

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА НАПРУГУ ДОТИКУ З ОГЛЯДУ РОЗРОБКИ РЕКОМЕНДАЦІЙ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Д.Г. Коліушко* канд.техн.наук, С.С. Руденко** канд.техн.наук
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Киричова, 2, Харків, 61002, Україна, e-mail: nio5_molniva@ukr.net

У роботі визначено фактори, які впливають на значення напруги дотику в процесі розробки рекомендацій щодо реконструкції заземлювального пристрою з мінімізацією матеріально-трудових витрат. Досліджено залежності напруги дотику від значення струму однофазного замикання на землю, електрофізичних характеристик ґрунту, конструктивного виконання заземлювального пристрою та опору основи в місці обслуговування обладнання. При цьому використовувалися статистичні дані енергооб'єктів, на яких були виконані вимірювання, засоби математичного моделювання розподілу електричного потенціалу в заземлювальному пристрої та методи фізичного експерименту. В роботі для фіксованого розміру рівномірної заземлювальної сітки визначено значення струму насичення з урахуванням впливу всіх чотирьох типів тришарового ґрунту на напругу дотику. Показана несиметричність розподілу значень напруги дотику вздовж лінії обладнання в залежності від відстані до краю заземлювача. За результатами роботи сформовано напрямки досліджень для створення єдиної методики розробки рекомендацій для реконструкції заземлювального пристрою з використанням прогнозної моделі оцінки напруги дотику до проведення розрахунків. Бібл. 15, рис. 6, табл. 2.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, напруга дотику, тришаровий ґрунт, енергооб'єкт.

Вступ і постановка проблеми. Міжнародними та вітчизняними нормативними документами передбачається можливість виконання заземлювального пристрою (ЗП) електроустановок класом напруги вище 1 кВ, які працюють у мережі з заземленою нейтраллю, відповідно до вимог з опору ЗП або з допустимого значення напруги дотику [1–3]. У [4] доведено, що проведення реконструкції ЗП, який знаходиться в експлуатації, за вимогами до напруги дотику дає змогу не тільки забезпечити електробезпеку обслуговуючого персоналу і надійність роботи обладнання електроустановки, а й мінімізувати матеріально-технічні витрати на виконання реконструкції ЗП.

В існуючих дослідженнях [5–12] неодноразово підкреслювалося, що важливість забезпечення нормованих параметрів ЗП підвищилась у зв'язку з впровадженням мікропроцесорної техніки та збільшенням аварійних струмів в енергосистемах. Крім того, в ряді випадків виконання ЗП у відповідності до його опору не забезпечує допустиме значення напруги дотику, що, в свою чергу, не гарантує електробезпеку персоналу [4–6]. У [7] проведено детальний аналіз факторів, які впливають на конструктивне виконання ЗП під час проектування енергооб'єктів, однак дослідження виконано лише для одного нормованого параметру – опору ЗП.

Слід зазначити, що останнім часом спостерігається значний інтерес до розробки універсальних підходів щодо оптимізації матеріально-трудових витрат на виконання ЗП [5–12]. Ґрунтовно це питання з урахуванням значень всіх нормованих параметрів ЗП розглянуто у [8]. У [9] розроблено алгоритми побудови оптимізованих заземлювальних сіток та доведено, що витрати можуть бути зменшені в 2–3 рази. В [5, 6] лабораторією EPD Labelec, що обслуговує енергосистему Португалії впродовж 30 років, розроблено інтегровану методику проектування та реконструкції ЗП високовольтних підстанцій. Проте вона в цілому методично повторює процедуру електромагнітної діагностики (ЕМД) ЗП, яка була розроблена НДПКІ «Молнія» та затверджена Мінпаливенерго України ще у 2009 р. як типова інструкція [13]. До того ж розроблені у [5, 6] рекомендації щодо встановлення п'яти додаткових вертикальних заземлювачів довжиною 50 м кожен для енергооб'єкта розміром 60 м × 40 м призводять до невиправданого завищення трудових і матеріальних витрат для забезпечення необхідних значень опору ЗП та напруги дотику у разі невеликого значення питомого опору шарів ґрунту (до 40 Ом·м) та струму однофазного замикання на землю (ОЗЗ) – всього 2,75 кА.

У [12] наведено аналіз результатів дослідження розподілу електричних потенціалів на поверхні землі, де розміщено заземлювач. Запропоновано оцінювати граничний розмір комірки ЗП за-

лежно від глибини його укладання. Представлена дворівнева конструкція ЗП, яка зменшує напругу дотику, але не враховує розподіл струмів зрівнювання у ґрунті. Крім того, виконання такого ЗП не враховує наявність реальної конструкції існуючого ЗП, що призводить до невиправданого завищення матеріально-трудових витрат, а також спричиняє великі труднощі в умовах експлуатації діючого об'єкта. При цьому результати [12] не знайшли впровадження на практиці при модернізації реальних об'єктів й можуть бути використані виключно при побудові нових.

У цілому запропоновані до цього часу варіанти оптимізації витрат на виконання ЗП характеризуються несистемним підходом та не враховують вплив низки факторів на значення напруги дотику, напруги на ЗП та опору ЗП. До того ж, в усіх розглянутих методах оптимізації конструктивного виконання під час реконструкції ЗП [5–12] для розрахунку використовувалася двошарова модель ґрунту, хоча у понад 90 % випадків на досліджених авторами енергооб'єктах ЗП розташовані в ґрунтах з три- та більше шаровою структурою. Як було доведено в [14], врахування тришарової структури замість двошарової дає змогу зменшити методичну похибку при визначенні опору ЗП з понад 18 до 10 %, а кількість потраплянь напруги дотику у розрахунковий діапазон становить понад 90 % для підстанцій, розташованих в Україні.

Авторами запропонована методика розробки рекомендацій для реконструкції ЗП діючих енергооб'єктів [15]. Основою для цього є результати електромагнітної діагностики стану ЗП, яка складається з експериментального та розрахункового етапів. Однак для вироблення оптимальних рекомендацій, які дали б змогу мінімізувати матеріально-технічні витрати для забезпечення допустимого значення напруги дотику, як правило, необхідно виконувати повторні розрахунки, тобто процес оптимізації рекомендацій носить ітераційний характер. З огляду на те, що розрахунок тільки першої ітерації для підстанцій класом напруги 330 кВ може становити кілька діб, актуальним є створення єдиного методу розробки рекомендацій для реконструкції ЗП діючих електроустановок класом напруги вище 1 кВ, які працюють у мережі з заземленою нейтраллю.

Метою роботи є визначення факторів, які впливають на значення напруги дотику в процесі розробки рекомендацій з реконструкції ЗП з мінімізацією матеріально-трудових витрат.

Матеріали дослідження. Для досягнення поставленої мети розглянемо фактори, що впливають на значення напруги дотику та існуючі підходи для забезпечення її допустимого рівня.

Напругою дотику (U_t) є різниця потенціалів між провідними частинами (одна з яких може бути землею) при одночасному торканні до них людини або тварини [2]. Допустиме значення U_t залежить від часу спрацьовування захисту, тобто індивідуальних характеристик електроустановки. При цьому у вітчизняному і міжнародних нормативних документах існують деякі відмінності в допустимих значеннях напруги дотику (табл. 1).

Таблиця 1

Тривалість дії, с	Допустимі значення U_t , В		
	ЄС [1]	Україна [2]	Швейцарія [3]
0,01	780	500	700
0,1	650	500	700
0,2	550	400	380
0,5	220	200	150
0,7	130	130	100
0,9	120	100	80
1,0-5,0	110-90	65	78-50

Слід зазначити, що вітчизняні норми мають більш жорстку диференціацію значення U_t , в той час як у [1, 3] залежність від тривалості дії захисту наведена у вигляді графіків, що дає можливість врахувати реальне значення часу дії захисту для кожного енергооб'єкта.

У [2] передбачається два підходи до забезпечення допустимого значення напруги дотику: перший – це прокладання додаткових горизонтальних і встановлення вертикальних заземлювачів, а другий – облаштування місць оперативного обслуговування обладнання ізолюючим шаром, якщо перший спосіб стає неефективним. Для досліджень, виконаних у роботі, була обрана база даних з 585 обстежених підстанцій класом напруги 110–750 кВ. Аналіз показує, що використання другого способу необхідно для 45 % ЗП підстанцій класом напруги 110 та 150 кВ і для 70 % ЗП підстанцій класом напруги 220–750 кВ.

Тому при розробці рекомендацій щодо реконструкції ЗП повинен обиратися спосіб для забезпечення допустимого значення напруги дотику (додаткові заземлювачі чи ізолюючий шар) за допомогою моделі для прогнозування значення U_t до проведення розрахунку. При цьому необхідно визначити, в яких випадках доцільним буде використання тільки першого або другого способу, а в яких першого та другого одночасно. Це залежить, в першу чергу, від того, у скільки разів прогнозоване поточне значення U_t перевищує допустиме, та низки факторів, що впливають на саме значення U_t . До таких факторів належать:

- значення струму однофазного замикання на землю;
- електрофізичні характеристики (ЕФХ) ґрунту (кількість шарів ґрунту, їхня товщина h та питомий електричний опір ρ);
- конструктивне виконання ЗП (розмір ЗП, розмір комірки, глибина його розташування, поперечний переріз заземлювача), спосіб заземлення обладнання (одним, двома або більше заземлювачами) та місце розташування одиниці обладнання, для якої визначається напруга дотику (віддаленість від краю ЗП);
- опір основи ґрунту (підсіпка щебнем, бетонні чи асфальтні доріжки в місці обслуговування тощо).

Розглянемо впливи зазначених факторів більш детально.

1. Залежність напруги дотику від струму ОЗЗ. Вплив струму ОЗЗ на значення нормованих параметрів ЗП носить нелінійний характер. Це пояснюється, в першу чергу, залежністю магнітної проникності технічної сталі від напруженості магнітного поля, а отже і значення струму ОЗЗ, що протікає по елементах ЗП. Її нелінійний характер відповідно впливає на комплексний опір заземлювача. Проте існують такі значення струму ОЗЗ, при яких настає магнітне насичення елементів ЗП зі сталі, і залежність напруги на ЗП й напруги дотику від струму ОЗЗ можна вважати лінійною, а опір ЗП – константою. В цілому значення такого струму насичення буде визначатися розмірами ЗП та ЕФХ ґрунту. На рис. 1 показано відповідну залежність U_i від струму ОЗЗ I_{le} для ЗП розміром $15\text{ м} \times 15\text{ м}$ з коміркою $3\text{ м} \times 3\text{ м}$ для всіх типів ґрунту, наведених в табл. 2. Залежності отримано розрахунковим способом з використанням методики розрахунку нормованих параметрів ЗП для тришарової моделі ґрунту [15].

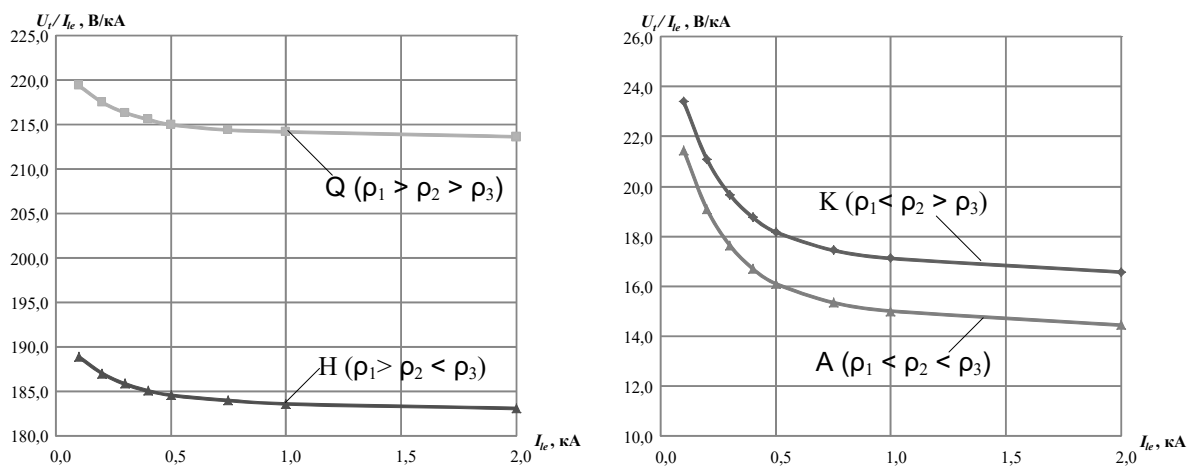


Рис. 1

У табл. 2 наведено значення питомого опору шарів ґрунту, які використовувалися під час проведення розрахунків для отримання графіків на рис. 1. При цьому в усіх випадках товщина першого шару становила – 0,8 м, другого – 6,3 м, а сам ЗП розташовано на глибині 0,5 м.

Таблиця 2

Тип ґрунту	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	ρ_3 , Ом·м
Q	100	50	10
H	100	50	100
K	10	100	10
A	10	50	100

Як видно з графіків, для таких розмірів ЗП режим насичення досягається при струмі ОЗЗ, що дорівнює 1 кА (відхилення від сталого значення напруги дотику менше 5 %) при будь-яких співвідношеннях ЕФХ ґрунту. Необхідно дослідити таку залежність для ЗП інших розмірів, найбільш поширених для енергооб'єктів України.

На рис. 2, а представлено гістограму розподілу площі ЗП S , величина якої змінюється у діапазоні від 122 до 436158 м^2 , що приблизно відповідає ЗП розміром від $11\text{ м} \times 11\text{ м}$ до $660\text{ м} \times 660\text{ м}$ для енергооб'єктів України класом напруги 110 кВ–750 кВ. На рис. 2, б показано розподіл значення струму ОЗЗ для обраної бази даних з 585 енергооб'єктів. При цьому значення струму знаходяться у діапазоні від 0,74 до 59 кА, а медіана складає – 8,47 кА. На рис. 2, а – це кількість енергооб'єктів у відсотковому відношенні до усіх обраних.

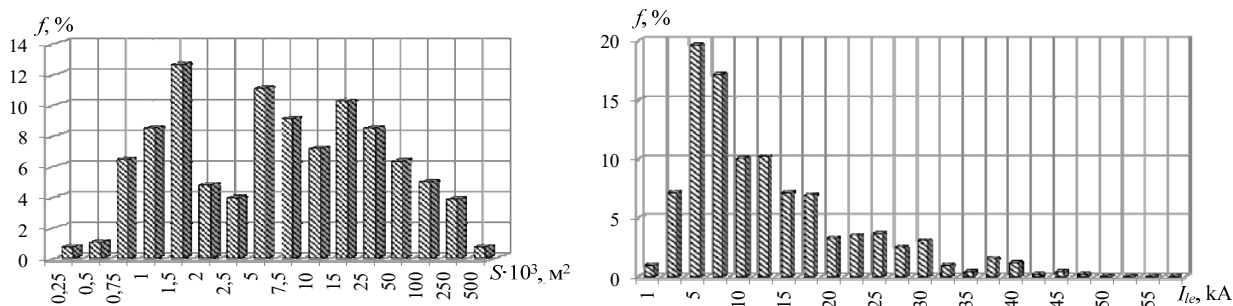


Рис. 2, а, б

Встановлення граничного значення струму ОЗЗ для заданих розмірів ЗП та визначених ЕФХ ґрунту, для яких є характерною лінійна залежність U_t від I_{les} , дає змогу перерахувати напругу дотику прямо пропорційно до реального значення струму ОЗЗ без використання спеціального програмного забезпечення.

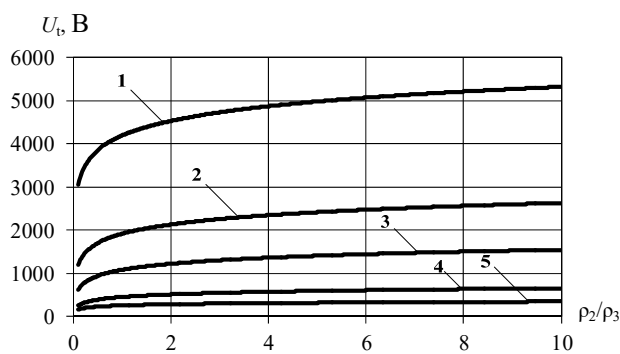


Рис. 3

2. Залежність напруги дотику від ЕФХ ґрунту.

В значній мірі на значення U_t впливають ЕФХ ґрунту: кількість шарів ґрунту, їхній питомий електричний опір та товщина. При цьому для багат шарових ґрунтів вагомий вплив мають не тільки абсолютні величини, а й співвідношення значень питомого опору ґрунту. На рис. 3 представлено у вигляді сімейства кривих залежність напруги дотику від значення співвідношення ρ_2/ρ_3 . При цьому криві відповідають наступним співвідношенням: 1 – $\rho_1/\rho_2 = 2$; 2 – $\rho_1/\rho_2 = 0,9$; 3 – $\rho_1/\rho_2 = 0,5$; 4 – $\rho_1/\rho_2 = 0,2$; 5 – $\rho_1/\rho_2 = 0,1$. За базову величину обрано питомий опір другого

шару ґрунту $\rho_2 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, тобто $\rho_2 = \text{const}$. Для прикладу розглядалося ЗП розміром $30 \text{ м} \times 30 \text{ м}$ з коміркою $6 \text{ м} \times 6 \text{ м}$ при струмі ОЗЗ 10 кА .

Отримавши низку таких залежностей для найбільш поширених розмірів ЗП і значень ЕФХ ґрунту та використовуючи теорію подібності, можна побудувати математичну модель для прогнозування досяжного, тобто мінімально можливого, значення U_t за заданих розмірів ЗП, струму ОЗЗ та ЕФХ ґрунту. Створення такої моделі дає змогу до початку проведення розрахунків оцінити напрямок забезпечення допустимого значення напруги дотику.

3. Конструктивне виконання ЗП. Після визначення напрямку реконструкції необхідно обрати оптимальну конструкцію ЗП, тобто таку, що забезпечить необхідне значення U_t за мінімальної довжини додаткових заземлювачів. У цілому конструктивне виконання ЗП характеризується: розмірами ЗП і комірки, глибиною розташування, поперечним перерізом заземлювача, кількістю заземлювальних провідників обладнання та їхньою довжиною і місцем розташування одиниці обладнання відносно краю ЗП, для якої визначається напруга дотику. Крім того, на вибір оптимальної конструкції суттєво впливає допустиме значення U_t , ЕФХ ґрунту та значення струму ОЗЗ (див. п. 1., п. 2). Таким чином, необхідно встановити багатofакторну залежність U_t від характеристик ЗП.

Визначення такої залежності зручно виконати у вигляді графіків залежності U_t від ЕФХ ґрунту як сімейства кривих для фіксованих значень розміру ЗП, розміру комірки та поперечного перерізу заземлювача. Залежність U_t від напрямку заземлення обладнання, відстані до краю ЗП, довжини заземлювальних провідників та їхньої кількості враховано відповідними коефіцієнтами.

Оптимальний напрямок заземлення обладнання пропонується визначити для ліній обладнання, розташованих відносно поперечного розміру ЗП – a . Встановлення такої залежності з урахуванням зміщення обладнання відносно центра ЗП дасть змогу ввести відповідний коефіцієнт – коефіцієнт зміщення та врахувати ефект концентрації потенціалу електричного поля по краях ЗП. При рівномірній заземлювальній сітці найменше значення U_t буде в центрі ЗП. На рис. 4 цифрами у колі позначено місця обслуговування обладнання, для якого виконувався розрахунок, сірою лінією позначено

чено обладнання, а чорною – ЗП. Розрахунок проводився вздовж п'яти ліній обладнання: 1–5; 6–10; 11–15; 16–20; 21–25 за методикою [15].

Наведена на рис. 4 схема з обладнанням для ЗП розміром 15 м × 15 м, комірки 3 м × 3 м є ідеалізованою і демонструє якісну залежність. У цілому в реальних підстанціях комірки ЗП не є правильними квадратами, мають більші розміри, як правило, не менше 6 м × 6 м та змінну глибину розташування заземлювачів, що пропонується враховувати під час більш детального дослідження.

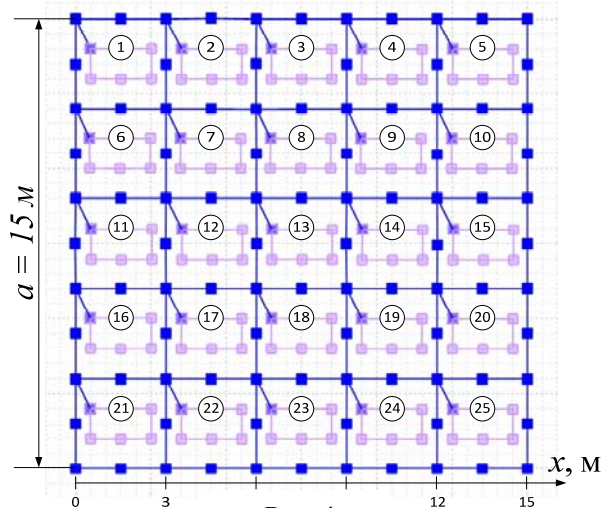


Рис. 4

13; 18; 23), у той час як для ґрунту типу Н (рис. 5, б) такої залежності не спостерігається. Для визначення можливих значень коефіцієнта зміщення та врахування впливу напрямку заземлення обладнання на значення U_i необхідно провести відповідні дослідження для інших співвідношень ЕФХ ґрунту та встановити залежність коефіцієнта від конструктивного виконання ЗП (розмірів ЗП, комірки тощо).

Під час дослідження залежності U_i від довжини заземлювальних провідників та їхньої кількості фактично необхідно визначити максимально допустиме значення довжини заземлювального провідника, для якого можливо забезпечити допустиме значення напруги дотику за заданих ЕФХ ґрунту, розмірах ЗП та його комірки.

Таким чином, для врахування впливу конструктивного виконання на значення напруги дотику основними є наступні завдання:

- побудувати сімейство кривих залежностей співвідношення напруги дотику до струму ОЗЗ від площі (або діагоналі) ЗП, при цьому розглянувши характерні розміри ЗП (рис. 3);
- для характерних розмірів ЗП дослідити вплив розміру комірки, діапазон зміни якої обрати виходячи з вимог [2] та принципу матеріальної доцільності (наприклад, не менше 6 м × 6 м).
- дослідити залежність розподілу напруги дотику вздовж ЗП для характерних розмірів ЗП $a \times a$, наприклад, уздовж ліній розташування обладнання.

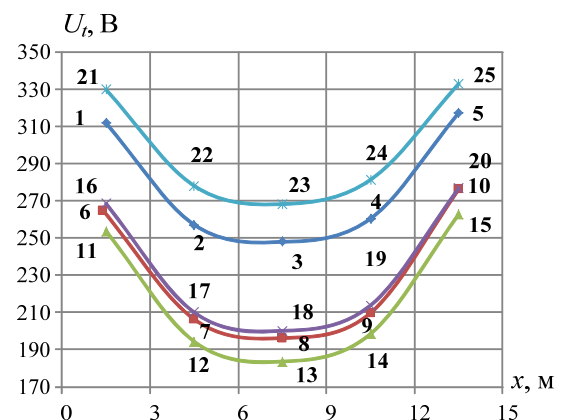
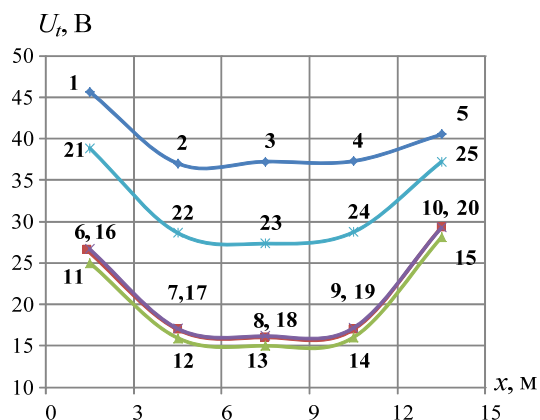


Рис. 5, а, б

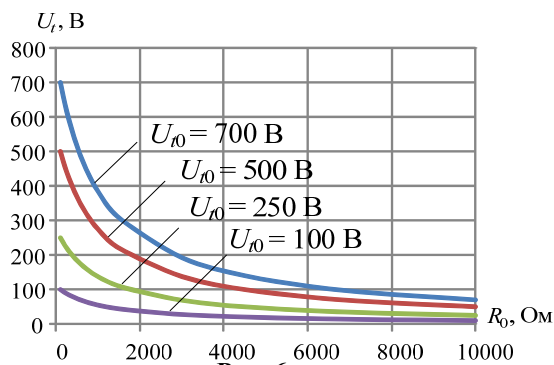
4. Вплив опору основи на напругу дотику. Опір основи – фізичне поняття, яке відносно недавно ввійшло у використання в теорії заземлення й, незважаючи на широке практичне застосування [13], ще не має ґрунтового теоретичного опису. В цілому опір основи (опір підсипки) є інтегральна величина, яка характеризує електричний опір між заземлювачем та вимірювальною пластиною, що імітує тіло людини, в заданому місці, наприклад, місці обслуговування обладнання.

Для експериментального визначення опору основи отримали найбільше розповсюдження схеми, наведені в [13]. Існує також вираз для теоретичного розрахунку її опору [10], який залежить від значення питомого опору верхнього шару ґрунту ρ_1 та радіуса вимірювальної пластини r_0

$$R_0 = \rho_1 / 4r_0 . \quad (1)$$

Проте порівняння експериментального й розрахункового значень опору основи показує, що вони можуть відрізнятися на порядок. Це пояснюється впливом локальних включень, які можуть різнитися для кожної точки обслуговування, таких як: щєбінь різної фракції та щільності засипання, асфальт різної якості й ступеня деградації, бетонні плити тощо.

Враховуючи, що облаштування ізолюючого шару в місці обслуговування обладнання, тобто збільшення опору основи, є додатковим способом для забезпечення допустимого значення напруги дотику [2], актуальним завданням є мінімізація матеріально-трудових витрат на експериментальне визначення опору основи для кожної одиниці обладнання або підвищення точності розрахунків, наприклад, за рахунок введення спеціальних коефіцієнтів, які б враховували локальні особливості обраного місця. Крім того, надзвичайно важливим завданням є визначення оптимальних матеріалів та способів їхнього укладання для збільшення значення опору основи, адже із досвіду ЕМД ЗП відомо, що існують такі об'єкти, як правило, розташовані в ґрунтах з високим питомим опором першого шару, де досягти допустимого значення U_i є можливим лише у разі облаштування ізолюючого шару з великим загальним опором (на одній з підстанцій необхідний опір основи складав 60 кОм). При цьому



вказане значення має забезпечуватися в будь-яку пору року за найнесприятливіших погодних умов. На рис. 6 показано графік, який підтверджує значний вплив опору основи на поточне значення U_i .

Визначення досяжного значення опору основи дає змогу обрати напрямок реконструкції ЗП для забезпечення допустимого значення напруги дотику: прокладання лише необхідних з точки зору конструктивного виконання ЗП заземлювачів та облаштування ізолюючого шару в місцях обслуговування обладнання або прокладання додаткових заземлювачів без використання ізолюючого шару.

Висновки.

1. У роботі виділено та проаналізовано основні фактори, що впливають на значення напруги дотику, врахування яких дає змогу зменшити матеріально-трудові витрати у разі реконструкції ЗП.
2. Доведено, що за струму ОЗЗ 1 кА спостерігається практично лінійна залежність напруги дотику від значення аварійного струму для ЗП розміром 15 м × 15 м. Дослідження такої залежності для ЗП інших розмірів та співвідношення ЕФХ ґрунту, найбільш поширених для енергооб'єктів України, дає змогу визначити межі застосування прогнозної моделі.
3. Встановлена залежність значення напруги дотику від ЕФХ тришарового ґрунту для розмірів ЗП 30 м × 30 м. Визначення аналогічних залежностей для найбільш поширених розмірів ЗП і значень ЕФХ ґрунту дає змогу побудувати математичну модель для прогнозування значення напруги дотику при заданому конструктивному виконанні ЗП, струмі ОЗЗ та ЕФХ ґрунту.
4. Доведено, що введення поняття коефіцієнта зміщення відносно центра дає змогу врахувати ефект концентрації потенціалу на краях ЗП та підвищити точність оцінки напруги дотику до початку проведення розрахунків.
5. Показано, що визначення досяжного значення опору основи дає змогу обрати напрямок реконструкції ЗП для забезпечення допустимого значення напруги дотику.
6. Використовуючи наведені у попередніх роботах основні положення існуючих методів оптимізації під час проектування ЗП, виконання поставлених у роботі завдань вперше створюють основу для єдиної методики розробки рекомендацій щодо реконструкції ЗП завдяки врахуванню впливу на значення напруги дотику таких основних факторів, як ЕФХ багат шарового ґрунту, розміру ЗП та його

го комірок, способу приєднання обладнання залежно від місця його розташування, а також значення струму ОЗЗ.

1. BS EN 50522:2010. Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c. London, BSI, 2012, 104 p.
2. Правила улаштування електроустановок. Київ: Міненерговугілля України, 2014, 793 с.
3. Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung). Bern: Der Schweizerische Bundesrat, 2016. 34 p.
4. Колиушко Д.Г., Руденко С.С., Колиушко Г.М. Анализ состояния заземляющих устройств действующих энергообъектов Украины. *Вісник НТУ ХПИ*. 2017. № 15 (1237). С. 44–48.
5. Cardoso C., Filipe N., Leiria A., Teixeira P. An integrated methodology for design of grounding systems, Proc. 23rd Conference on *Electricity Distribution*. Lion, France, 15-18 June, 2015. Pp. 1–5.
6. Cardoso C., Filipe N., Leiria A., Teixeira P. Validation of an integrated methodology for design of grounding systems through field measurements. *CIREN*. 2017. Iss. 1. Pp. 897–901.
7. Prasad D., Sharma H. C. Parameters Effecting Substation Grounding Grid Resistance. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 5. Iss. 10. Pp. 30–37.
8. Gilbert G. High Voltage Grounding Systems: author's abstract of PhD diss.: department of Electrical and Computer Engineering. University of Waterloo. Waterloo. Ontario. Canada. 2011. 88 p.
9. Wu X., Simha V., Wellman R.J. Optimal ground grid design for large EHV substations with auto-transformer. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver. 2015. Pp. 1-5.
10. IEEE Std. 80-2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, NY: IEEE, 2000. 192 p.
11. Шишигин Д.С. Методы теории заземлителей для анализа электромагнитной совместимости и молниезащиты электрических подстанций: дис. канд. техн. наук: 05.09.05. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург. 2017. 137 с.
12. Нижевский И.В., Нижевский В.И., Шишигин С.Л. Исследование выравнивания электрических потенциалов по поверхности земли на занятой заземлителем территории. *Електротехніка і електромеханіка*. 2014. № 4. С. 71-77.
13. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009. Київ: Мінпаливенерго України, 2010. 54 с.
14. Руденко С.С., Колиушко Д.Г., Кашеев О.В. Визначення напрямку реконструкції заземлювального пристрою. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 2. С. 66-70.
DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.09>
15. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Определение электрического потенциала, создаваемого заземляющим устройством в трехслойном грунте. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 19–24.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.019>

УДК 621.316.99

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПРИКОСНОВЕНИЯ, С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Д.Г. Колиушко*, канд.техн.наук, С.С. Руденко** канд.техн.наук

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина, e-mail: nio5_molniva@ukr.net

Целью работы является определение факторов, влияющих на значение напряжения прикосновения в процессе разработки рекомендаций по реконструкции заземляющего устройства при минимизации материально-трудовых затрат. Исследованы зависимости напряжения прикосновения от величины тока однофазного замыкания на землю, электрофизических характеристик грунта, конструктивного исполнения заземляющего устройства и сопротивления основания в месте обслуживания оборудования. При этом использовались статистические данные энергообъектов, на которых были проведены измерения, средства математического моделирования распределения электрического потенциала в заземляющем устройстве и методы физического эксперимента. В работе для фиксированного размера равномерной заземляющей сетки определена величина тока насыщения с учетом влияния всех четырех типов трехслойного грунта на величину напряжения прикосновения. Показана несимметричность распределения значений напряжения прикосновения вдоль линий оборудования в зависимости от расстояния до края заземления. По результатам работы сформированы направления исследований для создания единой методики разработки рекомендаций для реконструкции заземляющего устройства с использованием прогнозной модели оценки напряжения прикосновения до проведения расчетов. Библ. 15, рис. 6, табл. 2.

Ключевые слова: заземляющее устройство, напряжение прикосновения, трехслойный грунт, энергообъект.

THE FACTORS OF THE INFLUENCE ON THE TOUCH VOLTAGE FROM THE REVIEW OF THE DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR THE RECONSTRUCTION OF THE GROUNDING DEVICE

D.G. Koliushko, S.S. Rudenko
National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine,
nio5_molniva@ukr.net

The purpose of the work is to determine the factors that affect the value of touch voltage during the synthesis of recommendations for reconstruction of the grounding while minimizing labor and material costs. The dependences of the touch voltage on the single-phase ground fault current, the soil electrophysical characteristics, the design of the grounding, and the base resistance in the place, where equipment is serviced, are investigated. At the same time, statistical data of the energy objects, where measurements were carried out, tools for mathematical modeling of the electrical potential distribution in the grounding device and methods of physical experiment were used. In the paper the value of the saturation current for a fixed size of a uniform grounding grid is determined, taking into account the influence of all four types of three-layer soil on the touch voltage. The asymmetry of the touch voltage distribution along the equipment lines depending on the distance to the grounding edge is shown. According to results, the research directions have been formed to develop the unified methodology for the synthesis of recommendations for reconstruction of the grounding using the predictive model of the touch voltage assessment before calculations.
References 15, figures 6, table 2.

Key words: grounding, touch voltage, three-layer soil, energy objects.

1. BS EN 50522:2010. Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c. London, BSI, 2012, 104 p.
2. Rules of the device electroinstallations. General rules. Kyiv: Minenerhovuhillia Ukrainy, 2014. 793 p. (Ukr)
3. Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung). Bern: Der Schweizerische Bundesrat, 2016, 34 p. (D)
4. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M. Analysis state of grounding grids of existing power plants of Ukraine. *Bulleten Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu KhPI*. 2017. № 15 (1237). Pp. 44-48. (Rus)
5. Cardoso C., Filipe N., Leiria A., Teixeira P. An integrated methodology for design of grounding systems, Proc. 23rd Conference on *Electricity Distribution*., Lion, France. 15-18 June, 2015. Pp. 1-5.
6. Cardoso C., Filipe N., Leiria A., Teixeira P. Validation of an integrated methodology for design of grounding systems through field measurements. *CIREC*. 2017. Iss. 1. Pp. 897-901.
7. Prasad D., Sharma H.C. Parameters Effecting Substation Grounding Grid Resistance. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 5. Iss. 10. Pp. 30-37.
8. Gilbert G. High Voltage Grounding Systems: author's abstract of PhD diss.: department of Electrical and Computer Engineering. University of Waterloo. Waterloo. Ontario, Canada. 2011. 88 p.
9. Wu X., Simha V., Wellman R.J. Optimal ground grid design for large EHV substations with auto-transformer. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver. 2015. Pp. 1-5.
10. IEEE Std. 80-2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, NY: IEEE, 2000. 192 p.
11. Shishigin D.S. Methods of the theory of grounding for the analysis of electromagnetic compatibility and lightning protection of electrical substations: author's abstract of PhDr diss.: 05.09.05. St. Petersburg State Polytechnic University. St. Petersburg. 2017. 137 p. (Rus)
12. Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I., Shishigin S.L. Research on electric potentials alignment on the ground surface within the grounding conductor territory. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2014. No 4. Pp. 71-77. (Rus)
13. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009. Kyiv: Minenerhovuhillia Ukrainy, 2010. 54 p. (Ukr)
14. 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.
DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.09>
15. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Determination the electrical potential of a created grounding device in a three-layer ground. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 4. Pp. 19-24.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.019>

Надійшла 12.09.2018
Остаточний варіант 14.12.2018