

Д.Г. Коліушко, С.С. Руденко

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДІЮЧИХ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ

Проведено аналіз і встановлено суттєві недоліки вимірювань нормованих параметрів заземлювальних пристроїв діючих енергооб'єктів при використанні різних методик та приладів. Показано, що електромагнітна діагностика стану заземлювального пристрою на теперішній час є найбільш повною, яка дозволяє комплексно оцінити поточний стан заземлювального пристрою та встановити значення опору заземлювального пристрою, напруги на ньому, напруги дотику та опору контактних з'єднань. Встановлені недоліки електромагнітної діагностики на сучасному етапі та визначені подальші напрямки її вдосконалення. Бібл. 17, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, опір заземлювального пристрою, напруга на заземлювальному пристрої, напруга дотику, опір контактних з'єднань, електромагнітна діагностика.

Проведен анализ и установлены существенные недостатки измерения нормируемых параметров заземляющих устройств действующих энергообъектов при использовании различных методик и приборов. Показано, что электромагнитная диагностика состояния заземляющего устройства в настоящее время является наиболее полной и позволяет комплексно оценить текущее состояние заземляющего устройства и определить значение сопротивления заземляющего устройства, напряжения на нем, напряжение прикосновения и сопротивления контактных соединений. Установлены недостатки электромагнитной диагностики на современном этапе и определены дальнейшие направления ее совершенствования. Библ. 17, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: заземляющее устройство, сопротивление заземляющего устройства, напряжение на заземляющем устройстве, напряжение прикосновения, сопротивление контактных соединений, электромагнитная диагностика.

Постановка проблеми. Термін експлуатації переважної більшості діючих енергооб'єктів України становить понад 30 років. За цей період як сама електроустановка, так і заземлювальний пристрій (ЗП) зазнають значних змін, внаслідок чого його електричні нормовані параметри (НП) можуть перевищувати допустимі значення, а конструктивне виконання не відповідає вимогам проектної та нормативної документації. Існує низка факторів, які суттєво впливають на стан ЗП та його параметри:

- дія корозії на елементи ЗП (порушення цілісності сітки та пошкодження заземлювальних провідників на межі земля-повітря);
- некоректне відновлення заземлення старих та під'єднання нових одиниць обладнання до існуючого ЗП (послідовне з'єднання обладнання, приєднання до металевих частин, що не мають зв'язку з ЗП);
- пошкодження ЗП при земляних роботах в результаті заміни або ремонту обладнання;
- збільшення потужності електроустановки зі зростанням значень струмів короткого замикання (КЗ) (перевищення допустимих значень НП ЗП).

Для оцінки працездатності ЗП використовуються НП [1], які періодично контролюються протягом всього строку експлуатації [2]. До них відносять: опір ЗП, напругу на ЗП, напругу дотику та опір контактних з'єднань. Ці величини залежать від таких факторів: конструктивного виконання ЗП, електрофізичних характеристик ґрунту (питомий опір і товщина шарів) та характеристик об'єкту (значення струму КЗ, час спрацювання захисту, клас напруги тощо).

Метою роботи є аналіз існуючих методів контролю та визначення найефективніших з них для оцінки стану ЗП діючих енергооб'єктів в процесі експлуатації.

Розглянемо найбільш поширені методи визначення НП ЗП.

1. Опір заземлювального пристрою та напруга на ньому. На теперішній час значення опору ЗП визначається за допомогою низки методів:

1) введення великого струму (50-100 А). Вказаний метод поділяється на декілька типів:

- синхронний [3], в якому використовується джерело напруги промислової частоти. Струм та напруга у колі вимірюється до та після включення джерела напруги. Потім за відповідними виразами визначається опір ЗП;

- частоти вдарянь [3], в якому використовується генератор змінного струму з частотою відмінною від промислової на 0,1-0,5 Гц. Внаслідок здвигу фази між введеним струмом та струмом, що розтікається по ЗП в процесі нормальної роботи, виникають максимуми та мінімуми вимірюваного струму та напруги. Напруга та струм також вимірюються до та після включення генератору, а значення опору визначається за відповідними виразами;

- введення струму, у якого частота відмінна від промислової частоти та її гармонік на декілька Гц;

2) введення малого струму (до 3 А) [4]. У даному випадку використовуються генератори з відмінною від промислової частотою;

3) розрахункового способу [5-9].

Вимірювання за наведеними методиками виконується за методом амперметра-вольтметра, при цьому використовуються дві схеми розташування електродів [2] – одно- та двопробенева (див. рис. 1). Двопробенева схема може бути доцільною при вимірюванні в умовах, де площа в місці розташування енергооб'єкту обмежена. Для обох схем застосовується один і той самий порядок вимірювань:

1) до генератору I під'єднується ЗП E та струмовий електрод C, який встановлюється на відстані 3D

для однопроменевої та (1,5-2) D для двопрменевої схеми, де D – найбільша діагональ ЗП;

2) встановлюється значення струму за допомогою генератора I та амперметра PA ;

3) потенційний електрод P забивається на деякій відстані X , наприклад 50 % від відстані до струмового електроду (для однопроменевої схеми – на одній прямій зі струмовим електродом, для двопрменевої – під кутом 40-45°), й вимірюється потенціал;

4) далі, пересуваючи потенційний електрод в сторону від ЗП, вимірюється потенціал через обрану відстань (наприклад, через 5 м, 10 м, 15 м і т.д.);

5) пересувати електрод P необхідно до такої відстані X , щоб значення між двома сусідніми вимірами відрізнялося не більше ніж на 10 %. Це буде означати, що знайдено точку R_2 кривої [10].

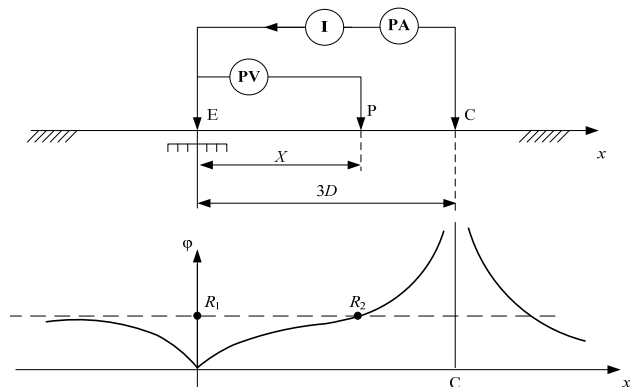


Рис. 1. Розподіл потенціалу по поверхні ґрунту при проведенні вимірювань за однопроменевою схемою

Опір ЗП в цьому випадку буде рівним відношенню потенціалу в точці R_2 до струму генератора. Однак, на практиці найбільш широкое розповсюдження, у зв'язку зі своєю простотою, отримала однопроменева схема за «методом 62 %», коли потенційний електрод P одразу встановлюється на відстані від ЗП, яка складає 62 % від виносу струмового електроду C . Такий метод забезпечує найбільшу точність при умові однорідності ґрунту, проте в інших випадках необхідно користуватися залежністю довжини виносу потенційного електроду від довжини виносу струмового для двошарового ґрунту, яка наведена в [10].

Горизонтальна частина на кривій залежності потенціалу від відстані до потенційного електроду з'являється при достатньо значному збільшенні відстані до струмового електроду. В залежності від структури ґрунту вказана умова виконується при відстані до струмового електроду в (3-40) діагоналей ЗП. Зрозуміло, що таке рознесення вимірювальних кіл в багатьох випадках буде неможливим.

В [11] розглянуто схему вимірювання опору ЗП за допомогою триелектродної установки. При цьому, незважаючи на ствердження про можливість вимірювань для будь-якої структури ґрунту, при фізичному моделюванні було розглянуто лише однорідну структуру, а вимірювання на діючих енергооб'єктах не проводились. В [12] показано, що в ґрунтах з горизонтальною та вертикальною неоднорідностями існує єдиний можливий варіант розташування допоміжного потенційного електроду в однопроменевій схемі

вимірювання, при якому можливе точне визначення опору ЗП. Наведений алгоритм експериментального пошуку цього варіанту для ґрунту з невідомою геоелектричною структурою є складним з точки зору практичної реалізації.

Напруга на ЗП – це напруга, яка виникає в разі стікання струму із заземлювача в землю між точкою введення струму в заземлювач і зоною нульового потенціалу [1]. Напряму величина напруги на ЗП впливає на стан кабельної продукції енергооб'єкту, мікропроцесорної вимірювальної техніки та техніки управління, панелей релейного захисту, а опосередковано також і на електробезпеку (саме величина напруги на ЗП разом з електрофізичними характеристиками ґрунту є визначальними для величини напруги дотику). Згідно з [1] для енергооб'єктів, що працюють в мережі з заземленою нейтраллю, величина напруги на ЗП регламентується наступним чином: перевищення значення 10 кВ допускається лише на ЗП, виконаному за вимогами до напруги дотику, й не допускається на ЗП виконаному за вимогами до опору ЗП. У випадку винесення високого потенціалу за межі електроустановки та перевищення значення 5 кВ необхідно застосовувати засоби захисту ізоляції кабелів зв'язку і телемеханіки, що відходять від електроустановки.

Найпростішим, але і найменш точним способом для знаходження напруги на ЗП є прямий перерахунок, коли виміряне за схемою на рис. 1 значення опору ЗП перемножується на реальне значення струму K_3 . Похибка при визначенні напруги на ЗП обумовлюється неточністю вимірювання опору ЗП та неврахуванням нелінійної залежності магнітної проникності заземлювачів від величини струму K_3 . В зв'язку з неможливістю проведення вимірювань опору ЗП та напруги на ЗП на низці об'єктів (промислових підприємствах, в умовах міської забудови тощо), найбільш універсальним та точним способом визначення стає розрахунковий за допомогою спеціальних програмних комплексів. Питанням моделювання електромагнітних процесів, що виникають в ЗП при протіканні аварійних струмів присвячена низка робіт [5-9]. В більшості випадків використовується математична модель ЗП, розташованого в двошаровому ґрунті, зокрема за допомогою аналогічної моделі [8] авторами проведено розрахунок для понад 1000 енергооб'єктів України класами напруги 35-750 кВ, а програмний комплекс, використаний в [5], є однією з найпопулярніших в світі комерційних версій). Вихідними параметрами для нього є конструктивне виконання ЗП (його схема, переріз заземлювачів, глибина розташування), електрофізичні характеристики ґрунту, режим роботи нейтралі та величина струму K_3 досліджуваного об'єкту.

2. Напруга дотику. Напруга дотику є параметром, який характеризує електробезпеку обслуговуючого персоналу енергооб'єкту. Він залежить від струму, який стікає з ЗП в землю, опору ЗП, конструкції ЗП та електрофізичних характеристик ґрунту. На відміну від вимірювання опору ЗП, при якому амплітуда вимірювального струму не грає великої ролі (вона задається в залежності від використовуваного методу),

напруга дотику їй пропорційна, хоча ця залежність і носить нелінійний характер.

Існують два шляхи експериментального вимірювання напруги дотику. Перший – безпосередньо при струмі КЗ, тобто в реальних умовах. Він небезпечний й може бути виправданим лише в поодиноких випадках у виключних ситуаціях (при проведенні випробовувань найбільш відповідальних ЗП), тому практично не використовується. Другий – при вимірювальному струмі, який в багато разів менший ніж реальний струм КЗ, з подальшим приведенням вимірної напруги дотику пропорційно до реального струму КЗ [2].

Вимірювальна схема практично така сама, як і для вимірювання опору ЗП, проте з особливим виконанням потенційного електроду й шунтуванням вольтметра резистором. На рис. 2 наведена схема вимірювання напруги дотику за допомогою комплексу «КДЗ-1У» [2].

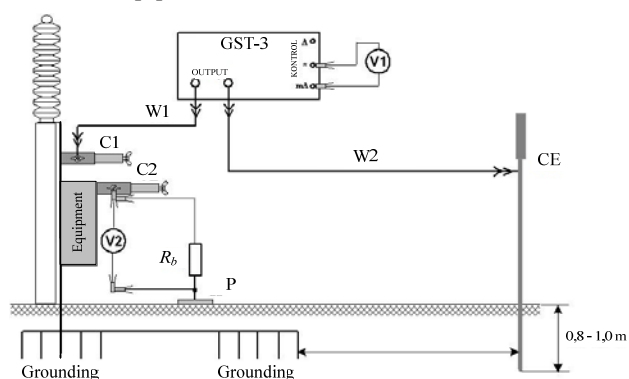


Рис. 2. Схема вимірювання напруги дотику

Потенційний електрод P має імітувати дві ступні людини. Для цього використовують спеціальний електрод-пластину з контактною поверхнею $25 \times 25 \text{ см}^2$. Для створення достатнього тиску на землю на пластину встановлюється вантаж вагою не менше 25 кг. Вольтметр шунтується резистором з опором R_p . Еквівалентний опір включених паралельно резисторів має дорівнювати опору тіла людини (як правило воно приймається рівним 1000 Ом). Горизонтальна відстань від місця контакту до пластины приймається рівним 0,8 м [1, 2] або 1 м [7].

Вольтметр паралельно з резистором за допомогою струбцини C2 включають між заземленим обладнанням (на рис. 2 – це ящик керування), на якому виконується вимірювання, та потенційним електродом. Струмовий електрод CE розташовують на такій же відстані, як і при вимірюванні опору ЗП. Генератор GST-3 від «КДЗ-1У» (або аналогічний) під'єднують до обладнання та CE за допомогою струбцини C1 й проводів W1 і W2 відповідно. Для моделювання найбільш несприятливих сезонних умов місце встановлення потенційного електроду зволожується. Після чого на схему подається напруга й виконуються виміри напруги та струму. Виміряні значення напруги дотику приводять до реального струму КЗ й порівнюють отриманий результат з припустимим нормованим значенням. Недоліками такого способу є неможливість проведення вимірювань в умовах щільної забудови та методична похибка способу, яка пов'язана з

неврахуванням залежності магнітної проникності матеріалу заземлювачів від струму, що протікає елементами ЗП, а також відтікання частин струму КЗ в заземлені нейтралі трансформаторів.

Таким чином, на відміну від опору ЗП, яке можна визначити як експериментальним, так і розрахунковим шляхом, напругу на ЗП та напругу дотику при реальному струмі КЗ можна знайти тільки шляхом виконання відповідних обчислень за допомогою спеціальних комп'ютерних програм.

3. Опір контактних з'єднань. Одним з електричних НП ЗП є опір контактного з'єднання обладнання з ЗП. У роботах останніх років неодноразово відзначався його значний вплив на величину напруги дотику [13-15]. Опір контактних з'єднань визначається методом амперметра-вольтметра при постійному або змінному струмі за допомогою мікроомметра або подвійного мосту [2]. Допустиме значення опору контактного з'єднання складає 0,05 Ом при введенні та не більше 0,1 Ом під час експлуатації. Загальноприйнята схема вимірювання вказаного НП, як в Україні [2], так і за кордоном [7], наведена на рис. 3.

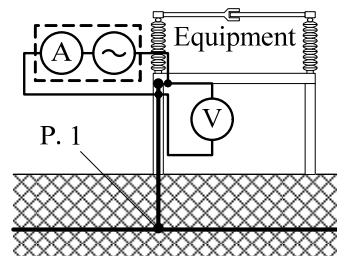


Рис. 3. Схема вимірювання опору контактних з'єднань

Таким чином, згідно схеми вимірювання, під опором контактного з'єднання мають на увазі перехідний опір між обладнанням та заземлювальним провідником. Проте, як показує практика експлуатації ЗП, та проведення вимірів НП ЗП, перевищення напруги дотику може наступити внаслідок порушення цілісності заземлювального провідника на межі «земля-повітря», а також в зв'язку зі збільшенням опору контактного з'єднання в точці зварки заземлювального провідника з самим ЗП (див. P. 1 на рис. 3). Тому врахування стану заземлювального провідника та якості його під'єднання, а відповідно й самого обладнання до ЗП, є важливою задачею. Для її контролю можна використовувати опір зв'язку, який визначається відносно іншого заземленого обладнання. Однак такої методики з мінімізацією кількості необхідних вимірювань на разі не існує.

Підсумовуючи, можна констатувати, що розглянуті вище методики мають наступні недоліки:

- неможливість проведення вимірювання напруги дотику, опору ЗП та напруги на ЗП на низці об'єктів у зв'язку з відсутністю вільної від комунікацій або споруд ділянки для розміщення допоміжних струмових та потенційних електродів;
- некоректне вимірювання НП ЗП у зв'язку з неврахуванням довжини виносу струмового електроду для двошарового ґрунту та відсутність такої залежності для три- і більше шарових ґрунтів;

- некоректне вимірювання напруги дотику та напруги на ЗП через неврахування залежності магнітної проникності заземлювачів від струму, що протікає по ним, і відтоку струму у заземлені нейтралі;

- неповна інформація про якість заземлення обладнання, яку дає вимір опору контактних з'єднань;

- технічна складність та значні трудові витрати при проведенні вимірювання напруги дотику на кожній одиниці обладнання енергооб'єкту (кількість таких одиниць на підстанції класом напруги 330 кВ може сягати декількох сотень, а трудові витрати на вимірювання однієї точки згідно з будівельними нормами [16] складають 15 люд-год).

Крім того, для об'єктів, які тривалий час знаходяться в експлуатації, проведення лише вимірювання перелічених НП не дозволяє однозначно оцінити стан ЗП: невідомим залишається конструктивне виконання та стан заземлювачів, що знаходяться під землею. Тому на сучасному етапі для контролю використовується електромагнітна діагностика (ЕМД) стану ЗП [2], яка включає в себе комплексне експериментальне та розрахункове (на основі реального стану ЗП та результатів додаткових експериментів) визначення всіх НП ЗП. Вказана методика поєднує в собі низку методів: вертикального електричного зондування ґрунту, індукційного методу визначення наявності заземлювачів, методу малого струму, розрахункового методу тощо.

4. Методика електромагнітної діагностики стану заземлювального пристрою. Методика ЕМД ЗП [2] діючих енергооб'єктів в цілому відповідає міжнародним стандартам [7] та [10], і передбачає проведення трьох етапів: експериментального, розрахункового та етапу видачі рекомендацій.

На першому етапі виконується:

- визначення конструктивного виконання ЗП за допомогою індукційного методу (місцезнаходження та глибина заземлювачів), необхідного в тому числі для побудови його математичної моделі;

- вимір уявного питомого опору для визначення електрофізичних характеристик ґрунту (питомого опору, товщини шарів та їх кількості) методом вертикального електричного зондування;

- вимір електричних параметрів (опору основи, опору ЗП, напруги дотику та напруги на ЗП відносно іншої заземленої точки) на основі методу амперметра-вольтметра та відомих схем, які необхідні для оцінки адекватності математичної моделі реальному ЗП.

Результати експериментальних досліджень разом з характеристиками енергооб'єкту (класом напруги, режимом роботи нейтралі трансформаторів та значенням струмів короткого замикання і часу спрацювання захисту) є вихідними даними для другого (розрахункового) етапу ЕМД.

При проведенні розрахунків на другому етапі використовується розроблена авторами математична модель нееквіпотенційного ЗП, розташованого в тришаровому провідному ґрунті з плоско-паралельними границями поділу [9]. Для того, щоб задати вихідні

параметри ґрунту використовуються засоби інтерпретації кривих вертикального електричного зондування та еквівалентування ґрунту. Моделювання процесів в ЗП виконується при реальному струмі КЗ з урахуванням нелінійної залежності магнітної проникності від його величини, скін-ефекту та реального розтікання аварійних струмів (у тому числі відтікання в заземлені нейтралі), що дозволяє визначити значення НП навіть для тих об'єктів, які розташовані в стислій забудові або на території промислових підприємств. Існуючі програмні засоби та математичні моделі дозволяють врахувати дво- та тришарову геоелектричну структуру ґрунту й охопити напряму понад 80 % енергооб'єктів України.

На третьому етапі виконується розробка рекомендацій обумовлених вимогами нормативних документів до конструктивного виконання заземлювачів, а також на основі порівняння значень розрахункових та допустимих параметрів оцінюється доцільність введення додаткових рекомендацій для проведення реконструкції заземлювального пристрою. Після цього проводиться повторний розрахунок з урахуванням рекомендованих додаткових заземлювачів. Синтез зазначених рекомендацій є складною технічною задачею, оскільки при її вирішенні необхідно визначити оптимальні місця прокладання заземлювачів для економії трудових та матеріальних витрат, і при цьому найбільш повно використовувати існуючий ЗП.

Таким чином, методика ЕМД стану ЗП дозволяє провести найбільш об'єктивну оцінку поточного стану ЗП та розробити способи для приведення його у відповідність до нормативних документів.

До недоліків ЕМД стану ЗП слід віднести помилки при визначенні конструктивного виконання ЗП та вплив допущень, прийнятих при побудові математичної моделі:

- похибка визначення глибини залягання ЗП;
- змінний переріз заземлювачів на різних частинах ЗП, що складно врахувати;

- помилки при ідентифікації горизонтальних заземлювачів (прийняття кабелів та підземних комунікацій за штучний заземлювач);

- проблеми знаходження місця встановлення вертикального заземлювача та відсутність методики визначення його довжини;

- допущення про плоско-паралельну багатошарову структуру ґрунту, який насправді має нахили та локальні включення;

- недостатня глибина зондування багатошарових ґрунтів та відсутність засобів інтерпретації.

5. Прилади для контролю стану заземлювального пристрою. В Україні використовується вітчизняний комплекс для діагностики стану ЗП «КДЗ-1У» [2] (див. рис. 4,а), французькі прилади С.А 6460 та С.А 6470N (див. рис. 4,б), а також вітчизняні стандартні прилади ще радянської конструкції: М-416 чи Ф 4103-М1, які по теперішній час застосовуються службами ізоляції та високовольтними лабораторіями на різних енергооб'єктах.



Рис. 4. Прилади для контролю стану ЗП:
а – «КДЗ-1У»; б – С.А 6470N

В табл. 1 наведено порівняння функцій найпоширеніших приладів для контролю стану ЗП діючих енергооб'єктів України.

Таблиця 1

Назва приладу	Стан ЗП	Питомий опір ґрунту	Опір ЗП	Напруга дотику	Опір контактних з'єднань
«КДЗ-1У»	+	+	+	+	+
С.А 6470N	-	+	+	+	+
С.А 6460	-	+	+	+	+
Абрис-12/8	+	-	-	-	-
Ф 4103-М1	-	+	+	-	-
М-416	-	+	+	-	-
ЕР-331	-	-	-	-	+

Аналіз приладів показує, що лише «КДЗ-1У» дозволяє виконувати повний комплекс робіт з ЕМД стану ЗП. Проте недоліком приладу є відсутність автономного живлення і мала величина допустимого опору вимірювальних електродів (що практично унеможливило проведення зондування ґрунту з питомим опором більше 350 Ом·м). Прилади ЕР-331 та Абрис-12/8 є вузько направлені й дозволяють виконувати лише вимір опору контактних з'єднань та пошук траси пролягання заземлювачів відповідно. Ф 4103-М1 та М-416 є технічно застарілими й також мають вузький спектр застосування. С.А 6460 у порівнянні з С.А 6470N має лише одну частоту вимірювання та не дозволяє проводити зондування ґрунту для енергооб'єктів класом напруги 220 кВ та вище. В цілому детальний аналіз характеристик та можливостей приладів для зондування ґрунту зроблено в [17].

Таким чином, найбільш широкі можливості для визначення НП ЗП мають «КДЗ-1У» та С.А 6470N. Виглядає перспективним удосконалення «КДЗ-1У» або розробка аналогічного без вказаних недоліків.

Висновки.

1. Проведено аналіз сучасних методів контролю стану ЗП та встановлено, що на відміну від визначення опору ЗП, яке можна робити як експериментально, так і розрахунковим шляхом, напругу на ЗП та напругу дотику при реальному струмі замикання на землю слід знаходити тільки розрахунковим шляхом за допомогою спеціальних комп'ютерних програм.

2. Показано, що методика ЕМД ЗП дозволяє провести найбільш об'єктивну оцінку поточного стану ЗП

та розробити рекомендації для приведення його у відповідність до нормативних документів.

3. Встановлено недоліки ЕМД ЗП, які пов'язані з помилками при визначенні його конструктивного виконання та впливом допущень, прийнятих при побудові математичної моделі.

4. Проведено аналіз приладів, що використовуються при контролі стану ЗП. Визначено перспективний напрямок удосконалення комплексу для діагностики заземлення «КДЗ-1У».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – Х. : «Форт», 2017. – 760 с.
2. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с.
3. Seljeseth H., Campling A., Feist K.H., Kuussaari M. Station Earthing. Safety and interference aspects // *Electra*. – 1980. – vol.71. – pp. 47-69.
4. Boaventura W.C., Lopes I.J.S., Rocha P.S.A., Coutinho R.M., Castro F., Dart F.C. Testing and evaluating grounding systems of high voltage energized substations: alternative approaches // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1999. – vol.14. – no.3. – pp. 923-927. doi: 10.1109/61.772335.
5. 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»*. – 2010. – iss.2. – vol.2. – no.1. – pp. 45-49.
6. Колечицкий Е.С. Приближенные оценки сопротивления заземляющих устройств // *Вестник МЭИ*. – 2006. – №4. – С. 56-62.
7. IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding. – New York: IEEE, 2000. – 200 p. doi: 10.1109/ieeestd.2000.91902.
8. 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.
9. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Определение электрического потенциала, создаваемого заземляющим устройством в трехслойном грунте // *Технічна електродинаміка*. – 2018. – №4. – С. 19-24. doi: 10.15407/techned2018.04.019.
10. IEEE Std 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. – New York: IEEE, 2012. – 86 p. doi: 10.1109/ieeestd.2012.6392181.
11. Нижевский И.В., Нижевский В.И., Бондаренко В.Е. Экспериментальное обоснование метода измерения сопротивления заземляющего устройства // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №6. – С. 60-64. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.10.
12. Целебровский Ю.В. Теория измерения сопротивления заземляющего устройства // *Доклады ТУСУР*. – 2012. – №1(25). – Ч.1. – С. 196-198.
13. Глебов О.Ю., Колиушко Д.Г., Линк И.Ю. Определение напряжения прикосновения методом суперпозиции составляющих тока однофазного замыкания на землю // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2005. – №49. – С. 85-88.
14. Salam M.A., Rahman Q.M., Ang S.P., Wen F. Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2015. – vol.5. – no.2. – pp. 290-297. doi: 10.1007/s40565-015-0153-8.
15. Фоменко О.В., Костенко М.А., Новикова А.О. Влияние сопротивления связи в заземляющем устройстве на повреждение электронной аппаратуры // *Глобальная ядерная безопасность*. – 2014. – №3(12). – С. 44-48.

16. Ресурсные элементные сметные нормы на пусконаладочные работы. Сборник 1. Электротехнические устройства. ДБН Д.2.6-1-2000. – К.: Держбудівництво України, 2001. – 49 с.

17. Руденко С.С. Требования к приборам для проведения вертикального электрического зондирования грунта при диагностике состояния заземляющих устройств // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №5. – С. 68-73. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.12.

REFERENCES

1. *Pravylyla ulashtuvannja elektroustanovok* [Electrical Installation Regulations]. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).

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

3. Seljeseth H., Campling A., Feist K.H., Kuussaari M. Station Earthing. Safety and interference aspects. *Electra*, 1980, vol.71, pp. 47-69.

4. Boaventura W.C., Lopes I.J.S., Rocha P.S.A., Coutinho R.M., Castro F., Dart F.C. Testing and evaluating grounding systems of high voltage energized substations: alternative approaches. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, vol.14, no.3, pp. 923-927. doi: 10.1109/61.772335.

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

6. Kolehitsky Ye.S. Approximate estimates of the resistance of grounding devices. *Vestnik MEI*, 2006, no.4, pp. 56-62. (Rus).

7. *IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, IEEE, 2000. 200 p. doi: 10.1109/ieeestd.2000.91902.

8. 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).

9. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Determination the electrical potential of a created grounding device in a three-layer ground. *Technical Electrodynamics*, 2018, no.4. pp. 19-24. (Rus). doi: 10.15407/techned2018.04.019.

10. *IEEE Std 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York, IEEE, 2012. 86 p. doi: 10.1109/ieeestd.2012.6392181.

11. Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I., Bondarenko V.E. The experimental validation of the grounding device resistance measurement method. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 60-64 (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.10.

12. Tselebrovskiy Yu.V. The theory of measurement of resistance of earthing device. *Proceedings of TUSUR*, 2012, iss.1, part 1, pp. 196-198. (Rus).

13. Glebov O.Yu., Koliushko D.G., Link I.Yu. Determination of the touch voltage by the method of superposition of current components of a single-phase earth fault. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2005, no.49, pp. 85-88. (Rus).

14. Salam M.A., Rahman Q.M., Ang S.P., Wen F. Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2015, vol.5, no.2, pp. 290-297. doi: 10.1007/s40565-015-0153-8.

15. Fomenko O.V., Kostenko M.A., Novikova A.O. Influence of Communication Resistance on Damage of the Electronic Equipment in the Grounding Device. *Global Nuclear Safety*, 2014, no.3(12), pp. 44-48. (Rus).

16. *Resursnye elementnye smetnye normy na puskonaladochnye raboty. Sbornik 1. Elektrotekhnicheskie ustroystva. DBN D.2.6-1-2000* [Resource elemental estimates for commissioning. Collection 1. Electrotechnical devices. DBN D.2.6-1-2000]. Kyiv, Derzhbudivnytstvo Ukrainy Publ., 2001. 49 p. (Rus).

17. Rudenko S.S. Requirements for devices for vertical electrical sounding of soil at diagnostics of grounding devices. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.5, pp. 68-73. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.12.

Надійшла (received) 13.09.2018

Коліушко Денис Георгійович¹, к.т.н., с.н.с.,
 Руденко Сергій Сергійович¹, к.т.н., н.с.,
¹Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»,
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
 e-mail: nio5_molnija@ukr.net

D.G. Koliushko¹, S.S. Rudenko¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Analysis of methods for monitoring of existing energy objects grounding devices state at the present stage.

Purpose. The purpose of the work is to analyze the modern methods of control and determine the most effective ones for monitoring the state of grounding of existing energy objects in operation. **Methodology.** The analysis of the methods was carried on the basis of comparison the experimental and calculation methods for determining the rated parameters of the grounding of existing energy objects. **Results.** Significant imperfections of measurements of the rated parameters of the grounding with different methods and devices was established. It has been shown that the electromagnetic diagnostics is the most complete, which allows to comprehensively assess the current state of the grounding and establish the resistance of the grounding, the voltage on it, the touch voltage and the resistance of the contact joints. The deficiencies of electromagnetic diagnostics are established at the present stage and further directions of its perfection are determined. **Originality.** For the first time the comparative analysis of existing methods for monitoring the state of the grounding and directions for improving electromagnetic diagnostics was made. **Practical value.** The obtained results allow to choose the optimum method for monitoring the state of the grounding. Elimination of the revealed drawbacks of the method of electromagnetic diagnostics will improve the accuracy of the determination of rated parameters. References 17, tables 1, figures 4.

Key words: grounding device, resistance of the grounding device, grounding device voltage, touch voltage, resistance of contact joints, electromagnetic diagnostics.