

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА ЗАНЯТОЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕМ ТЕРРИТОРИИ

Наведено аналіз результатів дослідження розподілу електричних потенціалів по поверхні землі на зайнятій заземлювачем території. Показано, що потенціал над центром квадратного заземлювача може бути вище, ніж над електродом. Запропоновано оцінювати граничний розмір комірки складного сіткового заземлювача в залежності від глибини його укладання. Встановлено, що дворівнева конструкція заземлювача зменшує напругу дотику. Новизна результатів полягає в тому, що з використанням математичної моделі досліджені електричні характеристики заземлювача у вигляді дворівневої конструкції.

Приведен анализ результатов исследования распределения электрических потенциалов по поверхности земли на занятой заземлителем территории. Показано, что потенциал над центром квадратного заземлителя может быть выше, чем над электродом. Предложено оценивать предельный размер ячейки сложного сеточного заземлителя в зависимости от глубины его укладки. Установлено, что двухуровневая конструкция заземлителя уменьшает напряжение прикосновения. Новизна результатов состоит в том, что с использованием математической модели исследованы электрические характеристики заземлителя в виде двухуровневой конструкции.

подавляющее большинство электрических станций, крупных подстанций (ПС) и открытых распределительных устройств, которые являются электроустановками с напряжением выше 1 кВ, работают в сетях с эффективно заземленной нейтралью. Согласно требованиям ПУЭ [1], любая электроустановка в обязательном порядке должна иметь заземляющее устройство (ЗУ). Проектирование заземляющих устройств электрических подстанций проводится по критериям электробезопасности и электромагнитной совместимости (ЭМС) [2]. Электробезопасность обеспечивается нормированием величины напряжения прикосновения (вторая норма ПУЭ), которое не должно превышать нормируемого значения по [1] и достигается выбором размеров ячеек заземляющей сетки. Альтернативным критерием является нормирование сопротивления ЗУ, которое не должно быть выше 0,5 Ом (первая норма ПУЭ), но ее применение не обеспечивает электробезопасность на ПС с большими токами короткого замыкания (КЗ) и ведет к избыточной металлоемкости ЗУ ПС с малыми токами [3].

К требованиям ЭМС относится ограничение величины напряжения на ЗУ при КЗ до значения 5 кВ [2], 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 [2-4], 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.

Возникающие при проектировании ЗУ электроустановок задачи зачастую требуют для их решения достаточно сложных компьютерных программ, которые позволяют быстро найти необходимое оптимальное решение, например, программы СТОК, ЗУМ, ORU M и другие.

В работе [5] была опубликована идея выравнивания электрических потенциалов в зоне заземления электроустановки путем заложения заземлителя на глубину, близкую к критической. Позже, в работе [6] было отмечено, что многие специалисты продолжают считать до сих пор, что идеально выровненное распределение электрических потенциалов может иметь место только и только в том гипотетическом случае, когда заземлитель выполнен из металлического листа размером, равным территории электроустановки. Выполнение такого заземлителя связано с огромными затратами и на практике, естественно, никогда не осуществляется.

Исследования распределения электрических потенциалов по поверхности земли над заземлителем в виде кольца в зависимости от глубины его заложения представлены в работе [6]. При этом показано, что на поверхности земли над центром кольца электрический потенциал может быть больше, чем над электродом. Аналогичный результат наглядно проиллюстрирован и в работе [7].

Цель статьи. На основании исследований показать, что такое распределение для кольцевого заземлителя подобным образом проявляется и для квадратного заземлителя, а также заземлителя в виде уложенной в грунте сетки с квадратными и прямоугольными ячейками, или ячейками других форм.

В статье на конкретных заземлителях исследуется вопрос оптимального выравнивания электрических потенциалов по поверхности земли на занимаемой заземлителем площади.

Исследования выполнены с помощью разработанной авторами программы расчета сложных заземлителей (см. приложение) на основе метода наведенного потенциала.

В связи с тем, что ЗУ подстанций выполняются в виде сетки с продольными и поперечными электродами и уложенным по её периметру контуром из горизонтальных электродов, в работе вначале выполнено исследование заземлителя в виде квадрата (одна уединенная ячейка сетки) со стороной a различных раз-

меров: 10 м; 5 м, 2,5 м, 1 м. Диаметр электродов принят равным $d=18$ мм как в случае одной сетки, так и в случае двухуровневой сетки.

Исследования выполнены для наиболее распространенных типов грунтов: влажных глинистых, сухих песчаных и влажных черноземных с глубиной залегания зоны грунтовых вод на расстоянии $h=5$ м от поверхности земли, т.е. мощность верхнего слоя во всех случаях, кроме оговоренных отдельно, принята одинаковой.

Таким образом, в исследованиях принята двухслойная модель грунта с толщиной нижнего слоя грунта, равной бесконечности. Удельное электрическое сопротивление верхнего слоя грунта принималось равным 20 Ом·м, 100 Ом·м, 500 Ом·м и 1000 Ом·м в то время, как удельное электрическое сопротивление нижнего слоя грунта во всех случаях принималось равным 100 Ом·м. При этом, удельное электрическое сопротивление грунта в каждом слое по его глубине принималось однородным. В действительности, грунт может иметь существенную неоднородность по проводимости, что должно учитываться при проектировании ЗУ. Неоднородность зачастую обусловлена просыханием грунта летом, промерзанием зимой, а также уровнем залегания зоны грунтовых вод.

Рассмотрим результаты исследования распределения электрического потенциала по поверхности земли для квадратного заземлителя, заложенного в двухслойном грунте с толщиной верхнего слоя $h=1$ м. Диаметр электрода заземлителя $d=18$ мм. Глубина t заложения заземлителя варьировалась в пределах от 0,1 м до 1,5 м. Удельное электрическое сопротивление верхнего слоя грунта ρ_1 принималось равным 20 Ом·м, 100 Ом·м и 500 Ом·м, а нижнего ρ_2 – 100 Ом·м. Оценка распределения электрического потенциала по поверхности земли осуществлялась в направлении x перпендикулярном к стороне квадрата и проходящем через его центр за пределы противоположной стороны квадрата. Результаты исследования при глубине заложения заземлителя $t=0,7$ м в качестве примера представлены на рис. 1-3 в виде зависимостей $\varphi/\varphi_3=f(x)$. Проанализируем рис. 1, на котором представлены кривые зависимости относительного электрического потенциала на поверхности земли в направлении x , т.е. $\varphi/\varphi_3=f(x)$.

Характерной особенностью является то, что кривые зависимости смещаются в сторону меньших значений относительного электрического потенциала при увеличении отношения $\rho_1/\rho_2 = (0,2; 1; 5)$. Анализ результатов показывает, что по поверхности земли над квадратным заземлителем и за его пределами величина относительного потенциала снижается с ростом отношения ρ_1/ρ_2 тем больше, чем больше это отношение при любом размере квадратного заземлителя.

Кроме того, величина относительного потенциала над центром квадратного заземлителя оказывается выше, чем над электродом при значениях отношения $\rho_1/\rho_2 \leq 1$, а при возрастании значения отношения $\rho_1/\rho_2 > 1$ величина относительного электрического потенциала становится ниже и уменьшается с ростом ρ_1/ρ_2 .

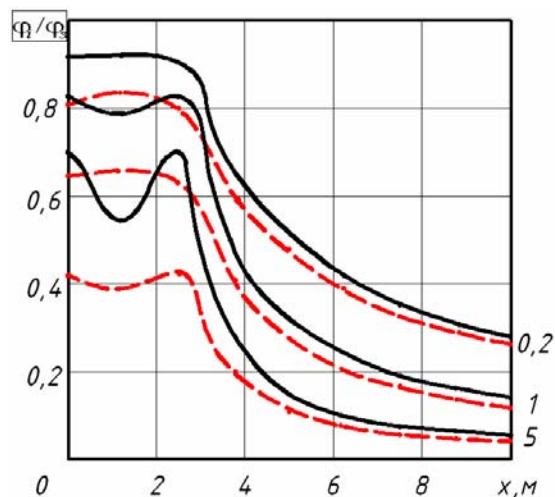


Рис. 1. График зависимости относительного потенциала от расстояния x для квадратного заземлителя со стороной $a=2,5$ м: квадратный заземлитель на нижнем уровне (пунктирная линия); квадратный заземлитель двухуровневый (сплошная линия)

Вместе с тем, уменьшение отношения ρ_1/ρ_2 приводит к более быстрому увеличению относительного потенциала в центре квадратного заземлителя, чем над электродом. При этом величина относительного потенциала над центром квадратного заземлителя не только становится равной величине относительного потенциала над электродом, но и становится больше. Увеличение размера a стороны квадрата, как показано на рис. 2 и рис. 3, приводит к аналогичным результатам, за исключением того, что величина относительного электрического потенциала на поверхности земли в точке над центром квадратного заземлителя при всех значениях отношения ρ_1/ρ_2 меньше, чем над электродом.

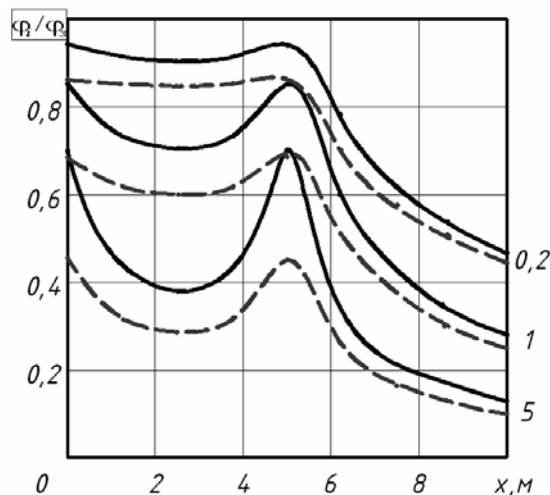


Рис. 2. График зависимости относительного потенциала от расстояния x для квадратного заземлителя со стороной $a=5$ м: квадратный заземлитель на нижнем уровне (пунктирная линия); квадратный заземлитель двухуровневый (сплошная линия)

Кроме того, исследовано влияние глубины t заложения заземлителя в виде квадрата на распределение электрических потенциалов по поверхности земли. При этом глубина t заложения заземлителя варьировалась в пределах от 0,1 м до 4 м.

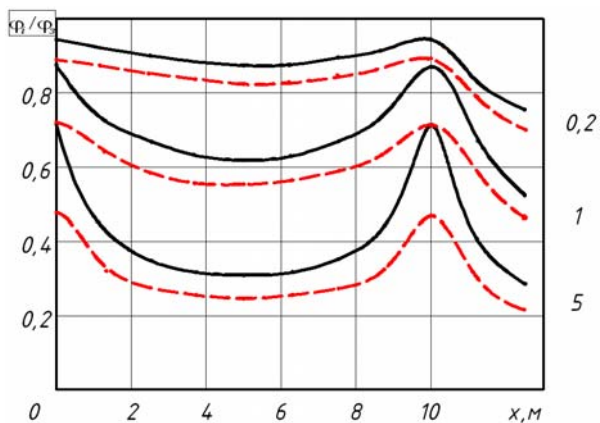


Рис. 3. График зависимости относительного потенциала от расстояния x для квадратного заземлителя со стороной $a=10$ м: квадратный заземлитель на нижнем уровне (пунктирная линия); квадратный заземлитель двухуровневый (сплошная линия)

Результаты исследования распределения электрических потенциалов по поверхности земли в зависимости от глубины заложения заземлителя с помощью его математической модели наиболее наглядно представлены на рис. 4 для заземлителя размером 5×5 м, на рис. 5 для заземлителя размером $2,5 \times 2,5$ м, на рис. 6 для заземлителя размером 1×1 м.

Так, например, на рис. 4 представлены зависимости относительного потенциала φ/φ_3 на поверхности земли над центром квадрата от относительной глубины t/a заложения заземлителя в грунтах с различным удельным электрическим сопротивлением верхнего слоя земли. Здесь же приведены зависимости относительного потенциала $\varphi/\varphi_3=f(x)$ на поверхности земли над электродом в точке, расположенной посередине стороны квадрата, от относительной глубины заложения t/a заземлителя.

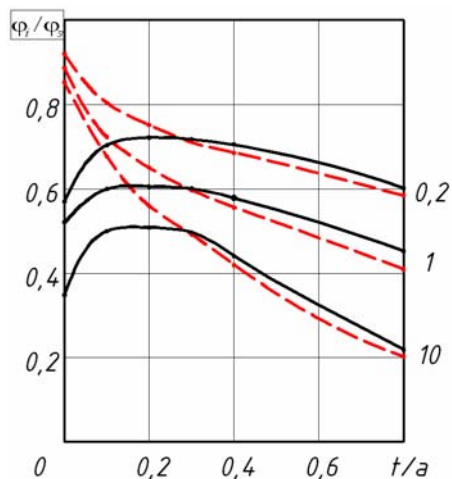


Рис. 4. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения квадратного заземлителя со стороной $a=5$ м: над электродом (пунктирная линия); над центром квадрата (сплошная линия)

Анализ приведенных зависимостей свидетельствует о том, что увеличение относительной глубины заложения квадратного заземлителя приводит к нелинейному снижению относительного потенциала φ/φ_3 на поверхности земли над электродом при любом

значении удельного электрического сопротивления грунта ρ_1 в исследованном диапазоне от 20 Ом·м до 1000 Ом·м. Кроме того, скорость снижения относительного потенциала φ/φ_3 с ростом удельного электрического сопротивления грунта ρ_1 возрастает. Вместе с тем, величина относительного потенциала φ/φ_3 на поверхности земли в точке над центром квадратного заземлителя при увеличении относительной глубины заложения t/a от 0,1 до 0,3 возрастает до некоторого максимального значения, а затем, при дальнейшем увеличении t/a , снижается. Чем выше удельное электрическое сопротивление грунта ρ_1 , тем ниже смещается кривая зависимости $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$. При этом, скорость снижения φ/φ_3 возрастает с ростом удельного электрического сопротивления грунта ρ_1 .

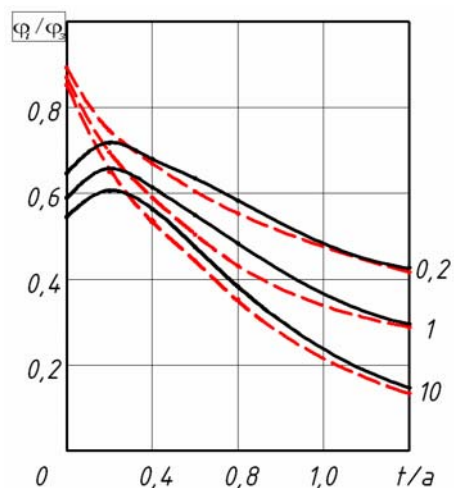


Рис. 5. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения квадратного заземлителя со стороной $a=2,5$ м: над электродом (пунктирная линия); над центром квадрата (сплошная линия)

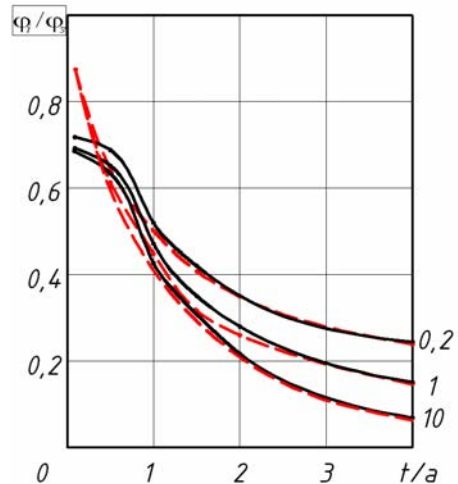


Рис. 6. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения квадратного заземлителя со стороной $a=1$ м: над электродом (пунктирная линия); над центром квадрата (сплошная линия)

Из графика также видно, что кривая зависимости $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$, полученная для точки на поверхности земли над электродом квадратного заземлителя, пересекается с кривой зависимости $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$ для точки на поверхности земли над центром квадратного заземлителя при значении $t/a=0,3$. Это наблюдается при

любом значении удельного электрического сопротивления грунта ρ_1 в рассматриваемом диапазоне.

Таким образом, близкое к равномерному распределение электрических потенциалов по поверхности земли наблюдается при некоторой глубине заложения квадратного заземлителя, определяемой по выражению $t=0,3a$.

Аналогичные по характеру зависимости получены также и при разных размерах a стороны квадрата. Во всех случаях глубина заложения квадратного заземлителя принята равной $t=0,5$ м.

Результаты, полученные для других размеров a квадратных заземлителей, показаны на рис. 5, 6.

Результаты исследования, приведенные на рис. 7, представляют собой зависимость относительного потенциала φ/φ_3 на поверхности земли от размера a стороны квадратного заземлителя, то есть $\varphi/\varphi_3=f(a)$. В данном случае относительный потенциал φ/φ_3 также определяется на поверхности земли, как в точке над электродом квадратного заземлителя, так и в точке над его центром. При этом глубина t заложения квадратного заземлителя составляет $t=0,5$ м.

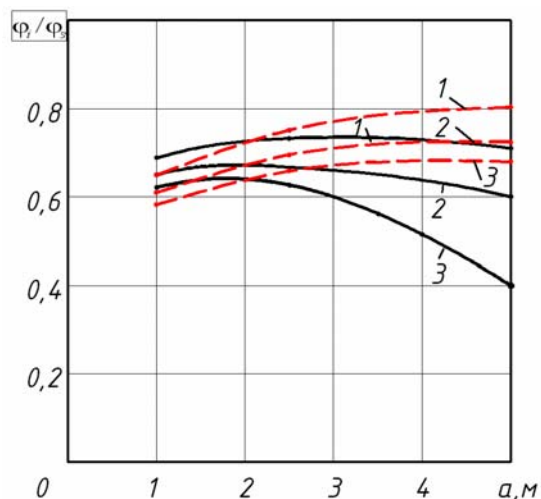


Рис. 7. График зависимости относительного потенциала от размера стороны квадрата $a=5$ м:
1 - $(\rho_1/\rho_2)=0,2$; 2 - $(\rho_1/\rho_2)=1$; 3 - $(\rho_1/\rho_2)=10$;
над электродом (пунктирная линия);
над центром квадрата (сплошная линия)

Исследования выполнены для того же диапазона изменений удельного электрического сопротивления грунта первого слоя $\rho_1=20\dots 1000$ Ом·м и второго $\rho_2=100$ Ом·м. Из рис. 7 также следует, что кривая зависимости $\varphi/\varphi_3=f(a)$ для точки на поверхности земли над центром квадратного заземлителя с ростом a вначале возрастает до некоторого максимального значения относительного потенциала φ/φ_3 , а затем начинает спадать, причем скорость спада возрастает с ростом отношения ρ_1/ρ_2 . Аналогичная кривая зависимости $\varphi/\varphi_3=f(a)$ для точки на поверхности земли над электродом с увеличением размера стороны a вначале возрастает быстрее, а затем этот рост замедляется. Характерным является то, что кривые зависимости $\varphi/\varphi_3=f(a)$ для точки над электродом в начальной части кривой, т.е. при малых a , расположены ниже, чем для точки над центром квадратного заземлителя, а при

значениях $a>2$ м эти кривые располагаются выше. В связи с этим, кривые зависимости $\varphi/\varphi_3=f(a)$ пересекаются в точке, которая определяет допустимый максимальный размер a стороны квадратного заземлителя, расположенного на рассматриваемой глубине $t=0,5$ м. При этом, величина относительного потенциала φ/φ_3 над электродом и над центром квадратного заземлителя равны, т.е. на поверхности земли над заземлителем в пределах его границ оказывается практически полное выравнивание относительного потенциала. Результаты исследования показывают, что неравномерность в распределении электрических потенциалов по поверхности земли для квадратного заземлителя со стороной $a=5$ м не превышает 30-35 % при удельном электрическом сопротивлении грунта $\rho_1=1000$ Ом·м и снижается с его уменьшением. В то же время, при максимальном допустимом размере ($a=2$ м) стороны квадратного заземлителя эта неравномерность на порядок ниже и не превышает 2-3 %, являясь наименьшей.

Установлено также, что неоднородность грунта не влияет на соотношение между максимально допустимым размером стороны квадратного заземлителя a и глубиной его заложения t .

Кроме того, был исследован квадратный заземлитель в виде двухуровневой конструкции, т.е. на нижнем уровне (глубина заложения $t=0,7$ м) расположен квадратный заземлитель аналогичный приведенному выше, а на верхнем уровне (глубина заложения $t=0,35$ м) соосно располагался квадратный заземлитель таких же геометрических размеров. Параметры грунта и условия эксперимента аналогичны рассмотренным выше. Результаты исследования в виде графиков зависимости $\varphi/\varphi_3=f(x)$ показаны на рис. 1-3. Отличие полученных результатов состоит в том, что кривые зависимости $\varphi/\varphi_3=f(x)$ располагаются во всех случаях выше, чем в случае одноуровневого квадратного заземлителя. Следовательно, в этом случае напряжение прикосновения будет меньше, т.е. характеристики электробезопасности заземлителя улучшаются.

Теперь рассмотрим сложный заземлитель в виде сетки, состоящей из нескольких одинаковых ячеек, например, 4-х ячеек размером 5×5 м. Для угловой ячейки такого заземлителя на рис. 8 показано изменение относительного потенциала φ/φ_3 в зависимости от относительной глубины t/a заложения сетки.

Аналогичные зависимости приведены на рис. 9 для сетки с ячейками $2,5\times 2,5$ м, а на рис. 10 для сетки с ячейками 1×1 м, при этом площадь, занимаемая заземляющей сеткой, во всех случаях одинаковая.

Кроме того, полученные зависимости $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$ качественно аналогичны приведенным выше для квадратного заземлителя. Зависимость $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$ для точки на поверхности земли над электродом угловой ячейки заземлителя располагается выше, чем над центром угловой ячейки. При больших значениях t/a эти зависимости практически совпадают, а при уменьшении они медленно расходятся вплоть до значения $t/a=0,2$, после чего расхождение существенно возрастает и тем больше, чем больше размер ячейки.

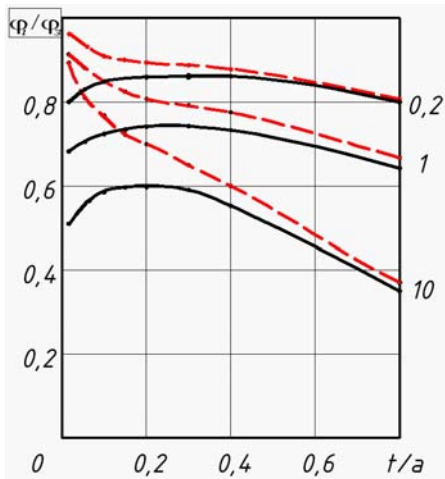


Рис. 8. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения заземлителя в виде сетки с размером стороны ячеек $a=5$ м: над внутренним электродом угловой ячейки (пунктирная линия); над центром угловой ячейки (сплошная линия)

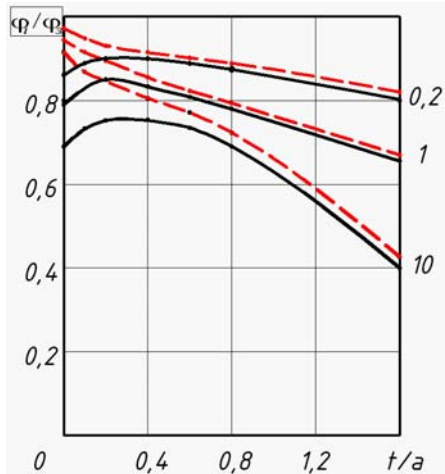


Рис. 9. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения заземляющей сетки с размером стороны ячеек $a=2,5$ м: над внутренним электродом угловой ячейки (пунктирная линия); над центром угловой ячейки (сплошная линия)

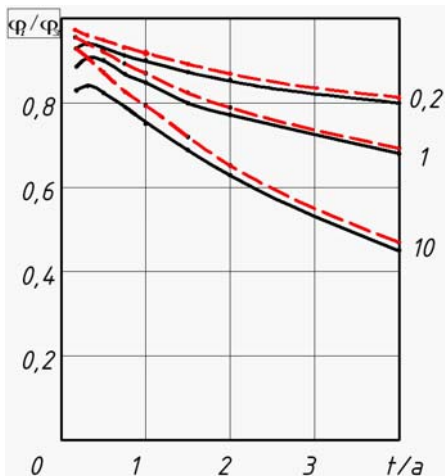


Рис. 10. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения заземляющей сетки с размером стороны ячеек $a=1$ м: над внутренним электродом угловой ячейки (пунктирная линия); над центром угловой ячейки (сплошная линия)

Однако, при уменьшении отношения t/a до значения примерно равного 0,2, расхождение в относительных потенциалах во всех случаях не превышает 2-10 %, при этом больший процент относится к большим размерам ячейки и большим значениям удельного электрического сопротивления верхнего слоя грунта. В связи с этим максимально допустимый размер ячейки сетки можно определять по соотношению $a=t/0,2$. Результаты исследования позволили установить, что максимальный размер a ячейки сетки больше, чем для рассмотренного квадратного заземлителя при одинаковом выравнивании электрических потенциалов по поверхности земли, и может определяться как $a=t/0,2$. Таким образом, максимально допустимый размер ячейки сложного заземлителя зависит как от глубины заложения заземлителя, так и от числа ячеек при неизменной занимаемой им площади.

Представляет особый интерес исследование сложного двухуровневого заземлителя. На нижнем уровне, на глубине $t=0,7$ м, заложена сетка с такими же размерами и количеством ячеек, как и ранее рассмотренная. Аналогичная сетка заложена на верхнем уровне, на глубине $t=0,35$ м, при этом обе сетки электрически связаны между собой. Выполненные исследования распределения электрических потенциалов по поверхности земли для угловой ячейки позволяют отметить следующее.

На рис. 11 представлены зависимости относительного потенциала ϕ/ϕ_0 от размера a стороны ячейки сетки.

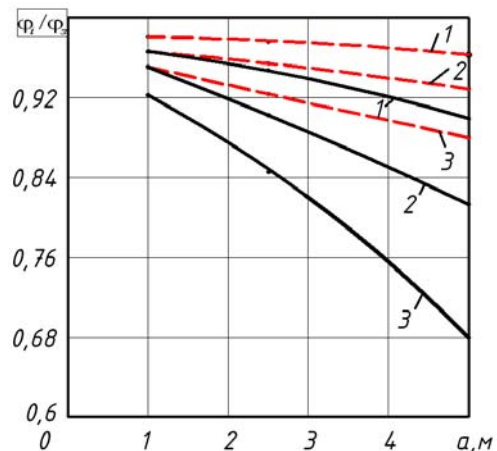


Рис. 11. График зависимости относительного потенциала от размера стороны ячейки для двухуровневой заземляющей сетки: 1 – $(\rho_1/\rho_2)=0,2$; 2 – $(\rho_1/\rho_2)=1$; 3 – $(\rho_1/\rho_2)=10$; над внутренним электродом угловой ячейки (пунктирная линия); над центром угловой ячейки (сплошная линия)

Приведенные зависимости показывают, что с уменьшением размера a ячейки относительный потенциал на поверхности земли возрастает как над электродом, так и в центре угловой ячейки. Кроме того, кривые зависимости сближаются, т.е. улучшается выравнивание электрических потенциалов на поверхности земли и улучшаются условия электробезопасности – уменьшается напряжение прикосновения.

Зависимости $\phi/\phi_0=f(a)$ для двухуровневого заземлителя (см. рис. 11) расположены выше, чем аналогичные зависимости для заземлителя только нижнего уровня.

Теперь допустим, что на заданной площади нам необходимо выполнить заземлитель с заданными линейными размерами на заданной глубине t и обеспечивающим заданную электробезопасность. В этом случае можно, используя полученные результаты, определить максимально допустимый размер ячейки заземляющей сетки, при котором неравномерность в распределении электрических потенциалов по поверхности земли будет наименьшей (или заданной) для данного типа заземлителя.

Таким образом, полученные результаты позволяют существенно оптимизировать расход металла и объем земляных работ при сооружении заземлителя, а также существенно повысить надежность выполнения требований электробезопасности.

ВЫВОДЫ

При малых глубинах заложения квадратного заземлителя распределение электрических потенциалов на поверхности земли над электродом заземлителя будет выше, чем над центром квадрата, а при больших глубинах наоборот.

При заданной глубине заложения квадратного заземлителя существует такой максимальный его размер, при котором распределение электрических потенциалов по поверхности земли над его центром, над электродом заземлителя и по всей поверхности в пределах квадрата будет близко к равномерному (расхождение менее 2-3 %).

Близкое к равномерному распределение электрических потенциалов по поверхности земли на территории сложного заземлителя можно достичь при большем максимальном размере его ячеек, чем для квадратного заземлителя в виде одной ячейки при одних и тех же условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок / Мин-во топлива и энергетики РФ – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Главгосэнергонадзор, 1999. – 608 с.
2. СТО 56947007-29.240.044-2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. – М.: ОАО "ФСК ЕЭС", 2010. – 147 с.
3. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
4. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 3-750 кВ переменного тока. – М.: Энергосетьпроект. №12740 тм. – т1. 1987.
5. Коструба С.И. Новый способ выравнивания электрических потенциалов в зоне заземления электроустановки // Электричество. – 1970. – №12. – С. 77-80.
6. Коструба С.И. К расчету заземлителей электроустановок с эффективно-заземленной нейтралью // Электрические станции. – 2004. – №6. – С. 55-60.
7. Нижевский В.И., Нижевский И.В. Исследование электрического поля в грунте в окрестностях кольцевого заземлителя // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №3/4(33). – С. 54-57.

REFERENCES: 1. *Pravila ustrojstva elektroustanovok* [Rules of the device electroinstallations]. Moscow, Glavgosenergonadzor Publ., 1999. 608 p. 2. *СТО 56947007-29.240.044-2010. Metodicheskie ukazaniya po obespecheniju elektromagnitnoj sovmestivosti na objektah elektrosетеvogo hozjajstva* [Methodical instructions on ensuring electromagnetic compatibility on objects of electronetwork economy]. Moscow, JSC FGC UES Publ., 2010. 147 p. 3. Bургsдорф V.V., Якобс A.I. *Zazemlyayushchie ustrojstva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. 4. *Rukovodjashhie ukazaniya po proektirovaniju zazemljajushhih ustrojstv elektricheskikh stancij i podstancij naprjazheniem 3-750 kV peremennogo toka* [Guidelines on design of grounding devices of power plants and substations of 3-750 kV of alternating current]. Moscow, Energoset-proyekt Publ., 1987, no.12740tm, vol.1. 5. Kostruba S.I. *Novyj sposob vyravnivaniya elektricheskikh potencialov v zone zazemlenija elektroustanovki* [A new way of alignment of electric potentials in a zone of grounding of electroinstallations]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1970, no.1, pp. 77-80. 6. Kostruba S.I. *K raschetu zazemlitlej elektroustanovok s effektivno-zazemlennoj nejtral'ju* [To calculation of grounding conductors of electroinstallations with effective the grounded neutral]. *Elektricheskije stantsii – Power Plants*, 2004, no.6, pp. 55-60. 7. Nizhevskiy V.I., Nizhevskiy I.V. *Issledovanie jelektricheskogo polja v grunte v okrestnostjakh kol'cevogo zazemlitelja* [Research of electric field in soil in vicinities of a ring grounding conductor]. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij – East European Journal of Enterprise Technologies*, 2008, no.3/4 (33), pp. 54-57.

Поступила (received) 12.04.2014

*Нижевский Илья Викторович¹, инженер,
Нижевский Виктор Ильич¹, доц., к.т.н.,
Шишигин Сергей Леонидович², проф., д.т.н.,*

*¹ Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076977, e-mail: nivich1@mail.ru,
² Вологодский государственный университет,
160000, Россия, Вологда, ул. Галкинская, 3,
тел/phone +7 8172 725093*

*I.V. Nizhevskiy¹, V.I. Nizhevskiy¹, S.L. Shishigin²
¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine
² Vologda State University
3, Galkinskaya Str., Vologda, 160000, Russia*

Research on electric potentials alignment on the ground surface within the grounding conductor territory.

Results of research on distribution of electric potentials on the earth surface in the territory with a grounding conductor are analyzed. It is shown that potential over the center of a square grounding conductor can be higher than that over the electrode. It is suggested to estimate the limit size of the cell of a complex net grounding conductor depending on the depth of its laying. It is found that a two-level design of the grounding conductor reduces touch voltage. Novelty of the results consists in application of a mathematical model to investigating electric characteristics of a two-level grounding conductor versus its laying depth. **Key words – research, grounding device, square grounding conductor, complex net grounding conductor, touch voltage, potential.**

ПРИЛОЖЕНИЕ
Фрагмент программы расчета заземлителя
в однородной и двухслойной земле

ORIGIN := 1

$$\text{ap}(p, q, dl) := \begin{cases} r1 \leftarrow q - p \\ r2 \leftarrow r1 + dl \\ R1 \leftarrow |r1| \\ R2 \leftarrow |r2| \\ DL \leftarrow |dl| \\ \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \text{if} \left(R2 > R1, \ln \left(\frac{R2 \cdot DL + r2 \cdot dl}{R1 \cdot DL + r1 \cdot dl} \right), \ln \left(\frac{R1 \cdot DL - r1 \cdot dl}{R2 \cdot DL - r2 \cdot dl} \right) \right) \end{cases}$$

$$\alpha(Q, L, q, dl) := \begin{cases} \text{ap}(Q + 0.5 \cdot L, q, dl) & \text{if } |Q + 0.5 \cdot L - (q + 0.5 \cdot dl)| > 2 \cdot |L| \\ 1.02 \cdot \int_{0.01}^{0.99} \text{ap}(Q + x \cdot L, q, dl) \, dx & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha0(Q, L, R, q, dl) := \begin{cases} \frac{\ln(|L| \div R) - 0.307}{2 \cdot \pi} & \text{if } R > 0 \\ \alpha(Q, L, q, dl) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha'(Q, L, q, dl) := \alpha(Q, L, q, dl) + \alpha \left[Q, L, \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ -q_3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} dl_1 \\ dl_2 \\ -dl_3 \end{pmatrix} \right]$$

$$\text{Limit}(\lambda, \delta) := \begin{cases} \text{return } 0 & \text{if } \lambda = 0 \\ \text{dim} \leftarrow 25 \\ \text{for } n \in 1.. \text{dim} \\ \text{return } n & \text{if } \left| 1 + \frac{\left(\sum_{k=1}^n \frac{\lambda^k}{k} \right) + \text{if} \left[\lambda < 0, \frac{\lambda^{n+1}}{2 \cdot (n+1)}, 0 \right]}{\ln(1 - \lambda)} \right| < \delta \\ \text{dim} \end{cases}$$

$$\text{oground}(x, y, q, dl, \rho1, \rho2, h, n, \tau) := \begin{cases} p \leftarrow (x \ y \ 0)^T \\ \sum_{j=1}^{\text{last}(q)} (\alpha_{ij}(p, 0, 0, q_j, dl_j, \rho1, \rho2, h, n) \cdot \tau_j) \end{cases}$$

$$\text{TauFi}(Q, L, R, I, \rho1, \rho2, h, n) := \begin{cases} t0 \leftarrow \text{time}(0) \\ \text{for } i \in 1.. \text{last}(Q) \\ \text{for } j \in 1.. \text{last}(Q) \\ \alpha_{i,j} \leftarrow \alpha_{ij}[Q_i, L_i, R_i (i=j), Q_j, L_j, \rho1, \rho2, h, n] \\ \tau \leftarrow \text{lsolve}(\alpha, \alpha^{(i)} \cdot 0 + 1) \\ \varphi \leftarrow \frac{1}{\tau \cdot |L|} \\ (\tau \cdot \varphi \ \text{time}(1) - t0) \end{cases}$$

$$\alpha11(Q, L, R, q, dl, q', dl', h2, \lambda, n) := \alpha0(Q, L, R, q, dl) + \alpha(Q, L, q', dl') \dots + \sum_{k=1}^n [\lambda^k \cdot (\alpha'(Q, L, q + k \cdot h2, dl) + \alpha'(Q, L, q' + k \cdot h2, dl'))]$$

Уточнение при $\lambda < 0$

$$\Delta\alpha11(Q, L, q, dl, q', dl', h2, \lambda, n1) := 0.5 \cdot \lambda^{n1} \cdot (\alpha'(Q, L, q + n1 \cdot h2, dl) + \alpha'(Q, L, q' + n1 \cdot h2, dl'))$$

$$\alpha22(Q, L, R, q, dl, q', dl', h2, \lambda, n) := \alpha0(Q, L, R, q, dl) - \lambda \cdot \alpha(Q, L, q' + h2, dl') \dots + (1 - \lambda^2) \cdot \sum_{k=0}^n (\lambda^k \cdot \alpha(Q, L, q' - k \cdot h2, dl'))$$

$$\alpha12(Q, L, q, dl, h2, \lambda, n) := (1 + \lambda) \cdot \sum_{k=0}^n (\lambda^k \cdot \alpha(Q, L, q + k \cdot h2, dl))$$

$$\alpha21(Q, L, q, dl, q', dl', h2, \lambda, n) := (1 - \lambda) \cdot \sum_{k=0}^n \left[\lambda^k \cdot \left(\alpha(Q, L, q - k \cdot h2, dl) \dots + \alpha(Q, L, q' - k \cdot h2, dl') \right) \right]$$

$$\text{UpDown}(S, h) := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{rows}(S) \\ \begin{cases} (A \ B \ R) \leftarrow (S_{i,1} \ S_{i,2} \ S_{i,3}) \\ \text{if } A_3 < h \wedge B_3 > h \\ \begin{cases} S_{i,2} \leftarrow A + \frac{h - A_3}{B_3 - A_3} \cdot (B - A) \\ S \leftarrow \text{stack}[S, (S_{i,2} \ B \ R)] \end{cases} \end{cases} \\ S \end{cases}$$

$$\text{Disc}(S, L1) := \begin{cases} k \leftarrow 1 \\ \text{for } i \in 1.. \text{rows}(S) \\ \begin{cases} (A \ L \ R) \leftarrow (S_{i,1} \ S_{i,2} - S_{i,1} \ S_{i,3}) \\ \text{continue if } |L| = 0 \\ m \leftarrow \text{ceil}(|L| \div L1) \\ \text{for } j \in 1.. m \\ (a_k \ dl_k \ r_k \ k) \leftarrow \left[\left(A + L \cdot \frac{j-1}{m} \right) \left(\frac{L}{m} \right) \ R \ (k+1) \right] \end{cases} \\ (a \ dl \ r) \end{cases}$$

$$\text{Grid}(t, R, Lx, nx, Ly, ny) := \begin{cases} S \leftarrow (0 \ 0 \ 0) \\ \text{for } i \in 0.. nx \\ \text{for } j \in 0.. ny - 1 \\ S \leftarrow \text{stack} \left[S, \begin{bmatrix} i \cdot (Lx + nx) \\ j \cdot (Ly + ny) \\ t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \cdot (Lx + nx) \\ (j+1) \cdot (Ly + ny) \\ t \end{bmatrix} \ R \right] \\ \text{for } j \in 0.. ny \\ \text{for } i \in 0.. nx - 1 \\ S \leftarrow \text{stack} \left[S, \begin{bmatrix} i \cdot (Lx + nx) \\ j \cdot (Ly + ny) \\ t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (i+1) \cdot (Lx + nx) \\ j \cdot (Ly + ny) \\ t \end{bmatrix} \ R \right] \\ \text{submatrix}(S, 2, \text{rows}(S), 1, \text{cols}(S)) \end{cases}$$

$$\text{Vert}(t, R, Lx, nx, Ly, ny, Lz) := \begin{cases} S \leftarrow (0 \ 0 \ 0) \\ \text{for } j \in 0.. 1 \\ \text{for } i \in 0.. nx \\ S \leftarrow \text{stack} \left[S, \begin{bmatrix} i \cdot (Lx + nx) \\ j \cdot Ly \\ t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \cdot (Lx + nx) \\ j \cdot Ly \\ t + Lz \end{bmatrix} \ R \right] \\ \text{for } i \in 0.. 1 \\ \text{for } j \in 1.. ny - 1 \\ S \leftarrow \text{stack} \left[S, \begin{bmatrix} i \cdot Lx \\ j \cdot (Ly + ny) \\ t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \cdot Lx \\ j \cdot (Ly + ny) \\ t + Lz \end{bmatrix} \ R \right] \\ \text{submatrix}(S, 2, \text{rows}(S), 1, \text{cols}(S)) \end{cases} \quad \text{if } ny > 1$$

$$\text{Graph2d}(Q, L) := \begin{cases} (xv_1 \ yv_1 \ m) \leftarrow (j \ j \ 1) \\ \text{for } i \in 1.. \text{last}(Q) \\ \begin{cases} \begin{bmatrix} x_{1,i} \ y_{1,i} \\ x_{2,i} \ y_{2,i} \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} (Q_i)_1 & (Q_i)_2 \\ (Q_i + L_i)_1 & (Q_i + L_i)_2 \end{bmatrix} \\ (xv_m \ yv_m \ m) \leftarrow [(Q_i)_1 \ (Q_i)_2 \ m + 1] \text{ if } |(L_i)_3| \neq 0 \end{cases} \\ (x \ y \ xv \ yv \ \min(\text{Re}(x)) - 1 \ \min(\text{Re}(y)) - 1 \ \max(\text{Re}(x)) + 1 \ \max(\text{Re}(y)) + 1) \end{cases}$$

$$\text{Graph2d}(A, L) := \begin{cases} B \leftarrow A + L \\ x_1 \leftarrow (A_1)_1 \\ y_1 \leftarrow (A_1)_2 \\ m \leftarrow 1 \\ \text{for } i \in 1.. \text{last}(A) \\ \text{if } (A_i)_1 \neq x_m \wedge (A_i)_2 \neq y_m \\ \begin{cases} x_{m+1} \leftarrow j \\ m \leftarrow m + 1 \\ x_{m+1} \leftarrow (A_i)_1 \\ y_{m+1} \leftarrow (A_i)_2 \\ m \leftarrow m + 1 \end{cases} \\ x_{m+1} \leftarrow (B_i)_1 \\ y_{m+1} \leftarrow (B_i)_2 \\ m \leftarrow m + 1 \\ m \leftarrow 0 \\ xv \leftarrow j \\ \text{for } i \in 1.. \text{last}(A) \\ \text{if } |(A_i)_3 - (B_i)_3| \neq 0 \\ \begin{cases} m \leftarrow m + 1 \\ xv_m \leftarrow (A_i)_1 \\ yv_m \leftarrow (A_i)_2 \end{cases} \\ (x \ y \ xv \ yv \ \min(\text{Re}(x)) - 1 \ \min(\text{Re}(y)) - 1 \ \max(\text{Re}(x)) + 1 \ \max(\text{Re}(y)) + 1) \end{cases}$$