

К.А. Старков, Е.Н. Федосеенко

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ НЕЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С УЧЕТОМ ПРОВОДИМОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

*Мета. Метою статті є розробка алгоритму розрахунку електричних характеристик нееквіпотенціальних заземлюючих пристроїв електроустановок з огляду на велику кількість природних зосереджених заземлювачів, а також з урахуванням власних активних і реактивних опорів горизонтальних заземлювачів. Методика. В роботі були проведені дослідження з послідовним застосуванням методу наведеного потенціалу і методів розрахунку розгалужених електричних кіл з розподіленими параметрами. Результати. Отримано алгоритм розрахунку складних нееквіпотенціальних заземлюючих пристроїв, що дозволяє отримати уточнені значення розподілу потенціалу на території електроустановки. Наукова новизна. Нові положення, в порівнянні з відомими рішеннями, складаються в обліку провідності природних зосереджених заземлювачів сукупністю вертикальних і горизонтальних електродів, що обґрунтована по рівнозначним електричним характеристикам стосовно двошарової моделі електронної структури землі. Практичне значення. Використання запропонованого алгоритму розрахунку в електричних мережах АК «Харківобленерго» дозволило визначити значення розподілу потенціалів при короткому замиканні (КЗ) на електричній підстанції з урахуванням впливу провідності природних зосереджених заземлювачів. Скориговані таким чином результати розрахунку дадуть більш точну інформацію про величини нормованих параметрів заземлюючих пристроїв діючих електроустановок. За допомогою запропонованого алгоритму можуть бути отримані уточнені значення падіння напруги по заземлюючим пристроям при КЗ, а, отже, розраховані напруги, що впливають на ізоляцію кабелів вторинних кіл, - параметри, нормовані за умовами електромагнітної сумісності. Бібл. 9, рис. 1.*

*Ключові слова:* природні зосереджені заземлювачі, електрична підстанція, метод наведеного потенціалу, розподіл потенціалу, двошарова модель землі.

*Цель. Целью статьи является разработка алгоритма расчета электрических характеристик неэквипотенциальных заземляющих устройств электроустановок с учетом большого числа естественных сосредоточенных заземлителей, а также собственных активных и реактивных сопротивлений горизонтальных заземлителей. Методика. Проведены теоретические исследования с использованием метода наведенных потенциалов, методов конечных разностей для расчета электрического поля простых заземлителей в земле с двухслойной структурой и последовательного применения метода наведенных потенциалов и методов расчета разветвленных электрических цепей с распределенными параметрами. Результаты. Получен алгоритм расчета сложных неэквипотенциальных заземляющих устройств, позволяющий получить уточненные значения распределения потенциала на территории электроустановки. Научная новизна. Новые положения, по сравнению с известными решениями, состоят в учете проводимости естественных сосредоточенных заземлителей совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов, обоснованной по равнозначным электрическим характеристикам применительно к двухслойной модели электрической структуры земли. Практическое значение. Использование предложенного алгоритма расчёта в электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» позволило определить значения распределения потенциалов при КЗ на электрической подстанции с учетом влияния проводимости естественных сосредоточенных заземлителей. Скорректированные таким образом результаты расчета дадут более точную информацию о величинах нормируемых параметров по заземляющим устройствам действующих электроустановок. С помощью предложенного алгоритма могут быть получены уточненные значения падения напряжений по заземляющим устройствам при КЗ, а, следовательно, рассчитаны напряжения, воздействующие на изоляцию кабелей вторичных цепей, – параметры, нормируемые по условиям электромагнитной совместимости. Библ. 9, рис. 1.*

*Ключевые слова:* природные сосредоточенные заземлители, электрическая подстанция, метод наведенного потенциала, распределение потенциала, двухслойная модель земли.

**Введение.** Характеристики заземляющих устройств (ЗУ) электроустановок с открытыми распределительными устройствами непосредственно определяют электромагнитную обстановку на энергетических объектах. Естественные сосредоточенные заземлители в силу большой поверхности контакта с грунтом выравнивают потенциал в узлах ЗУ и, тем самым, разгружают по току горизонтальные искусственные и естественные заземлители. Поэтому их подробный учет в решении задачи расчета электрических характеристик сложных неэквипотенциальных ЗУ представляется обязательным, так как влияет на уровень электромагнитных помех.

Расчет электрических характеристик неэквипотенциальных заземлителей производится на основе

последовательного применения метода наведенного потенциала и методов расчета разветвленных электрических цепей с распределенными электрическими параметрами. Использование возможностей указанного алгоритма расчета сложных ЗУ предполагает размещение естественных сосредоточенных заземлителей (железобетонных оснований и фундаментов) совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов, диаметры которых принимаются такими же, как у соответствующих искусственных электродов. При этом достигается единообразие расчетных форм всех электродов ЗУ.

Метод расчета сложного комбинированного заземлителя может базироваться на условии его эквипо-

© К.А. Старков, Е.Н. Федосеенко

тенциальности, так и на условии неэквипотенциальности, т.е. с учетом продольного сопротивления горизонтальных электродов. Современные вычислительные возможности позволяют реализовать алгоритм расчета неэквипотенциальных сложных комбинированных заземлителей как универсальный.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Предложенная в работе [1] математическая модель неэквипотенциального ЗУ подстанции, размещенного в двухслойном грунте, базируется на основных положениях совместного представления ЗУ, в общем случае, как сложной электрической цепи и создающего установившееся электрическое поле тока в земле. Дополнительно учитывает изменение плотности тока, стекающего с горизонтальных электродов, по линейному закону и их произвольное расположение. Однако влияние на формирование электрических характеристик ЗУ электроустановок, которое могут оказать естественные сосредоточенные заземлители в данной работе не учитывается.

Реализован в виде программного комплекса «Контур» [2] алгоритм расчета, основанный на единой математической модели и одновременно учитывающий как неравномерность распределения потенциалов по ЗУ объекта, так и процесс растекания тока с заземлителя в землю. Предложенная математическая модель, судя из построения алгоритма, не учитывает нелинейной зависимости распределенных параметров горизонтальных электродов от протекающего по ним тока.

В работе [3] рассматриваются различные методы расчета сопротивления различных заземляющих устройств в однородных и двухслойных моделях электрической структуры земли. Полученные результаты сравниваются с соответствующими формулами метода конечных элементов, которые рассматриваются как эталонные. В работе [3] отмечена необходимость поиска лучших аппроксимаций в ходе расчета сопротивления сложного ЗУ, особенно для случая многослойной модели земли.

Основная идея метода [4] заключается в совместном рассмотрении ЗУ в общем случае как сложной электрической цепи и создающего установившееся электрическое поле тока в земле. По этому методу вертикальные элементы представляются сосредоточенными параметрами, а горизонтальные – распределенными параметрами, нелинейно зависящими от проходящего по ним тока.

Анализ приведенных в [4] выражений показывает, что они не охватывают все возможные варианты расположения элементов сложных ЗУ применительно к двухслойной модели грунта. Форма представлений этих выражений отображает те ограничения в части геометрии расчетной модели ЗУ, которые приняты в алгоритме, реализующем выражения. Согласно [4] при проектировании сложных ЗУ арматурные каркасы железобетонных оснований (естественные сосредоточенные заземлители) с учетом возможностей известных алгоритмов расчета заземлителей приходится замещать совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов. Следует, однако, отметить, что расчетная совокупность замещающих электродов в

данном случае не обоснована по эквивалентным электрическим характеристикам.

**Целью работы** является совершенствование алгоритма, реализующего математическую модель, основанную на совместном рассмотрении ЗУ как сложной электрической цепи и создающего установившееся электрическое поле тока в земле, путем подробного учета естественных сосредоточенных заземлителей открытых распределительных устройств электроустановок высокого напряжения.

**Метод расчета сложных ЗУ.** Основой для алгоритма расчета сложных неэквипотенциальных ЗУ электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей принят метод расчета сложных ЗУ, учитывающий продольное сопротивление горизонтальных элементов [4]. Этот метод разработан для случая, когда ЗУ содержит наряду с горизонтальными и вертикальные элементы. Под горизонтальными элементами, продольное сопротивление которых учитывается, понимаются части заземлителя, заключенные между двумя соседними узловыми точками (точками, в которых пересекаются и сходятся два или большее число элементов) и которые конструктивно представляют собой электроды заземляющей сетки. В качестве узловой можно принять любую точку, расположенную на горизонтальной части заземлителя [4]. При замещении железобетонных подножников и стоек совокупностью вертикальных и горизонтальных линейных электродов, продольное сопротивление последних элементов не учитывается.

Исходную модель сложного заземлителя определяют допущения в соответствии с [4]:

1) в пределах данного сложного заземлителя те горизонтальные элементы, продольное сопротивление которых учитывается, обладают однородными (в пределах элемента) распределенными удельными параметрами, т.е. на единицу длины: продольными активными сопротивлениями, индуктивностью и поперечной проводимостью растеканию тока;

2) значения поперечной проводимости элементов зависят также от их продольных параметров, которые в свою очередь при использовании элементов из стали являются нелинейной функцией проходящего по ним тока;

3) отсутствует влияние на распределенные параметры заземлителя электромагнитного поля тока однофазного замыкания на землю, проходящего по воздушным линиям;

4) вертикальные элементы и те горизонтальные элементы, продольное сопротивление которых не учитывается, являются идеальными сосредоточенными;

5) в пределах заземлителя может быть несколько «задающих» узловых точек, т.е. точек непосредственно электрически связанных с внешней электрической цепью («задающими») являются узловые точки заземлителя, непосредственно связанные с нейтралью трансформаторов или автотрансформаторов, и точка, на которую в расчетном аварийном режиме замкнута фаза линии электропередачи);

6) при расчетном однофазном замыкании через задающие узловые точки проходят задающие токи (установившиеся значения тока однофазного замыкания

на землю и токов, «возвращающихся» в систему через нейтрали трансформаторов и автотрансформаторов).

В соответствии с требованиями о прямолинейности электродов заземления предложен следующий способ учета естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных заземлителей для реализации возможностей указанного алгоритма расчета. Представим естественный сосредоточенный заземлитель эквивалентной совокупностью линейных электродов, например, таким образом, чтобы эти электроды были расположены по абрису естественного заземлителя. В частности, арматурный каркас подножников замещается совокупностью вертикальных электродов, размеры и расположение которых определяется по соответствующим геометрическим характеристикам стойки подножника, и совокупностью горизонтальных электродов – в соответствии с геометрическими характеристиками его плиты. Совокупность замещающих электродов расположена в земле с послойно однородной электрической структурой, как и моделируемый естественный сосредоточенный заземлитель. Далее к указанной совокупности электродов можно применять метод наведенного потенциала [4] для решения задачи электрического поля как к сложному ЗУ и определить значения сопротивления растеканию и потенциалов точек на поверхности земли.

**Замещение естественных сосредоточенных заземлителей.** Полифункциональность ЗУ электроустановок напряжением выше 1 кВ сети с глухозаземленной или эффективно заземленной нейтралью привела к необходимости нормирования нескольких параметров ЗУ - или напряжения прикосновения, или сопротивления ЗУ [5]. В связи с этим, принимаем два критерия эквивалентности схемы замещения естественных сосредоточенных заземлителей совокупностью линейных электродов: приближение по сопротивлению и приближение по потенциалам точек на поверхности земли. При этом в качестве исходных данных для оценки достаточности приближения принимаем результаты решения краевой задачи для уравнения Лапласа применительно к модели естественного сосредоточенного заземлителя в ограниченном объеме земли. Достаточность достигнутого приближения в процессе наращивания замещающих линейных электродов оцениваем таким образом:

по сопротивлению

$$\xi_R = \left| \frac{R_{s,e} - R_{p,m}}{R_{p,m}} \right| \leq \xi_{R,\text{lim}}; \quad (1)$$

по потенциалам точек

$$\xi_\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\varphi_{i,s,e} - \varphi_{i,p,m}}{\varphi_{i,p,m}} \right| \leq \xi_{\varphi,\text{lim}}, \quad (2)$$

где  $R_{s,e}$ ,  $R_{p,m}$  – сопротивление растеканию совокупности электродов и апробированной модели соответственно;  $\varphi_{i,s,e}$ ,  $\varphi_{i,p,m}$  – потенциал на поверхности земли совокупности электродов и апробированной модели соответственно;  $n$  – число точек на поверхности земли.

Варианты замещения естественных сосредоточенных заземлителей (железобетонных стоек и под-

ножников) расчетной совокупностью линейных электродов получены по способу, описанному ранее с использованием  $\xi_R$ - и  $\xi_\varphi$ -критериев, и представлены в работах [6, 7].

**Расчетные выражения для взаимных и собственных сопротивлений.** Предложенный способ учета естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных естественных заземлителей может потребовать использования выражений для взаимных и собственных сопротивлений применительно к горизонтальным электродам расположенным в нижнем слое двухслойной модели земли. Необходимость в указанных выражениях появится при замещении арматурного каркаса подножников, плита которых располагается на глубине около 3 м, совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов.

Расчетные выражения для взаимных и собственных сопротивлений получены на основании общей формулы для взаимного сопротивления  $R_{qg}$  между двумя электродами с индексами  $g$  и  $q$ , расположенными в проводящем полупространстве применительно к электродам, размеры поперечного сечения которых в сотни раз меньше их длины [4], т.е.

$$R_{qg} = \frac{1}{l_q l_g} \int_{(l_q)} \int_{(l_g)} f'_{0q}(Q) f'_{0g}(G) \Psi_{QG} dl_Q dl_G, \quad (3)$$

где  $l_q$  и  $l_g$  – длина электродов;  $f'_{0q}(Q)$  и  $f'_{0g}(G)$  – функция неоднородности линейной плотности тока по длине электрода;  $\Psi_{QG}$  – функция пропорциональности между током, выходящим в проводящее полупространство из окрестностей точки  $G$ , и потенциалом, наводимым этим током в точке  $Q$ .

Как результат вывода согласно (3) получены следующие выражения: взаимное сопротивление двух горизонтальных электродов, расположенных в нижнем слое и параллельных друг другу; взаимное сопротивление двух горизонтальных электродов, расположенных в нижнем слое и перпендикулярных друг другу; взаимное сопротивление двух горизонтальных электродов, в случае если один электрод расположен в верхнем слое, второй – в нижнем слое; взаимное сопротивление двух горизонтальных скрещивающихся под прямым углом электродов, расположенных в верхнем и нижнем слое; взаимное сопротивление горизонтального электрода, расположенного в нижнем слое, и вертикального электрода, пересекающего границу раздела слоев.

Корректность выражений подтверждена путем сопоставления результатов тестовых расчетов по ним и по выражениям, приведенным в работе [4] для условий расположения горизонтального электрода (электродов) в верхнем слое, и исходных данных, соответствующих положению указанного электрода (электродов) на границе раздела слоев. Полученные расчетные выражения для взаимных и собственных сопротивлений электродов опубликованы в работе [8] и вместе с ранее опубликованными охватывают все возможные комбинации расположения электродов при расчетах сложных ЗУ с учетом естественных сосредоточенных заземлителей.

**Алгоритм расчета сложного неэквипотенциального ЗУ.** Полученные модели естественных сосредоточенных заземлителей в виде совокупности линейных вертикальных и горизонтальных электродов вводятся в алгоритм расчета сложного неэквипотенциального ЗУ, которое принимаем за исходное. Эти элементы наряду с искусственными линейными заземлителями участвуют в токораспределении ЗУ. При этом продольное сопротивление горизонтальных электродов, замещающих естественные заземлители, не учитывается. При промышленной частоте электрическое поле тока, выходящего из заземлителя в землю, можно рассматривать как стационарное. В этом случае токораспределение между элементами эквипотенциального ЗУ определяет система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [4]:

$$\varphi_G = \sum_{p=1}^n \alpha_{mp} I_p, \quad \text{при } m = \overline{1, n} \quad (4)$$

где  $n$  – число элементов заземлителя;  $\alpha_{mp}$  – взаимное сопротивление элементов ЗУ с индексами  $m$  и  $p$  (при  $m \neq p$ ) и собственное сопротивление элементов при одинаковых индексах;  $I_p$  – ток, выходящий в землю с  $p$ -го элемента;  $\varphi_G$  – потенциал заземлителя (эквипотенциального).

В данном случае имеем СЛАУ (5) аналогичную СЛАУ с собственными и взаимными потенциальными коэффициентами в системе заряженных тел [9].

Согласно [4] в случае неэквипотенциального заземлителя СЛАУ в матричной форме имеет вид:

$$AI_0 = U, \quad (5)$$

где  $A$  – матрица взаимных и собственных сопротивлений элементов;  $I_0$  – матрица-столбец комплексных значений токов, выходящих из элементов сложного заземлителя в землю;  $U$  – матрица-столбец комплексных значений напряжений элементов (для горизонтальных элементов берут среднее из значений напряжения в начале и конце элемента, а для вертикальных элементов – напряжение узловой точки, с которой он соединен).

Комплексные значения напряжений элементов ЗУ связаны со значениями задающих токов и с параметрами сложной нелинейной электрической цепи, имитирующей исходное ЗУ – без учета естественных заземлителей. Выражаем эту связь по методу узловых напряжений в матричной форме (все узлы, начиная с опорного, в качестве которого принимаем «землю» – зону нулевого потенциала, пронумерованы от нуля до  $q$ ) [4]:

$$YU_{nodal} = I_{set}, \quad (6)$$

где  $Y$  – квадратная матрица полной проводимости цепей;  $U_{nodal}$  – матрица-столбец узловых напряжений;  $I_{set}$  – матрица столбец задающих токов.

В соответствии с [4] расчет сложной электрической цепи, замещающей многоэлементное ЗУ, сводится к совместному решению двух матричных уравнений (5) и (6). Учитывая то, что параметры горизонтальных элементов нелинейно зависят от проходящего по ним тока, уравнение (6) – нелинейно. Вертикальные элементы ЗУ замещают сосредоточенными проводимостями на землю; также замещают те

горизонтальные элементы, продольное сопротивление которых не учитывается.

На следующем этапе алгоритма расчета горизонтальные элементы, продольное сопротивление которых учитывается, замещают эквивалентными П-образными схемами с сосредоточенными параметрами (рис. 1).

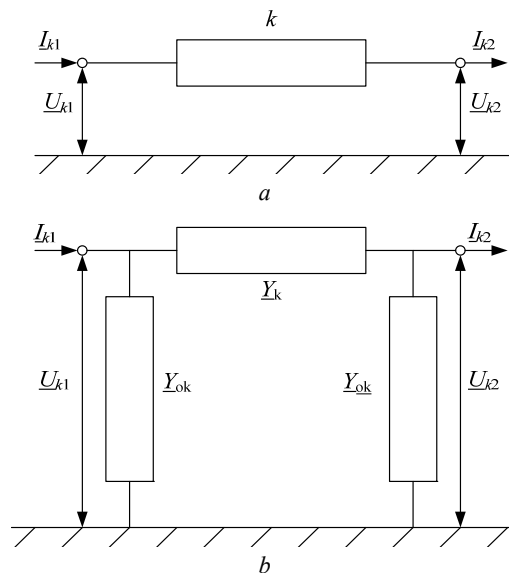


Рис. 1. Горизонтальный  $k$ -й элемент с распределенными параметрами  $r, L, g$  (a) и его эквивалентная П-образная схема замещения (b)

Связь сосредоточенных параметров П-образной схемы замещения  $k$ -го горизонтального элемента ( $Y_k$  и  $Y_{0k}$ ) с его распределенными параметрами известна [6]:

$$\begin{aligned} Y_k &= 1/Z_{wk} \operatorname{sh} \gamma_k l_k; \\ Y_{0k} &= (\operatorname{ch} \gamma_k l_k - 1) / Z_{wk} \operatorname{sh} \gamma_k l_k, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $Z_{wk}$  – волновое сопротивление;  $\gamma_k$  – коэффициент распространения.

Величины, входящие в формулы для волнового сопротивления  $Z_{wk}$  и коэффициента распространения  $\gamma_k$ , представляют собой удельное полное сопротивление элемента  $Z_k$  и удельную полную поперечную проводимость  $g_k$ . Удельное полное продольное сопротивление горизонтального электрода определяется активным сопротивлением и индуктивностью, причем последняя имеет две составляющие: внешнюю  $L_{ext}$ , обусловленную магнитным полем вне электрода, и внутреннюю  $L_{int}$ , связанную с магнитным полем внутри электрода. Внутренняя индуктивность  $L_{int}$  вычисляется в зависимости от магнитной проницаемости стали электрода  $\mu_k$ , которая определяется по основной кривой намагничивания при данном действующем значении напряженности магнитного поля на поверхности электрода. Магнитная проницаемость стали элемента  $\mu_k$  нелинейно зависит от тока  $I_k$ , проходящего по  $k$ -му элементу. Внешняя индуктивность  $L_{ext}$  определяется на основании известной формулы Поллячека. Удельная проводимость

$$g_k = G_k I_k^{-1},$$

причем  $G_k$  определяется с помощью метода наведенного потенциала.

Для первого приближения или первой итерации [4] заземлитель принимают эквипотенциальным и находят численные значения вектора решения матричного уравнения (4). Далее определяют поперечные проводимости  $G$  всех горизонтальных и вертикальных элементов заземлителя; на первой итерации считаем, что все рассматриваемые проводимости имеют активный характер.

Далее, задавшись некоторым начальным значением магнитной проницаемости стали электрода  $\mu$ , определяют распределенные продольные параметры горизонтальных элементов заземляющей сетки и параметры их эквивалентных П-образных схем замещения. Решение матричного уравнения (6) при заданных задающих токах позволяет получить численные значения узловых напряжений и рассчитать токи во всех ветвях схемы замещения сложного ЗУ.

При втором приближении [4] напряжения в узлах и токи в ветвях схемы замещения заземлителя, вычисленные в первом приближении, используются в качестве дополнительных исходных данных, а именно, заземлитель представляется как неэквипотенциальный – СЛАУ имеет вид (5), а указанные выше значения токов позволяют уточнить магнитную проницаемость стали электрода  $\mu$ . Для этого уточнения величины  $\mu$  используют среднее между значениями тока в начале и в конце каждого горизонтального элемента с распределенными продольными параметрами. Решение системы (3) относительно токов в комплексной форме позволяет далее определить значения полных поперечных проводимостей  $\underline{G}$  всех элементов; указанные проводимости имеют реактивные составляющие, что формально связано с наличием у узловых напряжений на первой итерации сдвига по фазе по отношению друг к другу. Далее по  $\mu$  и  $\underline{G}$  определяются распределенные продольные параметры тех горизонтальных элементов заземлителя, продольное сопротивление которых учитывается, и т.д.

В части определения напряжения до прикосновения в заданных точках на поверхности земли и входного сопротивления ЗУ, расчет выполняется известным способом [4].

Полученное решение токов во всех ветвях схемы замещения сложного ЗУ дает значения проходящих по горизонтальным элементам ЗУ токов как среднее между значениями тока в начале и в конце каждого горизонтального элемента с распределенными продольными параметрами. Как результат этого – добавление в алгоритм расчета сложных неэквипотенциальных ЗУ электроустановок решения задачи определения уровня электромагнитной совместимости.

Достаточность достигнутого приближения оценивают по  $\xi$ -критерию:

$$\xi = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \left| \frac{U_{jo}^{(n-1)} - U_{jo}^{(n)}}{U_{jo}^{(n)}} \right| \leq \xi_{\text{lim}}, \quad (8)$$

где  $(n)$  – верхний индекс, показывающий номер последней итерации;  $q$  – число узлов схемы замещения заземлителя;  $U_{jo}$  – модуль напряжения  $j$ -го узла относительно опорного.

## Выводы.

Обоснована необходимость учёта влияния естественных сосредоточенных заземлителей при формировании электрических характеристик сложных неэквипотенциальных ЗУ электроустановок путём их эквивалентирования совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов.

Получены расчетные выражения для взаимных и собственных сопротивлений горизонтальных электродов сложных неэквипотенциальных ЗУ, расположенных в нижнем слое двухслойной модели земли, которые охватывают все возможные комбинации их расположения и обеспечивают учет естественных сосредоточенных заземлителей.

Использование в электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» предложенного алгоритма расчёта распределения потенциалов при КЗ на подстанции с учетом влияния проводимости естественных сосредоточенных заземлителей позволило обеспечить оптимальное нормирование параметров ЗУ действующих электроустановок за счёт более точного определения величины напряжения прикосновения.

Определены выражения для расчёта величин падений напряжений на ЗУ при КЗ, которые позволяют оценить уровень напряжений, воздействующих на изоляцию кабелей вторичных цепей, что необходимо для нормирования их параметров по условиям электромагнитной совместимости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – 2003. – Т.25. – №2. – С. 99-111.
2. Матвеев М.В., Кузнецов М.Б., Луцишин А.Р. Оценка электромагнитной обстановки при проектировании электрических станций и подстанций // Вести в электроэнергетике. – 2005. – №2. – С. 1-8.
3. Katsanou V.N., Papagiannis G.K. Substation grounding system resistance calculations using a FEM approach. – IEEE Bucharest PowerTech, Jun. 2009. doi: 10.1109/PTC.2009.5282044.
4. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
5. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом. – К.: Міненерговугілля України, 2011. – 72 с.
6. Федосеенко Е.Н. Минченко А.А. Вариант замещения естественных сосредоточенных заземлителей – арматурных каркасов железобетонных фундаментов (подножников) в виде расчетной совокупности электродов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2006. – №6/3(24). – С. 81-84.
7. Минченко А.А., Федосеенко Е.Н. Учет естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных стоек при расчетах сложных заземляющих устройств электроустановок с помощью совокупности вертикальных электродов // Вісник НТУ «ХП». Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – 2006. – №28 – С. 97-100.
8. Федосеенко Е.Н. Определение взаимных и собственных сопротивлений вертикальных и горизонтальных электродов сложных заземлителей в двухслойной земле // Вісник НТУ

«ХП». Тем. выпуск: Электроэнергетика і перетворююча техніка. – 2006. – №34 – С. 84-91.

9. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.

#### REFERENCES

1. Link I.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M. A mathematical model is not an equipotential ground grids substation placed in a double layer. *Electronic modeling*, 2003, vol.25, no.2, pp. 99-111. (Rus).
2. Matveev M.V., Kuznetsov M.B., Lushchishin A.R. Evaluation of the electromagnetic environment in the power station and substations engineering. *Vesti v elektroenergetike*, 2005, no.2, pp. 1-8. (Rus).
3. Katsanou V.N., Papagiannis G.K. *Substation grounding system resistance calculations using a FEM approach*. IEEE Bucharest PowerTech, Jun. 2009. doi: 10.1109/PTC.2009.5282044.
4. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
5. *Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. Rozdil 1. Zagal'ni pravila. Glava 1.7. Zazemlennya i zakhisni zakhodi vid urazhennya elektrichnim strumom* [Rules of the device electroinstallations. Chapter 1. General rules. Grounding and protective measures against electric shock]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2011. 72 p. (Ukr).
6. Fedoseenko E.N., Minchenko A.A. The substitution option of natural concentrated grounds, such as concrete pole armature, by the calculated set of electrodes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2006, vol.3, no.6(24), pp. 81-84. (Rus).
7. Minchenko A.A., Fedoseenko E.N. Taking into account the natural conductivity of current spreading with concrete pole armature for calculation complicated grounding connections by the set of vertical electrodes. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2006, no.28, pp. 96-100. (Rus).
8. Fedoseenko E.N. Finding of mutual and own resistances of vertical and horizontal electrodes for complicated grounding connections in a double layer ground. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2006, no.34, pp. 84-91. (Rus).
9. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 3-kh t. Uchebniki dlia vuzov. Tom 2* [Theoretical bases of electrical engineering. In 3 vols. Vol.2.]. St. Petersburg, Piter Publ, 2003. 576 p. (Rus).

Поступила (received) 25.04.2017

Старков Константин Александрович<sup>1</sup>, к.т.н.,  
Федосеенко Елена Николаевна<sup>2</sup>, ст. преподаватель,

<sup>1</sup> АК «Харьковоблэнерго»,  
61037, Харьков, ул. Плехановская, 149,  
тел/phone +380 57 7401268,  
e-mail: ptu1@obl.kh.energy.gov.ua

<sup>2</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +380 57 7076977,  
e-mail: fedosejenko@gmail.com

K.A. Starkov<sup>1</sup>, E.N. Fedoseenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC «Kharkivoblenergo»,  
149, Plekhanovskaia Str., Kharkiv, 61037, Ukraine.

<sup>2</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Improved algorithm for calculating complex non-equipotential grounding devices of electrical installations taking into account conductivity of natural groundings.

**Purpose.** The method of natural concentrated groundings substitution by the set of electrodes taking them into account in the algorithm of electric characteristics calculation for complicated grounding connections of electric installation is offered. An equivalent model as a set of linear electrodes is chosen in accordance with two criteria: leakage resistance and potentials on the ground surface. **Methodology.** We have applied induced potential method and methods for computing branched electrical circuits with distributed parameters. **Results.** We have obtained the algorithm for calculating complex non-equipotential grounding connections, which makes it possible to obtain refined values of the potential distribution in the electric stations and substations with outdoor switchgear. **Originality.** For the first time, we have taking into account the conductivity of natural concentrated grounds by a set of vertical and horizontal electrodes based on equivalent electrical characteristics applied to a two-layer ground. **Practical value.** The using of the proposed calculation algorithm in the electric grids of JSC «Kharkivoblenergo» made it possible to determine the values of the potential distribution at short circuit in electrical substation taking into account the influence of the conductivity of natural concentrated groundings. References 9, figures 1.

**Key words:** natural concentrated groundings, substitution, induced potential method, the potential distribution, a two-layer ground model.