачи с учетом их термической устойчивости // Электричество. – 1972. – № 4. – С. 17–20.
8. Мирзаабдуллаев А.О. О повышении надежности ВЛ 110 кВ с заземленным грозозащитным тросом // Повышение эффективности работы энергосистем: труды ИГЭУ. Вып. V. – М.: Энергоатомиздат, 2002.

References

1. Turaev, V.A., Bazanov, V.P. O navedennykh napryazheniyakh na vozdushnykh liniyakh pri odnofaznykh korotkikh zamykaniyakh [Induced voltages on overhead lines under single-phase short circuits]. *Elektricheskie stantsii*, 1998, no. 3, pp. 40–42.
2. Dolin, P.A. *Osnovy tekhniki bezopasnosti v elektroustanovkakh* [Fundamentals of safety in electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1984.
3. Kuznetsov, A.P. Navedennoe napryazhenie: mify i real'nost' [Induced voltage: myths and reality]. *Energetik*, 2009, no. 1, pp. 14–16.
4. Vanteev, A.I. Problemy obespecheniya bezopasnosti rabot na VL, nakhodyashchikhsya pod navedennym napryazheniem [Problems of providing no-risk works on induced voltage overhead lines]. *Energetik*, 2008, no. 11, pp. 5–7.
5. Slyshalov, V.K., Kiseleva, Yu.A. Elektromagnitnoye pole protyazhennogo zazemlitelya, prolozhennogo parallel'no granitse razdela vozdukh-grunt [Electromagnetic field of extended grounding devices laid parallel to the air-ground interface]. *Vestnik IGUE*, 2005, issue 1, pp. 62–69.
6. Kiseleva, Yu.A., Tikhomirov, M.S. Polevaya matematicheskaya model' protyazhennogo zazemlitelya [Field mathematical model of extended grounding devices]. *Vestnik IGUE*, 2005, issue 4, pp. 187–188.
7. Genov, L., Siromakhov, B. Opredelenie secheniy grozozashchitnykh trosov liniy elektropereдачи s uchetom ikh termicheskoy ustoychivosti [Determination of cross sections of the overhead ground wires taking into account their thermal stability]. *Elektrichestvo*, 1972, no. 4, pp. 17–20.
8. Mirzaabdullaev, A.O. O povyshenii nadezhnosti VL 110 kV s zazemlennym grozozashchitnym trosom [On increasing reliability of 110 kV overhead lines with a ground-wire cable]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [ISPU collected works «Increasing of the efficiency of power systems»]. Moscow, Energoatomizdat, 2002, issue V.

Куликов Александр Леонидович,
филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС;
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
директор, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электроснабжения,
e-mail: kulikov@nrmes.elektra.ru

Мирзаабдуллаев Акрамжан Одилович,
ЗАО «Инспекция по контролю технического состояния объектов электроэнергетики»;
ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС»,
главный эксперт отдела технического аудита оборудования электрических сетей,
e-mail: akramzhan2011@yandex.ru