

*И.В. НИЖЕВСКИЙ*, инженер, НТУ "ХПИ", Харьков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОМЕРЗАНИЯ  
(ПРОСЫХАНИЯ) ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЗЕМЛИ НА  
СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА  
ПОДСТАНЦИИ**

За результатами дослідження ЗП підстанцій обґрунтовано ефективність застосування вертикальних електродів по його периметру. Показано, що застосування горизонтальних електродів складного ЗП повинно визначатись виходячи з умов електробезпеки. Підтверджено необхідність модернізації ЗУ підстанції замість існуючої реконструкції.

По результатам исследования ЗУ подстанций обоснована эффективность применения вертикальных электродов по его периметру. Показано, что применение горизонтальных электродов сложного ЗУ должно определяться исходя из условий электробезопасности. Подтверждена необходимость модернизации ЗУ подстанций вместо существующей реконструкции.

**Введение.** Общеизвестно, что подстанции всех классов напряжения имеют заземляющее устройство (ЗУ), которое в большинстве случаев представляет собой сложную конструкцию из горизонтальных и вертикальных электродов соединенных сваркой. Согласно ПУЭ [1] ЗУ должно обеспечивать в частности нормируемую величину сопротивления растеканию тока в земле в любое время года. Нормативными документами предусмотрено осуществлять периодическую проверку ЗУ путем измерения величины сопротивления растеканию с него тока в землю, а также выявления состояния и целостности электродов ЗУ. На протяжении ряда лет активно ведутся обследования ЗУ подстанций, на базе которых даются рекомендации по осуществлению их реконструкции [2-4]. Однако эффективность такой реконструкции, как показали исследования автора [5], достаточно низкая. Поэтому автором предложена модернизация ЗУ подстанций, которая заключается в применении двухуровневой конструкции заземлителя [6]. Это приводит не только к улучшению нормируемых параметров, но и к повышению надежности работы подстанций, а также улучшению условий электробезопасности и электромагнитной совместимости. При этом возникает вопрос: как повлияет на вышеизложенное промерзание

(просыхание) верхнего слоя земли? В литературе [7-9] нет достаточных данных для однозначного ответа.

**Цель работы** – исследовать изменение величины сопротивления ЗУ подстанции при промерзании (просыхании) верхнего слоя земли и дать рекомендации по выполнению их конструкции при проектировании и модернизации.

**Принятые конструкции ЗУ и исходные условия эксперимента.** Для исследования были приняты ЗУ подстанций как в виде конструкции из горизонтальных электродов (рис. 1), так и в виде горизонтальных и вертикальных электродов (рис. 2).

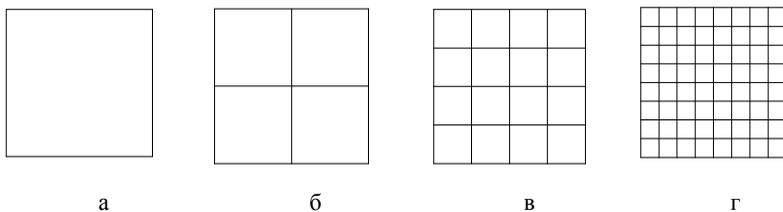


Рис. 1. Модель ЗУ в виде системы горизонтальных электродов.

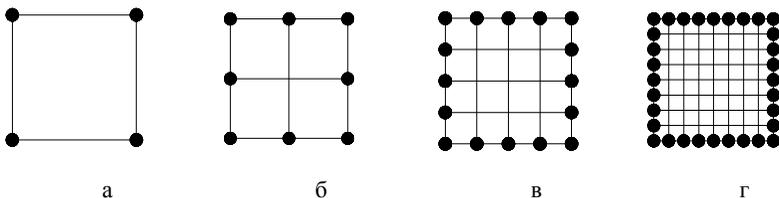


Рис. 2. Модель ЗУ в виде системы горизонтальных и вертикальных электродов.

В последнем случае вертикальные электроды размещаются по контуру (периметру) ЗУ из горизонтальных электродов. При этом площадь, занимаемая ЗУ, во всех случаях оставалась неизменной и равной  $40 \times 40 \text{ м}^2$ . Число и размер ячеек сетки ЗУ изменялись путем увеличения числа горизонтальных электродов, укладываемых равномерно внутри контура ЗУ, как это показано на рис. 1. Глубина укладки сетки  $t$  и размещение верхнего конца вертикальных электродов приняты равными 0,5 м. Число и длина  $l_v$  вертикальных электродов во всех случаях принимались такими, чтобы обеспечивалось равенство единице отношения  $a/l_v$ , т.е. суммарная длина вертикальных электродов равнялась длине контура ЗУ, а их эффективное использование было по возможности неизменным и максимальным. Диаметр  $d$  горизонталь-

ных и вертикальных электродов принят равным 16 мм. Модель структуры земли принята традиционной, т.е. двухслойной, удельное сопротивление  $\rho_1$  земли верхнего слоя изменялось в пределах от 20 Ом\*м до  $10^4$  Ом\*м, а  $\rho_2$  нижнего слоя принималось неизменным и равным  $10^2$  Ом\*м. Толщина  $h$  верхнего слоя земли принята равной 1 м, а нижнего до  $\infty$ . С целью упрощения ЗУ принято эквипотенциальным.

**Результаты исследования и их анализ.** Исследования, выполненные для принятых по рис. 1 а,б,в,г и рис. 2 а,б,в,г ЗУ по разработанной в пакете Mathcad программе, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры электродов

Размер ячейки, $a$ , м	Удельное сопротивление верхнего слоя земли, $\rho_1$ , Ом*м	Длина вертикального электрода, $l_v$ , м	Сопротивление ЗУ, $R$ , Ом
40	20	0	0,928
		2	0,894
		20	0,762
	$10^4$	0	40,221
		2	1,512
		20	1,108
20	20	0	0,884
		2	0,861
		20	0,747
	$10^4$	0	26,695
		2	1,492
		20	1,098
10	20	0	0,86
		2	0,843
		20	0,738
	$10^4$	0	15,84
		2	1,454
		20	1,078
5	20	0	0,849
		2	0,835
		20	0,734
	$10^4$	0	8,667
		2	1,386
		20	1,039

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее.

Во-первых, применение только горизонтальных электродов по контуру в виде одной ячейки в случае увеличения удельного сопротивления  $\rho_1$  земли верхнего слоя от  $20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  до  $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  приводит к увеличению сопротивления ЗУ от  $0,928 \text{ Ом}$  до  $40,221 \text{ Ом}$ , т.е. в  $43,34$  раза. Увеличение числа ячеек при уменьшении их размеров до  $5 \times 5 \text{ м}$  при  $\rho_1=20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  приводит к снижению сопротивления от  $0,928 \text{ Ом}$  до  $0,849 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,093$  раза. При  $\rho_1=10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  аналогичное изменение конструкции сетки приводит к снижению сопротивления от  $40,221 \text{ Ом}$  до  $8,667 \text{ Ом}$ , т.е. в  $4,64$  раза.

Во-вторых, введение в конструкцию ЗУ, состоящего из горизонтальных электродов, вертикальных электродов по контуру приводит к существенному уменьшению величины его сопротивления. Это обусловлено тем, что часть вертикального электрода располагается во втором слое земли. Так, например, при длине вертикальных электродов  $l_b=2 \text{ м}$ , расположенных по контуру ячейки размером  $40 \times 40 \text{ м}$ , изменение отношения  $\rho_1/\rho_2$  от  $0,2$  до  $100$  приводит к увеличению сопротивления ЗУ от  $0,894 \text{ Ом}$  до  $1,512 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,69$  раза. Увеличение числа ячеек при уменьшении их размеров до  $5 \times 5 \text{ м}$  при аналогичном изменении отношения  $\rho_1/\rho_2$  приводит к увеличению сопротивления от  $0,835 \text{ Ом}$  до  $1,386 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,66$  раза. Кроме того, при отношении  $\rho_1/\rho_2=0,2$  увеличение числа ячеек при уменьшении их размеров до  $5 \times 5 \text{ м}$  приводит к снижению сопротивления от  $0,894 \text{ Ом}$  до  $0,835 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,07$  раза. Аналогичное снижение при отношении  $\rho_1/\rho_2=100$  составляет от  $1,512 \text{ Ом}$  до  $1,386 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,09$  раза. Следовательно, применение вертикальных электродов даже длиной  $l_b=2 \text{ м}$  приводит к существенному снижению сопротивления ЗУ подстанции. Увеличение длины  $l_b$  вертикальных электродов от  $2 \text{ м}$  до  $20 \text{ м}$ , т.е. в  $10$  раз, приводит к снижению сопротивления ЗУ подстанции следующим образом: в случае одной ячейки при  $\rho_1/\rho_2=0,2$  сопротивление снижается от  $0,894 \text{ Ом}$  до  $0,762 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,17$  раза, а при  $\rho_1/\rho_2=100$  аналогичное снижение составляет от  $1,512 \text{ Ом}$  до  $1,108 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,36$  раза. В то же время при размерах ячеек  $5 \times 5 \text{ м}$  при  $\rho_1/\rho_2=0,2$  сопротивление снижается от  $0,835 \text{ Ом}$  до  $0,734 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,14$  раза, а при  $\rho_1/\rho_2=100$  аналогичное снижение составляет от  $1,386 \text{ Ом}$  до  $1,039 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,33$  раза. Кроме того, при длине вертикальных электродов  $l_b=20 \text{ м}$  увеличение числа ячеек ЗУ подстанции, т.е. до размеров  $5 \times 5 \text{ м}$  при  $\rho_1/\rho_2=0,2$  приводит к снижению сопротивления ЗУ от  $0,762 \text{ Ом}$  до  $0,734 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,038$  раза, а при  $\rho_1/\rho_2=100$  аналогичное снижение составляет от  $1,108 \text{ Ом}$  до  $1,039 \text{ Ом}$ , т.е. в  $1,04$  раза.

Увеличение числа ячеек ЗУ подстанции при неизменных размерах занимаемой им площади, т.е. фактически увеличение числа горизонтальных продольных и поперечных электродов, оказывает значительно меньшее влияние на снижение сопротивления ЗУ подстанции, чем применение вертикальных электродов. Тем более промерзание (просыхание) земли и расположение заземляющей сетки в верхнем слое (слое промерзания или просыхания) указывает на малоэффективное ее использование в обеспечении требуемой величины сопротивления ЗУ подстанций. Количественно это подтверждается следующим. Если сопротивление ЗУ подстанции в виде контура (ячейка с размером 40x40 м) при отношении  $\rho_1/\rho_2 = 0,2$  составляет 0,928 Ом, то добавление к контуру вертикальных электродов длиной по 2 м дает сопротивление равное 0,894 Ом, т.е. снижение составляет 3,7 %. Увеличение числа ячеек ЗУ без вертикальных электродов дает сопротивление 0,849 Ом, а добавление вертикальных электродов длиной по 2 м дает сопротивление 0,835 Ом, т.е. снижение на 1,65 %. В случае, если отношение  $\rho_1/\rho_2 = 100$ , ЗУ в виде контура (ячейка 40x40 м) имеет сопротивление 40,221 Ом, а с добавлением вертикальных электродов длиной по 2 м сопротивление составляет 1,512 Ом, т.е. снижается в 26,6 раза. В то же время увеличение числа ячеек (увеличение числа продольных и поперечных электродов) обеспечивает величину сопротивления 8,667 Ом, а добавление вертикальных электродов длиной по 2 м обеспечивает величину сопротивления равную 1,386 Ом, т.е. сопротивление снижается в 6,25 раза.

**Вывод.** Исследования показали, что в обеспечении требуемой минимальной величины сопротивления растеканию ЗУ подстанции основную роль играют вертикальные электроды, располагаемые по периметру контура ЗУ. Горизонтальные электроды (продольные и поперечные) должны использоваться в минимально возможном количестве, которое должно определяться исходя из условий электробезопасности, а это требует проведения дополнительных исследований. Полученные результаты следует рекомендовать к использованию при проектировании и модернизации ЗУ подстанций.

**Список литературы:** 1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Х.: ІНДУСТРІЯ, 2007. – 416 с. 2. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И. и др. 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 электрифика-

ция. – 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.** Нижевский И.В., Нижевский В.И. Экспериментальное исследование двухуровневого заземляющего устройства подстанции на физических моделях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №5/6 (41). – С. 61-65. **6.** Пат. 18292, Украина, МПК Н02В 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.** Заземляющие устройства на линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения. Итоги науки и техники. Электрические станции, сети и системы. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1966. – С. 65-184. **8.** Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978. – 224 с. **9.** Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.



**Нижевский Илья Викторович.** Защитил диплом инженера в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" по специальности электрические системы и сети в 2007 г. Научные интересы связаны с проблемами молниезащиты, заземляющих устройств, перенапряжений и координации изоляции в электрических сетях.

*Поступила в редколлегию 01.10.2011  
Рецензент*