



Научная статья

УДК 621.316.99

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-94-108>

Анализ и совершенствование методов расчёта сопротивлений заземляющих устройств подстанций

А.В. Ляхомский¹, С.В. Кузьмин^{2✉}, А.П. Кудряшов³, Р.С. Кузьмин⁴,
И.С. Кузьмин⁵, В.А. Меньшиков⁶

¹НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия

^{2,4,6}Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³ООО «СУЭК-Хакасия», г. Черногорск, Россия

^{4,5,6}ООО ГК «Рутас», г. Красноярск, Россия

Резюме. Цель – анализ и уточнение результатов расчета сопротивления заземляющих устройств подстанций с учетом факторов эксплуатации. Для оценки сопротивления заземляющего устройства подстанции использовались различные методы: расчетные (методы коэффициентов использования, обобщенных параметров и наведенных потенциалов) и инструментальные (метод «амперметра-вольтметра»). Установлено, что в процессе эксплуатации систем заземления сопротивление заземляющих устройств возрастает по сравнению с расчетными значениями, что снижает эффективность ее работы. Проведенные экспериментальные измерения сопротивления заземляющих устройств подстанций по методу «амперметра-вольтметра» показали, что относительная погрешность рассмотренных расчетных методов может достигать, %, соответственно: 48, 46,7 и 28,6. Для повышения точности расчета сопротивления заземляющих устройств по методу наведенных потенциалов предложено использовать коэффициент эксплуатации заземляющего устройства. Установлено, что при сроках эксплуатации подстанций до 10 лет, от 10 лет до 20 лет и более 20 лет за счет коррозии конструкции заземляющего устройства и его сопротивления возрастает в 1,02–1,1 раза. Показано, что монтаж заземляющего устройства приводит к росту его сопротивления в 1,02 раза, а проверка целостности конструкции и функционирования заземляющего устройства увеличивает его сопротивление в 1,05 раза, если периодичность проверки более 6 лет. Грозовая активность и токи короткого замыкания влияют на интенсивность коррозии конструкции заземляющего устройства и, соответственно, приводят к росту его величины в 1,01–1,03 раза и 1,03–1,05 раза. Таким образом, величина коэффициента эксплуатации может изменяться в диапазоне от 1,115 до 1,274, а практика применения коэффициента эксплуатации в расчетах сопротивления заземляющего устройства по методу наведенных потенциалов позволила повысить точность расчетов: относительная погрешность не превысила 3%. Это соответствует требованиям нормативно-технической документации Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы России.

Ключевые слова: методы расчета, сопротивление заземляющих устройств, подстанция, экспериментальное измерение, относительная погрешность, коэффициент эксплуатации

Для цитирования: Ляхомский А.В., Кузьмин С.В., Кудряшов А.П., Кузьмин Р.С., Кузьмин И.С., Меньшиков В.А. Анализ и совершенствование методов расчёта сопротивлений заземляющих устройств подстанций // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 94–108. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-94-108>.

Analysis and improvement of methods for calculating the resistance of substation earthing equipment

Aleksandr V. Lyakhomskiy¹, S.V. Kuzmin^{3✉}, Aleksey P. Kudryashov³,
Roman S. Kuzmin⁴, Ilya S. Kuzmin⁵, Vitaliy A. Menshikov⁶

¹National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

^{2,4,6}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³LLC «SUEK-Khakassia», Chernogorsk, Russia

^{4,5,6}Group of companies «Rutas» LLC, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. In this study, we analyze the results of calculating the resistance of substation earthing equipment taking operational factors into account. The resistance of a substation earthing system was estimated using both calculation (methods of equipment operating factors, generalized parameters and induced potentials) and instrumental (ammeter-voltmeter) methods. During operation, the resistance of the studied earthing system was found to increase in comparison with the rated values, thus reducing its overall efficiency. The resistance of substation earthing equipment measured experimentally by the ammeter-voltmeter method showed the relative error of the considered calculation methods to reach 48, 46.7 and 28.6%, respectively. With the purpose of increasing the calculation accuracy of earthing equipment resistance by the method of induced potentials, it was proposed to use an operating factor. Thus, during the substation operation period of 10, 10–20 and over 20 years, the resistance of the earthing system increases by 1.02–1.1 times due to corrosion. It was shown that the installation procedure and maintenance checks (conducted at least every six years) increase the resistance of earthing systems by 1.02 and 1.05 times, respectively. Lightning discharges and short-circuit currents affect the corrosion rate of earthing systems, thereby increasing their resistance by 1.01–1.03 and 1.03–1.05 times, respectively. Therefore, the operating factor value may range from 1.115 to 1.274. The use of the operating factor in calculating the resistance of an earthing system by the induced potentials method increased the overall calculation accuracy, with the relative error not exceeding 3%. This corresponds to the normative and technical requirements stipulated by the Federal Grid Company of the Unified Energy System of Russia.

Keywords: calculation methods, resistance of grounding devices, substation, experimental measurement, relative error, operating ratio

For citation: Lyakhomskiy A.V., Kuzmin S.V., Kudryashov A.P., Kuzmin R.S., Kuzmin I.S., Menshikov V.A. Analysis and improvement of methods for calculating the resistance of substation earthing equipment. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):94–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-94-108>.

ВВЕДЕНИЕ

Современные заземляющие устройства подстанции 35–220 кВ выполняют три основных функции:

- рабочее заземление, предназначенное для обеспечения работоспособности электрооборудования, систем релейной защиты и автоматики, устройств сбора и передачи информации, приборов учета электроэнергии;
- защитное заземление, обеспечивающее электробезопасность при эксплуатации электрооборудования и электроустановок;
- молниезащитное заземление, предназначенное для эффективного отвода в землю токов молнии с молниеотводов, разрядников и нелинейных ограничителей перенапряжений.

Основополагающим параметром, обуславливающим эффективность заземляющих устройств (ЗУ), является сопротивление растекания тока (далее сопротивление ЗУ).

Опыт эксплуатации подстанций показывает, что ЗУ эффективно выполняют вышеперечисленные функции, если величина сопротивления ЗУ не превышает нормируемое значение. В частности, для подстанций напряжением 110 кВ и выше сопротивление ЗУ не должно превышать 0,5 Ом для каждого времени года и для любых климатических поясов, а для подстанций напряжением 6–35 кВ сопротивление ЗУ не должно превышать значения, рассчитанного по формуле (1), но не более 10 Ом⁷ [1]:

$$R_{3У} < \frac{250}{J_{033}}, \quad (1)$$

где J_{033} – расчетный ток замыкания на землю.

В связи с вышеизложенным, точность определения сопротивления ЗУ является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение сопротивления ЗУ выполняется расчетными методами^{8,9} [2–6] или экспериментальными с помощью непосредственных измерений¹⁰ [7–10].

Расчетные методы определения сопротивления ЗУ используются на стадии проектирования подстанций, а также на действующих подстанциях, расположенных в плотной городской застройке с наличием в земле различного рода металлических трубопроводов, кабельных линий и других металлических коммуникаций, которые могут приводить к недопустимому увеличению погрешности при измерении сопротивления ЗУ [7].

В связи с этим для оценки точности методов расчета сопротивления ЗУ были выбраны десять подстанций напряжением 110–220 кВ, расположенных на открытой местности вне городов в разных климатических поясах, что исключает влияние различных металлических (расположенных в земле) коммуникаций на результаты измерений сопротивления ЗУ.

Точность методов расчета сопротивления ЗУ определялась с помощью сравнения расчетных и измеренных величин.

В табл. 1 приведены параметры заземляющих устройств подстанций, для которых были рассчитаны сопротивления ЗУ различными инженерными методами.

ЗУ выбранных подстанций имеют прямоугольную форму ($L_{max} \times L_{min}$), что минимизирует погрешность расчетов их сопротивлений

[2, 3].

В табл. 1 приведены следующие обозначения:

– ρ_1 и ρ_2 – удельное электрическое сопротивление первого и второго слоев грунта применительно к двухслойной модели грунта, Ом·м;

– $\rho_{экв}$ – эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м;

– h_1 – толщина первого слоя грунта, м;

– t – глубина погружения вертикального электрода от поверхности земли, м;

– ℓ_B – длина вертикального электрода, м;

– m_B – количество вертикальных электродов, шт.;

– S_B – поперечное сечение вертикального электрода, мм²;

– a – среднее расстояние между электродами, м;

– L_{max} – длина большей стороны ЗУ, м;

– L_{min} – длина меньшей стороны ЗУ, м;

– n_{max} и n_{min} – количество горизонтальных заземлителей с длиной L_{max} и L_{min} , шт.;

– L_{Σ} – суммарная протяженность горизонтальных заземлителей, м;

– S_{Γ} – поперечное сечение горизонтальных заземлителей, мм²;

– $S_{3У}$ – площадь ЗУ, м².

В настоящее время используются три основных инженерных метода расчета сопротивлений ЗУ подстанции:

– коэффициентов использования [2];

– обобщенных параметров [2];

– наведенных потенциалов [3].

Метод коэффициентов использования заключается в расчете собственных проводимостей отдельных элементов сложного заземляющего устройства, таких как горизонтальные заземлители (g_{Γ}) и вертикальные электроды

⁷Правила устройства электроустановок ПУЭ [Электронный ресурс]. URL: https://www.elec.ru/viewer?url=/library/direction/pue_7.pdf (10.06.2022).

⁸ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2016.

⁹СТО 59947007-29.130.15.105-2011. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088448> (10.06.2022).

¹⁰Васильев П.Ф. Методы снижения сопротивления заземляющих устройств в много летнемёрзлых грунтах: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Томск, 2012.

Таблица 1. Параметры заземляющих устройств подстанций
 Table 1. Parameters of substation grounding devices

№	Наименование и регион расположения подстанций	$\rho_1, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_2, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_{\text{экв}}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$h_1, \text{м}$	$t, \text{м}$	$\ell_B, \text{м}$	$m_B, \text{шт.}$	Диаметр вертикального электрода, $\varnothing, \text{мм}$	Сечение вертикального электрода, $S_B, \text{мм}^2$	$a, \text{м}$	$L_{\text{max}}, \text{м}$	$n_{\text{max}}, \text{шт.}$	$L_{\text{min}}, \text{м}$	$n_{\text{min}}, \text{шт.}$	$L_{\Sigma}, \text{мм}^2$	$S_{\Gamma}, \text{мм}^2$	$S_{3\text{У}}, \text{м}^2$
1	ПС 110/10кВ «Кедровская тяговая», угольный разрез «Кедровский», Кемеровская область	24	16	18,8	1,5	0,8	5	38	12	113	12	51	6	44	7	614	200	2244
2	ПС 110/35/10/6 кВ «ТРП-7»; угольный разрез «Восточный», Республика Казахстан	45	85	67,1	5,0	0,8	5	200	28	615	9	225	16	107	15	5205	250	24075
3	ПС 110/10кВ «Кулаково», Тюменская область	26	48	39,0	3,0	0,8	5	24	16	201	3	36	6	28	7	412	200	1008
4	ПС 110/10кВ «НПС- 2», Богучанский район Красноярского края	270	405	368,0	2,0	0,8	5	63	18	254	16	184	19	120	23	6256	250	22080
5	ПС 110/6кВ «Ерунаковская- Северная», угольный разрез «Талдинский», Кемеровская область	24	50	40,0	5,0	0,8	3	28	16	201	12	54	5	32	9	558	160	1728
6	ПС 220/10кВ «НПС- 6» г. Усть-Кут	16	110	72,0	2,0	0,7	5	100	16	201	14	149	11	111	12	2971	250	16539
7	ПС 220/110/10кВ «Приангарская», п. Богучаны Красноярского края	78	104	84,5	1,6	0,6	5	200	16	201	6	325	10	156	29	7774	200	50700
8	ПС 220/110/10кВ «Шушенская опорная», Красноярский край	23	207	110,0	3,5	0,6	5	181	Труба $\varnothing$ 18мм	245	10	240	14	210	18	7140	200	50400
9	ПС 220/110/10кВ «Горячинская», п. Горячинск, Республика Бурятия	65	260	171,5	8,0	0,8	12	250	30	706	10	255	20	236	22	10292	200	60180
10	ПС 220/35/10кВ «Туран», Республика Тыва	11	127	75,0	1,5	0,6	5	117	16	200	8	200	8	99	12	2788	200	1980

Примечание: ПС – подстанция.

(g_B) с учетом их взаимного влияния на результирующие сопротивления ЗУ посредством коэффициента использования (η).

Сопротивление ЗУ по методу коэффициентов использования определяется по формуле:

$$R_{\text{расч}} = (\eta \times \sum_{i=1}^n g_i)^{-1}, \quad (2)$$

где η – коэффициент использования; g_i – проводимость отдельного элемента ЗУ, см^{-1} .

Недостатком данного метода является большая трудоемкость в определении коэффициента использования, эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта для вертикальных электродов, сопротивлений растекания тока отдельных элементов ЗУ.

Коэффициент использования является сложной интегральной функцией, отражающей взаимное потенциальное влияние элементов ЗУ с учетом влияния параметров электрической структуры земли.

Для сложных современных ЗУ с развитой внутренней структурой, имеющей заземляющие сетки и вертикальные электроды внутри ЗУ, значение коэффициента использования определяется с помощью специальных компьютерных программ. Причем в этом случае относительная погрешность метода будет находиться в пределах 38–48%.

Это связано с тем, что требуется определить отдельно эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта как для горизонтальных заземлителей, так и для вертикальных электродов.

Для вертикальных электродов эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта определяется по формуле:

$$\rho_{\text{ЭКВ.В.}} = \frac{\rho_1 \times \rho_2 \times k \ell_B}{\rho_1 \times (t + k \ell_B - h_1) + \rho_2 (h_1 - t)}, \quad (3)$$

где $k = 1$ при $\rho_1 > \rho_2$ и $k = 1,2$ при $\rho_1 < \rho_2$.

Значение эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта двухслойной земли для горизонтальных заземлителей $\rho_{\text{ЭКВ.Г.}}$ находят с помощью линейной интерполяции по данным табл. 8.1, приведенной в [2].

Значения проводимостей отдельных вертикальных электродов и отдельных горизонтальных заземлителей, соответственно, определяются по формулам (3) и (4):

$$g_B = \left[\frac{\rho_{\text{ЭКВ.В.}}}{2\pi \ell_B^2} \left[\left(\ell_B \ln \frac{2\ell_B}{r_0} + (\ell_B + t) \ln \frac{\ell_B + t}{\ell_B + 2t} + t \times \ln \frac{2t}{\ell_B + 2t} - 0,307 \ell_B \right) \right] \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$g_{\Gamma} \left[\frac{\rho_{\text{ЭКВ.Г.}}}{2\pi \ell_{\Gamma}} \left[\ln \frac{\ell_{\Gamma}^2}{2r_0 t} + \frac{2t}{\ell_{\Gamma}} - 0,5 \left(\frac{2t}{\ell_{\Gamma}} \right)^2 - 0,61 \right] \right]^{-1}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) r_0 – это радиус окружности эквивалентного поперечного сечения вертикального электрода и горизонтального заземлителя. Определяется по формуле:

$$r_0 = \left(\frac{S_{\text{ЭКВ}}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{ЭКВ}}$ – площадь поперечного сечения, м^2 .

Таким образом, большой объем вычислений при расчете сопротивления сложных ЗУ, имеющих значительное число горизонтальных элементов с разными длинами и плотно заполняющих пространство внутри замкнутого контура ЗУ, обуславливает увеличение относительной погрешности и ограничивает область применения метода коэффициентов использования заземляющими устройствами с простой геометрией, исключающей заполнение пространства внутри ЗУ.

В последнем случае относительная погрешность расчетов сопротивления ЗУ не превышает 2% [2].

Метод обобщенных параметров разработан для двух основных типов сложных заземлителей, широко применяемых в электроустановках напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированными и эффективно заземленными нейтралью. Первый тип – сложные комбинированные заземлители, имеющие в плане форму замкнутого или разомкнутого контура с развитыми внутренними горизонтальными перемычками и с вертикальными электродами, расположенными лишь по периметру контура. Второй тип – заземляющие сетки, состоящие почти исключительно из горизонтальных элементов и так же, как и первый тип, имеющие в плане форму замкнутого или разомкнутого контура с развитыми внутренними перемычками. Единичные вертикальные электроды, имеющиеся у заземляющих сеток, например, для целей молниезащиты, при расчете электрических характеристик в установившихся режимах не учитываются.

В конструкции современных заземляющих устройств подстанций широко используются вертикальные электроды, как по периметру ЗУ, так и внутри замкнутого контура ЗУ, поэтому на практике преимущественно

используют первый вариант метода обобщенных параметров.

Согласно исследованиям, приведенным в [2], основными конструктивными параметрами сложных заземлителей, оказывающими заметное влияние на сопротивление ЗУ, являются: S – площадь заземляющего устройства, м^2 ; ℓ_B – длина вертикальных электродов, м; L_Σ – общая длина всех горизонтальных элементов, м; a – среднее расстояние между соседними вертикальными электродами. Сильное влияние на сопротивление ЗУ оказывают также отношение удельного сопротивления верхнего и нижнего слоев ρ_1/ρ_2 и толщина верхнего слоя h .

Если $0,5 \leq \rho_1/\rho_2 \leq 2$, то обобщенный параметр (T_1) определяется по формуле:

$$T_1 = \ell_B \times L_\Sigma (a \times \sqrt{S})^{-1}. \quad (7)$$

В случае $\rho_1/\rho_2 > 2$, на сопротивление ЗУ сильное влияние оказывает относительное проникновение вертикальных электродов в нижний слой грунта, поэтому обобщенный параметр T_2 определяется по формуле:

$$T_2 = (t + \ell_B - h_1) \times L_\Sigma \times (a \times \sqrt{S})^{-1}. \quad (8)$$

Сопротивление ЗУ по данному методу определяется по формуле:

$$R_{\text{расч}} = \rho_2 \times B \times (T^\beta \times \sqrt{S})^{-1}, \quad (9)$$

где B и β – коэффициенты, величина которых определяется соответствующим образом:

$$B = C_B \times (\rho_1/\rho_2)^{E_B} \text{ и } \beta = C_\beta \times (\rho_1/\rho_2)^{E_\beta}, \quad (10)$$

где параметры C_B , E_B , C_β , E_β определяются по табл. 8.4, приведенной в [2], и справедливы при следующих основных условиях: $0,5 \leq T_1 \leq 40$; $0,05 \leq T_2 \leq 40$; $5 \leq \ell_B \leq 20$ м; $0,5 \leq a/\ell_B \leq 4$; $0,5 \leq t \leq 0,8$; $4 \leq L_\Sigma/\sqrt{S} \leq 40$; $1 \leq L_{\text{max}}/L_{\text{min}} \leq 2$, что объясняет ограниченную область применения данного метода.

Наиболее универсальным методом, не имеющим ограничений и обладающим минимальными затратами при расчете сопротивления ЗУ, является **метод наведенных потенциалов** [3, 11].

Сопротивление ЗУ определяется по выражению:

$$R_{\text{расч}} = A \times \rho_{\text{экв}} \times \left(\frac{1}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L_\Sigma + m \cdot \ell_B} \right), \quad (11)$$

где коэффициент A рассчитывается по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A &= 0,444 - 0,84t_{\text{отн}}, \text{ при } 0 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,1 \\ A &= 0,385 - 0,25t_{\text{отн}}, \text{ при } 0,1 < t_{\text{отн}} \leq 0,5 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В свою очередь, параметр $t_{\text{отн}}$ определяется следующим образом:

$$t_{\text{отн}} = \frac{(\ell_B + t)}{\sqrt{S}}. \quad (13)$$

Основным показателем эффективности расчетного метода является его точность. Для инженерных методов в качестве критерия точности оценки сопротивления ЗУ принята относительная погрешность результатов расчета по сравнению с измеренным значением сопротивления ЗУ:

$$\delta = \frac{R_{\text{расч}} - R_{\text{изм}}}{R_{\text{расч}}}. \quad (14)$$

Для подстанций, указанных в табл. 1, проведены расчеты и экспериментальные определения сопротивлений ЗУ.

Измерения сопротивления ЗУ осуществлялись по методу «амперметра-вольтметра», который рекомендован Федеральной сетевой компанией Единой энергетической системы как основной метод для определения сопротивления ЗУ на подстанции напряжением 110 кВ и выше [8].

В табл. 2 приведены результаты измерений и расчетов сопротивлений ЗУ подстанций, указанных в табл. 1.

Таблица 2. Относительная погрешность расчетных методов определения сопротивления заземляющих устройств подстанций**Table 2.** Relative error of calculation methods for determining substation grounding device resistances

№	Наименование подстанции	$R_{изм}, \text{Ом}$	Метод коэффициентов использования		Метод обобщенных параметров		Метод наведенных потенциалов	
			$R_{расч}, \text{Ом}$	$\delta, \%$	$R_{расч}, \text{Ом}$	$\delta, \%$	$R_{расч}, \text{Ом}$	$\delta, \%$
1	ПС 110/10кВ Кедровская тяговая	0,22	0,426	48,0	0,150	-46,7	0,180	-22,2
2	ПС 110/35/10/6кВ ТРП-7	0,23	0,434	47,0	0,163	-36,9	0,193	-19,2
3	ПС 110/10кВ Кулаково	0,63	1,020	38,2	0,473	-33,2	0,498	-28,6
4	ПС 110/10кВ НПС-2	1,23	2,270	45,8	0,908	-35,5	1,074	-14,5
5	ПС 110/6кВ Ерунаковская-Северная	0,53	0,840	36,9	0,408	-29,9	0,429	-23,5
6	ПС 220/10кВ НПС-6	0,27	0,520	48,1	–	–	0,249	-8,4
7	ПС 220/110/10кВ Приангарская	0,19	0,371	48,8	0,147	-29,3	0,168	-13,1
8	ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная	0,26	0,492	47,2	–	–	0,221	-17,6
9	ПС 220/110/10кВ Горячинская	0,35	0,642	45,5	–	–	0,313	-11,8
10	ПС 220/35/10кВ Туран	0,31	0,558	44,4	–	–	0,248	-25,0

Расчет сопротивлений ЗУ методом обобщенных параметров для подстанции ПС 220/10кВ НПС-6, ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная, ПС 220/110/10кВ Горячинская не выполнялся, т.к. отношение ρ_1/ρ_2 для перечисленных подстанций, соответственно, равно 0,145; 0,111; 0,25; 0,087 и меньше 0,5. Это не позволяет достоверно определить обобщенный параметр T_1 , следовательно, и сопротивление ЗУ.

Анализ табл. 2 показывает, что относительная погрешность расчетов сопротивления ЗУ по методу коэффициентов использования положительная и находится в диапазоне от 37 до 49%.

Положительное значение относительной погрешности указывает на то, что расчетное значение сопротивления ЗУ превышает измеренную величину. Превышение расчетных значений по сравнению с измеренными величинами обусловлено физической идеей данного метода, основанной на том, что взаимное влияние растекания токов с отдельных элементов ЗУ приводит к увеличению плотности тока, стекающего в землю с ЗУ, что

уменьшает поперечное сечение условного проводника и приводит к росту его сопротивления.

Значительная погрешность данного метода, как было отмечено выше, связана прежде всего со сложностью определения коэффициента использования применительно к современным заземляющим устройствам.

Относительная погрешность метода обобщенных параметров отрицательная и находится в диапазоне 30–46,7%. Отрицательное значение относительной погрешности указывает на то, что расчетные значения сопротивления ЗУ меньше измеренных величин. Данная тенденция связана с тем, что метод обобщенных параметров не учитывает растекание тока с вертикальных электродов, размещенных во внутренней зоне ЗУ подстанции. Следовательно, плотность тока, стекающего с ЗУ, будет меньше реальной плотности тока, а уменьшение плотности тока подобно увеличению поперечного сечения условного проводника, что ведет к снижению сопротивления.

Наиболее точным методом из трех рассмотренных методов расчета сопротивления

ЗУ является метод наведенных потенциалов.

Данный метод учитывает влияние вертикальных электродов и горизонтальных заземлителей, расположенных по периметру и во внутренней зоне ЗУ, на величину его сопротивления. Однако данный метод не учитывает влияние продольных сопротивлений горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов и переходные сопротивления в конструкции ЗУ.

В связи с этим относительная погрешность находится в диапазоне 8,4–28,6%.

Отрицательное значение относительной погрешности связано с невозможностью учета неравномерности растекания тока с ЗУ, что в физическом смысле снижает плотность тока, стекающего с ЗУ в землю, а, следовательно, приводит к заведомому снижению расчетного значения по сравнению с измеренным.

Согласно нормативно-технической документации (НТД), относительная погрешность расчетных методов определения сопротивления ЗУ подстанций напряжением 110 кВ и выше не должна отличаться от реального значения сопротивления ЗУ на $\pm 5\%$ [8].

Таким образом, существующие методы расчетов сопротивления ЗУ не в полной мере отвечают требованиям НТД.

В работах профессора Л.В. Гладилина указывается на то, что переходное и продольное сопротивление в конструкции заземляющих устройств и сетей заземления может оказывать существенное влияние на величину сопротивления ЗУ [13–15].

Если на подстанции для снижения сопротивления ЗУ используются выносные заземляющие устройства (ВЗУ), тогда на сопротивление ЗУ существенное влияние оказывает продольное сопротивление заземляющих проводников, связывающих центральное заземляющее устройство (ЦЗУ) подстанции с ВЗУ [15]. В частности, применительно к подстанциям 120/10(6) кВ и 35/6 кВ, эксплуатируемых на открытых горных работах, протяженность заземляющих проводников между ЦЗУ и ВЗУ ограничена 2 км, если удельное сопротивление грунта свыше 200 Ом·м [16]. Продольное сопротивление горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов, используемых в конструкции ЦЗУ, в основном

зависит от длины, поперечного сечения указанных элементов, от проводимости материала, из которого они изготовлены, и от переходного сопротивления в местах соединений отдельных элементов ЗУ.

При постоянстве длины отдельных элементов конструкции ЗУ определяющими факторами, влияющими на изменение продольного сопротивления горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов, служат поперечное сечение и продольное сопротивление, которые сильно зависят от интенсивности коррозии материала, из которого они изготовлены.

Интенсивность коррозии зависит не только от коррозионных характеристик грунта [8] и срока эксплуатации подстанции, но и от плотности протекающего по элементам ЗУ тока, который резко возрастает в режимах однофазного КЗ и при прямом ударе молнии в молниеприемник подстанции [4–6].

Доля уменьшения поперечного сечения горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов выполняется на основе оценки глубины коррозии, определяемой при периодических проверках ЗУ путем частичного вскрытия и осмотра отдельных элементов конструкции ЗУ подстанции.

В случае критического снижения поперечного сечения элементов конструкции ЗУ обосновывается их замена, что приведет к повышению эффективности растекания тока с ЗУ.

Следовательно, определение расчетных значений переходных и продольных сопротивлений отдельных элементов ЗУ на действующей подстанции – трудоемкий и длительный процесс.

В то же время влияние переходных и продольных сопротивлений отдельных элементов конструкции ЗУ на сопротивление ЗУ можно определить по косвенным параметрам, к которым относятся следующие: срок эксплуатации подстанции, качество монтажных работ при сооружении ЗУ, периодичность проверки ЗУ, величина тока однофазного короткого замыкания на землю в сетях 110 кВ и выше, грозовая активность.

Влияние вышеперечисленных факторов на сопротивление ЗУ определено на основании диагностики систем заземления,

включающей 110 подстанций в 12 регионах. В табл. 1 и 2 приведены выборочные подстанции.

С увеличением срока эксплуатации ЗУ возрастает степень коррозионности отдельных элементов конструкции ЗУ, что приводит к уменьшению поперечного сечения горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов и, как следствие, к росту сопротивления ЗУ.

В табл. 3 на основании экспериментальных исследований приведены данные о сроках эксплуатации подстанций, указанных в табл. 1, и относительная погрешность расчетов сопротивления ЗУ. Анализ результатов табл. 3 показывает, что с увеличением срока эксплуатации подстанции реальное (измеренное) значение сопротивления ЗУ возрастает и приводит к росту относительной погрешности расчетных значений.

Срок эксплуатации ЗУ подстанции принимался равным с даты последней реконструкции ЗУ до даты последнего измерения сопротивления ЗУ.

Исследования показывают, что при эксплуатации подстанции до 10 лет сопротивление возрастает в среднем на 2%. Если подстанция эксплуатируется от 10 до 20 лет, тогда сопротивление ЗУ может возрасти как минимум на 6%, а при эксплуатации более 20 лет сопротивление ЗУ увеличивается на 10% и более, что подтверждается результатами, приведенными в табл. 4.

Измерения сопротивления ЗУ на новых подстанциях после сооружения ЗУ пока-

зывают, что расчетное значение и измеренная величина отличаются на 1–3% в большую сторону. Очевидно, что подобное несовпадение объясняется качеством монтажных работ и наличием переходных сопротивлений в местах соединения отдельных элементов в конструкции ЗУ.

Диагностика заземляющих устройств подстанций, расположенных в одинаковых климатических зонах, с близкими значениями срока эксплуатации, аналогичными параметрами электропроводности грунтов и площадями подстанций показывает, что на величину сопротивления ЗУ оказывает влияние периодичность проверки состояния ЗУ. Если периодичность проверки ЗУ составляла менее 6 лет, отличия измеренных значений сопротивления ЗУ для подстанций не превышают 3%, а при сроках проверки более 6 лет состояние ЗУ указанное отличие может достигать 5%.

Заземляющие устройства подстанций подвергаются воздействию электромагнитных полей переменного тока, что приводит к протеканию по элементам ЗУ переменного тока. Исследования в данной области [5, 6] показывают, что в безаварийном режиме эксплуатации подстанции плотность тока, протекающего по элементам ЗУ, находится в диапазоне от 20 мА/дм² до 180 мА/дм², что не превышает допустимое значение 200 мА/дм². Следовательно, блуждающие переменные токи в безаварийном режиме эксплуатации подстанции не увеличивают интенсивность коррозии ЗУ.

Таблица 3. Влияние срока эксплуатации подстанции на величину относительной погрешности расчетных значений сопротивления заземляющих устройств

Table 3. Influence of substation operating life on the magnitude of relative error of calculated values of grounding device resistances

Наименование подстанции	Срок эксплуатации заземляющих устройств, год	Относительная погрешность
ПС 110/10кВ Кулаково	36	28,6
ПС 220/35/10кВ Туран	32	25,0
ПС 110/6кВ Ерунаковская-Северная	29	23,5
ПС 110/10кВ Кедровская тяговая	27	22,2
ПС 110/35/6кВ ТРП-7	25	19,2
ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная	14	17,6
ПС 220/10кВ НПС-2	3	14,5
ПС 220/110/10кВ Приангарская	3	13,1
ПС 220/110/10кВ Горячинская	2	11,8
ПС 220/10кВ НПС-6	Менее 1	8,4

Таблица 4. Влияние срока эксплуатации заземляющих устройств подстанции на интенсивность увеличения сопротивления заземляющих устройств

Table 4. Influence of substation grounding device service life on intensity of grounding device resistance increase

№	Наименование подстанции	Строительство или последняя реконструкция заземляющих устройств		Последнее измерение сопротивления заземляющих устройств		Срок эксплуатации, год	Интенсивность увеличения сопротивления заземляющих устройств $R_{изм2}/R_{изм1}$	Среднее значение интенсивности
1	ПС 220/10кВ НПС-2	2016	1,205	2019	1,23	3	1,0207	1,023
2	ПС 220/110/10кВ Приангарская	2016	0,186	2019	0,19	3	1,0220	
3	ПС 220/110/10кВ Горячинская	2016	0,340	2018	0,35	2	1,0290	
4	ПС 220/10кВ НПС-6	2017	0,265	2018	0,27	1	1,0190	
5	ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная	2007	0,245	2021	0,26	14	1,0610	1,061
6	ПС 110/35/6кВ ТРП-7	1991	0,215	2016	0,23	25	1,0700	
7	ПС 110/10кВ Кедровская тяговая	1989	0,200	2016	0,22	27	1,1000	
8	ПС 110/6кВ Ерунаковская Северная	1991	0,480	2020	0,53	29	1,1040	
9	ПС 220/35/10кВ Туран	1989	0,280	2021	0,31	32	1,1070	1,101
10	ПС 110/10кВ Кулаково	1980	0,560	2016	0,63	36	1,1250	

В режиме однофазного короткого замыкания на землю в сетях 110 кВ и выше и при прямых ударах молнии в молниеотводы, установленные на подстанции, по элементам ЗУ будут протекать импульсные токи молний величиной до 100 кА, а также кратковременные переменные токи частотой 50 Гц, измеряемые в кА.

В этом случае плотность тока, протекающего по элементам ЗУ, возрастает, что может спровоцировать более интенсивные коррозионные процессы в ЗУ и, как следствие, приводить к росту сопротивления ЗУ. Если плотность тока возрастает до 5 А/дм², скорость коррозии увеличивается в 7,5 раза [4, 6].

Исследования, проведенные на вышеуказанных подстанциях, показывают, что при прочих равных условиях, но при различных токах однофазного короткого замыкания наблюдаются различия измеренных значений сопротивления ЗУ. При токах однофазного короткого замыкания до 10 кА, от 10 кА до 15 кА, более 15 кА, отличие измеренных значений сопротивлений ЗУ от расчетных в среднем составляло, соответственно, 3, 4 и 5%.

В случае расположения подстанций в районе с грозовой активностью до 50 ч в год – от 50 до 80 ч в год и при более 80 ч в год, одинаковых площадях ЗУ, электропроводности

грунтов, сроков эксплуатации и сроков ЗУ, а также больших значениях токов КЗ отличие измеренных значений сопротивлений ЗУ составляет в среднем 1, 2 и 3%.

Мультипликативное воздействие выше-рассмотренных факторов может приводить к росту сопротивления ЗУ до 27,4%, а при аддитивном воздействии указанных факторов сопротивление ЗУ может возрасти до 25% по сравнению с расчетными значениями. Величина относительных погрешностей расчетных значений, приведенных в табл. 2, может достигать 28,6%. Это указывает на то, что выше-рассмотренные факторы воздействуют на ЗУ и его сопротивление мультипликативно. Следовательно, учет указанных факторов в расчетах сопротивления ЗУ позволит повысить точность определения его величины.

Учет влияния указанных условий (факторов) может быть определен с применением обобщенного мультипликативного коэффициента.

В роли обобщенного коэффициента предлагается использовать коэффициент эксплуатации ЗУ, составляющие которого определены на основании экспериментальных исследований:

$$K_{\Sigma} = K_K \times K_M \times K_{\Pi} \times K_{\Gamma} \times K_{K3}, \quad (15)$$

где $K_K = 1,02$ – коэффициент, учитывающий влияние коррозии металла на работоспособность ЗУ со сроком эксплуатации после капитального ремонта (реконструкции) до 10 лет, $K_K = 1,06$ и $K_K = 1,1$, если срок эксплуатации ЗУ, соответственно, составляет от 10 до 20 лет и более 20 лет;

$K_M = 1,02$ – коэффициент, учитывающий качество монтажных работ;

K_{Π} – коэффициент, учитывающий периодичность проверки заземляющего устройства: $K_{\Pi} = 1,03$ – периодичность проверки до 6 лет, $K_{\Pi} = 1,05$ – периодичность проверки свыше 6 лет;

K_{Γ} – коэффициент, учитывающий грозовую активность в районе, где расположена подстанция: $K_{\Gamma} = 1,01$, если грозовая активность

не превышает 50 ч в год, $K_{\Gamma} = 1,02$, если грозовая активность находится в диапазоне 51–80 ч в год, $K_{\Gamma} = 1,03$, если грозовая активность более 80 ч в год;

K_{K3} – коэффициент, учитывающий величину тока однофазного КЗ в сетях напряжением свыше 110 кВ и более: $K_{K3} = 1,03$, если ток однофазного КЗ не превышает 10 кА, $K_{K3} = 1,04$, если ток однофазного КЗ находится в диапазоне 10–15 кВ и $K_{K3} = 1,05$, если ток однофазного КЗ свыше 15 кА.

В этом случае сопротивление ЗУ будет определяться по формуле:

$$R_{\Sigma} = K_{\Sigma} \times R_{\text{расч}}, \quad (16)$$

где K_{Σ} – коэффициент эксплуатации; $R_{\text{расч}}$ – сопротивление ЗУ, рассчитанное по формуле (11).

Таблица 5. Значения сопротивлений заземляющих устройств подстанций 110–220 кВ с учетом коэффициента эксплуатации и относительной погрешности

Table 5. Resistance values of 110-220 kV substation grounding devices taking into account the operating ratio and relative error

№	Наименование подстанций	Коррозия металла		Качество монтажных работ	Периодичность проверки		Грозовая активность		Ток однофазного короткого замыкания		K_{Σ}	R_0 , Ом	R_{Σ} , Ом	$R_{\text{изм}}$, Ом	δ , %
		T_{Σ} , год	K_K	K_M	T_{Π} , год	K_{Π}	T_{Γ} , ч	K_{Γ}	$I_{K3}^{(1)}$, кА	K_{K3}					
1	ПС 110/10кВ Кедровская тяговая	27	1,10	1,02	12	1,05	60	1,02	0,576	1,03	1,238	0,180	0,223	0,22	1,30
2	ПС 110/35/10/6 кВ ТРП-7	25	1,10	1,02	до 6	1,03	40	1,01	3,200	1,03	1,202	0,193	0,232	0,23	0,86
3	ПС 110/10кВ Кулаково	36	1,10	1,02	12	1,05	60	1,02	8,550	1,03	1,238	0,498	0,617	0,63	- 2,10
4	ПС 110/10 кВ НПС-2	3	1,02	1,02	до 6	1,03	40	1,01	1,550	1,03	1,115	1,070	1,193	1,23	- 3,10
5	ПС 110/6кВ Ерунаковская-Северная	29	1,10	1,02	12	1,05	60	1,02	9,510	1,03	1,238	0,429	0,531	0,53	0,19
6	ПС 220/10кВ НПС-6	менее 1	1,02	1,02	до 6	1,03	40	1,01	4,500	1,03	1,115	0,249	0,278	0,27	2,88
7	ПС 220/110/10кВ Приангарская	3	1,02	1,02	до 6	1,03	40	1,01	3,600	1,03	1,115	0,168	0,187	0,19	- 1,60
8	ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная	14	1,06	1,02	12	1,05	40	1,01	9,760	1,03	1,181	0,221	0,261	0,26	0,38
9	ПС 220/110/10кВ Горячинская	2	1,02	1,02	до 6	1,03	40	1,01	6,600	1,03	1,115	0,313	0,349	0,35	- 0,28
10	ПС 220/35/10кВ Туран	32	1,10	1,02	12	1,05	60	1,02	1,725	1,03	1,238	0,248	0,307	0,31	- 0,98

В табл. 5 приведены данные по учету в определении сопротивления ЗУ значений коэффициентов, обуславливающих его изменение в условиях эксплуатации, для подстанций (представленных в табл. 1) с учетом коэффициента эксплуатации.

Анализ данных табл. 5 показывает, что относительная погрешность расчетных и измеренных значений сопротивления ЗУ не превышает 3,1%, что соответствует требованиям НТД [8] и подтверждает достоверность формулы (15).

Таким образом, применение коэффициента эксплуатации позволяет повысить точность метода наведенных потенциалов при определении сопротивления ЗУ до вышеуказанного требуемого значения в 5%.

Усовершенствованный метод расчета сопротивления ЗУ позволит на стадии проектирования более точно определять параметры конструкции ЗУ подстанций, а также его можно использовать для оценки сопротивления ЗУ, где не представляется возможным измерить сопротивление ЗУ, например, если подстанции расположены в плотной городской застройке.

Применение коэффициента K_3 позволяет уточнять в процессе эксплуатации значения фактического сопротивления ЗУ для оценки эффективности систем заземления в обеспечении безопасной работы электроустановок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие основные выводы:

1. Относительная погрешность рассмотренных инженерных методов расчета сопротивления ЗУ подстанций напряжением 110 кВ и выше может находиться в диапазоне от 8,4 до 48,8%, что не удовлетворяет требованиям нормативно-технической документации, т.к. превышает допустимую точность расчетов равную 5%.

2. Наиболее точным из рассмотренных инженерных методов расчета сопротивления ЗУ является метод наведенных потенциалов, т.к. относительная погрешность расчетных значений сопротивления ЗУ не превышает 28,6%, а относительная погрешность метода коэффициентов использования и метода обобщенного параметра, соответственно, может достигать 48,8 и 46,7%.

3. Коэффициент эксплуатации ЗУ подстанций учитывает влияние срока эксплуатации, качество монтажных работ, периодичность проверки, грозовую активность и величину токов однофазного КЗ на состояние ЗУ, а, следовательно, и на величину сопротивления ЗУ. Использование коэффициента эксплуатации позволяет снизить относительную погрешность расчета сопротивления ЗУ методом наведенных потенциалов до 3%, что соответствует требованиям НТД.

4. Применение коэффициента K_3 позволяет уточнять в процессе эксплуатации значения фактического сопротивления ЗУ для оценки эффективности систем заземления в обеспечении безопасной работы электроустановок.

Список источников

1. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of technological performance of the extraction area of the coal mine // 3rd International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 41. P. 01014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101014>.
2. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
3. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1984. 448 с.
4. Wang Junping, Liew A.C., Darveniza M. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20. Iss. 3. P. 2160–2165. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839645>.
5. Шевырев Ю.В., Шевырева Н.Ю., Плехов А.С., Титов

- Д.Ю. Применение компьютерных моделей для выбора регуляторов качества электроэнергии при работе электроприводов с полупроводниковыми преобразователями: монография. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. П.Е. Алексеева, 2018. 180 с.
6. Pecherkin V., Vasilyak L., Vetchinin S. P., Panov V., Son E., Danilin A., et al. Optical investigations of pulsed sparks in soil near electrode // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653. P. 012151. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012151>.
7. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. М.: Энергоатомиздат, 1983. 166 с.
8. Данилин А.Н., Ивонин В.В. Экспериментальные исследования импульсных характеристик сосредото-

точных заземлителей // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 3. С. 27–32.

9. Шишигин С.Л., Смирнов И.Н., Шишигин Д.С. Высоко-частотный метод измерения сопротивления заземления опоры воздушной линии в высокоомном грунте // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 10. С. 296–301.

10. Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С. Импульсный метод измерения сопротивления заземлителей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 30–41.

11. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С. Расчёт заземлителей: монография. Вологда: ВоГУ, 2020. 219 с.

12. Нестеров С. Сопротивление электролитического заземлителя // Новости ЭлектроТехники. 2020. № 1-2. С. 72–77. [Электронный ресурс]. URL:

http://www.news.elteh.ru/pics/121/Net_121-122_12_Nesterov.pdf (10.06.2022).

13. Гладиллин Л.В., Щуцкий В.И. К расчёту защитных заземлений шахтных и карьерных электроустановок // Горный журнал. 1973. № 12. С. 63–66.

14. Гладиллин Л.В., Якуба Ю.Ф. Непрерывность общей

сети электроустановок шахт и карьеров основное условие обеспечения электробезопасности // Горный журнал. 1974. № 10. С. 129–132.

15. Гладиллин Л.В., Щуцкий В.И., Бацезhev Ю.Г., Чеботаев Н.И. Электробезопасность в горно-добывающей промышленности. М.: Недра, 1977. 327 с.

16. Щуцкий В.И., Маврицын А.М., Сидоров А.И., Ситчихин Ю.В. Электробезопасность на открытых горных работах. М.: Недра, 1983. 192 с.

17. Sekioka S., Lorentzou M.I., Philippakou M.P., Prousalidis J.M. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21. Iss. 1. P. 194–201. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852337>.

18. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2014. Vol. 56. Iss. 5. P. 1163–1171. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2313977>.

19. Анненков В.З. Метод расчёта импульсного сопротивления стержневого заземлителя // Электричество. 1997. № 8. С. 59–66.

20. Анненков В.З. Искрообразование в земле вокруг заземлителей молниезащиты // Электричество. 1993. № 12. С. 15–20. <http://doi.org/10.24160/0013-5380-2018-12-22-27>.

References

1. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of technological performance of the extraction area of the coal mine. In: *3rd International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences*. 2018;41:01014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101014>.

2. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Grounding devices of electrical installations*. Moscow: Energoatomizdat; 1987, 400 p. (In Russ.).

3. Dolin P.A. *Fundamentals of safety in electrical installations*. Moscow: Energoatomizdat; 1984, 448 p. (In Russ.).

4. Wang Junping, Liew A.C., Darveniza M. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005;20(3):2160-2165. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839645>.

5. Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu., Plekhov A.S., Titov D.Yu. *Using computer models for the selection of power quality regulators when operating electric drives with semiconductor converters: monograph*. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev; 2018, 180 p. (In Russ.).

6. Pecherkin V., Vasilyak L., Vetchinin S.P., Panov V., Son E., Danilin A., et al. Optical investigations of pulsed sparks in soil near electrode. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015;653:012151. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012151>.

7. Kostruba S.I. *Measurement of earth and grounding device electrical parameters*. Moscow: Energoatomizdat; 1983. 166 p. (In Russ.).

8. Danilin A.N., Ivonin V.V. Experimental studies of lumped ground electrode impulse characteristics. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN = Transactions Kola Science*

Centre. 2014;3:27-32. (In Russ.).

9. Shishigin S.L., Smirnov I.N., Shishigin D.S. High-frequency method for measuring the resistance of the grounding system of the transmission line tower in high-resistance soil. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University*. 2020;10:296-301. (In Russ.).

10. Shishigin S.L., Cherepanov A.V., Shishigin D.S. Pulse method for measuring the resistance of earth electrode. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Estestvennye i inzhenernye nauki = Global Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. 2019;25(2):30-41. (In Russ.).

11. Shishigin S.L. *Calculation of earth electrode systems*. Vologda: Vologda State University; 2020, 219 p. (In Russ.).

12. Nesterov S. Electrolytic ground electrode resistance. *Novosti elektrotehniki*. Available from:

http://www.news.elteh.ru/pics/121/Net_121-122_12_Nesterov.pdf [Accessed 10th June 2022]. (In Russ.).

13. Gladilin LV, Shchutskii VI. To protective grounding calculation for mine and open pit electrical installations. *Gornyi zhurnal*. 1973;12:63-66. (In Russ.).

14. Gladilin L.V., Yakuba Y.F. General network continuity of electrical installations of mines and open pits as the main condition for ensuring electrical safety. *Gornyi zhurnal*. 1974;10:129-132. (In Russ.).

15. Gladilin L.V., Shuckij V.I., Bacezhev Yu.G., Chebotaev N.I. *Electrical safety in mining industry*. Moscow: Nedra; 1977, 327 p. (In Russ.).

16. Shutskii V.I., Mavritsyn A.M., Sidorov A.I., Sitchikhin

Y.V. *Electrical safety in open pit mining*. Moscow: Nedra; 1983, 192 p. (In Russ.).

17. Sekioka S., Lorentzou M.I., Philippakou M.P., Prousalidis J.M. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006;21(1):194-201. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852337>.

18. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on*

Electromagnetic Compatibility. 2014;56(5):1163-1171. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2313977>.

19. Annenkov V.Z. Calculation method of rod ground electrode impulse resistance. *Elektrichestvo*. 1997;8:59-66. (In Russ.).

20. Annenkov V.Z. Sparking in the ground around lightning protection earth electrodes. *Elektrichestvo*. 1993;12:15-20. (In Russ.). <http://doi.org/10.24160/0013-5380-2018-12-22-27>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ляхомский Александр Валентинович,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой энергетики и
энергоэффективности горной промышленности,
НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4/1, Россия
mggu.eegp@mail.ru

Кузьмин Сергей Васильевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры электрификации
горно-металлургического производства,
Сибирский федеральный университет,
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия
✉ rutas2004@list.ru

Кудряшов Алексей Петрович,

главный энергетик,
ООО «СУЭК-Хакасия»,
655162, г. Черногорск, ул. Советская, 40,
Республика Хакасия
kudriashovap@suek.ru

Кузьмин Роман Сергеевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры электрификации
горно-металлургического производства,
Сибирский федеральный университет,
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия
rutas2004@list.ru

Кузьмин Илья Сергеевич,

генеральный директор,
ООО ГК «Рутас»,
660064, г. Красноярск, ул. Вавилова, 2ж, Россия
is@rutas.group

Меньшиков Виталий Алексеевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры электрификации
горно-металлургического производства,
Сибирский федеральный университет,
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия
rutas2004@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr V. Lyakhomskiy,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Power Engineering
and Energy Efficiency of Mining Industry,
National University of Science and Technology MISIS,
4-1, Leninsky pr., Moscow 119049, Russia
mggu.eegp@mail.ru

Sergey V. Kuzmin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electrification of Mining and Metallurgy Industry,
Siberian Federal University,
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia
✉ rutas2004@list.ru

Aleksey P. Kudryashov,

Chief Power Engineer,
LLC «SUEK-Khakassia»,
40, Sovetskaya St., Chernogorsk 655162, Russia
kudriashovap@suek.ru

Roman S. Kuzmin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electrification of Mining and Metallurgy Industry,
Siberian Federal University,
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia
rutas2004@list.ru

Ilya S. Kuzmin,

Chief Executive Officer,
Group of companies «Rutas» LLC,
2ж, Vavilov St., Krasnoyarsk 660064, Russia
is@rutas.group

Vitaliy A. Menshikov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electrification of Mining and Metallurgy Industry,
Siberian Federal University,
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia
rutas2004@list.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.07.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 27.02.2023.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 12.07.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 27.02.2023.