

О.Ю. Глебов, Д.Г. Колиушко, Г.М. Колиушко, Е.П. Еремеева

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ 330(220) КВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ

Мета. Метою статті є розробка основних положень методики проектування конструктивного виконання заземлювального пристрою підстанцій з відкритими розподільними пристроями 330 (220) кВ, яка спрямована на забезпечення електромагнітної сумісності вторинних кіл трансформаторів струму. Методика. Для проведення досліджень використовувалися положення теорії планування експериментів, теорія електричних кіл, математичне моделювання в пакеті Grounding 1.0 і Microsoft Excel. Результати. В ході проведення однофакторних експериментів отримані залежності опору заземлювального пристрою і напруги між розрахунковими точками від площі заземлюючих пристроїв, розміру чарунки сітки, периметра поперечного перерізу заземлювачів, еквівалентного питомого опору ґрунту, струму короткого замикання і конструктивного коефіцієнта. Показано, що опір заземлювального пристрою і напруга між розрахунковими точками практично не залежать від глибини розташування горизонтальних заземлювачів в діапазоні глибин від 0,4 м до 1,4 м. Наукова новизна. У роботі сформульовано три критерії проектування заземлюючих пристроїв підстанцій 330 (220) кВ, спрямовані на забезпечення електромагнітної сумісності вторинних кіл. Практичне значення. Сформульовано положення методики проектування заземлювального пристрою за критерієм запобігання помилкового спрацьовування релейних захистів в аварійних режимах. Бібл. 10, табл. 2, рис. 14.

Ключові слова: заземлюючий пристрій, підстанції, електромагнітна сумісність, вторинні кола, опір заземлювального пристрою.

Цель. Целью статьи является разработка основных положений методики проектирования конструктивного выполнения заземляющего устройства подстанций с открытыми распределительными устройствами 330(220) кВ, которая направлена на обеспечение электромагнитной совместимости вторичных цепей трансформаторов тока. Методика. Для проведения исследований использовались положения теории планирования экспериментов, теория электрических цепей, математическое моделирование в пакете Grounding 1.0 и Microsoft Excel. Результаты. В ходе проведения однофакторных экспериментов получены зависимости сопротивления заземляющего устройства и напряжения между расчетными точками от площади заземляющего устройства, размера ячейки сетки, периметра поперечного сечения заземлителей, эквивалентного удельного сопротивления ґрунта, тока короткого замыкания и конструктивного коэффициента. Показано, что сопротивление заземляющего устройства и напряжение между расчетными точками практически не зависят от глубины расположения горизонтальных заземлителей в диапазоне глубин от 0,4 м до 1,4 м. Научная новизна. В работе сформулированы три критерия проектирования заземляющих устройств подстанций 330(220) кВ, направленные на обеспечение электромагнитной совместимости вторичных цепей. Практическое значение. Сформулированы положения методики проектирования заземляющего устройства по критерию предотвращения ложного срабатывания релейных защит в аварийных режимах. Библ. 10, табл. 2, рис. 14.

Ключевые слова: заземляющее устройство, подстанции, электромагнитная совместимость, вторичные цепи, сопротивление заземляющего устройства.

Введение. В п. 1.7.59 ПУЭ:2017 [1] указано назначение заземляющего устройства (ЗУ) электроустановок: «...Заземлювальный пристрій, який використовують для заземлення електроустановок ..., протягом усього періоду експлуатації має відповідати всім вимогам до заземлення цих електроустановок: захисту людей від ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції, умовам режимів роботи мереж, захисту електрообладнання від перенапруги, електромагнітної сумісності технічних засобів, які застосовують у цих електроустановках (наприклад, комп'ютерних і мікропроцесорних систем тощо). У першу чергу слід дотримуватися вимог до захисного заземлення...». В этом пункте показано, что главной задачей ЗУ является обеспечение электробезопасности.

Для решения указанной задачи разработаны основные критерии проектирования ЗУ, которые изложены в соответствующих пунктах [1]:

- 1) по допустимому значению сопротивления ЗУ;
- 2) по допустимому значению напряжения прикосновения;
- 3) по допустимому значению напряжения на ЗУ.

В ряде работ, например [2], рассмотрены направления реконструкции ЗУ для обеспечения электробезопасности.

Однако, помимо обеспечения электробезопасности, с помощью ЗУ должны решаться и другие важные задачи, перечисленные в п. 1.7.59 ПУЭ:2017, а именно обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств, применяемых в электроэнергетике. Указанный пункт является единственным пунктом в [1], где к ЗУ предъявляются требования по обеспечению ЭМС микропроцессорных технических средств (МП ТС), но далее по тексту документа эти требования (например, к конструктивному выполнению ЗУ) не конкретизированы.

В электроэнергетике Украины основными системообразующими элементами являются линии электропередачи и подстанции с распределительными 330(220) кВ и 750(500) кВ. Эти объекты относятся к электрическим сетям с заземлённой нейтралью, имеют большие токи замыкания на землю (до 50 кА) и представляют наибольшую опасность для персонала и

© О.Ю. Глебов, Д.Г. Колиушко, Г.М. Колиушко, Е.П. Еремеева

МП ТС в аварийных режимах. Наиболее широким классом релейных защит на подстанциях 330(220) кВ являются те, которые подключены к вторичным цепям трансформаторов тока (ТТ), например, максимальная или дифференциальная токовые защиты, направленные или не направленные и т.д. Поэтому обеспечение ЭМС именно токовых цепей является актуальной задачей для надежного функционирования подстанций.

Наиболее мощными источниками электромагнитных воздействий на подстанциях являются короткие замыкания на шинах, прямой удар молнии или срабатывание ограничителей перенапряжений и разрядников. Общей особенностью указанных воздействий является стекание больших токов в ЗУ, хотя амплитудно-временные параметры существенно различаются. Именно в этих режимах наиболее важную роль для надежного функционирования МП ТС играет конструктивное выполнение ЗУ. Однако, на сегодняшний день в нормативных документах по ЭМС [3] не сформулированы критерии проектирования ЗУ, а именно отсутствуют четкие требования к конструктивному выполнению ЗУ, которые позволяют обеспечить выполнение требований ЭМС первичных и вторичных цепей.

Целью работы является разработка методики проектирования конструктивного выполнения заземляющего устройства подстанций с распределительными 330(220) кВ, которая направлена на обеспечение электромагнитной совместимости токовых цепей.

Материалы исследования. Для решения поставленной задачи необходимо в первую очередь оценить значимость факторов, влияющих на основные нормированные параметры ЗУ. Для этого следует определить зависимость сопротивления ЗУ (R_G) и напряжения (U_C) между точками концевой заделки кабелей вторичных цепей ТТ от параметров ЗУ. Сопротивление ЗУ также определяет ещё одну нормированную величину – напряжение на ЗУ (U_G), которая представляет опасность для изоляции отходящих кабелей в аварийных режимах.

В работе [4] авторы показали, что напряжения помех во вторичных цепях ТТ определяются напряжением между двумя точками ЗУ, в которых выполнена концевая заделка кабеля вторичных цепей. Это напряжение определяется воздействующим током (КЗ или молнии). Ограничив это напряжение, можно предотвратить как пробой изоляции кабелей, так и ложное срабатывание релейных защит. Поэтому существующие критерии проектирования ЗУ необходимо дополнить следующими [5]:

1) предотвращение пробоя изоляции кабеля вторичных цепей высокочастотными (импульсными) напряжениями при стекании в ЗУ больших высокочастотных (импульсных) токов;

2) предотвращение пробоя изоляции кабеля вторичных цепей напряжениями промышленной частоты при стекании в ЗУ токов КЗ;

3) предотвращение ложного срабатывания релейных защит при КЗ от низкочастотных напряжений, если изоляции кабеля вторичных цепей все же повреждена.

Первый критерий сводится к уменьшению импульсных напряжений на ЗУ до значения, не превышающего предела прочности изоляции кабелей. Далее при проектировании ЗУ следует предусматривать такую конструкцию заземлителей вблизи ТТ и их клеммных шкафов, при которой сопротивление ЗУ импульсному току ($R_{G\ pulse}$) при КЗ на рассматриваемом оборудовании (или при ударе молнии в установленный рядом молниеотвод) не превышало бы допустимого значения (R_{PERM}), Ом:

$$R_{G\ pulse} \leq R_{PERM} = \frac{U_{PERM}}{I_{HF}}, \quad (1)$$

где U_{PERM} – максимальное значение напряжения, определяющее предел прочности изоляции кабеля к импульсным напряжениям нормированной формы, В; I_{HF} – максимальное значение импульсного тока при КЗ на шинах, (расчетное значение, характерное для распределительных устройств каждого класса напряжения), А.

Для случая удара молнии в установленный рядом молниеотвод, вместо тока I_{HF} следует принимать ток молнии $I_L = 100$ кА (или его часть при наличии нескольких путей стекания тока молнии в грунт).

В табл. 1 приведены параметры (максимальное значение I_{HF} , частота колебаний f_{HF}) высокочастотной составляющей тока КЗ на шинах открытых распределительных устройств (ОРУ) соответствующего класса напряжения (U_{nom}) [6]. Если отсутствуют данные о реальных пределах прочности изоляции контрольных кабелей к импульсным напряжениям, то U_{PERM} можно принять равным согласно [3] на уровне 1 кВ – для ОРУ-220 кВ и ниже, на уровне 2 кВ – для ОРУ-330 кВ и выше.

Таблица 1

Параметры ВЧ составляющей тока КЗ на шинах ОРУ

U_{nom} , кВ	110	220	330	500	750
I_{HF} , кА	1	2	6	8	12
f_{HF} , МГц	1,0	0,8	0,3	0,15	0,1
U_{PERM} , кВ	1	1	2	2	2
R_{PERM} , Ом	1,0	0,5	0,33	0,25	0,17

Второй критерий сводится к уменьшению (при КЗ на шинах подстанции) напряжений между точкой заземления клеммного ящика ТТ и точкой заземления панели релейной защиты (U_C) до испытательного напряжения ($U_{C,P}$), В:

$$U_C \leq U_{C,P} = 1000 \text{ В}. \quad (2)$$

Третий критерий направлен на уменьшение (при КЗ на шинах ОРУ) напряжений (U_C) до допустимого значения, обусловленного параметрами релейной защиты ($U_{C,relay}$), В:

$$U_C \leq U_{C,relay} = I_{relay} \cdot (Z_L + Z_{relay}), \quad (3)$$

где $U_{C,relay}$ – допустимое напряжение между точкой заземления клеммного шкафа ТТ и точкой заземления панели релейной защиты, В; I_{relay} – ток уставки срабатывания реле тока (пускового органа токовых защит) при КЗ на шинах, А; Z_L – сопротивление фазного проводника кабеля вторичных цепей ТТ, Ом; Z_{relay} – сопротивление катушки реле на промышленной частоте, Ом.

Наихудшим случаем для каждого распределительного устройства следует считать КЗ на том ТТ, у которого самый длинный кабель вторичных цепей, т.е. наиболее удаленный ТТ от здания, в котором установлены

Диапазон изменения влияющих факторов

Обозначение фактора	Значение фактора	
	минимальное	максимальное
$S_G \cdot 10^4, \text{ м}^2$	0,906352	9,251508
$b_G, \text{ м}$	7,03	30,4
$\rho_H, \text{ мм}$	31,4	172,0
$\rho_{EQ}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	1,69	249,67
$I_S, \text{ кА}$	2,43	42,961
k_ℓ	0,236	0,955
$t_H, \text{ м}$	0,5	2,0

релейные панели (ЗРП). Следовательно, при проектировании ЗУ необходимо выбирать такие конструктивные параметры сетки ЗУ, при которых напряжение U_C не превысит допустимого значения.

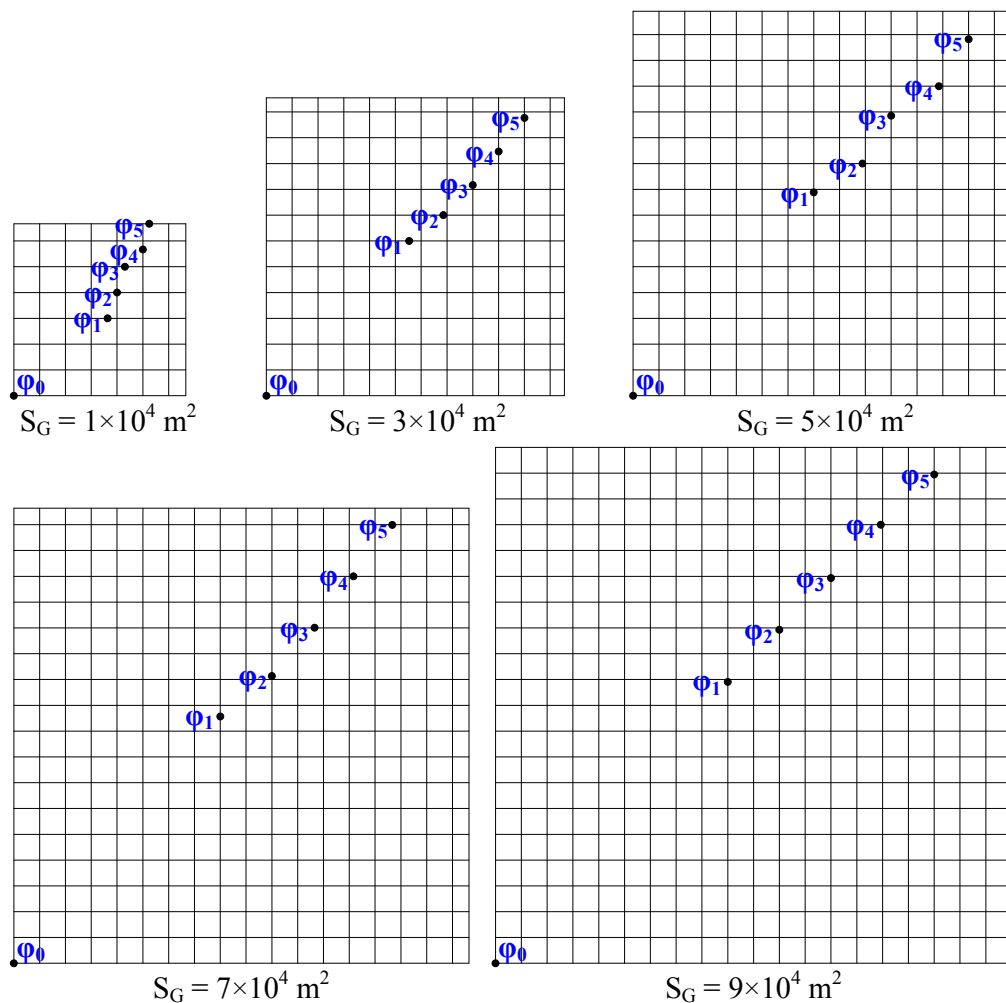
В работе [5] рассмотрено около 40 параметров, влияющих на напряжение U_C и сопротивление ЗУ подстанций 330(220) кВ. Многие из рассмотренных параметров являются взаимосвязанными. Однако, можно выделить семь независимых факторов:

- 1) площадь ЗУ (S_G);
- 2) размер ячейки сетки ЗУ (b_G);
- 3) периметр поперечного сечения горизонтальных заземлителей (ρ_H);
- 4) эквивалентное удельное сопротивление грунта (ρ_{EQ});
- 5) ток КЗ на шинах ОРУ (I_S);
- 6) конструктивный коэффициент соотношения длин (k_ℓ) – отношение расстояния от ТТ до ЗРП (ℓ_C) к диагонали ЗУ (D_G);
- 7) глубина расположения горизонтальных заземлителей (t_H).

Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении диагностики ЗУ восьмидесяти подстанций 330(220) кВ, позволил определить реальный диапазон изменения перечисленных факторов (см. табл. 2).

На первом этапе исследований проводились однофакторные эксперименты для определения зависимостей искомых величин от каждого из независимых факторов. Для проведения таких экспериментов были составлены математические модели ЗУ, которые представляют собой квадратные равномерные сетки площадью $1 \cdot 10^4 \text{ м}^2$, $3 \cdot 10^4 \text{ м}^2$, $5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$, $7 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ и $9 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ с размерами ячейки сетки ЗУ 5 м, 15 м и 25 м.

На рис. 1 показаны сетки ЗУ с различной площадью и размером ячейки сетки 15 м, а также указано расположение точки КЗ (φ_0) и расчётных точек ($\varphi_1 - \varphi_5$), которым соответствуют различные места расположения здания ЗРП.

Рис. 1. Равномерные сетки ЗУ с размером ячейки сетки $b_G = 15 \text{ м}$

Расположение точки КЗ в углу сетки ЗУ является наихудшим случаем, что позволяет выполнить оценку искомых параметров «сверху», т.е. обеспечивает некоторый запас, позволяющий компенсировать старение изоляции кабелей и изменение параметров ЗУ в процессе эксплуатации.

Значения факторов принимались на уровне, близком к среднему значению из диапазонов, указанных в табл. 2: $S_G = 5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$; $b_G = 15 \text{ м}$; $p_H = 92 \text{ мм}$; $\rho_{EQ} = 80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $I_S = 21 \text{ кА}$; $k_\ell = 0,7$; $t_H = 0,7 \text{ м}$.

В ходе эксперимента определялись следующие параметры: сопротивление ЗУ (R_G); потенциал точки ввода тока КЗ φ_0 , и расчётных точек $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$, для которых значения конструктивного коэффициента k_ℓ составляли 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 соответственно. Напряжение $U_{C,i}$ определяется по формуле:

$$U_{C,i} = \varphi_0 - \varphi_i. \quad (4)$$

На рис. 2, 3 изображены графики зависимостей $R_G = f(S_G)$ и $U_C = f(S_G)$ соответственно. Зависимость $R_G = f(S_G)$ является убывающей, а зависимость $U_C = f(S_G)$ – возрастающей. При увеличении площади ЗУ в 9 раз сопротивление ЗУ уменьшается в 2,73 раз, а напряжение U_C увеличивается в 1,61 раз. Эти зависимости носят нелинейный характер, поэтому с достоверностью $R^2 = 1$ аппроксимируются полиномами четвертой степени. Аппроксимация зависимостей и определение её достоверности выполнялось в среде электронных таблиц Microsoft Excel. Поскольку зависимость $R_G = f(S_G)$ является нелинейной, то для получения линейных моделей при проведении многофакторного эксперимента область значений S_G целесообразно разделить на участки.

На рис. 4, 5 изображены графики зависимостей $R_G = f(b_G)$ и $U_C = f(b_G)$ соответственно. Обе зависимости являются возрастающими. При увеличении размера ячейки сетки ЗУ в 5 раз сопротивление ЗУ увеличивается в 1,16 раз, а напряжение U_C – в 2,56 раз. Эти зависимости носят линейный (или близкий к линейному для U_C) характер, поэтому с достоверностью не ниже $R^2 = 0,988$ аппроксимируются уравнениями прямой.

На рис. 6, 7 изображены графики зависимостей $R_G = f(p_H)$ и $U_C = f(p_H)$ соответственно. Обе зависимости являются убывающими. При увеличении периметра поперечного сечения горизонтальных заземлителей в 4,75 раз сопротивление ЗУ уменьшается в 1,28 раз, а напряжение U_C – в 4,94 раз. Эти зависимости носят нелинейный характер, но с достоверностью не ниже $R^2 = 0,86$ аппроксимируются уравнениями прямой.

На рис. 8, 9 изображены графики зависимостей $R_G = f(\rho_{EQ})$ и $U_C = f(\rho_{EQ})$ соответственно. Зависимость $R_G = f(\rho_{EQ})$ является возрастающей и носит практически линейный характер, поэтому с достоверностью не ниже $R^2 = 0,998$ аппроксимируется уравнением прямой. При увеличении эквивалентного удельного сопротивления грунта в 25 раз сопротивление ЗУ увеличивается в 13 раз. Зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$ является существенно нелинейной и имеет точку экстремума – максимум, поэтому область значений ρ_{EQ} следует разделить на участки. Границу раздела участков целесообразно принять при значении $\rho_{EQ} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. На каждом участке зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$ можно аппрок-

симировать уравнением прямой с достоверностью не ниже $R^2 = 0,94$.

Зависимость сопротивления ЗУ от тока КЗ на шинах ОРУ обусловлена нелинейной зависимостью продольного сопротивления ферромагнитных (стальных) заземлителей от амплитуды и частоты протекающего по ним тока, которая в свою очередь обусловлена зависимостью $\mu = f(H)$ магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля [10]. На рис. 10, 11 изображены графики зависимостей $R_G = f(I_S)$ и $U_C = f(I_S)$ соответственно. Анализ результатов, полученных для сеток ЗУ различной площади, показывает, что сопротивление ЗУ зависит от тока КЗ на шинах ОРУ лишь при токах менее 10 кА. Зависимость $R_G = f(I_S)$ является убывающей, а зависимость $U_C = f(I_S)$ – возрастающей. При увеличении тока КЗ на шинах ОРУ в 11 раз сопротивление ЗУ уменьшается в 1,11 раз, а напряжение U_C увеличивается в 19,32 раз. Зависимость $R_G = f(I_S)$ носит нелинейный характер, поэтому с достоверностью $R^2 = 1$ аппроксимируется полиномом четвертой степени. Зависимость $U_C = f(I_S)$ носит практически линейный характер, поэтому с достоверностью не ниже $R^2 = 0,999$ аппроксимируется уравнением прямой.

На рис. 12 изображён график зависимости $U_C = f(k_\ell)$, анализ которого показывает, что U_C существенно зависит от конструктивного коэффициента. Зависимость $U_C = f(k_\ell)$ является возрастающей. При увеличении коэффициента k_ℓ в 1,8 раз напряжение U_C увеличивается в 1,17 раз. Зависимость носит практически линейный характер, поэтому с достоверностью не ниже $R^2 = 0,98$ аппроксимируется уравнением прямой.

На рис. 13, 14 изображены графики зависимостей $R_G = f(t_H)$ и $U_C = f(t_H)$ соответственно, анализ которых показывает, что оба параметра практически не зависят от глубины расположения горизонтальных заземлителей в диапазоне глубин от 0,4 м до 1,4 м. Зависимость $R_G = f(t_H)$ является убывающей, а зависимость $U_C = f(t_H)$ – возрастающей. При увеличении глубины горизонтальных заземлителей в 3,5 раз сопротивление ЗУ уменьшается лишь на 1,74 %, а напряжение U_C увеличивается лишь на 3,58 %.

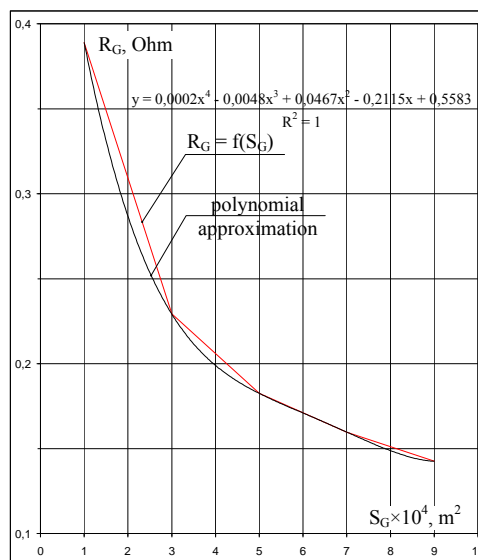


Рис. 2. Зависимость $R_G = f(S_G)$

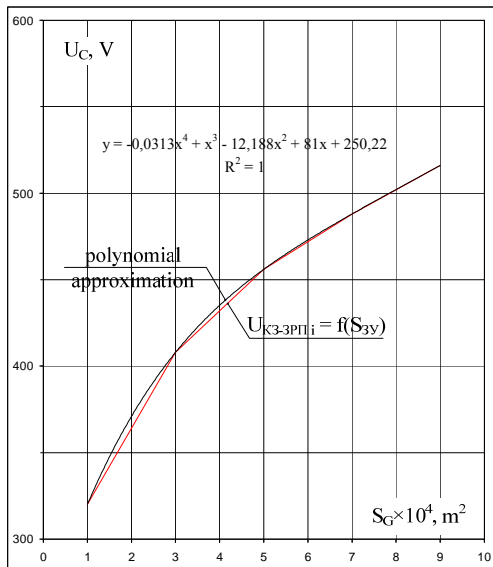


Рис. 3. Зависимость $U_C = f(S_G)$

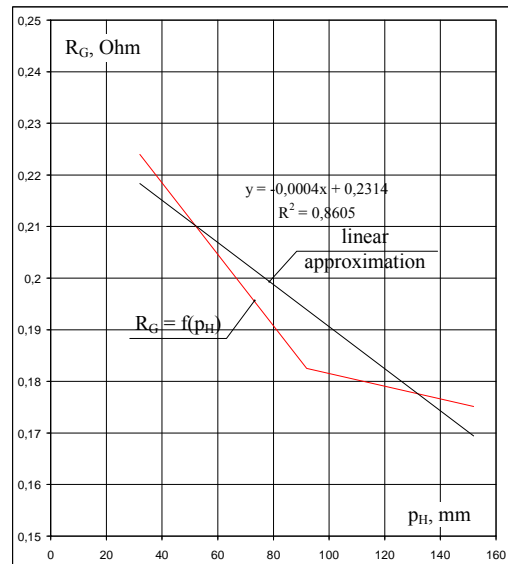


Рис. 6. Зависимость $R_G = f(\rho_H)$

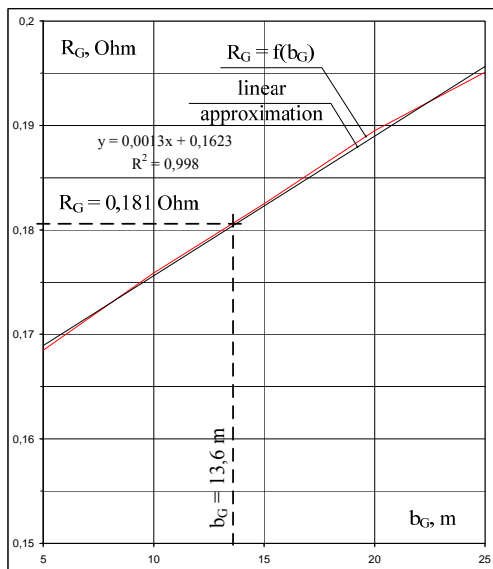


Рис. 4. Зависимость $R_G = f(b_G)$

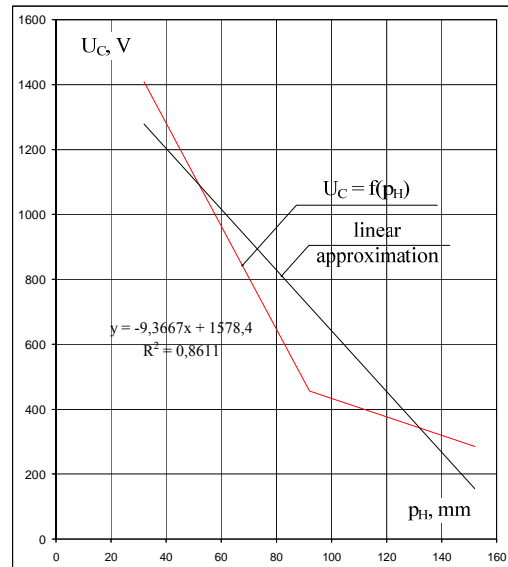


Рис. 7. Зависимость $U_C = f(\rho_H)$

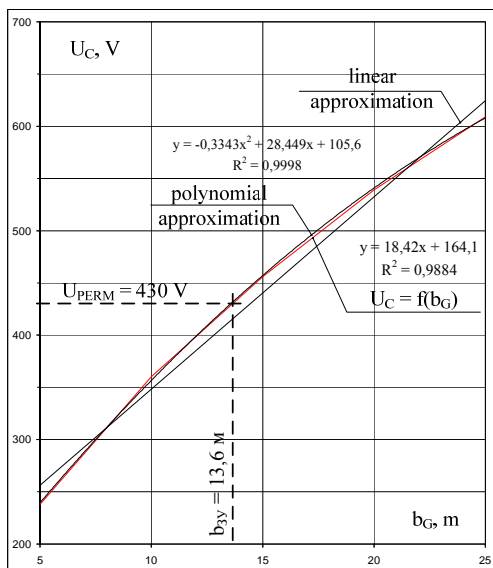


Рис. 5. Зависимость $U_C = f(b_G)$

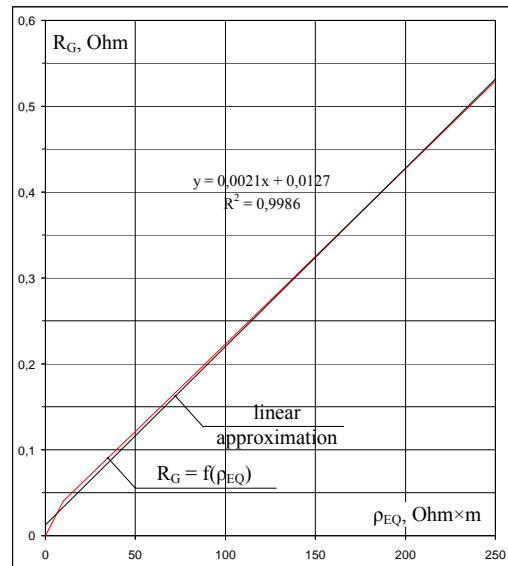


Рис. 8. Зависимость $R_G = f(\rho_{EQ})$

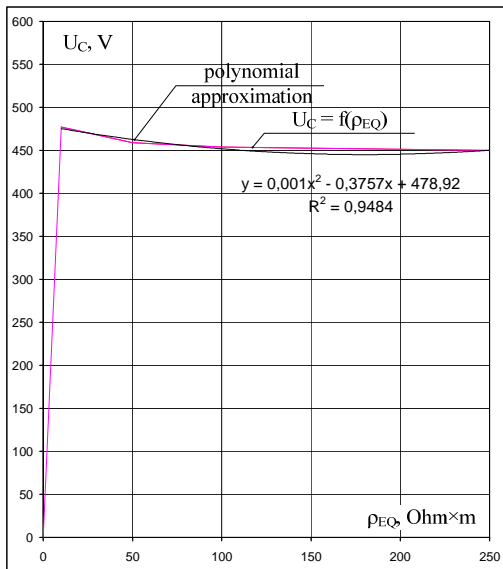


Рис. 9. Зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$

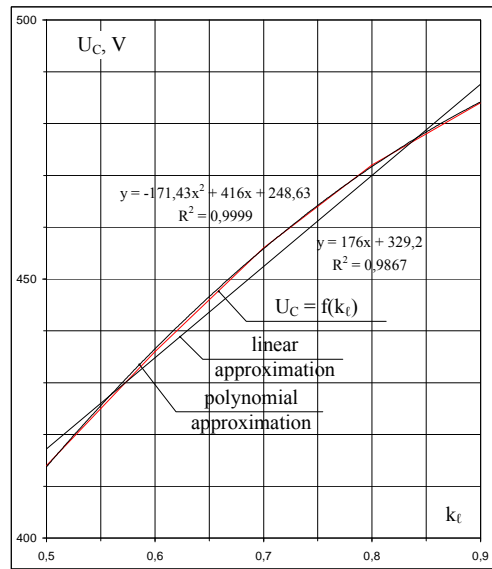


Рис. 12. Зависимость $U_C = f(k_t)$

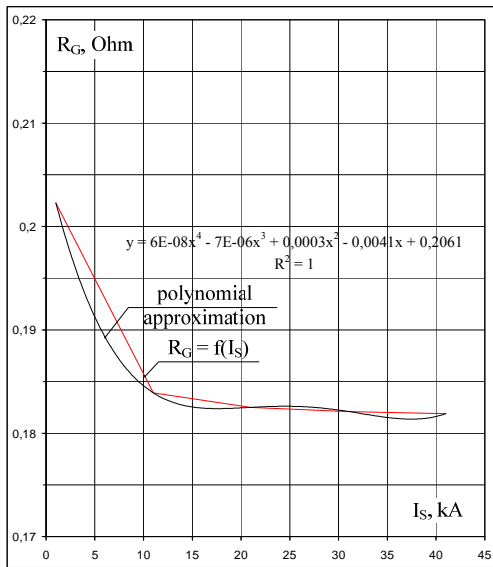


Рис. 10. Зависимость $R_G = f(I_s)$

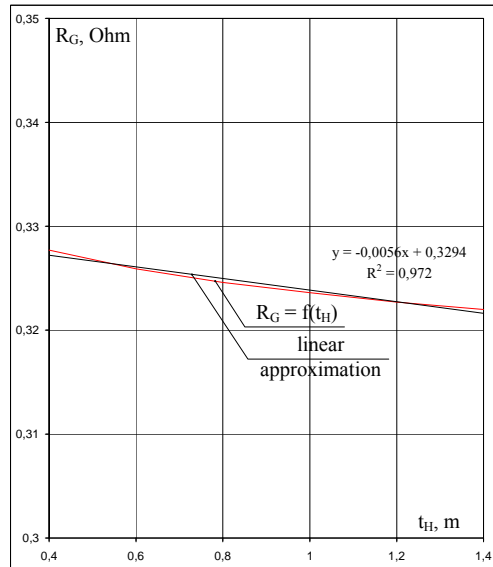


Рис. 13. Зависимость $R_G = f(t_H)$

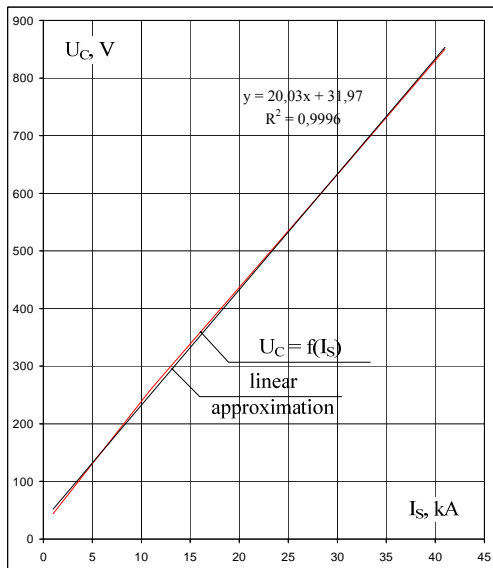


Рис. 11. Зависимость $U_C = f(I_s)$

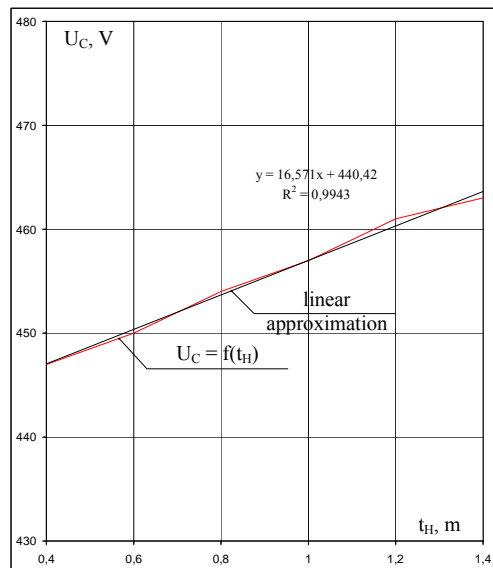


Рис. 14. Зависимость $U_C = f(t_H)$

На основании результатов проведенных исследований можно сформулировать основные положения методики проектирования конструктивного выполнения ЗУ подстанций с распредустройствами 330(220) кВ, которая направлена на обеспечение ЭМС токовых цепей:

- при проектировании ЗУ задаются исходными данными, которыми являются следующие параметры: S_G , ρ_{EQ} , I_S , k_ℓ , а также $U_{C,relay}$. Площадь ЗУ (S_G) определяется типом схемы первичных цепей и компоновкой распредустройств. Эквивалентное удельное сопротивление грунта (ρ_{EQ}) определяется параметрами геологической структуры грунта в месте расположения проектируемого ЗУ и определяется на этапе предпроектных изысканий. Ток КЗ на шинах ОРУ (I_S) определяется удаленностью подстанции от источников энергии. Конструктивный коэффициент (k_ℓ) определяется диагональю ЗУ и расстоянием от ТТ до здания ЗРП. Напряжение U_{PERM} определяется параметрами релейных защит (марка и длина кабеля токовых цепей и тип реле тока);

- далее необходимо определить размер ячейки сетки ЗУ (b_G) и периметр поперечного сечения горизонтальных заземлителей (p_H). Для этого необходимо построить графики зависимости $U_C = f(S_G, b_G, p_H, \rho_{EQ}, I_S, k_\ell)$ по заданным значениям S_G , ρ_{EQ} , I_S , k_ℓ при вариации b_G , приняв p_H из стандартного ряда стального проката (например, полоса 6×40 мм², у которой $p_H = 92$ мм). Построив график, определяем размер ячейки сетки ЗУ из условия $U_C \leq U_{C,relay}$. Так, например, для рассмотренного в работе набора факторов при $U_{C,relay} = 430$ В (см. рис. 5) размер ячейки сетки не должен превышать $b_G \leq 13,6$ м;

- затем необходимо определить R_G по заданным значениям параметров S_G , ρ_{EQ} , I_S и полученным значениям параметров b_G и p_H , подставив их в зависимость $R_G = f(S_G, b_G, p_H, \rho_{EQ}, I_S)$. Так, например, для рассмотренного в работе набора факторов и полученных значений $p_H = 92$ мм и $b_G = 13,6$ м, сопротивление R_G составит 0,181 Ом (см. рис. 4);

- далее следует определить напряжение на ЗУ ($U_G = I_S \cdot R_G$) по заданному значению I_S и полученному значению R_G . Так, например, для заданного тока КЗ на шинах ОРУ $I_S = 21$ кА и полученного значения $R_G = 0,181$ Ом, напряжение U_G составит 3801 В, что не превышает допустимого значения (см. п. 1.7.104 и п. 1.7.105 ПУЭ:2017), равного 5000 В;

- если напряжение на ЗУ окажется больше допустимого значения, то следует уменьшить значение b_G и/или увеличить значение p_H , после чего выполнить перерасчет значений R_G и U_G ;

- значения параметров S_G , b_G и p_H следует использовать для составления графической части проекта ЗУ и расчета стоимости горизонтальных заземлителей.

Выводы.

1. В работе предложено дополнить существующую методику проектирования ЗУ подстанций 330(220 кВ) ещё тремя критериями, направленными на обеспечение электромагнитной совместимости токовых цепей:

- предотвращение пробоя изоляции кабелей токовых цепей импульсными напряжениями при КЗ на шинах ОРУ или ударах молнии;

- предотвращение пробоя изоляции кабелей токовых цепей напряжениями промышленной частоты при КЗ на шинах ОРУ;

- предотвращение ложного срабатывания релейных защит от низкочастотных напряжений при КЗ на шинах ОРУ.

2. В работе проведены однофакторные эксперименты и получены зависимости сопротивления ЗУ и напряжения между расчётными точками от семи факторов: площадь ЗУ (S_G); размер ячейки сетки ЗУ (b_G); периметр поперечного сечения горизонтальных заземлителей (p_H); эквивалентное удельное сопротивление грунта (ρ_{EQ}); ток КЗ на шинах ОРУ (I_S); конструктивный коэффициент (k_ℓ); глубина расположения горизонтальных заземлителей (t_H). Показано следующее:

- зависимости $R_G = f(S_G)$, $R_G = f(p_H)$, $U_C = f(p_H)$, $R_G = f(I_S)$, $R_G = f(t_H)$ являются убывающими, а зависимости $U_C = f(S_G)$, $R_G = f(b_G)$, $U_C = f(b_G)$, $R_G = f(\rho_{EQ})$, $U_C = f(I_S)$, $U_C = f(k_\ell)$, $U_C = f(t_H)$ – возрастающими;

- зависимости $R_G = f(S_G)$, $U_C = f(S_G)$, $R_G = f(I_S)$ носят нелинейный характер, поэтому аппроксимируются полиномами четвертой степени;

- зависимости $R_G = f(b_G)$ и $U_C = f(b_G)$, $R_G = f(p_H)$, $U_C = f(p_H)$, $R_G = f(\rho_{EQ})$, $U_C = f(I_S)$, $U_C = f(k_\ell)$, $R_G = f(t_H)$, $U_C = f(t_H)$ носят линейный (или близкий к линейному) характер, поэтому аппроксимируются уравнениями прямой;

- зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$ является нелинейной и имеет точку экстремума – максимум, поэтому область значений ρ_{EQ} следует разделить на участки, на каждом из которых зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$ можно аппроксимировать уравнением прямой;

- параметры R_G и U_C пренебрежимо мало зависят от t_H в рассмотренном диапазоне глубин от 0,4 м до 1,4 м.

3. В работе сформулированы основные положения методики проектирования ЗУ с равномерной сеткой по критерию предотвращения ложного срабатывания релейных защит с примером её использования.

4. Для создания инженерной методики проектирования конструктивного выполнения ЗУ, которая направлена на обеспечение ЭМС токовых цепей, в дальнейших исследованиях необходимо провести многофакторные эксперименты с целью определения зависимости сопротивления ЗУ и напряжения U_C от параметров S_G ; b_G ; p_H ; ρ_{EQ} ; I_S ; k_ℓ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міністерство енергетики України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
2. Руденко С.С., Коліушко Д.Г., Кашеев О.В. Визначення напрямку реконструкції заземлювального пристрою // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №2. – С. 57-61. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.09.
3. IEC/TS 61000-6-5 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-5: Generic standards – Immunity for power station and substation environments.
4. Воронина З.А., Глебов О.Ю., Колиушко Г.М. Определение уровней электромагнитных помех в кабелях трансформаторов тока при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – №16. – С. 44-59.

5. Забезпечення енергетичної безпеки України шляхом підвищення надійності роботи стратегічних енергооб'єктів в нормальному та аварійних режимах. Звіт про НДР (промисловий, № держреєстрації 0117U000534) / Керівник М.І. Баранов. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017.
6. СТО 56947007-29.240.044-2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 147 с.
7. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
8. Колюшко Д.Г. Интерфейс программного комплекса для расчета заземляющих устройств электроэнергообъектов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2007. – №34. – С. 71-79.
9. Линк И.Ю., Колюшко Д.Г., Колюшко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – 2003. – Т.25. – №2. – С. 99-111.
10. Найфельд Н.Р. Заземление, защитные меры электробезопасности. Изд.4-е. – М.: Энергия, 1971. – 312 с.

REFERENCES

1. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations]. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
2. Rudenko S.S., Koliushko D.G., Kashcheyev O.V. Determination of direction to reconstruction of grounding system. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.2, pp. 57-61. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.09.
3. IEC/TS 61000-6-5 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-5: Generic standards – Immunity for power station and substation environments.
4. Voronina Z.A., Glebov O.Yu., Koliushko G.M. Determination of the levels of electromagnetic interference in the cables of current transformers with short-circuit on substation buses in order to ensure electromagnetic compatibility. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2011, no.16, pp. 44-59. (Rus).
5. Baranov M.I. *Zabezpechennya enerhetychnoyi bezpeky Ukrayiny shlyakhom pidvyshchennya nadiynosti roboty stratehichnykh enerhoobyektiv v normalnomu ta avariynnykh rezhymakh. Zvit pro NDR (promislyv; № derzhreestratsiyi 0117U000534)* [Ukraine's energy security by increasing the reliability of the operation of strategic energy facilities in normal and emergency modes. Report on research work. State registration no.0117U000534]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2017. (Ukr).
6. СТО 56947007-29.240.044-2010. *Metodicheskie ukazaniya po obespecheniju elektromagnitnoj sovmestimosti na ob'ektah elektros-etevogo hozjajstva* [Methodical instructions on ensuring electromagnetic compatibility on objects of electronetwork economy]. Moscow, JSC FGC UES Publ., 2010. 147 p. (Rus).
7. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. *Zazemlyayushchie ustroystva electroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
8. Koliushko D.G. The interface of the program complex for Grounding system calculating of electric power objects. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2007, no.34, pp. 71-79. (Rus).
9. 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).
10. Nayfeld N.R. *Zazemleniye, zashchitnyye mery elektrobezopasnosti*. [Earthing, protective measures of electro-safety] Moscow, Energiya Publ., 1971. 312 p. (Rus).

Поступила (received) 11.07.2018

Глебов Олег Юрьевич¹,
 Колюшко Денис Георгиевич², к.т.н., с.н.с.,
 Колюшко Георгий Михайлович¹, к.т.н., с.н.с.,
 Еремеева Екатерина Петровна¹,

¹ НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
 тел/phone +380 57 7076671, e-mail: nio5_molniya @ukr.net

² Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +380 57 7076671, e-mail: nio5_molniya @ukr.net

O.Yu. Glebov¹, D.G. Koliushko², G.M. Koliushko³, E.P. Eremeeva⁴

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»
 National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

On the issue of design of grounding systems of 330(220) kV substations to ensure the electromagnetic compatibility of secondary circuits.

Purpose. The purpose of the work is to develop the fundamentals of the design methodology of grounding system design of substations with open switchgears 330 (220) kV, which is aimed at ensuring electromagnetic compatibility of secondary circuits of current transformers. **Methodology.** To carry out the research, the provisions of the theory of experiment planning, the theory of electrical circuits, mathematical modeling in the package Grounding 1.0 and Microsoft Excel were used.

Results. During the one-factor experiments, the dependencies of the grounding system resistance and the voltage between the calculated points on the grounding system area, the size of the grid cell, the perimeter of the grounding system horizontal electrodes cross-section, the equivalent soil resistivity, the short-circuit current and the design factor were obtained. It is shown that the grounding system resistance and the voltage between the calculated points are practically independent of the depth of the horizontal electrodes in the depth range from 0.4 m to 1.4 m. **Originality.** The paper formulated three criteria for grounding system designing of substations 330 (220) kV, aimed at ensuring electromagnetic compatibility of secondary circuits. **Practical value.** The fundamentals of the methodology for grounding system designing are formulated according to the criterion of preventing false triggering of relay protections in emergency modes. References 10, tables 2, figures 14.

Key words: grounding system, substations, electromagnetic compatibility, secondary circuits, grounding system resistance.