

DOI:10.26104/NNTIK.2023.23.73.006

Асанов А.К., Мамбетова К.М., Омокеева А.А.

**ЖЕРГЕ ТУТАШТЫРУУ ТҮЗҮЛҮШҮНҮН КОНФИГУРАЦИЯСЫНЫН
ТОПУРАКТЫН КАРШЫЛЫГЫНА ТИЙГИЗГЕН ТААСИРИ**

Асанов А.К., Мамбетова К.М., Омокеева А.А.

**ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАСТЕКАНИЮ ТОКА**

A. Asanov, K. Mambetova, A. Omokeeva

**INFLUENCE OF GROUNDING DEVICE CONFIGURATION
ON SOIL RESISTANCE**

УДК: 621.316.9

Иште жерге туташтыруучу түзүлүштөрдүн конфигурациясын эске алуу менен жогорку вольттогу көмөкчордондордун учурдагы таралуу каршылыгын эсептөөнүн натыйжалары талданат. Токтун жайылышына туруктуулукту баалоо үчүн индукцияланган потенциалдар жана компьютердик моделдөө ыкмалары колдонулган. Стандарттуу эмес (узартылган) жерге туташтыруу торлору үчүн индукцияланган потенциалдар ыкмасын колдонуу менен эсептөөдө жерге туташтыруучу түзүлүштүн каршылыгы эсептөөлөрдөгү 30%ке чейинки катага алып келери аныкталган. Квадрат тордуу салыштырмалуу катасы бар стандарттуу жерге туташтыруучу түзүлүштөр үчүн жерге туташтыруучу түзүлүштүн каршылыгы 5% дан ашпайт, бул ченемдик-техникалык документтердин талаптарына жооп берет. Жеке жерге туташтыруучу түзүлүштөн пассивдүү чынжырдагы индукцияланган токтун үлүшү алардын ортосундагы аралыкка жараша эсептелген жана талданган. Токтун олуттуу бөлүгү дагы эле негизги жер электродуна агып келе жаткандыгы жана жеке жер электродунун функциялары нөлгө тенденциясы аныкталган, бул электромагниттик шайкештиктин жана электр коопсуздугунун шарттарын бузган.

Негизги сөздөр: *эсептөө ыкмалары, каршылык, жерге туташтыруучу түзүлүштөр, жогорку чыңалуудагы подстанция, жерге туташтыруучу тор, жердин каршылыгы, салыштырмалуу ката, жеке жерге туташтыргыч, пассивдүү жерге туташтыруу контуру.*

В работе произведен анализ результатов расчета сопротивления растекания тока высоковольтных подстанций с учетом конфигурации заземляющих устройств. Для оценки сопротивлению растеканию тока использовались методы наведенных потенциалов и компьютерного моделирования. Установлено, что сопротивление заземляющего устройства при расчете по методу наведенных потенциалов для не типовых (вытянутых в длину) заземляющих сеток приводит до 30% погрешности в расчетах. Сопротивление заземляющего устройства для типовых заземляющих устройств с квадратной сеткой относительная погрешность не превышает 5%, что соответствует требованиям нормативно-технической документации. Произведен расчет и анализ доли наведенного тока в пассивном контуре от индивидуального заземляющего устройства в зависимости от расстояния между ними. Уста-

новлено, что значительная доля тока все равно попадает в основной заземлитель и функции индивидуального заземлителя стремятся к нулю, что нарушают условия электромагнитной совместимости и электробезопасности.

Ключевые слова: *методы расчета, сопротивление, заземляющие устройства, высоковольтная подстанция, заземляющая сетка, удельное сопротивление земли, относительная погрешность, индивидуальный заземлитель, пассивный контур заземления.*

The work analyzes the results of calculating the current spreading resistance of high-voltage substations, taking into account the configuration of grounding devices. To estimate the resistance to current spreading, methods of induced potentials and computer modeling were used. It has been established that the resistance of the grounding device when calculated using the method of induced potentials for non-standard (elongated) grounding grids leads to up to 30% error in the calculations. The resistance of the grounding device for standard grounding devices with a square mesh relative error does not exceed 5%, which meets the requirements of regulatory and technical documentation. The proportion of induced current in the passive circuit from an individual grounding device has been calculated and analyzed depending on the distance between them. It has been established that a significant portion of the current still flows into the main ground electrode and the functions of the individual ground electrode tend to zero, which violates the conditions of electromagnetic compatibility and electrical safety.

Key words: *calculation methods, resistance of grounding devices, high-voltage substation, grounding grid, earth resistivity, relative error, individual grounding conductor, passive grounding loop.*

Введение. *Заземляющие устройства высоковольтной подстанции выполняют три основные функции:*

- рабочее заземление, предназначенное для обеспечения нормального функционирования электрооборудования и вторичных цепей;*
- защитное заземление, обеспечивающее электробезопасность при эксплуатации электрооборудования и электроустановок;*

– молниезащитное заземление, предназначенное для обеспечения электромагнитной совместимости электрооборудования и вторичных цепей на объектах электроэнергетики.

Основным параметром которого является сопротивление растеканию тока или сопротивление заземляющего устройства.

Согласно Правилу устройства электроустановок (ПУЭ п. 1.7.90) [1], заземляющие устройства электроустановок напряжением выше 1 кВ в сетях с эффективно заземленной нейтралью, эффективно выполняют вышеперечисленные функции, если его сопротивление, имеет в любое время года не более 0,5 Ом с учетом сопротивления естественных и искусственных заземлителей. Но в районах с большим удельным сопротивлением земли $\rho > 500$ Ом·м, допускается повысить требуемые значения сопротивлений ЗУ в 0,002 раз, при этом увеличение требуемых сопротивлений заземляющих устройств должно быть не более десятикратного (п. 1.7.108) [1].

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

Методы расчета. Сопротивление ЗУ большой площади в виде заземляющей сетки из горизонтальных электродов, в однородной земле определялось по методу наведенных потенциалов, где в основе лежит эмпирическая формула Оллendorфа-Лорана

$$R_3 = 0,444 \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где S – площадь заземляющего устройства (м^2), ρ – удельное сопротивление земли (расчетное), Ом·м.

В выражении (1) первый член дает сопротивление заземлителя в виде сплошной пластины, второй учитывает разницу между сплошной пластиной и сеткой из горизонтальных электродов (полос) общей длиной L_g , м. Первый член определяет также минимальное сопротивление заземлителя, которое может быть достигнуто на данной площади S с помощью только горизонтальных электродов.

В случае сложных заземлителей, содержащих горизонтальные и вертикальные электроды, и с учетом неоднородности удельного сопротивления земли (двухслойная модель) формула (1) видоизменяется:

$$R_3 = A \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L_r + L_b}, \text{ Ом}, \quad (2)$$

$$\text{где } A = \left(0,444 - 0,84 \frac{l_b + t}{\sqrt{S}}\right) \text{ при } 0 \leq \frac{l_b + t}{\sqrt{S}} < 0,1; \quad (3)$$

$$A = \left(0,385 - 0,25 \frac{l_b + t}{\sqrt{S}}\right) \text{ при } 0,1 \leq \frac{l_b + t}{\sqrt{S}} < 0,5; \quad (4)$$

ρ_m – эквивалентное удельное сопротивление земли, Ом·м, зависящее от параметров электрической структуры земли (ρ_1 / ρ_2 и ρ_2) и от конструктивных параметров заземлителя, m : толщины верхнего слоя h_1 , глубины заложения заземлителя t и длины вертикального электрода l_e .

Эквивалентное удельное сопротивление земли определялось по равенству

$$\rho_3 = \rho_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^\alpha; \quad (5)$$

$$\alpha = 0,19 \left(1 + \lg \frac{4,8h_1}{l_b}\right) \text{ при } 0,1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} < 1; \quad (6)$$

$$\alpha = 0,43 \frac{h_1 - t}{l_b} + 0,27 \lg \frac{a}{l_b} \text{ при } 1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} < 10; \quad (7)$$

Представленный выше алгоритм расчета не учитывает:

- площадь соприкосновения с землей проводников заземляющей сетки;
- глубину залегания заземляющей сетки;
- длину и ширину заземляющей сетки.

Первые два показателя существенного влияния не оказывают, а вот геометрическая разность длины и ширины заземляющей сетки могут существенно повлиять на результаты расчета. В связи с этим нами был реализован расчет и моделирование влияние конструктивного исполнения заземляющей сетки на сопротивление заземляющего устройства.

Ниже в графиках и таблице 1 показаны результаты расчета по приближенной эмпирической формуле Оллendorфа-Лорана (кривая 1, на рисунках 1-3) и компьютерного моделирования (кривая 2, на рисунках 1-3) длиной сетки для 100м, 200м, 300м, с разными значениями ширины сетки от 20 м до 100, 200 и 300 м соответственно, ячейка заземляющей сетки 10 x 10 м.

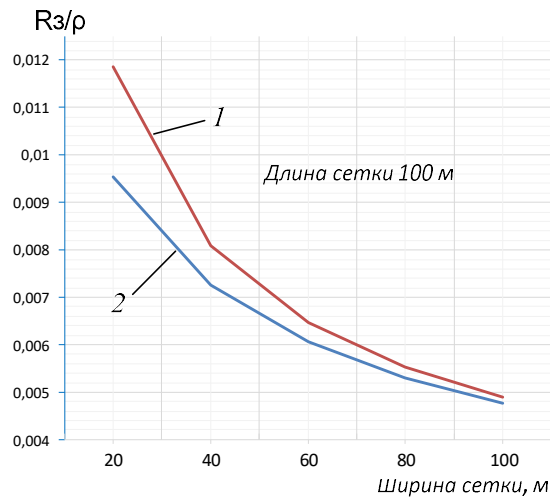


Рис. 1. Зависимость сопротивления заземляющего устройства от ширины заземляющей сетки при длине заземляющей сетки 100 м.

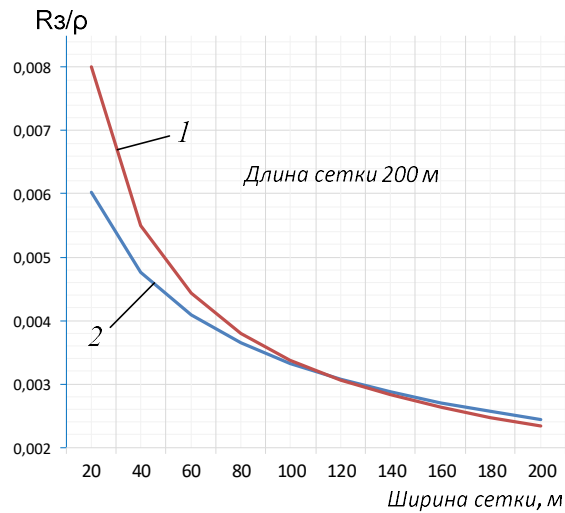


Рис. 2. Зависимость сопротивления заземляющего устройства от ширины заземляющей сетки при длине заземляющей сетки 200 м.

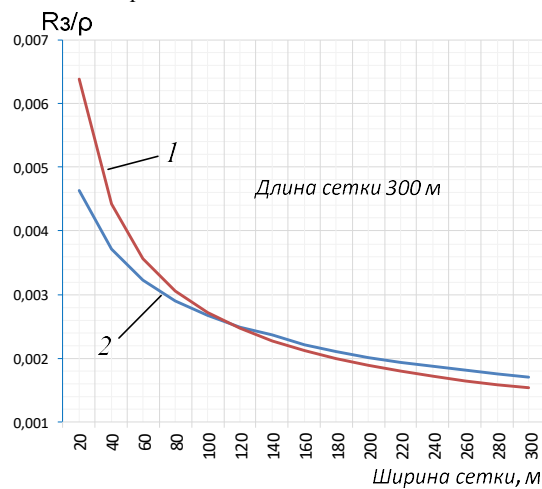


Рис. 3. Зависимость сопротивления заземляющего устройства от ширины заземляющей сетки при длине заземляющей сетки 300 м.

Таблица 1

Погрешность расчета сопротивления заземляющих устройств подстанций

Погрешность δ , %														
Ширина заземляющей сетки для сетки длиной 100 м, 200 м и 300 м														
20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
19,5	10,2	6,3	4,0	2,8										
24,7	13,6	8,7	5,0	1,5	-0,4	-1,7	-2,9	-3,7	-4,4					
27,5	16,0	10,5	6,1	1,9	-0,6	-3,7	-4,2	-5,6	-6,7	-7,8	-8,7	-9,6	-10,3	-11,4

Анализ таблицы 1 показывает, что погрешность расчетов сопротивления ЗУ по формуле 1 находится в диапазоне от 3 до 20% для заземляющей сетки с длиной 100 м, от - 4 до 25% для длины сетки 200 м, и от - 11 до 28% для длины сетки 300 м.

Положительное значение погрешности указывает на то, что при отношении длины и ширины заземляющей сетки, равной 1,6 для длины сетки 100м, 3,3 для длины сетки 200 м, и 3,7 для длины сетки 300 м они выходят за пределы допустимых погрешностей расчетных методов определения сопротивления ЗУ

подстанций напряжением 110 кВ и выше [4].

Таким образом, применение в проектировании приближенной формулы Оллендрофа-Лорана для не типовых (вытянутых в длину) заземляющих сеток приводит к заведомо завышенному значению.

Ниже на рисунке 4 приводится зависимость сопротивления ЗУ от квадратных (равносторонних) заземляющих сеток, где кривые 1 и 2 имеют почти одинаковое значение, поэтому для квадратных сеток применение формулы 1 приемлем.

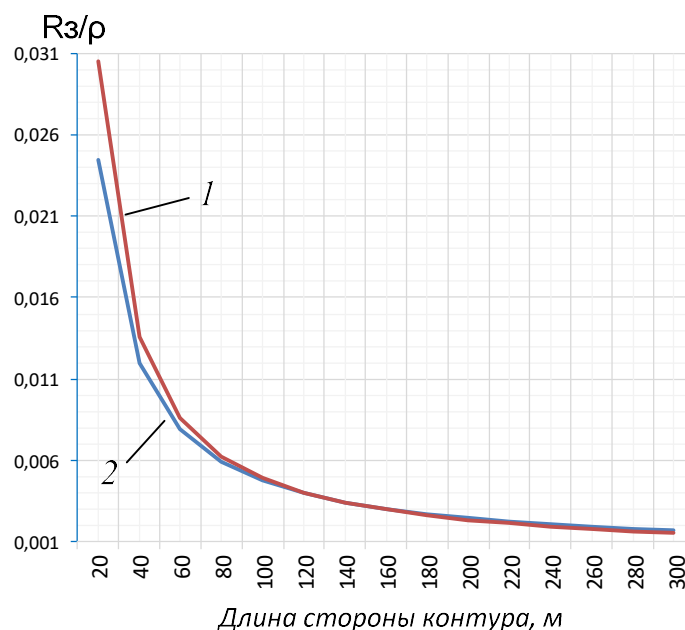


Рис. 4. Зависимость сопротивления заземляющего устройства от квадратной заземляющей сетки.

Также при проектировании ЗУ применяют индивидуальные заземлители, которые не имеют связь с основным заземлителем, это делается для того, чтобы избежать проблемы воздействия тока молнии на контур заземления подстанции.

В связи с этим произведен расчет и моделирование стекания доли тока на пассивный контур

заземления, в зависимости от расстояния между заземлителями. Результаты расчета приведены на рисунке 5.

Расчет выполнен для заземляющей сетки с ячейкой 10х10 м. Ток введен в горизонтальную шину длиной 10 м с 3 вертикальными электродами длиной по 2 м (типовой заземлитель для молниевывода).

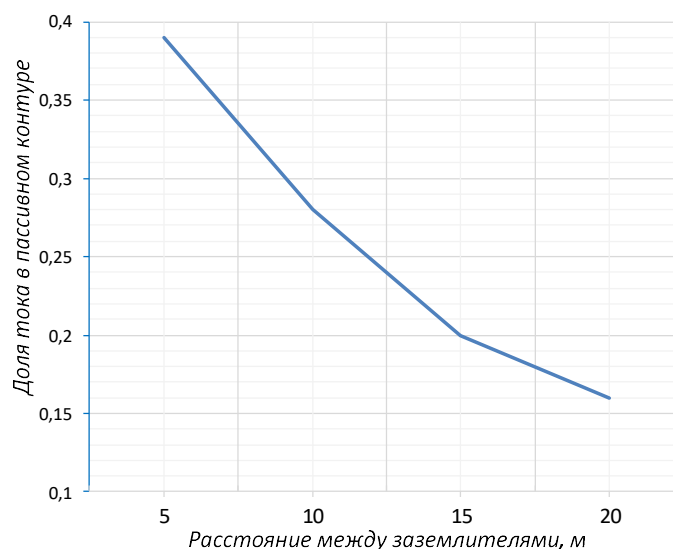


Рис. 5. Наведенный ток в пассивном контуре.

Из анализа зависимости (рис. 5), можно делать вывод о том, что применение индивидуальных заземлителей с соблюдением нормированных расстояний, не будет выполнять свою задачу, позволяя поступать значительной части тока молнии на основное ЗУ ПС. Самое благоприятное удельное сопротивление грунта больше удельного сопротивления заземляющих электродов ориентировочно в 100 раз, поэтому значительная доля тока молнии из заземлителя молниеотвода направится к близко расположенным заземляющим электродам открытого распределительного устройства, распространится по ним насколько это возможно, и только затем уже окончательно уйдет в землю.

Выводы. Для не типовых (вытянутых в длину) заземляющих сеток применение метода наведенных потенциалов приводит к заведомо завышенному значению при расчете сопротивления растеканию тока.

Применение индивидуальных заземлителей, не связанных с основным заземляющим устройством, не выполняет условия по обеспечению электромагнитной совместимости и электробезопасности обслуживающего персонала.

По представленным графикам можно определить сопротивление заземляющего устройства в зависимости от отношения длины и ширины заземляющей сетки с учетом удельного сопротивления грунта, которые могут быть применены при проектировании заземляющего устройства высоковольтной подстанции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта МОУН КР №0007818.

Литература:

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
2. Борисов Р.К. и другие. Заземляющие устройства электроустановок. Требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкции, сооружение. М.: - Изд. дом МЭИ, 2013. – 360 с.
3. СО 153-34.21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций.
4. Данилин А.Н., Ивонин В.В. Экспериментальные исследования импульсных характеристик сосредоточенных заземлителей // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 3. С. 27-32.
5. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6 -750 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.
6. Болот кызы Р., Асанов А.К. Оценка эффективности заземляющего устройства ПС 500 кВ «Кемин» // Материалы №60 МНТК «Научно-инновационные технологии: Идеи исследования и разработки» Ч.III. – КГТУ им. И.Раззакова. – Бишкек, 2018 – С. 188-194.
7. Асанов А.К., Джолдошбеков Б.Ж., Джусупбекова Н.К., Аркарчиева М.К. Исследование влияния сопротивления грунта на сопротивление заземляющих устройств (на примере Нарынской области) // Проблемы автоматики и управления. - Бишкек, 2022. – №2 (44). – С. 70-76.
8. Асанов А.К., Омокеева А.А. Экспериментально-расчетное определение электромагнитной обстановки ПС 110 кВ «Ананьево». // Проблемы автоматики и управления. - Бишкек, 2022. – №3 (45). – С. 42-51.
9. Асанов А.К., Джусупбекова Н.К., Батырбеков Б.К. Исследование электрофизических характеристик грунта энергообъектов Кыргызстана // Известия ВУЗов Кыргызстана. - Бишкек, 2022. – №6. – С. 3-8.