

Особенности проектирования заземляющего устройства электрической подстанции 110 кВ в грунте со скальным основанием

ЛИПАТКИН В.А., СТЕННИКОВ Д.Е., ШИШИГИН С.Л.

Анализируются особенности проектирования заземляющего устройства (ЗУ) электрической подстанции в грунте с изолирующим (скальным) основанием. Показано, что при горизонтальном растекании тока в подобном грунте имеет место логарифмическое убывание потенциала точечного источника, возрастает сопротивление заземляющего устройства, уменьшаются коэффициенты использования его элементов, возникают проблемы с выносом высокого потенциала за территорию подстанции. Исследованы пути снижения стационарного сопротивления ЗУ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическая подстанция, заземляющие устройства, сопротивление, скальный грунт

Проектирование заземляющих устройств (ЗУ) электрических подстанций (ПС) проводится по критериям электробезопасности и электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Электробезопасность обеспечивается нормировкой напряжения прикосновения (вторая норма ПУЭ) и достигается выбором заземляющей сетки. Альтернативным критерием является нормировка сопротивления ЗУ (0,5 Ом – первая норма ПУЭ), но ее применение не обеспечивает электробезопасность на ПС с большими токами КЗ и ведет к избыточной металлоемкости ЗУ ПС с малыми токами [2]. К требованиям ЭМС относится ограничение напряжения ЗУ при КЗ значением 5 кВ (ПУЭ), что при заданном токе эквивалентно ограничению сопротивления ЗУ, но в отличие от первой нормы ПУЭ его значение индивидуально для каждой ПС. Проектные решения по снижению сопротивления ЗУ целесообразны для любого объекта, но для ПС с большими токами и/или в грунте с низкой проводимостью они неизбежны. Рекомендуемые способы [1–3], связанные с использованием глубинных и выносных заземлителей, не всегда реализуемы, поэтому перед проектировщиком встает задача исключения выноса высокого потенциала и защиты от перенапряжений отходящих кабельных линий.

В статье решение перечисленных задач рассматривается на конкретном проекте ЗУ ПС в двухслойном грунте с проводящим верхним слоем и практически изолирующим скальным основанием, характерным для Урала. На основе исследований

The specific features of designing the grounding device for an electric power substation in soil with insulating (rock) bed are analyzed. It is shown that horizontal spreading of current in such soil results in that the potential of a point source decreases according to a logarithmic law, the impedance of the grounding device increases, the utilization coefficients of its elements decrease, and problems arise due to propagation of a high potential beyond the substation boundaries. Ways for reducing the steady-state impedance of the grounding device are investigated.

Key words: electric power substation, grounding devices, impedance, rocky ground

специфики подобного грунта показаны наиболее рациональные пути снижения сопротивления ЗУ. Обращено внимание на последствия ошибок при определении модели грунта с изолирующим основанием по данным пробного бурения.

Электрическая ПС 110 кВ с закрытым распределительным устройством (ЗРУ) построена для электроснабжения нового микрорайона Екатеринбурга в конце 2008 г. Схема ЗРУ ПС: две рабочие системы шин с шиносоединительным выключателем с 14 ячейками КРУЭ 110 кВ. Питание осуществляется по трем ВЛ 110 кВ с кабельными заходами. За резервированы четыре ячейки КРУЭ для ввода двухцепной КЛ 110 кВ от проектируемой ПС 220 кВ и двух ВЛ 110 кВ. Установлены два трансформатора 110/10 кВ мощностью по 40 МВт. Расчетный ток однофазного КЗ на начальном периоде работы ПС составляет 12 кА, но существенно возрастет (до 44 кА) с вводом дополнительных мощностей в ближайшие годы.

Проект ПС был разработан в полном соответствии с нормами технологического проектирования, однако измерение стационарного сопротивления ЗУ показало, что его значение (около 2 Ом) значительно превышает проектное (0,16 Ом). Основной причиной, как показано далее, является неадекватная расчетная модель земли, полученная по данным бурения серии скважин на площадке объекта. Похожая ситуация описана в [2] и, вероятно, не единственная. Избежать подобных просчетов позволяет проведение вертикального электрического

зондирования (ВЭЗ). Это требование было в [3], но выпало из норм технологического проектирования (и приложений к ним), действующих на момент проектирования рассматриваемой ПС, но вновь закреплено в [1]. Вместе с тем, принимая во внимание работы [4, 5], где показаны значительные погрешности ВЭЗ в условиях мерзлого и скального грунта, этот метод требует совершенствования [6] и его не следует рассматривать как единственный.

Как следствие высокого сопротивления ЗУ потенциал ЗУ ПС в режиме КЗ существенно превышает допустимый (5 кВ), в связи с чем необходимо решить задачу исключения выноса высокого потенциала за территорию ПС по экранам кабельной линии 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (ИСПЭ). Возникает угроза пробоя изоляции оболочки, аналогичной ВЛ 110 кВ, поскольку при удалении от ПС (в «чистой» земле) к оболочке прикладывается почти все напряжение ЗУ в режиме КЗ. Высокий потенциал ЗУ представляет опасность и для изоляции обмоток низкого напряжения трансформаторов.

Авторами статьи был проведен анализ причин расхождения расчетных и экспериментальных значений сопротивления ЗУ и исследованы пути по снижению этого сопротивления.

Геоэлектрическая структура грунта. Эквивалентное удельное сопротивление грунта $\rho = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, использованное на этапе проектирования ЗУ ПС, получено в лабораторных условиях по данным бурения серии скважин на площадке объекта. По завершении строительства проведено ВЭЗ вблизи ПС и вдоль трасс ВЛ 110 (рис. 1).

Необходимо определить параметры двухслойной горизонтально-слоистой модели земли, принятой в настоящее время для инженерных расчетов ЗУ. Касательная к последней точке графика кажущегося удельного сопротивления от разноса токовых электродов $\rho_k(r)$ (рис. 1), проведенная под углом 45° , близка к данным эксперимента, что позволяет интерпретировать изолирующее (скальное) основание [7]. Точка пересечения касательной с

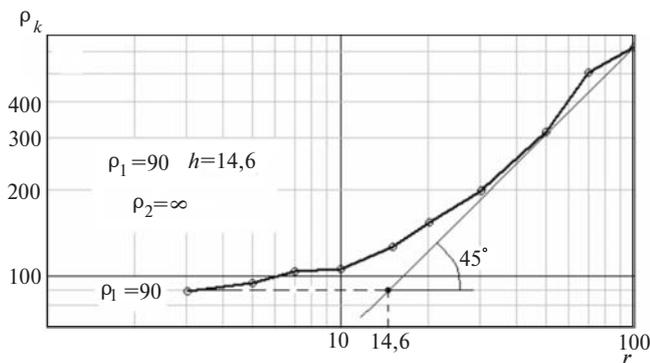


Рис. 1. Графический метод определения параметров двухслойного грунта с изолирующим основанием по данным ВЭЗ

уровнем $\rho_1 = 90 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ определяет мощность верхнего слоя $h = 14,6 \text{ м}$ по методу палеток [7]. Автоматизированный расчет на основе минимизации среднеквадратичной погрешности данных эксперимента и модели дает близкие результаты. Линии уровня функции погрешности – вытянутые (рис. 2), поэтому в пределах точности измерений можно предложить несколько различных моделей земли, что характерно для некорректных задач. Действительно, при изменении значения ρ_2 в 2 раза (с 6000 до 3000 Ом·м) погрешность изменяется на 2% (рис. 2). Принимаем двухслойную модель земли $\rho = 95/6000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ с проводящим верхним слоем мощностью 14 м и фактически изолирующим ($\rho_2 \gg \rho_1$) основанием. Подчеркнем, что это – расчетная модель и она в наилучшей степени удовлетворяет экспериментальным данным для точечных источников в двухслойной среде, но далее адекватность модели подтверждается измерениями сопротивления ЗУ.

Полученная модель земли принципиально отличается от модели на этапе проектирования наличием нижнего изолирующего слоя, что является основной причиной расхождения с результатами измерений. Применение ВЭЗ позволило его «рассмотреть», хотя значение $\rho_2 = 6000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ является завышенным по данным геологии. Но к завышенным значениям ρ_2 (по сравнению с методами дистанционно индуцированного зондирования и резонансно-акустического профилирования) приводит ВЭЗ и в скальном грунте в районе Выборга [5].

Таким образом, получена расчетная модель земли с проводящим верхним слоем и изолирующим (скальным) основанием.

Особенности расчета ЗУ в грунте с изолирующим основанием. Сопоставим условия растекания тока полупогруженного сферического заземлителя в однородном грунте и грунте с изолирующим основанием. В первом случае имеем электрическое поле сферы в однородной среде, характеризующееся гиперболическим затуханием потенциала. В двухслойной земле источник тока последовательно отражается от двух границ (рис. 3), что приводит к бесконечному числу пар зеркальных электродов в однородной среде с удельным сопротивлением ρ_1 и потенциалом

$$j(r) = \frac{\rho_1 I \dot{e}}{2\rho \dot{e} r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \dot{e} k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}, \quad (1)$$

где k – коэффициент отражения; r – расстояние от центра сферы на поверхности земли.

В грунте с изолирующим основанием $\rho_2 \gg \rho_1$, коэффициент k близок к единице, поэтому ряд в (1) знакопостоянный и медленно сходящийся.

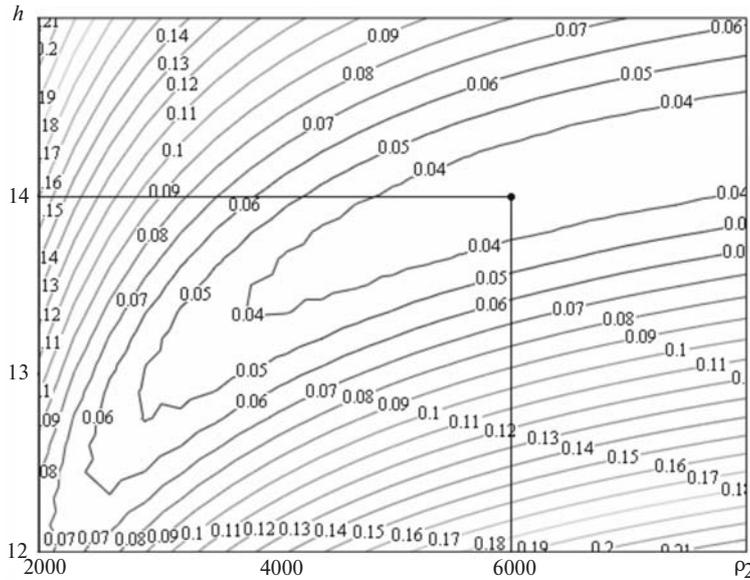


Рис. 2. Среднеквадратичная погрешность двухслойной модели земли в функции r_2, h при $r_1 = 95 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Система зеркальных источников (рис. 3) в грунте с изолирующим основанием в «дальней» зоне ($r \gg h$) практически совпадает с заряженной осью бесконечной длины с логарифмическим потенциалом. «Ближняя» зона ($r < h$) представляет меньший интерес, но и здесь потенциал (1) (без постоянного множителя)

$$j(r) = 1/r - 2 \ln(1 - k) = 1/r + C$$

из-за константы C затухает существенно медленнее, чем $1/r$.

Таким образом, результирующий потенциал точечного источника в грунте с изолирующим основанием имеет две составляющие – быстро затухающую гиперболическую составляющую, характерную для однородного грунта, и логарифмическую составляющую, обусловленную зеркальными источниками и затухающую медленно.

Медленное убывание потенциала приводит к усилению взаимного влияния заземлителей и низким коэффициентам их использования по сравнению с однородным грунтом, следовательно, к высоким сопротивлениям ЗУ. Но с точки зрения электробезопасности медленное убывание потенциала является положительным фактором, поскольку приводит к выравниванию потенциала на поверхности земли и уменьшению напряжения прикосновения.

Специфика грунта с изолирующим основанием должна учитываться при проектировании ЗУ, а также при разработке программ расчета ЗУ. Для уменьшения сопротивления ЗУ в подобном грунте следует развивать периферию ЗУ. В программе ЗУМ [8], использованной в данном случае, реали-

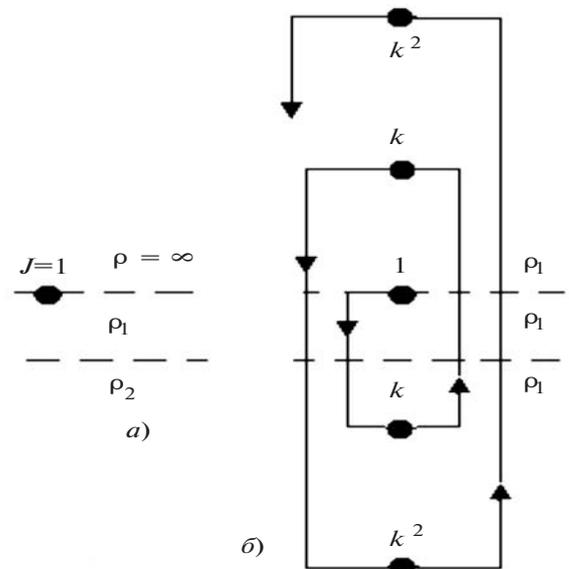


Рис. 3. Точечный источник в двухслойной земле (а) и его модель с бесконечным числом зеркальных изображений в однородной среде (б)

зована методика ускорения сходимости бесконечных рядов (1), позволяющая проводить расчеты ЗУ в грунте с заданной точностью и высоким быстродействием.

Расчетная модель ЗУ включает в себя заземлитель ПС, заземлители оконечных опор и систему трос–опоры трех ВЛ (рис. 4).

Фундаменты металлических опор ВЛ-1 и ВЛ-2 с грибовидными подножниками Ф5 моделируются стержнями (рис. 5), размеры которых получены в [9] при сопоставлении с данными физического моделирования [10]. Свайные фундаменты железобетонных опор ВЛ-3 моделируются стержнями диаметром $D = 470 \text{ мм}$, длиной 3 м.

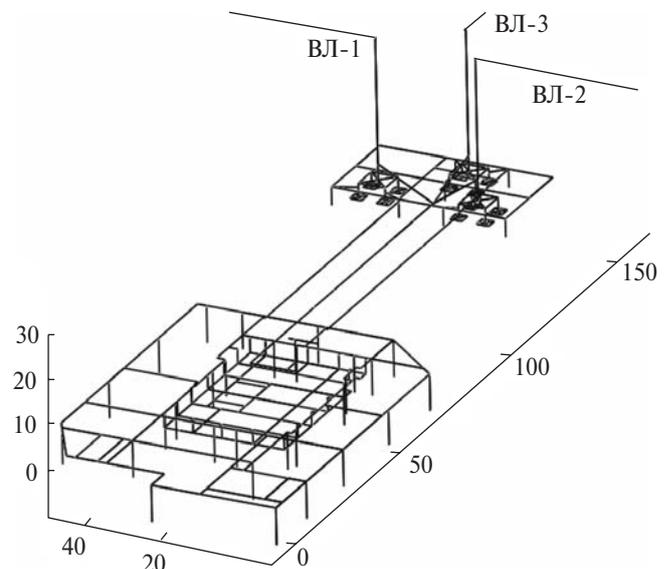


Рис. 4. Расчетная модель ЗУ ПС 110 кВ

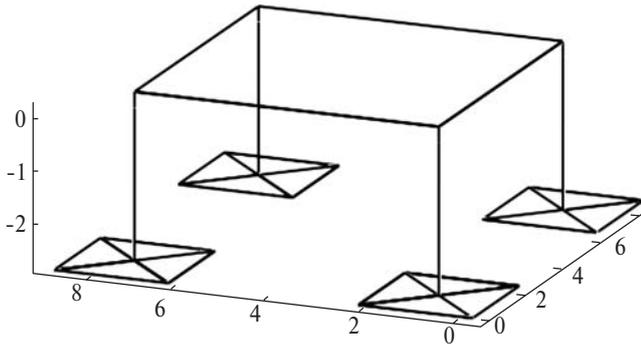


Рис. 5. Расчетная модель фундамента опоры с четырьмя под-ножниками серии Ф5

Стальной грозозащитный трос ТК-50 моделируется цилиндром с удельной проводимостью $g = 0,5 \times 10^7$ См/м (сопротивление на единицу длины $R_0 = 4$ Ом/км) и магнитной проницаемостью $\mu_r = 15$, существенно меньшей, чем μ_r составляющих трос стальных проволок [11, 12]. Число пролетов ВЛ в расчетной модели принято равным $n = 11$, исходя из погрешности $d = 5\%$ [13]:

$$n = - \ln(d) \sqrt{r_{\text{тр}} / R_{\text{оп}}},$$

где $r_{\text{тр}}$ – сопротивление троса в пролете длиной 200 м; $R_{\text{оп}}$ – сопротивление фундамента опоры.

Сопротивление ЗУ. Исследуем влияние отдельных элементов ЗУ на его стационаре сопротивление R . Сопротивление заземлителя ПС (в пределах ограждения) равно $R = 3,7$ Ом. Сопротивление не изменится, если из расчетной модели исключить центральную часть заземлителя, что соответствует сделанному ранее утверждению о периферийном растекании тока ЗУ в грунте с изолирующим основанием. Эквивалентное удельное сопротивление однородной земли равно $\gamma_{\text{экв}} = 575$ Омж.

С учетом заземлителей трех оконечных опор ВЛ (рис. 4) сопротивление ЗУ составляет $R = 3,3$ Ом. Эквивалентное удельное сопротивление однородной земли уменьшается до $\gamma_{\text{экв}} = 550$ Омж, т.е. расширение периферии заземлителя повышает его эффективность.

Сопротивление фундаментов опор ВЛ-1 и ВЛ-2 (рис. 5) составляет 7,5 Ом, что соответствует эквивалентному удельному сопротивлению однородной земли $\gamma_{\text{экв}} = 195$ Омж, т.е. почти в 3 раза меньше, чем для заземлителя ПС. Сопротивление фундамента опор ВЛ-3 равно 20 Ом, что соответствует $\gamma_{\text{экв}} = 115$ Омж и незначительно превышает удельное сопротивление верхнего слоя земли.

Таким образом, ток растекается в 3–5 раз эффективней из заземлителей опор ВЛ, размеры которых значительно меньше верхнего проводящего слоя земли, чем из заземлителя ПС, где соотношение размеров обратное.

Сопротивление системы трос–опоры ВЛ-1 и ВЛ-2 равно $R = 3,8$ Ом, что существенно больше значения [13]:

$$R_{\text{тр-оп}} \gg \sqrt{r_{\text{тр}} R_{\text{оп}}} = 2,45,$$

где $r_{\text{тр}} = 0,8$ Ом и $R_{\text{оп}} = 7,5$ Ом.

Поскольку данная формула получена без учета взаимного влияния опор, можно оценить коэффициент использования ЗУ опор: $k = 2,45/3,8 = 0,64$.

Сопротивление системы трос–опоры ВЛ-3 с железобетонными опорами равно $R = 5,4$ Ом. Результирующее сопротивление ЗУ ПС, включая три ВЛ, равно 1,55 Ом. При расчете этого сопротивления как параллельного соединения заземлителя ПС с оконечными опорами и трех систем трос–опоры получим сопротивление 1 Ом и коэффициент использования $k = 1/1,55 = 0,65$.

Таким образом, получены низкие коэффициенты использования элементов ЗУ по сравнению с однородным грунтом, что объясняется выполненным ранее анализом потенциала точечного источника и относится к особенностям расчета ЗУ в грунте с изолирующим основанием.

Адекватность расчетной модели. В таблице приведены результаты расчетов (на разных частотах) и измерений по однолучевой схеме (расстояние до токового/потенциального электрода 1000/500 м), выполненных дважды в разное время.

Частота f , Гц	Измеренный параметр				Расчетный параметр, Ом	
	I (фон), мА	U (фон), мВ	Сопротивление, Ом		Z	$ Z $
			R	$R_{\text{ср}}$		
50	–	–	–	–	$1,55 + j0,18$	1,56
57	430 (80)	830 (580)	1,93	–	$1,56 + j0,6$	1,57
211	446 (80) 195	869 (115) 415	1,95 2,13	2,05	$1,77 + j0,6$	1,87 (9%)
419	443 (80) 195	1142 (48) 538	2,58 2,76	2,67	$2,12 + j0,9$	2,3 (14%)

Измерения на частоте 57 Гц не информативны из-за недостаточной селективности измерительного прибора (фон напряжения составляет 70% полезного сигнала). Незначительные фоновые значения напряжения и тока на частотах 211 и 419 Гц делают измерения на этих частотах наиболее точными. Расчетные данные на частоте 211 и 419 Гц меньше экспериментальных на 9–14%, что объясняется погрешностью модели земли, а также погрешностями измерений, связанных с расположе-

нием измерительных электродов в неоднородной земле [14, 15]. Таким образом, расчетная модель по результатам измерений является адекватной.

Мероприятия по снижению сопротивления ЗУ. Использование глубинных и выносных заземлителей является основной рекомендацией по снижению сопротивления ЗУ [1–3]. Создание скважных заземлителей в данном случае нецелесообразно, поскольку геологические данные не подтверждают наличие грунтовых вод. Кроме того, это затратное мероприятие [16]. Увеличение площади ЗУ исключается, поскольку требует дополнительного землеотвода в городской черте. По этой же причине отказываются от выносного заземлителя. Из других способов [17] отметим специальную обработку земли для повышения ее проводимости, но она требует периодического повтора и неэкологична. Варианты с использованием электродов с пониженным сопротивлением растеканию, а также взрывных технологий монтажа ЗУ в скальном грунте [18] возможно рассматривать только на этапе проектирования. Поэтому усиление роли естественных заземлителей (система трос–опоры, КЛ) – главное средство снижения сопротивления ЗУ в данных условиях.

Замена стального троса ТК-50 на сталеалюминевый АС-120/27 приводит к существенному снижению внутреннего сопротивления троса и включению дополнительного числа опор в процесс растекания тока, что согласуется с данными [16]. Как показывают расчеты, следует заменить трос 6–19 пролетов. При замене троса 10 пролетов сопротивление ЗУ равно 1 Ом (снижение в 1,55 раза).

Для выравнивания потенциала по трассе КЛ 110 кВ, связывающей рассматриваемую ПС с вновь строящейся, под кабельными лотками прокладывается лучевой заземлитель из двух медных стержней. С этим заземлителем сопротивление ЗУ снижается до 0,8 Ом. С учетом заболоченного участка по трассе ВЛ-1 (на расстоянии порядка 1 км от ПС) сопротивление $R_{ЗУ} = 0,65$ Ом. Заметим, что по стальному тросу ток до этого участка практически не дотекает.

Таким образом, предлагаемые меры позволяют снизить сопротивление ЗУ в 2,5 раза (с 1,55 до 0,65 Ом) без дополнительного землеотвода.

К снижению сопротивления ЗУ приводят КЛ с заземленной оболочкой (броней), играющие роль естественных заземлителей [17], но в настоящее время их вытеснили КЛ с ИСПЭ, которые имеют изолированную оболочку и заземлителями не являются. Однако при двухстороннем заземлении экранов КЛ с ИСПЭ на ЗУ ПС 110 кВ и ЗУ трансформаторных подстанций (ТП) 10/0,4 кВ последние следует рассматривать как естественные заземлите-

ли, подключенные через индуктивные сопротивления экранов КЛ. Таким образом, с развитием инфраструктуры района, предполагающим опережающее строительство сети 10 кВ, сопротивление ЗУ ПС может быть дополнительно снижено, но при условии исключения выноса высокого потенциала при КЗ на ПС.

Проблема выноса высокого потенциала за территорию ПС по экранам кабелей 10 кВ с ИСПЭ. При двухстороннем заземлении экранов потенциал ЗУ ПС при КЗ выносится на ЗУ ТП 10/0,4 кВ, к которым подключаются РЕ-проводники сети 0,4 кВ. Существует опасность заноса высокого потенциала в здания, что следует учитывать при проектировании этой сети, используя повторное заземление. Одностороннее заземление экранов КЛ исключает вынос высокого потенциала, но исчезает сеть естественных заземлителей ЗУ ТП, кроме того, на разомкнутом конце экрана появляется опасное наведенное напряжение [19, 20]. Таким образом, выбор способа заземления экранов КЛ с ИСПЭ должен быть обоснован расчетом при учете требований электробезопасности и надежности КЛ в нормальных и аварийных режимах.

Заметим, что проблема выноса высокого потенциала не возникает при использовании кабелей с заземленной оболочкой, которые обеспечивают стекание тока КЗ в землю до подхода к ТП [17].

Выравнивание потенциала по трассе КЛ 110 кВ. Рассматриваемую ПС 110 кВ планируется соединить с вновь строящейся ПС 220 кВ кабелями FXLJ-1x1200/265-64/110 с ИСПЭ. В режиме КЗ на любой из ПС практически весь потенциал ЗУ (за вычетом индуктивного падения напряжения экрана и потерь в земле) приложен к экрану кабеля, поэтому напряжение оболочки относительно «чистой» земли (на удалении от ПС) превышает допустимое значение 10 кВ (данные АББ «Москабель»). Пробой оболочки приводит к проникновению влаги и способствует пробое основной изоляции. Двухлучевой медный заземлитель под лотками КЛ является эффективным средством выравнивания потенциала, гарантирующим допустимый уровень напряжения оболочки кабеля.

Электробезопасность. Здание ЗРУ выполнено из армированного литого бетона с электрической связью арматурной сетки с контурами выравнивания потенциала на каждом этаже, поэтому напряжение прикосновения в здании с большим запасом удовлетворяет действующим нормам (ГОСТ 12.1.038–82). На открытой части ПС электрооборудование, доступное для прикосновения, отсутствует.

Напряжение прикосновения вблизи металлического ограждения ПС также удовлетворяет нормам, что связано с медленным убыванием потенциала

по мере удаления от ЗУ в грунте с изолирующим основанием и горизонтальным растеканием тока. Таким образом, требования электробезопасности выполняются. Заметим, что при проектировании аналогичной ПС в однородном грунте потребовалось бы принять меры по снижению напряжения прикосновения вокруг ограждения.

Выводы. 1. Адекватность расчетных моделей ЗУ определяется достоверной информацией о геоэлектрической структуре земли, которая в сложных грунтах должна быть получена геофизическими методами и подтверждена измерениями сопротивления ЗУ.

2. В грунте с изолирующим основанием и горизонтальным растеканием тока происходит существенное снижение коэффициента использования элементов ЗУ по сравнению с однородным грунтом. Для снижения сопротивления здесь следует развивать периферию ЗУ.

3. Замена стального троса на сталеалюминиевый (с четным числом повивов алюминия), использование двух тросов приводит к существенно увеличению числа опор, обеспечивающих растекание тока, и снижению сопротивления ЗУ без дополнительного землеотвода. Одновременно расширяются возможности по созданию выносных заземлителей, например в форме «противовесов» между отдельными опорами по трассе ВЛ.

4. Двухстороннее заземление экранов кабелей с ИСПЭ подключает сеть естественных заземлителей из ЗУ ТП 10/0,4 кВ, что снижает сопротивление ЗУ ПС, однако приводит к выносу потенциала. Способ заземления экранов подобных кабелей должен быть обоснован расчетом с учетом требований электробезопасности и надежности работы КЛ в нормальном и аварийном режиме работы.

5. Выравнивание потенциала по трассе протяженных КЛ с ИСПЭ является эффективным способом снижения напряжения оболочки в режиме КЗ, а следовательно, продления ресурса изоляции кабеля. Техническим решением является сооружение под лотками КЛ лучевого заземлителя, который одновременно приводит к снижению сопротивления ЗУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СТО 56947007-29.240.044–2010.** Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. — М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2010.
2. **Бургдорф В.В., Якобс А.И.** Заземляющие устройства электроустановок. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. **Руководящие** указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 3–750 кВ переменного тока. — М.: Энергосетьпроект, №12740 тм-т1, 1987.

4. **Пантелеев В.И., Авербух М.А., Забусов В.В., Панкрушина И.В.** Анализ погрешностей при определении параметров грунта для расчета заземляющих устройств в районах Крайнего Севера. — Электрические станции, 2004, №7.

5. **Притыко С.В.** Сравнение методов геофизических исследований грунта на трассах воздушных линий электропередачи. — Сб. докладов Второй Российской конф. по заземляющим устройствам. — Новосибирск: Сибирск. энерг. академия, 2005.

6. **Колесников В.П.** Основы интерпретации электрических зондирований. — М.: Научный мир, 2007.

7. **Коструба С.И.** Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

8. **Шишигин С.Л.** Математические модели и методы расчета заземляющих устройств. — Электричество, 2010, №1.

9. **Шишигин С.Л.** Математические модели и расчет сопротивления железобетонных фундаментов опор высоковольтных линий. — Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2009, №4-2(89).

10. **Корсунцев А.В., Покровская К.И.** Методика расчета сопротивлений заземления железобетонных фундаментов. — Электрические станции, 1968, №11.

11. **Аркадьев В.К.** Вычисление электрического сопротивления и магнитной проницаемости металлических проводов и тросов в переменном поле. — Вестник электротехники, 1930, №5.

12. **Нейман Л.Р., Зайцев И.А.** Электрические параметры сталеалюминиевых проводов. — Электричество, 1935, №19.

13. **Рюденберг Р.** Переходные процессы в электроэнергетических системах. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955.

14. **Ослон А.Б., Целебровский Ю.В.** Пересечение потенциальных кривых и сопротивление заземляющего устройства. — Сб. докладов Третьей Российской конф. по заземляющим устройствам. — Новосибирск: Сибирск. энерг. академия, 2008.

15. **Борисов Р.К., Жарков Ю.В.** Диагностика заземляющих устройств электрических станций и подстанций. — Сб. докладов Третьей Российской конф. по заземляющим устройствам. — Новосибирск: Сибирск. энерг. академия, 2008.

16. **Целебровский Ю.В., Нестеров С.В.** Заземляющие устройства КТПБ 110/25/6 кВ. Требования к проектированию и сооружению. — Новости электротехники, 2005, №5(35).

17. **Найфельд Н.М.** Заземление и защитные меры безопасности. — М.: Энергия, 1971.

18. **Meng Q., He J., Dawalibi F.P., Ma J.** A new method to decrease ground resistances of grounding systems in high resistivity regions. — IEEE Trans. Power Del., 1999, vol. 14, №2.

19. **Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А.** Однофазные кабели 6–19 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. — Новости электротехники, 2007, №5(47).

20. **Кузнецов Д.В., Попова Ю.С., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А.** К вопросу об эксплуатации силовых кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. — Электро, 2009, №3.

[15.02.11]

А в т о р ы: Липаткин Владимир Анатольевич в 1976 г. окончил электротехнический факультет Уральского политехнического института (УПИ). В 1983 г. в УПИ защитил кандидатскую диссертацию «Применение методов распознавания образов для оценки статической устойчивости электроэнергетических систем». Главный специалист технического отдела «Уралэнергосетьпроект».

Стенников Дмитрий Евгеньевич в 2002 г. окончил магистратуру электротехнического факультета Уральского государственного технического университета. Ведущий инженер технического отдела института «Уралэнергосетьпроект».

Шишигин Сергей Леонидович в 1982 г. окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института. В 1988 г. в Ленинградском политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию «Оптимизация формы электродов с осевой симметрией по условию ограничения максимальной напряженности». Доцент кафедры электротехники Вологодского государственного технического университета.