

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УВЛАЖНЕНИЯ, ПРОСЫХАНИЯ ИЛИ ПРОМЕРЗАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЗЕМЛИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

*Наведений аналіз показав, що після обстеження заземлюючих пристроїв тривало експлуатованих підстанцій доцільно проводити не реконструкцію, а модернізацію їх заземлювачів шляхом створення дворівневої конструкції. Це дозволяє отримати як технічний, так і економічний ефект. Новизна результатів полягає в тому, що з використанням математичної моделі досліджено електричні характеристики заземлювача у вигляді дворівневої конструкції залежно від глибини просихання або промерзання верхнього шару землі.*

*Приведенный анализ показал, что после обследования заземляющих устройств длительно эксплуатируемых подстанций целесообразно проводить не реконструкцию, а модернизацию их заземлителей путем создания двухуровневой конструкции. Это позволяет получить как технический, так и экономический эффект. Новизна результатов состоит в том, что с использованием математической модели исследованы электрические характеристики заземлителя в виде двухуровневой конструкции в зависимости от глубины просыхания или промерзания верхнего слоя земли.*

Обследования заземляющих устройств (ЗУ) на существующих длительное время в эксплуатации подстанциях (ПС) по известной методике [1, 2] выявили серьезную проблему. Они показали, что ЗУ в ряде случаев сильно корродировали, морально устарели, имеют вышедшие за пределы допустимых электрические характеристики. Именно поэтому данная проблема требует наискорейшего и эффективного ее решения. После обследования специализированной организацией и анализа полученных результатов выдаются обстоятельно обоснованные рекомендации по реконструкции ЗУ [3], которую выполняют либо специализированные организации, либо предприятия самостоятельно.

После реконструкции ЗУ обязательно проводится неразрушающий контроль электрических характеристик ЗУ [1, 4]. Проводимые реконструкции ЗУ ПС решают эту проблему, но, к сожалению не коренным образом, так как выполняется, в случае необходимости, замена разрушенных (на данный момент контроля) электродов в отдельных местах ЗУ, или дополнительная прокладка в случае их отсутствия. Однако коррозия электродов происходит постоянно, поэтому после реконструкции ЗУ в других местах старой части ЗУ будут выходить из строя электроды, что вновь повлечет за собой уход электрических параметров ЗУ за пределы допустимых значительно раньше, чем будет выполняться очередной их контроль (1 раз в 12 лет [1]).

Учитывая, что на подстанциях при реконструкции устанавливаются наряду с отечественными и зарубежные устройства и оборудование, в особенности устройства релейной защиты и автоматики на основе микропроцессорной техники, проведение реконструкции очевидно недостаточно. Это связано с тем, что микропроцессорная техника намного меньше защищена от влияния электромагнитных помех, чем релейно-контакторная. Одной из главных причин возникновения электромагнитных помех является ЗУ даже после его реконструкции, так как его электрические характеристики будут постепенно ухудшаться в связи с постоянной коррозией. Кроме того, электрические характеристики ЗУ зависят также от электрофизического состояния верхнего слоя земли в течение года: увлажнения, просыхания, промерзания.

Кардинальное решение существующей проблемы было предложено в работе [5] и подтверждено патентом [6]. Критика такого решения на конференциях и симпозиумах сводилась к следующему:

- размещение сетки верхнего уровня двухуровневого ЗУ на глубине 0,3-0,35 м может привести к повышенной коррозии электродов;
- электрические характеристики двухуровневого ЗУ подвергаются более сильному влиянию электрофизических параметров верхнего слоя земли, в особенности при просыхании и промерзании;
- будет ли обеспечена техническая и экономическая эффективность двухуровневого ЗУ при модернизации.

В отношении первой позиции критики можно отметить следующее. Во-первых, ПУЭ [7] рекомендуют укладку сетки ЗУ на глубину не менее 0,3 м в случае выполнения ЗУ по нормам на напряжение прикосновения. Кроме того, согласно ПУЭ (п. 1.7.107) необходимо прокладывать заземляющие проводники, которые присоединяют оборудование или конструкции к заземлителю, в земле на глубине, не менее 0,3 м. Во-вторых, в случае повышенной коррозии можно применять оцинкованные электроды. Можно также применять медные электроды, как за рубежом, но в условиях Украины в настоящее время это практически невозможно.

В отношении второй позиции ниже приводятся результаты исследования и обоснования преимущества двухуровневого ЗУ при модернизации [8] по сравнению с существующими ЗУ в случае реконструкции [3].

В отношении третьей позиции авторами установлено, что техническая и экономическая эффективности обеспечиваются улучшением электрических характеристик ЗУ и их контроля в первом случае и уменьшением объема земляных работ и расходом металла во втором.

В качестве объекта исследования принята конструкция ЗУ средних размеров как в виде двухуровневой сетки, так и в виде одноуровневой, а также и в их сочетании с вертикальными электродами по контуру, как показано на рис. 1.

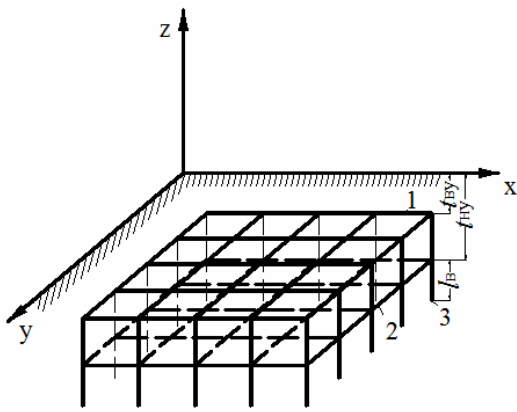


Рис. 1. Конструкция двухуровневого ЗУ:  
 1 – сетка верхнего уровня на глубине  $t_{вн}=0,35$  м;  
 2 – сетка нижнего уровня на глубине  $t_{ни}=0,7$  м;  
 3 – вертикальный электрод

С целью упрощения принята однородная структура земли с удельным сопротивлением  $\rho_2=100$  Ом·м. Удельное сопротивление  $\rho_1$  верхнего слоя земли толщиной  $h$  принималось подвергнутым увлажнению ( $\rho_1=20$  Ом·м), просыханию ( $\rho_1=500$  Ом·м) или промерзанию ( $\rho_1=1000$  Ом·м), причем толщина  $h$  слоя земли варьировалась от 0 до 2 м. Размер ячеек сетки ЗУ принят равным  $10 \times 10$  м<sup>2</sup>, диаметр электродов  $d=0,02$  м, длина вертикальных электродов  $l_{в}=4$  м, а их число 36 штук с равномерным размещением по контуру ЗУ.

ЗУ представлено в виде математической модели, с помощью которой были выполнены исследования его электрических характеристик (сопротивления  $R_{з\gamma}$  и относительного потенциала  $\phi_i/\phi_3$  в расчетных точках на поверхности земли). Результаты исследований представлены в табл. 1-4 (см. приложение), которые позволяют отметить следующее.

Увеличение глубины увлажнения верхнего слоя земли от 0 до 2 м приводит к снижению величины сопротивления ЗУ в виде сетки нижнего уровня (существующий вариант) от 1,197 Ом до 0,766 Ом, т.е. на 36 %. Изменение относительного потенциала на поверхности земли от центра по диагонали до угла сетки уменьшается незначительно, а за пределами сетки снижается более резко. Это характерно для любой толщины увлажненного слоя земли, кроме того, увеличение толщины слоя увлажнения приводит к увеличению относительного потенциала на поверхности земли, т.е. к снижению напряжения прикосновения.

В случае двухуровневого ЗУ, т.е. при применении сетки и верхнего уровня, аналогичное уменьшение сопротивления (см. табл. 2) составляет от 1,134 Ом до 0,75 Ом, т.е. на 34 %. При этом сопротивление ЗУ, состоящего из одной сетки только нижнего уровня, составляет 1,197 Ом, а в случае сетки только верхнего уровня 1,231 Ом, а применение двухуровневой сетки дает 1,134 Ом.

Опыт проектирования показывает, что без применения вертикальных электродов по контуру ЗУ в большинстве случаев практически не обойтись. Исключения составляют случаи, когда в грунт невозможно вертикальные электроды ввинтить или забить.

Исследования также показали, что и в этом случае (см. табл. 1) аналогичное увеличение глубины увлажнения верхнего слоя земли от 0 до 2 м приводит к снижению величины сопротивления ЗУ в виде сетки нижнего уровня с вертикальными электродами (существующий вариант ЗУ) от 1,065 Ом до 0,743 Ом, т.е. на 30 %. Добавление к данной конструкции сетки верхнего уровня, т.е. двухуровневый вариант ЗУ (предлагаемый вариант), при аналогичном увлажнении приводит (см. табл. 2) к снижению величины сопротивления ЗУ от 1,05 Ом до 0,735 Ом, т.е. на 30 %.

Изменение относительного потенциала на поверхности земли в тех же точках и в этом случае имеет качественно аналогичный характер. Следует также отметить, что применение сетки верхнего уровня (двухуровневая конструкция ЗУ) приводит к увеличению относительного потенциала на поверхности земли в среднем на 3-5 %.

Допустим, рассмотрение исходного ЗУ в виде сетки, которая расположена на глубине нижнего уровня, после обследования показало, что коррозия разрушила половину ЗУ. В этом случае сопротивление ЗУ и изменения относительного потенциала  $\phi_i/\phi_3$  в расчетных точках на поверхности земли приведены в табл. 3. Точки расчета относительного потенциала на поверхности земли показаны на рис. 2.

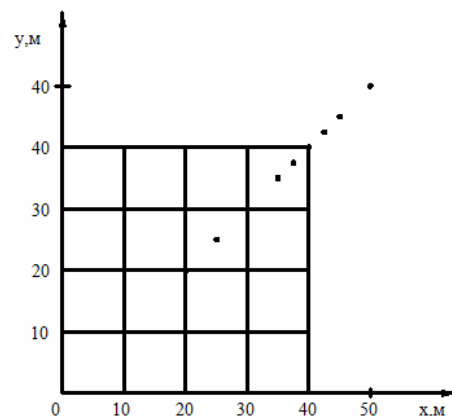


Рис. 2. Точки расчета относительного потенциала  $\phi_i/\phi_3$

Рассмотрим типичный существующий случай, когда после обследования и разработки рекомендаций выполнена реконструкция ЗУ, т.е. вместо разрушенной коррозией части ЗУ восстановлена вторая половина ЗУ. В этом случае электрические характеристики ЗУ в виде сетки нижнего уровня (существующее ЗУ) восстановятся (см. табл. 1). После реконструкции ЗУ обязательно проводится контроль его электрических характеристик. Но далее коррозия будет продолжать разрушать электроды оставшейся старой части ЗУ существенно быстрее, чем восстановленной при реконструкции части ЗУ. Следовательно, отдельные электроды старой части ЗУ после реконструкции будут продолжать выходить из строя, а электрические характеристики ЗУ будут выходить за пределы допустимых значений. Заметим, однако, что после реконструкции очередной контроль ЗУ будет проводиться, согласно [1], только через 12 лет, а электрические характеристики начнут уходить за пределы допустимых вскоре после реконструкции, т.е. вполне очевидно,

что в этом случае появляется большой риск возникновения аварии.

Теперь рассмотрим не реконструкцию, а модернизацию ЗУ, т. е. применим сетку верхнего уровня на глубине  $t_{\text{вн}}=0,35$  м над сеткой существующей (исходной до модернизации). В этом случае получим двухуровневую конструкцию ЗУ для случая, когда (см. рис. 3) сетка нижнего уровня разрушена коррозией до половины. На рис. 4 приведены зависимости изменения относительного потенциала  $\varphi_i/\varphi_3$  на поверхности земли в направлении от центра сетки по диагонали в расчетных точках (рис. 2) для трех случаев: 1 – перед реконструкцией; 2 – после реконструкции; 3 – после модернизации.

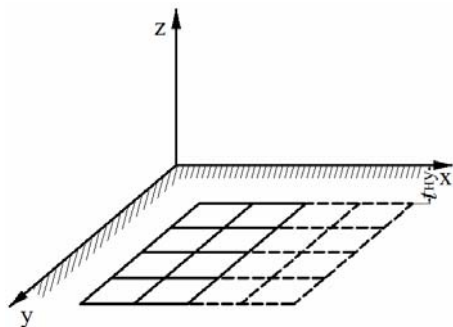


Рис. 3. Существующая перед реконструкцией сетка ЗУ на глубине  $t_{\text{вн}}$  в результате коррозии

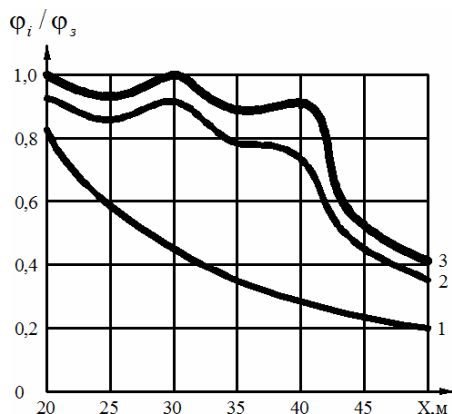


Рис. 4. Изменение относительного потенциала  $\varphi_i/\varphi_3$  на поверхности земли различных вариантов ЗУ в виде сетки при толщине слоя увлажнения  $h=0,4$  м

Анализ полученных результатов исследования (см. рис. 4) показал, что вышедшие за пределы допустимого электрические характеристики ЗУ до реконструкции (кривая 1) находятся значительно ниже, чем в исходном состоянии ЗУ или после его реконструкции (кривая 2). В случае модернизации ЗУ (кривая 3) электрические характеристики ЗУ не просто восстанавливаются, а становятся даже лучше, так как кривая 3 располагается выше, чем при реконструкции. Это наглядно свидетельствует о большей технической эффективности двухуровневого ЗУ, а, следовательно, подтверждает необходимость проведения модернизации ЗУ вместо осуществляемой в настоящее время реконструкции.

На рис. 5 показано изменение относительного потенциала  $\varphi_i/\varphi_3$  в центре угловой ячейки ( $x=y=35$  м) в зависимости от толщины  $h$  верхнего слоя грунта. В данном случае кривые 1а и 2а соответствуют увлаж-

нению грунта, а кривые 1б и 2б соответствуют просыханию или промерзанию грунта. При этом кривые 1 соответствуют случаю модернизации ЗУ, а кривые 2 соответствуют ЗУ после обследования. Приведенные результаты показывают, что увлажнение верхнего слоя грунта приводит к снижению напряжения прикосновения с увеличением толщины слоя до глубины равной глубине укладки  $h=t_{\text{вн}}$  сетки верхнего уровня двухуровневого ЗУ, или  $h=t_{\text{нн}}$  в случае ЗУ перед модернизацией. Дальнейшее увеличение толщины слоя в обоих случаях приводит к незначительному снижению напряжения прикосновения. В случае просыхания (промерзания) верхнего слоя грунта напряжение прикосновения увеличивается с ростом толщины  $h$  слоя. При превышении толщины слоя грунта сверх глубины укладки сетки, увеличение напряжения прикосновения существенно замедляется.

Кроме того, следует отметить, что с течением времени после модернизации старая часть ЗУ будет продолжать разрушаться коррозией. Однако даже при полном её разрушении, электрические характеристики ЗУ приобретут значения, которые будут соответствовать приведенным в табл. 4 значениям, т. е. для случая сетки верхнего уровня.

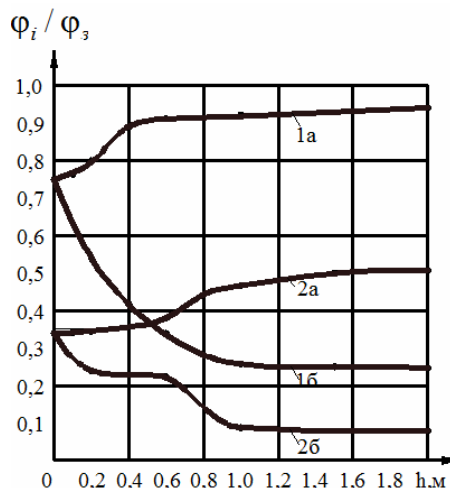


Рис. 5. Изменение относительного потенциала  $\varphi_i/\varphi_3$  в центре угловой ячейки ЗУ в зависимости от толщины  $h$  верхнего слоя земли

## ВЫВОДЫ

1. Представленные в статье результаты исследования и их анализ убедительно показывают, что необходимо проводить не реконструкцию, а модернизацию ЗУ подстанций, чтобы предотвратить возникновение в будущем неизбежных серьезных аварий в электрических высоковольтных сетях по причине неисправного ЗУ.

2. Новизна результатов состоит в том, что с использованием математической модели исследованы электрические характеристики заземлителя в виде двухуровневой конструкции в зависимости от глубины просыхания или промерзания верхнего слоя земли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525-00. М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 2000. – 82 с.

2. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И., Васьковский А.П., Чевычелов В.А., Колиушко Д.Г. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 4. – С. 29-32.

3. Колиушко Г.М., Носулько В.Д., Воронина З.А., Колиушко Д.Г. Опыт обследования заземляющих устройств подстанций напряжением 150 кВ Запорожских Восточных электрических сетей // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 7. – С. 24-26.

4. Борисов Р.К., Колечицкий Е.С., Горшков А.В., Балашов В.В. Методика и технические средства для диагностики состояния заземляющих устройств энергообъектов // Электричество. – 1996. – № 1. – С. 65-67.

5. Гуль В.И., Нижевский В.И., Нижевский И.В. Электрические характеристики двухуровневого эквипотенциального заземлителя из одиночных горизонтальных электродов // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 5. – С. 33-35.

6. Пат. 18292, Україна, МПК H02B 1/00. Пристрій заземлення / В.І. Ніжевський, І.В. Ніжевський, В.І. Гуль – № u200603019. Заявлено 21.03.2006. Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. – 3 с.

7. Правила улаштування електроустановок. Глава 1.7 (ПУЕ). – К.: ТОВ "ТКО", 2011. – 71 с.

8. Нижевский И.В. Восстановление нормируемых параметров заземляющих устройств на действующих подстанциях // Вісник НТУ "ХПИ". – 2010. – № 16. – С. 83-88.

**Bibliography (transliterated):** 1. Metodicheskie ukazaniya po kontrolju sostojanija zazemljajushhijh ustrojstv jelektroustanovok. RD 153-34.0-20.525-00. M.: Sluzhba peredovogo opyta ORGRES, 2000, 82 p. 2. Borisov R.K., Koliushko G.M., Grimud G.I., Vas'kovskij A.P., Chevychelov V.A., Koliushko D.G. Metodika issledovanija zazemljajushhijh ustrojstv ob'ektov jelektrojenergetiki. Jenergetika i jelektifikacija, 2000, no.4, pp. 29-32. 3. Koliushko G.M., Nosul'ko V.D., Voronina Z.A., Koliushko D.G. Opyt obsledovanija zazemljajushhijh ustrojstv podstancij naprjazheniem 150 kV Zaporozhskih Vostochnyh jelektricheskijh setej. Jenergetika i jelektifikacija, 2000, no.7, pp. 24-26.

4. Borisov R.K., Kolechickij E.S., Gorshkov A.V., Balashov V.V. Metodika i tehniczeskie sredstva dlja diagnostiki sostojanija zazemljajushhijh ustrojstv jenergoob'ektov. Elektrichestvo, 1996, no.1, pp. 65-67. 5. Gul' V.I., Nizhevskij V.I., Nizhevskij I.V. Electric descriptions of two-tier equipotential grounder made from single horizontal electrodes. Electrical engineering & electromechanics, 2006, no.5, pp. 33-35. 6. Nizhevskij V.I., Nizhevskij I.V., Gul' V.I. Prystriy zazemlennya. Patent UA, no.18292, 2006. 7. Pravyla ulashtuvannya jelektroustanovok. Part 1.7. Kyiv, TOV "TKO" Publ., 2011. 71 p. 8. Nizhevskij I.V. Vosstanovlenie normiruemyh parametrov zazemljajushhijh ustrojstv na dejstvujushhijh podstancijah. Bulletin of NTU "KhPI", 2010, no.16, pp. 83-88.

Поступила (received) 12.09.2013

Нижевский Илья Викторович<sup>1</sup>, инженер,  
Нижевский Виктор Ильич<sup>1</sup>, доц., к.т.н.,  
<sup>1</sup> Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
кафедра "Передача электрической энергии",  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076977, e-mail: nivich1@mail.ru

I.V. Nizhevskiy<sup>1</sup>, V.I. Nizhevskiy<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

**Research into action of surface soil moistening, drying or freezing on electrical characteristics of grounding device.**

The analysis made has shown expediency of modernization rather than reconstruction of earth electrodes, after inspection of long operating substations grounding grids, via building a two-level structure. It will result in both technical and economic effects. The novelty of the results consists in studying, by means of a mathematical model, electrical characteristics of a two-level earth electrode versus the depth of surface soil drying or freezing.

**Key words – substations, grounding devices, reconstruction, modernization, two-level structure.**

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Электрические характеристики ЗУ в виде сетки на глубине  $t_{\text{нв}}=0,7$  м

$\rho_1$ , Ом·м	$h$ , м	$R_{3y}$ , Ом	Величина относительного потенциала $\varphi_1/\varphi_2$ в расчетной точке $x=y$ , м								
			20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	50
20	0,2	1,132	0,933	0,849	0,92	0,774	0,767	0,742	0,537	0,448	0,35
		1,014	0,942	0,871	0,936	0,839	0,842	0,816	0,612	0,509	0,395
	0,4	1,092	0,932	0,862	0,918	0,787	0,773	0,74	0,551	0,462	0,362
		0,984	0,941	0,882	0,934	0,847	0,843	0,81	0,621	0,52	0,405
	0,6	1,039	0,944	0,881	0,931	0,81	0,794	0,759	0,573	0,484	0,38
		0,949	0,95	0,898	0,944	0,862	0,855	0,82	0,635	0,535	0,419
0,8	0,899	0,992	0,948	0,99	0,912	0,913	0,886	0,666	0,56	0,439	
	0,866	0,992	0,952	0,991	0,929	0,932	0,906	0,693	0,584	0,457	
1,0	0,866	0,992	0,956	0,991	0,922	0,921	0,89	0,681	0,576	0,453	
	0,838	0,993	0,959	0,992	0,937	0,938	0,911	0,706	0,597	0,47	
2,0	0,766	0,992	0,966	0,989	0,928	0,917	0,887	0,708	0,614	0,495	
	0,743	0,992	0,968	0,991	0,944	0,938	0,914	0,735	0,637	0,512	
100	0	1,197	0,955	0,836	0,947	0,761	0,763	0,778	0,525	0,436	0,34
		1,065	0,962	0,862	0,958	0,833	0,846	0,855	0,606	0,5	0,387
1000	0,2	1,189	0,731	0,602	0,732	0,549	0,561	0,617	0,375	0,309	0,24
		1,054	0,73	0,621	0,732	0,606	0,628	0,677	0,439	0,357	0,274
	0,4	1,212	0,755	0,608	0,759	0,556	0,572	0,64	0,375	0,306	0,236
		1,068	0,752	0,628	0,756	0,618	0,647	0,706	0,444	0,357	0,272
	0,6	1,255	0,767	0,608	0,771	0,553	0,569	0,638	0,368	0,298	0,23
		1,09	0,763	0,631	0,769	0,624	0,654	0,715	0,446	0,355	0,269
0,8	2,121	0,623	0,366	0,607	0,307	0,307	0,401	0,201	0,167	0,132	
	1,178	0,717	0,531	0,724	0,571	0,61	0,685	0,423	0,334	0,251	
1,0	2,561	0,658	0,312	0,646	0,261	0,270	0,421	0,169	0,139	0,109	
	1,242	0,749	0,503	0,759	0,557	0,603	0,702	0,413	0,324	0,241	
2,0	1,44	0,83	0,49	0,837	0,55	0,629	0,74	0,397	0,3	0,218	

Примечание: при каждом  $h$  первая строка – ЗУ в виде сетки, а вторая – сетка с вертикальными электродами по периметру.

Таблица 2

Электрические характеристики ЗУ в виде двухуровневой конструкции

$\rho_1$ , Ом·м	$h$ , м	$R_{3y}$ , Ом	Величина относительного потенциала $\phi_1/\phi_3$ в расчетной точке $x=y$ , м								
			20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	50
20	0,2	1,056	0,981	0,892	0,977	0,834	0,84	0,845	0,584	0,484	0,377
		0,989	0,982	0,902	0,98	0,871	0,882	0,885	0,632	0,523	0,405
	0,4	0,964	1	0,933	1	0,894	0,907	0,917	0,639	0,53	0,412
		0,926	1	0,938	1	0,914	0,928	0,937	0,67	0,556	0,431
	0,6	0,923	1	0,946	1	0,912	0,921	0,92	0,661	0,551	0,43
		0,892	1	0,949	1	0,928	0,938	0,941	0,688	0,574	0,447
0,8	0,879	1	0,959	1	0,932	0,941	0,933	0,686	0,576	0,45	
	0,856	1	0,961	1	0,943	0,953	0,948	0,707	0,593	0,463	
1,0	0,849	1	0,964	1	0,94	0,947	0,935	0,7	0,59	0,464	
	0,83	1	0,966	1	0,95	0,957	0,949	0,718	0,606	0,475	
2,0	0,75	1	0,974	1	0,947	0,943	0,935	0,728	0,63	0,507	
	0,735	1	0,975	1	0,956	0,954	0,954	0,746	0,645	0,518	
100	0	1,134	1	0,871	1	0,806	0,818	0,877	0,56	0,463	0,36
		1,05	1	0,885	1	0,852	0,87	0,925	0,617	0,507	0,392
1000	0,2	1,132	0,767	0,624	0,776	0,577	0,595	0,704	0,397	0,325	0,253
		1,042	0,763	0,635	0,769	0,616	0,642	0,746	0,444	0,36	0,277
	0,4	1,122	0,892	0,65	0,894	0,591	0,608	0,735	0,401	0,328	0,255
		1,018	0,889	0,665	0,89	0,644	0,672	0,803	0,461	0,371	0,284
	0,6	1,192	0,94	0,633	0,942	0,575	0,593	0,761	0,384	0,312	0,241
		1,062	0,937	0,652	0,939	0,637	0,668	0,83	0,453	0,361	0,274
0,8	1,731	0,942	0,445	0,938	0,377	0,384	0,663	0,248	0,205	0,162	
	1,147	0,954	0,567	0,954	0,587	0,627	0,828	0,429	0,339	0,256	
1,0	2,06	0,962	0,385	0,96	0,326	0,346	0,674	0,211	0,173	0,135	
	1,22	0,971	0,532	0,971	0,568	0,618	0,834	0,415	0,326	0,243	
2,0	2,844	0,994	0,351	0,994	0,304	0,396	0,722	0,18	0,131	0,099	
	1,453	0,996	0,509	0,996	0,555	0,648	0,864	0,393	0,294	0,214	

Примечание: при каждом  $h$  первая строка – ЗУ в виде двух сеток, а вторая – две сетки с вертикальными электродами по периметру.

Таблица 3

Электрические характеристики ЗУ до и после модернизации

$\rho_1$ , Ом·м	$h$ , м	$R_{3y}$ , Ом	Величина относительного потенциала $\phi_1/\phi_3$ в расчетной точке $x=y$ , м								
			20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	50
20	0,2	1,091	0,976	0,865	0,954	0,782	0,78	0,792	0,545	0,456	0,358
		1,575	0,837	0,572	0,435	0,342	0,307	0,278	0,253	0,232	0,199
	0,4	0,971	1,001	0,928	1	0,883	0,893	0,908	0,629	0,523	0,407
		1,508	0,833	0,589	0,451	0,356	0,32	0,289	0,264	0,242	0,208
	0,6	0,927	1	0,943	0,999	0,905	0,912	0,913	0,654	0,547	0,427
		1,418	0,852	0,615	0,475	0,376	0,339	0,307	0,28	0,257	0,221
0,8	0,888	1	0,952	0,998	0,915	0,918	0,913	0,67	0,564	0,448	
	1,184	0,955	0,713	0,559	0,446	0,402	0,364	0,333	0,306	0,263	
1,0	0,859	1	0,957	0,998	0,92	0,919	0,912	0,68	0,576	0,454	
	1,532	0,957	0,729	0,577	0,463	0,417	0,379	0,347	0,319	0,274	
2,0	0,761	1	0,966	0,996	0,921	0,909	0,908	0,703	0,611	0,493	
	0,98	0,954	0,76	0,62	0,508	0,462	0,423	0,388	0,359	0,311	
100	0	1,176	0,997	0,84	0,982	0,75	0,751	0,825	0,519	0,433	0,34
		1,678	0,874	0,557	0,421	0,33	0,296	0,268	0,244	0,224	0,192
1000	0,2	1,178	0,77	0,598	0,774	0,531	0,539	0,667	0,364	0,302	0,237
		1,674	0,694	0,397	0,297	0,232	0,208	0,188	0,172	0,157	0,135
	0,4	1,3	0,894	0,547	0,765	0,41	0,395	0,525	0,284	0,245	0,199
		1,714	0,724	0,397	0,293	0,228	0,204	0,185	0,168	0,154	0,132
	0,6	1,448	0,939	0,498	0,833	0,354	0,34	0,562	0,245	0,213	0,174
		1,79	0,73	0,39	0,285	0,221	0,197	0,178	0,162	0,148	0,127
0,8	2,069	0,921	0,358	0,855	0,274	0,275	0,566	0,185	0,157	0,127	
	3,484	0,483	0,192	0,141	0,11	0,099	0,089	0,082	0,075	0,064	
1,0	2,394	0,944	0,321	0,876	0,25	0,263	0,581	0,166	0,138	0,111	
	4,273	0,522	0,16	0,115	0,09	0,08	0,073	0,066	0,061	0,052	
2,0	3,188	0,981	0,304	0,922	0,246	0,315	0,631	0,148	0,11	0,085	
	5,769	0,641	0,14	0,091	0,068	0,06	0,054	0,049	0,045	0,039	

Примечание: при каждом  $h$  первая строка – ЗУ в виде двух сеток, а вторая – только сетка нижнего уровня (в обоих случаях половина сетки нижнего уровня полностью изъедена коррозией).

Таблица 4

Электрические характеристики модернизированного ЗУ после полного исчезновения сетки нижнего уровня (исходной)

$\rho_1$ , Ом·м	$h$ , м	$R_{3y}$ , Ом	Величина относительного потенциала $\varphi_i/\varphi_3$ в расчетной точке $x=y$ , м								
			20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	50
20	0,2	1,136	0,959	0,848	0,951	0,776	0,774	0,788	0,538	0,447	0,349
		1,01	0,964	0,872	0,961	0,845	0,853	0,861	0,618	0,512	0,397
	0,4	0,978	1	0,926	1	0,882	0,892	0,908	0,628	0,521	0,405
		0,925	1	0,933	1	0,91	0,922	0,932	0,669	0,556	0,431
	0,6	0,931	0,999	0,942	0,999	0,904	0,912	0,913	0,654	0,546	0,426
		0,89	0,999	0,947	0,999	0,926	0,935	0,938	0,687	0,574	0,447
0,8	0,897	0,998	0,949	0,998	0,914	0,917	0,912	0,668	0,562	0,44	
	0,862	0,999	0,953	0,998	0,933	0,938	0,939	0,699	0,588	0,46	
1,0	0,87	0,998	0,954	0,997	0,919	0,918	0,911	0,678	0,574	0,451	
	0,838	0,998	0,958	0,998	0,937	0,939	0,939	0,708	0,594	0,47	
2,0	0,774	0,997	0,962	0,996	0,92	0,908	0,907	0,7	0,607	0,49	
	0,743	0,997	0,966	0,997	0,941	0,935	0,943	0,735	0,636	0,512	
100	0	1,231	0,984	0,819	0,981	0,742	0,744	0,821	0,51	0,423	0,33
		1,073	0,987	0,851	0,985	0,826	0,842	0,905	0,604	0,497	0,384
1000	0,2	1,241	0,769	0,581	0,777	0,524	0,534	0,666	0,357	0,295	0,23
		1,068	0,762	0,607	0,767	0,596	0,619	0,733	0,434	0,353	0,271
	0,4	1,868	0,735	0,404	0,722	0,337	0,331	0,482	0,226	0,19	0,15
		1,104	0,8	0,555	0,802	0,579	0,61	0,753	0,432	0,347	0,264
	0,6	2,516	0,801	0,305	0,794	0,254	0,253	0,513	0,168	0,141	0,111
		1,192	0,855	0,502	0,86	0,553	0,593	0,785	0,415	0,329	0,248
0,8	2,821	0,847	0,278	0,843	0,232	0,237	0,546	0,151	0,125	0,099	
	1,237	0,89	0,488	0,895	0,547	0,595	0,806	0,411	0,322	0,241	
1,0	3,047	0,873	0,264	0,87	0,22	0,237	0,569	0,142	0,116	0,091	
	1,274	0,909	0,48	0,913	0,545	0,598	0,813	0,408	0,318	0,236	
2,0	3,768	0,922	0,27	0,92	0,231	0,302	0,625	0,136	0,099	0,075	
	1,459	0,943	0,479	0,946	0,547	0,631	0,838	0,397	0,298	0,216	

Примечание: при каждом  $h$  первая строка – ЗУ в виде сетки верхнего уровня, а вторая – сетка верхнего уровня с вертикальными электродами по периметру.