

Д.Г. Коліушко, С.С. Руденко

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ НОРМОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ ТРИШАРОВОЇ МОДЕЛІ ҐРУНТУ

*Проведено аналіз можливості застосування розробленої методики визначення нормованих параметрів заземлювального пристрою, розташованого в тришаровому ґрунті, шляхом порівняння результатів експериментальних вимірів з розрахунковими значеннями для діючих високовольтних підстанцій України. Показано, що середня похибка розрахунку значення опору заземлювального пристрою знизилася з 18 % для двошарової моделі ґрунту до менше 10 % для тришарової моделі. Порівняння розрахункових та експериментально визначених значень напруги дотику показало високу ступінь їх співпадіння. Бібл. 10, табл. 4, рис. 3.*

*Ключові слова:* заземлювальний пристрій, опір, напруга дотику, тришарова модель ґрунту.

*Выполнен анализ возможности применения разработанной методики определения нормируемых параметров заземляющего устройства, расположенного в трехслойном грунте, путем сравнения результатов экспериментальных измерений с расчетными значениями для действующих высоковольтных подстанций Украины. Показано, что средняя погрешность определения значения сопротивления заземляющего устройства снизилась с 18 % для двухслойной модели до менее 10 % для трехслойной модели. Сравнение расчетных и экспериментально определенных значений напряжения прикосновения показало высокую степень их совпадения. Библ. 10, табл. 4, рис. 3.*

*Ключевые слова:* заземляющее устройство, сопротивление, напряжение прикосновения, трехслойная модель грунта.

**Постановка проблеми.** Визначення значень нормованих параметрів (НП) заземлювальних пристроїв (ЗП) діючих електричних станцій та підстанцій, а саме напруги дотику, напруги на ЗП та опору ЗП [1, 2] експериментальним шляхом, як правило, призводить до суттєвих труднощів (відсутність вільної ділянки для виносу вимірювальних електродів на достатню відстань, комунікації, які виходять за межі електроустановки, неможливість виконання вимірів при реальному струмі замикання на землю). Тому нормативними документами [2] передбачається можливість використання експериментально-розрахункових методів [3-7]. Основним способом контролю стану ЗП наразі є електромагнітна діагностика (ЕМД), яка включає в себе експериментальний і розрахунковий етапи, а також етап розробки рекомендацій для приведення ЗП у відповідність до вимог нормативних документів. На першому етапі визначається реальна схема розташування ЗП, корозійний стан та переріз горизонтальних заземлювачів (ГЗ), проводиться вертикальне електричне зондування та вимірюються електричні параметри ЗП для подальшого розрахунку. На другому етапі проводиться інтерпретація результатів ВЕЗ з метою визначення структури та питомого електричного опору (ПЕО) і товщини шарів ґрунту, та розрахунок НП ЗП в режимі однофазного замикання на землю. На даний час найбільш розповсюдженими для розрахунку НП є програми, які базуються на математичній моделі ЗП, розташованого у двошаровому ґрунті [6].

В [8], на основі статистичної бази даних з дослідження понад 600 енергооб'єктів України, показано, що ґрунт в місцях їх розташування в більшості випадків має тришарову структуру (72,7 %), іноді двошарову (близько 8,7 %) або ж має понад три шари (близько 19 %). Виходячи з цього, з метою підвищення точності розрахунку, авторами була запропонована математична модель нееквіпотенційного ЗП, розташованого в тришаровому ґрунті, [9] та розроблена нова методика розрахунку на її основі.

Однак розроблена методика розрахунку НП ЗП на основі тришарової моделі ґрунту не має експериментального обґрунтування, що обмежує її практичне застосування.

**Метою роботи** є експериментальне обґрунтування методики розрахунку нормованих параметрів заземлювальних пристроїв на основі тришарової моделі ґрунту.

**Матеріали дослідження.** Перевірка методики розрахунку проводилася шляхом порівняння результатів експериментальних досліджень для діючих високовольтних енергооб'єктів України з отриманими розрахунковими значеннями.

Для реалізації методики розрахунку була розроблена тестова версія програмного комплексу «LiGro» з визначення НП ЗП діючих електричних станцій та підстанцій при тришаровій структурі ґрунту. Від існуючих програм [3-7] вказаний програмний комплекс відрізняє:

- врахування тришарової структури ґрунту при збереженні тривалості розрахунку на рівні двошарових моделей;

- розрахунок електричного поля відбувається на основі рішення задачі про потенціал поля точкового джерела струму у тришаровому напівпросторі;

- врахування нееквіпотенційності заземлювачів;

- можливість довільної орієнтації заземлювача.

Перевірку відповідності методики розрахунку експериментальним даним виконаємо за критеріями:

- порівняння експериментально визначеного та розрахованого значення опору ЗП ( $R_G$ );

- порівняння експериментально визначеного та розрахованого значення напруги дотику на декількох обраних одиницях обладнання підстанції ( $U_t$ ).

**Аналіз результатів визначення опору ЗП.** Для проведення аналізу була використана база даних з результатів ЕМД стану ЗП 70 електричних підстанцій класом напруги 35 кВ, розташованих на півночі Укра-

їни. Вибір цієї групи енергооб'єктів пояснюється наступним чином:

- вимірювання проводилися в однакових погодних умовах;
- підстанції розташовані на відкритій місцевості й не мають гальванічного зв'язку з промисловими об'єктами (що забезпечує точність вимірювань), крім ПС №12 (див. табл. 1);
- наявність вільної від підземних комунікацій ділянки навколо об'єктів, що дозволило отримати криві ВЕЗ з достатньою точністю інтерпретації (відхилення розрахункових кривих ВЕЗ від експериментальних значень не перевищувало 10 %);
- ґрунти місцевості, де розташовані об'єкти мають широкий діапазон значень ПЕО й дозволяють оцінити всі типи ґрунтів (наприклад, мінімальне й максимальне значення ПЕО першого шару лежить в діапазоні від 17 Ом·м до 5690 Ом·м).

Таблиця 1  
Результати експериментального та розрахункового визначення  $R_G$

Номер ПС	$R_{Ge}$ , Ом	$R_{G2}$ , Ом	$R_{G3}$ , Ом	Номер ПС	$R_{Ge}$ , Ом	$R_{G2}$ , Ом	$R_{G3}$ , Ом
№1	0,620	0,5953	0,644	№36	5,600	6,133	5,527
№2	0,700	0,749	0,7349	№37	1,170	1,236	1,346
№3	1,270	2,084	1,530	№38	1,000	0,7291	0,7756
№4	0,750	0,7149	0,684	№39	0,560	0,5375	0,5917
№5	1,160	1,304	1,218	№40	1,000	0,8848	0,9036
№6	0,990	0,9278	0,9138	№41	1,150	1,250	1,227
№7	0,955	1,152	1,252	№42	9,700	9,000	8,372
№8	0,600	0,5419	0,6788	№43	1,330	2,428	1,467
№9	0,814	0,9386	0,9175	№44	2,600	2,918	2,662
№10	1,060	1,607	1,396	№45	0,760	0,8873	0,898
№11	1,120	1,244	1,206	№46	0,898	1,29	0,9515
№12	0,394	0,6461	0,6448	№47	1,790	1,862	1,792
№13	2,370	2,318	2,465	№48	1,250	1,796	1,491
№14	0,960	0,5622	0,764	№49	0,500	0,523	0,5225
№15	0,710	0,6598	0,5931	№50	2,000	2,526	2,524
№16	0,870	0,4934	0,7422	№51	0,530	0,7412	0,8197
№17	0,697	0,6848	0,7046	№52	0,622	0,541	0,6842
№18	0,873	0,7781	0,828	№53	0,990	0,8837	0,8393
№19	0,775	0,882	0,849	№54	0,670	0,8287	0,9077
№20	0,600	0,6185	0,6017	№55	1,100	0,8556	0,9265
№21	7,200	8,216	7,543	№56	0,950	1,575	1,032
№22	1,200	1,459	1,316	№57	0,630	0,6615	0,63
№23	0,840	1,579	0,961	№58	0,441	0,5143	0,4982
№24	1,088	1,398	1,233	№59	3,810	3,969	3,802
№25	0,790	0,7408	0,7919	№60	2,800	2,840	2,833
№26	0,875	1,024	1,111	№61	1,740	1,932	1,731
№27	0,605	0,5522	0,560	№62	10,10	9,591	10,1
№28	1,370	1,661	1,372	№63	0,680	0,7406	0,694
№29	0,900	0,9658	0,9637	№64	0,870	0,9517	1,006
№30	2,600	2,25	2,746	№65	1,060	1,453	1,136
№31	0,300	0,3829	0,327	№66	2,236	2,171	2,173
№32	0,500	0,517	0,4815	№59	0,530	0,5849	0,64
№33	21,10	17,66	23,66	№68	0,986	1,28	1,182
№34	0,610	0,6879	0,6903	№69	0,610	0,7621	0,7084
№35	1,290	1,073	1,220	№70	0,560	0,5695	0,5713

При виконанні досліджень було порівняно експериментально виміряні значення опору ЗП  $R_{Ge}$  з отриманими розрахунковим способом  $R_{G2}$  та  $R_{G3}$  за допомогою методики визначення НП ЗП, розташова-

ного в двошаровому ґрунті, (програмний комплекс «Grounding 1.0») [6], та розробленої авторами в [9] для ЗП, розташованого в тришаровому ґрунті (програмний комплекс «LiGro»). В табл. 1 зведено результати вимірів  $R_{Ge}$ , розрахунку двошаровою  $R_{G2}$  та тришаровою моделлю  $R_{G3}$  відповідно.

Слід відмітити, що для досить значної кількості підстанцій (28,5 %) характерним виявився чотиришаровий ґрунт і для виконання розрахунків довелося застосовувати методику еквівалентування з приведенням існуючої структури ґрунту до розрахункових дво- та тришарових моделей. Зокрема це справедливо для підстанцій №7 – №10, №24 – №28, №37, №52 – №61 (див. табл. 1). ЗП підстанції №50 розташовано у п'ятишаровому ґрунті. Для всіх інших енергооб'єктів характерною є тришарова структура ґрунту, тому при розрахунку за допомогою «LiGro» використовувалась вихідна структура ґрунту, а при моделюванні за допомогою «Grounding 1.0» в усіх випадках застосовувалась методику еквівалентування.

Як видно з результатів, наведених в табл. 1 для більшості випадків (71 %) похибка розрахунку за допомогою моделі з тришаровою структурою ґрунту програмного комплексу «LiGro»  $\delta_3$  є меншою у порівнянні з похибкою  $\delta_2$  (розрахунок за допомогою двошарової моделі «Grounding 1.0»). Крім того, слід відзначити, що для тришарової моделі (близько 74 %) похибка є додатною величиною. Це пов'язано з тим, що при моделюванні не було враховано наявність природних заземлювачів (фундаментів обладнання та тросових блискавковідводів, приєднання ЗП до зовнішньої металевої огорожі тощо).

Проте для трьох підстанцій фіксується значна похибка ( $\delta_3 > 35\%$ ) при розрахунку опору ЗП. Тому для перевірки результатів визначення опору ЗП (а саме модуля значення похибки  $\delta_3$ ) на наявність у вибірці випадкових значень, що різко відрізняються, було використано критерій Граббса [10]. При цьому рівень статистичної значущості для визначення табличного значення критерію становив 0,05.

В результаті аналізу поетапно з об'єму вибірки були виключені результати визначення опору ЗП для підстанцій №12, №51 та №54.

З фізичної точки зору значне відхилення розрахункових та експериментальних даних для підстанції №54 пояснюється впливом методичної похибки, яка виникла при використанні методики еквівалентування для приведення чотиришарової структури ґрунту до розрахункової тришарової. А в двох інших випадках – виносом потенціалу за межі електроустановки: для підстанції №12 по кабелям, а для підстанції №51 по двом тросовим блискавковідводам, які в свою чергу приєднані до металічних опор повітряних ліній класом напруги 35 кВ й є природними додатковими заземлювачами.

Результати аналізу для вибірки з 67 об'єктів (без врахування виключених підстанцій) наведено в табл. 2.

Як видно з табл. 2, методику розрахунку нееквівалентного ЗП, розташованого у тришаровому ґрунті, й реалізована у вигляді програмного комплексу «LiGro», має значно меншу середню похибку (в 1,8 рази) при визначенні опору ЗП у порівнянні з двошаровою моделлю [6].

Таблиця 2

Порівняння точності визначення опору ЗП  
для 67 підстанцій

Тип моделі	Середня похибка $\delta$ , %	Кількість підстанцій, які потрапили в діапазон похибки, шт.			
		$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$
Двошарова «Grounding 1.0»	18,22	14	28	41	47
Тришарова «LiGro»	9,91	22	40	50	59

Також для розробленої методики розрахунку НП ЗП, розташованого в тришаровому ґрунті, фіксується більша кількість потраплянь експериментально визначених значень в припустимі діапазони похибки (в середньому на 31 %). Особливо це характерно для діапазонів  $\pm 5\%$  та  $\pm 10\%$ , де кількість таких потраплянь збільшилась на 57 % та на 42 % відповідно.

**Аналіз результатів визначення напруги дотику.** Перевірка базувалася на порівнянні значень напруги дотику на декількох обраних одиницях обладнання підстанцій при імітації однофазного замикання на землю. Аналіз проведено на трьох підстанціях класом напруги 110(150) кВ. При цьому було використано традиційну методику набору експериментальних даних для оцінки адекватності математичних моделей ЗП, котра наведена в [6]. Підстанції були обрані таким чином, щоб кожна з них мала один з найбільш поширених типів ґрунту: Q, H та K, які становлять понад 99 % всіх тришарових ґрунтів України в місцях розташування енергооб'єктів. Ґрунт типу A не розглядався, так як він зустрічається менше ніж в 1 % випадків [8].

На рис. 1-3 наведено схеми розташування ЗП для вказаних підстанцій. Товстою чорною лінією позначено горизонтальні заземлювачі, точками – заземлювальні провідники, що з'єднують обладнання з заземлювачем, а також показано назви обладнання на якому проводилося вимірювання QS-1–QS-6 та силові трансформатори 1Т та 2Т.

Результатом розрахунку є максимальне і мінімальне значення напруги дотику по радіусу 0,8 м навколо точки дослідження.

Оцінка результатів розрахунку проводилася наступним чином: експериментально виміряне значення напруги дотику  $U_t$  мало опинитися в інтервалі між мінімальним і максимальним розрахунковим значенням для відповідної точки. В табл. 3 наведено результати порівняння  $U_t$  для роз'єднувачів підстанцій ПС №1, ПС №2 та ПС №3. Опір основи (пластини)  $R_o$  – експериментально визначене значення згідно з [6], яке необхідне для розрахунку та є власною характеристикою для кожної точки:

$$U_t = \left| \varphi_{k0} - \varphi_{0,8} \right| \frac{R_{body}}{R_{body} + R_o}, \quad (1)$$

де  $\varphi_{k0}$  – потенціал на  $k$ -й одиниці обладнання,  $\varphi_{0,8}$  – потенціал на поверхні ґрунту, визначений за результатами обчислень, по радіусу 0,8 м навколо  $k$ -ої одиниці обладнання;  $R_{body}$  – опір тіла людини 1 кОм [6].

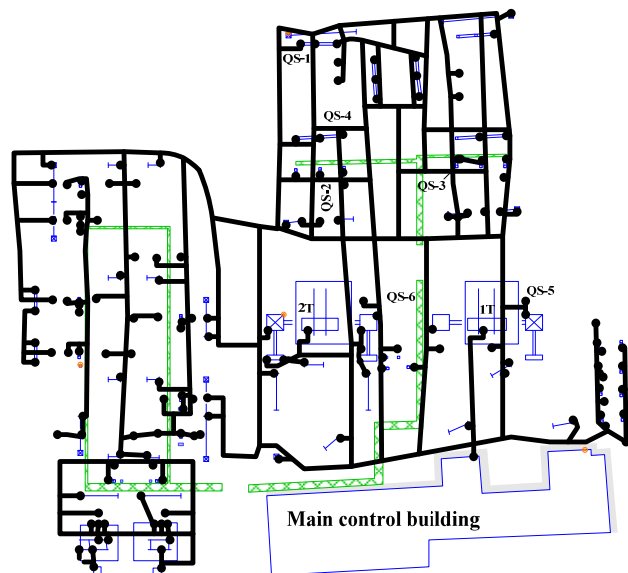


Рис. 1. Схема ЗП діючої підстанції ПС №1 класом напруги 150 кВ в центральній частині України

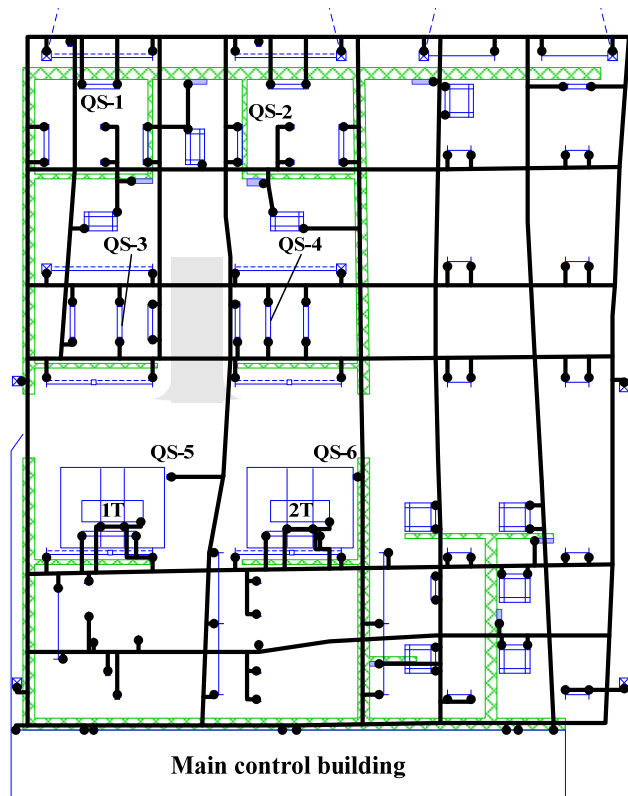


Рис. 2. Схема ЗП діючої підстанції ПС №2 класом напруги 110 кВ в центральній частині України

Вихідні дані для розрахунку (параметри заземлювача, питомий електричний опір шарів ґрунту  $\rho$  та їх товщини  $h$ , та величина вимірювального струму) наведені в табл. 4.

Для ПС №1 та ПС №3 експериментально визначене значення напруги дотику для всіх точок (тобто в 100 % випадків) лежить в розрахунковому діапазоні.

Для ПС №2 експериментально визначене значення напруги дотику для 5 точок з 6 (тобто в 83,3 % випадків) лежить в розрахунковому діапазоні, а для обладнання QS-4 відхилення найближчого розрахункового значення від  $U_t$  складає – 20,8 %. Для вказаної

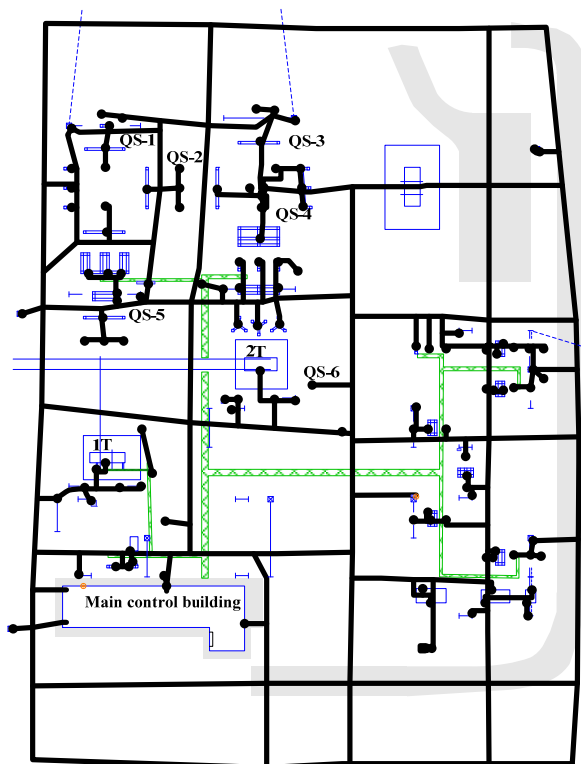


Рис. 3. Схема ЗП діючої підстанції ПС №3 класом напруги 150 кВ на півдні України

Таблиця 3  
Порівняння експериментального та розрахункового значення напруги дотику

Назва об'єкту	Умовна назва об'єкта	Результати експерименту		Результати розрахунку		Потрапляння в діапазон визначення $U_t$
		$U_b$ , мВ	$R_{os}$ , Ом	$U_{t \max}$ , мВ	$U_{t \min}$ , мВ	
ПС №1	QS-1	20	273	21,40	16,10	+
	QS-2	19	92	21,40	18,40	+
	QS-3	30	130	30,50	25,40	+
	QS-4	18	213	19,90	14,00	+
	QS-5	35	162	51,35	32,50	+
	QS-6	42	114	58,00	41,90	+
ПС №2	QS-1	33	38	34,6	19,5	+
	QS-2	17	42	24,0	16,2	+
	QS-3	16	61	20,3	15,2	+
	QS-4	13	87	21,5	15,7	-
	QS-5	24	123	31,1	23,1	+
	QS-6	38	116	61,4	36,5	+
ПС №3	QS-1	95	266	97,5	78,13	+
	QS-2	117	239	120,1	85,20	+
	QS-3	99	315	99,3	65,60	+
	QS-4	190	252	238,4	129,70	+
	QS-5	60	298	70,8	56,60	+
	QS-6	107	1169	259,0	106,80	+

Таблиця 4  
Вихідні дані для розрахунку напруги дотику

Параметр:	ПС №1	ПС №2	ПС №3
Поперечний переріз ГЗ, мм	штаба 20×6	штаба 40×4	пруток Ø16
$\rho_1$ , Ом·м	92,5	42	150
$\rho_2$ , Ом·м	61	3,3	43
$\rho_3$ , Ом·м	13	22	12
$h_1$ , м	0,9	0,3	0,3
$h_2$ , м	3,2	5,3	9,8
Вимірювальний струм $I_t$ , А	4,76	4,76	4,76

точки таке відхилення можна пояснити відмінністю поперечного перерізу локального заземлювача, його корозійним зносом або складною трасою пролягання заземлювача (глибина залягання є змінною, а сам заземлювач має не пряму, а довільну форму на відстані менше 0,2 м, що неможливо визначити). Для врахування цього необхідно проводити додаткові дослідження з внесенням відповідних результатів у розрахункову модель. Проте близькість експериментального значення до розрахункового для цієї точки та потрапляння в розрахунковий діапазон для інших точок дає змогу зробити висновок про адекватність моделі для ЗП даної підстанції.

Таким чином, загальне потрапляння у розрахунковий діапазон спостерігається у 17 точок з 18, що становить 94,4 %.

Результати виконаних досліджень підтверджують адекватність розробленої методики розрахунку ЗП на основі тришарової моделі ґрунту, експериментальним значенням напруги дотику, отриманим при імітації однофазного замикання на землю на реальних ЗП, які знаходяться в експлуатації.

#### Висновки.

1. Обґрунтована адекватність методики розрахунку нормованих параметрів заземлювального пристрою на основі тришарової моделі ґрунту шляхом порівняння результатів експериментальних досліджень для діючих високовольтних енергооб'єктів України з результатами розрахунку.

2. Показано, що розроблена методика розрахунку дозволяє підвищити точність визначення нормованих параметрів заземлювальних пристроїв. При цьому середня похибка визначення опору заземлювальних пристроїв не перевищує 10 %, а при визначенні напруги дотику фіксується потрапляння у розрахунковий діапазон для 94 % експериментальних точок.

3. Отримані результати дозволяють використовувати розроблену методику розрахунку для створення програмних засобів з визначення нормованих параметрів заземлювальних пристроїв довільної конфігурації, розташованого в тришаровому ґрунті.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- IEEE Standard 81-2012. IEEE Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system. Amended by 2012-12-28. – New York: IEEE, 2012. – 86 p. doi: 10.1109/ieeestd.2012.6392181.
- Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 – [Чинний від 2010-03-29]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
- Tabatabaei N.M., Mortezaei S.R. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software // International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE). – 2010. – iss.2. – vol.2. – no.1. – pp. 45-49.
- Turri R., Andolfato R., Cuccarollo D. A numerical simulation tool for cathodic protection and electromagnetic interference analysis // NACE Milano Italia Section – Conference & Expo 2016 «A European event for the Corrosion Prevention of Oil&Gas industry». – 17 p. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/303685228\\_A\\_NUMERICAL\\_SIMULATION\\_TOOL\\_FOR\\_CATHODIC\\_PROTECTION\\_AND\\_ELECTROMAGNETIC\\_INTERFERENCE\\_ANALYSIS](https://www.researchgate.net/publication/303685228_A_NUMERICAL_SIMULATION_TOOL_FOR_CATHODIC_PROTECTION_AND_ELECTROMAGNETIC_INTERFERENCE_ANALYSIS).

5. Zubov K.N. *Sovershenstvovanie raschetnykh metodov molnieszashchity i zazemlyayushchikh ustroystv v neodnorodnykh gruntakh*: дис. канд. техн. наук: спец. 05.09.03. – Вологда, 2011. – 158 с.

6. Колиушко Д.Г. *Совершенствование диагностики заземляющих устройств электроэнергообъектов*: дис. канд. техн. наук: спец. 05.11.13. – Харьков, 2003. – 172 с.

7. Unde M.G., Kushare B.E. Grounding grid performance of substation in two layer soil – a parametric analysis // *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*. – 2012. – vol.1. – no.2. – pp. 69-76. doi: **10.7323/ijeset/v1\_i2\_8**.

8. Колиушко Д.Г., Руденко С.С., Колиушко Г.М. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 3. – С. 67-72. doi: **10.20998/2074-272X.2015.3.10**.

9. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Математическая модель заземляющего устройства энергообъекта при наличии подстилающего слоя // *Электронное моделирование*. – 2014. – Т.36. – №2. – С. 89-97.

10. International Organization for Standardization. ISO 5725-2: 1994: Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results-Part 2: Methods for the Determination of Repeatability and Reproducibility. International Organization for Standardization, 1994.

#### REFERENCES

1. IEEE Standard 81-2012. IEEE Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system. [Amended by 2012-12-28]. New York: IEEE, 2012. 86 p. doi: **10.1109/ieeestd.2012.6392181**.

2. *Natsional'nyy standart Ukrainy. SOU 31.2-21677681-19:2009. Viprobuvannya ta kontrol' prystroyiv zazemlennyya elektroustanovok. Tipova instruktsiya*. [National Standard of Ukraine SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2010. 54 p. (Ukr).

3. Tabatabaei N.M., Mortezaei S.R. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*, 2010, iss.2, vol.2, no.1, pp. 45-49.

4. Turri R., Andolfato R., Cuccarollo D. A numerical simulation tool for cathodic protection and electromagnetic interference analysis. *NACE Milano Italia Section – Conference & Expo 2016 «A European event for the Corrosion Prevention of Oil&Gas industry»*. 17 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/303685228\\_A\\_NUMERICAL\\_SIMULATION\\_TOOL\\_FOR\\_CATHODIC\\_PROTECTION\\_AND\\_ELECTROMAGNETIC\\_INTERFERENCE\\_ANALYSIS](https://www.researchgate.net/publication/303685228_A_NUMERICAL_SIMULATION_TOOL_FOR_CATHODIC_PROTECTION_AND_ELECTROMAGNETIC_INTERFERENCE_ANALYSIS) (accessed 22 September 2016).

5. Zubov K.N. *Sovershenstvovanie raschetnykh metodov molnieszashchity i zazemlyayushchikh ustroystv v neodnorodnykh gruntakh*. Diss. cand. techn. nauk [Improved computational methods for lightning protection and grounding devices in heterogeneous soil. Cand. tech. sci. diss.]. Vologda, 2011. 158 p. (Rus).

6. Koliushko D.G. *Sovershenstvovanie diagnostiki zazemlyayushchikh ustroystv elektroenergoob"ektov*. Diss. cand. techn. nauk [Improving the diagnosis of grounding devices for electric power objects. Cand. tech. sci. diss.]. Kharkov, 2003. 172 p. (Rus).

7. Unde M.G., Kushare B.E. Grounding grid performance of substation in two layer soil – a parametric analysis. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 2012, vol.1, no.2, pp. 69-76. doi: **10.7323/ijeset/v1\_i2\_8**.

8. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2015.3.10**.

9. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer. *Electronic modeling*, 2014, vol.36, no.2, pp. 89-97. (Rus).

10. International Organization for Standardization. ISO 5725-2: 1994: Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results-Part 2: Methods for the Determination of Repeatability and Reproducibility. International Organization for Standardization, 1994.

Поступила (received) 10.12.2017

Коліушко Денис Георгійович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.,  
 Руденко Сергій Сергійович<sup>1</sup>, м.н.с.,  
<sup>1</sup>Національний технічний університет  
 «Харківський політехнічний інститут»,  
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,  
 e-mail: nio5\_molnija@ukr.net

D.G. Koliushko<sup>1</sup>, S.S. Rudenko<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Experimental substantiation of the calculation procedure of normalized parameters of grounding device based on the three-layer soil model.

**Purpose.** Experimental substantiation of the possibility of using the calculation procedure of normalized parameters grounding devices on the basis of a three-layer model soil. **Methodology.** The research was based on comparison of the results of experimental measurements for the existing high voltage energy facilities of Ukraine with the results of the calculation. **Results.** Comparison showed that the average error decreased from 18 % for the two-layer model to 10 % for the three-layer model. The analysis of the calculated and experimentally determined values of the touch voltage showed a high degree of coincidence. **Originality.** The adequacy of the calculation procedure of the normalized parameters of the grounding device for model with three-layer soil is substantiated by the results of experimental research on the existing energy objects. **Practical value.** The obtained results allow us to use calculation procedure to create software to determine with increased accuracy the normalized parameters of grounding device located in three-layer soils. References 10, tables 4, figures 3.

**Key words:** grounding device, resistance, touch voltage, three-layer soil model.