

УДК 621.316.99

doi:10.20998/2413-4295.2023.02.03

ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ У ВИГЛЯДІ ТРИШАРОВОЇ ГЕОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРИ

Д. Г. КОЛУШКО, С. С. РУДЕНКО*

НДПКІ «Молнія», НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
e-mail: nio5_molniya@ukr.net

АНОТАЦІЯ Електротехнічний персонал при контролі стану заземлювального пристрою повинен самостійно вирішувати задачу інтерпретації результатів вертикального електричного зондування (ВЕЗ) ґрунту за допомогою власних знань та практичного досвіду. Під час інтерпретації застосовують застарілі палетки або ж дорогі програмні комплекси, які дозволяють аналізувати лише двошарові ґрунти. Це призводить до великої кількості помилок та неточностей в оцінці стану системи заземлення та погіршує їх роботу. У зв'язку з цим була розроблена програма для інтерпретації результатів ВЕЗ у вигляді тришарової геоелектричної структури. Програма реалізована на мові програмування Delphi та містить дві частини: обчислювальну та графічну. Обчислювальна частина програми використовує методи точкового джерела струму, Хука-Дживса, еквівалентування та методи теорії надійності для оптимізації визначення параметрів геоелектричної моделі. Графічна частина дозволяє користувачеві візуалізувати отримані результати та виконувати їх аналіз. Для підтвердження достовірності розробленої програми було проведено порівняння результатів експериментального вимірювання опору заземлювального пристрою з результатами розрахунку за допомогою програми для 65 підстанцій класом напруги 35 кВ одного з облenerго України. Отримані результати показали, що програма дає достовірні результати та може покращити якість контролю стану заземлювальних пристроїв, а відповідно підвищити надійність та безпеку експлуатації електричних станцій та підстанцій.

Ключові слова: підстанція; заземлювальний пристрій; вертикальне електричне зондування; питомий опір, ґрунт

SOFTWARE FOR INTERPRETING THE RESULTS OF VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING IN THE FORM OF A THREE-LAYER GEOELECTRIC STRUCTURE

D. KOLIUSHKO, S. RUDENKO*

Research and Design Institute "Molniya", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT By monitoring the state of the grounding system, electrical engineering personnel must independently solve the problem of interpreting the results of vertical electrical sounding (VES) of the soil using their own knowledge and practical experience. During the interpretation, outdated palettes or expensive software complexes are used, which allow analyzing only two-layer soils. This leads to a large number of errors and inaccuracies in the assessment of the state of the grounding system and worsens their operation. In this regard, a program was developed for the interpretation of the results of the VES in the form of a three-layer geoelectrical structure. The program is implemented in the Delphi programming language and contains two parts: computational and graphic. The computational part of the program uses point source current, Hooke-Jives, equivalence and reliability theory methods to optimize the determination of geoelectric model parameters. The graphical part allows the user to visualize the obtained results and perform their analysis. To confirm the reliability of the developed program, a comparison of the results of the experimental measurement of the resistance of the grounding arrangements with the results of the calculation using the program was made for 65 substations with a voltage class of 35 kV of one of the regional energy companies of Ukraine. The obtained results showed that the program gives reliable results and can improve the quality of monitoring the condition of grounding systems, and accordingly increase the reliability and safety of operation of electrical stations and substations.

Keywords: substation; grounding arrangement; vertical electrical sounding; resistivity, soil

Вступ

Заземлювальний пристрій електричних станцій та підстанцій представляє собою складну технічну систему, яка призначена в першу чергу для забезпечення електричної безпеки персоналу та надійності роботи дорогоцінного високовольтного і чутливого низьковольтного обладнання [1]. На разі для контролю його ефективності роботи використовують методику електромагнітної діагностики з експериментально-розрахунковим способом визначення нормованих параметрів системи заземлення на основі відомостей про поточну топологію заземлювачів та електрофізичні характеристики (ЕФХ) ґрунту.

Для визначення ЕФХ ґрунту використовуються геофізичні методи зондування та спеціалізовані програми для інтерпретації їх результатів. В практиці контролю стану заземлювальних пристроїв найбільше розповсюдження отримав метод вертикального електричного зондування (ВЕЗ) з використанням установки Веннера [2]. Перевагами зазначеного способу є простота його використання, висока чутливість до горизонтальних неоднорідностей та слабка до вертикальних (що відповідає особливостям засобів моделювання електромагнітних процесів у системі заземлення), пряма залежність між рознесенням вимірювальних електродів та глибиною

зондування, відносно прості вирази для інтерпретації результатів тощо.

ВЕЗ виконується (див. рис. 1) шляхом ін'єктування генератором вимірювального струму через електроди C_1 та C_2 та вимірювання падіння напруги на ділянці поверхні ґрунту електродами P_1 та P_2 . При цьому для симетричної установки Веннера відстань між сусідніми електродами L буде однаковою. На рис.1 наведено схема зондування ґрунту з використанням комплексу для діагностики систем заземлення KNTR-1, розробленого за участю фахівців НДПКи «Молнія» НТУ «ХПІ» [3].

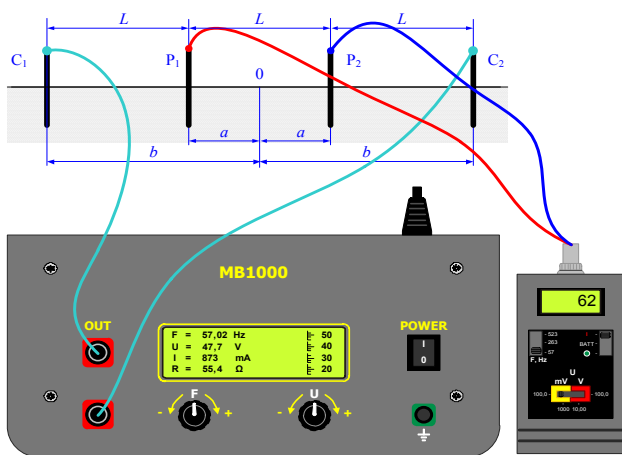


Рис. 1 – Схема виконання ВЕЗ установкою Веннера: C_1 та C_2 – струмові електроди, P_1 та P_2 – потенційні електроди; L – міжелектродна відстань; a та b – відстань до потенційного та струмового електроду від нульової точки відповідно

При виконанні вимірювань струмові електроди розглядаються як два точкові джерела струму, а потенційні як точки спостереження. Тоді величина уявного питомого електричного опору визначається за формулою:

$$\rho_k = \frac{U}{I} k, \quad (1)$$

де U та I – виміряні значення напруги та струму відповідно; $k = 2\pi L$ – геометричний коефіцієнт установки Веннера.

За результатами вимірювань будується крива ВЕЗ, як правило, у вигляді залежності уявного питомого опору від міжелектродної відстані.

Для інтерпретації результатів необхідно вирішити зворотню задачу електророзвідки, тобто визначити за кривою ВЕЗ електрофізичні характеристики ґрунту: кількість шарів, питомий електричний опір кожного шару та його товщину.

У загальному випадку для інтерпретації результатів ВЕЗ при виконанні геологічних вишукувальних робіт використовується ряд спеціалізованих програм для визначення геоелектричної структури ґрунту [4]. Їх використання

в межах контролю стану заземлювального пристрою обмежується низкою особливостей:

- в геології вирішується задача визначення фізичного середовища, а не його електричні характеристики;

- сучасні програми орієнтовані на побудову складної тривимірної картини, що не дозволяє розповсюдити отримані результати на засоби моделювання процесів в системі заземлення;

- відсутність можливості еквівалентування геоелектричних моделей (приведення складних багат шарових з нахиленими границями розділу шарів до простіших одно-, дво- та тришарових моделей з плоско паралельними границями поділу);

- складність використання для інженерів без геологічної освіти.

Тому в практиці контролю стану існуючих заземлювальних пристроїв, що знаходяться в експлуатації, та при проектуванні нових склалася ситуація, коли інженери випробувальних лабораторій використовують палетки для інтерпретації результатів ВЕЗ. Їх опис та принцип використання наведені зокрема в [5]. Проте вони мають досить значну похибку, пов'язану з тим, що дають точне значення лише для певних співвідношень ґрунту, а для інших випадків слід використовувати апроксимацію та не дозволяють напряму виконати інтерпретацію зокрема для тришарових ґрунтів. Аналогічна проблема спостерігається і з програмами для інтерпретації результатів ВЕЗ, які вбудовані в комплекси для розрахунку параметрів заземлення, зокрема найпоширеніші комплекси ETAP, GSA та Grounding розглядають лише двошарову структуру ґрунту. Враховуючи, що в Україні в місцях розташування енергооб'єктів найпоширенішим є тришаровий ґрунт, який складає понад 70 %, вдосконалення засобів інтерпретації в межах діагностики стану заземлювальних пристроїв є актуальною задачею.

Крім того, програмні комплекси не передбачають окремого модулю для інтерпретації ВЕЗ, а вартість комплексу в цілому складає 10-20 тис. доларів.

Мета роботи

Таким чином, метою роботи є розробка програмного засобу для інтерпретації результатів вертикального електричного зондування в межах контролю стану заземлювальних пристроїв з можливістю опрацювання тришарових ґрунтів.

Вихідні дані для розробки програмного засобу

Враховуючи регламентовані в міжнародних та вітчизняних стандартах методики контролю стану заземлювальних пристроїв [5-7], а також накоплені за останні 25 років досвід, були сформовані наступні вимоги до створюваного програмного засобу:

- інтерпретація результатів ВЕЗ у вигляді геоелектричної структури з плоско-паралельними межами поділу шарів та їх числом не менше трьох;

- отримання набору електрофізичних характеристик ґрунту (питомого електричного опору та потужностей шарів);
- можливість еквівалентування ґрунту, тобто. приведення тришарового до еквівалентного двох або одношарового ґрунту;
- можливість проводити як інтерактивну інтерпретацію, так і автоматичну;
- графічне відображення експериментальних точок ВЕЗ та кривих інтерпретації;
- розрахунок середньої похибки з метою оцінки точності інтерпретації.

Принцип роботи програмного засобу можна представити у вигляді блок-схеми (див. рис.2).



Рис. 2 – Блок-схема роботи програмного засобу для інтерпретації ВЕЗ

Для проведення інтерпретації в основу програми закладені вирази для визначення уявного питомого опору ρ_k як функції від величини L у багатошаровому середовищі з плоско-паралельними межами поділу при проведенні ВЕЗ установкою Веннера:

- при двошаровій структурі [8]:

$$\rho_k = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K_{2,1}^n \left[\frac{L}{\sqrt{L^2 + (2nh)^2}} - \frac{L}{\sqrt{4L^2 + (2nh)^2}} \right] \right\}, \quad (2)$$

де h – глибина поділу шарів у двошаровій та спільна міра у тришаровій моделях; $K_{2,1} = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ – коефіцієнт неоднорідності; n – номер члену ряду;

- при тришаровій структурі:

$$\rho_k = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} q_n^n \left[\frac{L}{\sqrt{L^2 + (2nh)^2}} - \frac{L}{\sqrt{4L^2 + (2nh)^2}} \right] \right\}, \quad (3)$$

де q_n – коефіцієнт розкладання підінтегральної функції [9].

Формули (2) і (3), отримані на підставі виразу для потенціалу електричного поля точкового джерела струму у багатошаровому середовищі [9], при розташуванні його та точки спостереження на поверхні ґрунту. При цьому (3) було отримано з застосуванням методу невизначених коефіцієнтів.

Для реалізації блоку автоматичної інтерпретації було використано метод Хука-Дживса [10], застосування якого для інтерпретації двошарової структури ґрунту детально наведено в [11].

Для приведення багатошарової геоелектричної структури до еквівалентної в [8] були отримані вирази шляхом вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення еквівалентних питомих опорів ρ_e та товщини еквівалентного шару h_e :

$$\rho_e = \sqrt{\sum_{i=1}^m h_i \cdot \rho_i \times \left(\sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\rho_i} \right)^{-1}}; \quad (4)$$

$$h_e = \sqrt{\sum_{i=1}^m h_i \cdot \rho_i \times \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\rho_i}}; \quad (5)$$

де ρ_i та h_i – ПЕО та товщина (потужність) i -го шару відповідно.

На основі виразів (1) – (5) та наведеної блок-схеми в середовищі розробки програмного забезпечення Delphi Embarcadero було реалізовано програмний засіб для інтерпретації результатів вертикального електричного зондування «VEZ-3EQ».

Опис роботи програмного засобу

Програма для інтерпретації складається із трьох частин:

- інтерфейсна частина для введення експериментальних даних, роботи з програмою, відображення отриманих результатів (див. рис. 3);
- розрахункова частина;
- модуль створення, відкриття та збереження та файлів.

В комірки стовпчика «L, м» заносяться відстані між струмовими та потенційним електродами, а в комірки стовпчика «R, Ом», відповідні їм виміряні при проведенні експерименту значення уявного питомого опору.

В блоці «Chart options» встановлюються максимальні та мінімальні значення питомого опору ґрунту для визначення граничних значень області побудови діаграми по осі ординат.

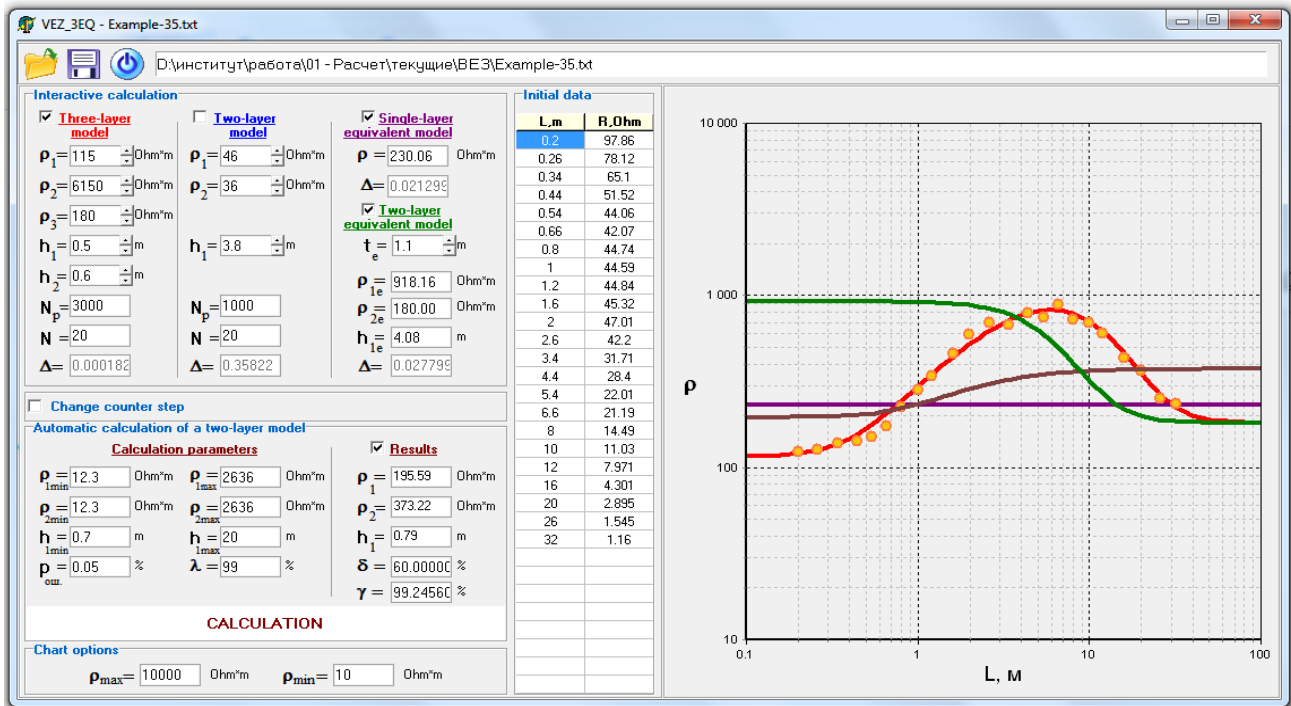


Рис. 3 – Вікно програми для інтерпретації ВЕЗ

Після введення вихідних даних виконуються інтерпретація за допомогою декількох моделей (рис. 4):

- тришарової;
- двошарової;
- еквівалентної двошарової (еквівалентування тришарової моделі за заданим оператором значенням глибини еквівалентування t_e);
- еквівалентної одношарової (еквівалентування тришарової моделі, за глибину еквівалентування береться значення $t_e = (L_{max} - 0,1 \text{ м})$).

Запуск розрахунку та графічне відображення кривих ВЕЗ відбувається при виборі відповідної моделі, наприклад **Three-layer model**, при цьому можна обирати декілька моделей одночасно.


Змінюючи параметри – питомий опір шарів ρ_i та товщину шарів h_i досягають якомога більшого співпадіння кривої ВЕЗ з результатами експерименту. При цьому контроль за відповідністю здійснюється двома способами:

1) візуальним порівнянням співпадіння експериментальних точок та розрахункової кривої ВЕЗ на графіку;

2) мінімізацією значення похибки Δ (її найменше значення відповідає максимальній точності співпадіння моделі ґрунту з результатами експерименту).

Змінювати параметри моделей також можна двома способами:

1) безпосереднім введенням значення параметрів ρ_i та h_i в комірку;

2) змінюванням значення за допомогою лічильника . Крок лічильника є плаваючим і залежить від абсолютного значення параметра, а також

може бути зменшений при виборі пункту **Change counter step** задля більш точної інтерпретації.

Величина N_p – кількість членів ряду при обчисленні розрахункового значення уявного питомого опору і за замовчуванням становить 1000. Може бути збільшено при великому співвідношенні ρ_1/ρ_2 та ρ_2/ρ_3 для покращення сходимості ряду. Величина N – кількість точок при побудові кривої ВЕЗ за замовчуванням – 20. Може бути збільшено при великому співвідношенні ρ_1/ρ_2 , ρ_2/ρ_3 та при глибині зондування L більше 32 м для точнішої побудови кривої.

На рис. 4, для прикладу наведено результати інтерпретації в інтерактивному режимі кривих ВЕЗ на півночі, півдні та центральній частині України.

Доцільно надати числові характеристики похибки інтерпретації для кожної кривої: для ПС №1 становить $\Delta = 0,003918$; ПС №2 – $\Delta = 0,001856$; ПС №3 – $\Delta = 0,002143$.

Під еквівалентною моделлю розуміється така модель ґрунту, в якій електрод буде мати такі ж самі електрофізичні характеристики, що й електрод, розміщений у вихідній моделі ґрунту. Для еквівалентування спочатку потрібно провести інтерактивне інтерпретування кривої ВЕЗ у вигляді тришарової моделі. При цьому одношарова еквівалентна модель буде розрахована автоматично, значення еквівалентного питомого опору з'явиться у відповідній комірці блоку «Single-layer equivalent model» (рис. 5).

Для розрахунку двошарової еквівалентної моделі слід встановити границю еквівалентування t_e відповідно з типом вихідного ґрунту та особливостям моделювання електромагнітних процесів в системі заземлення (значення за замовчуванням – 0,5 м).

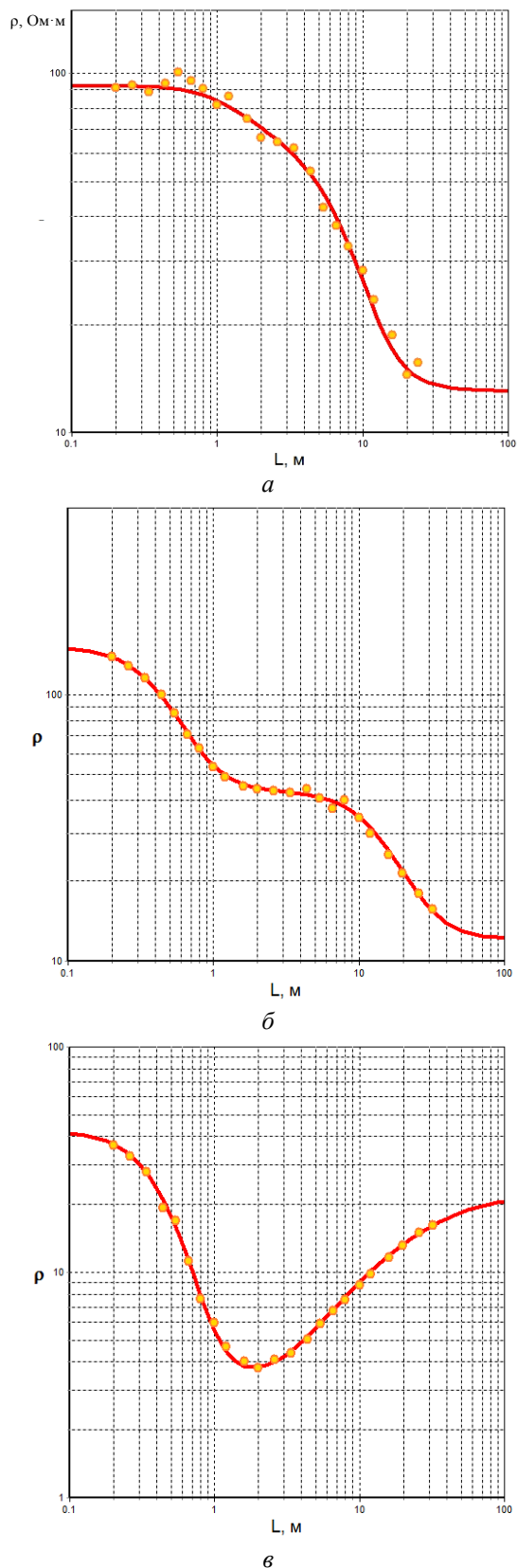


Рис. 4 – Експериментальні точки ВЕЗ та криві тришарової інтерпретації:
а – ПС-150 кВ; б – ПС-330 кВ; в – ПС-110 кВ

Значення еквівалентних питомих опорів першого та другого шарів (ρ_1 та ρ_2 відповідно) і глибини розділу шарів (h_1) з'явиться у відповідних комірках блоку «Two-layer equivalent model» (див. рис. 5). Для побудови графіку еквівалентної моделі слід обрати відповідний пункт в блоці.

Крім інтерактивної інтерпретації у розробленому програмному засобі можна виконувати також автоматичну. Для цього в блоці «Automatic calculation of a two-layer model» (див. рис. 6, а) необхідно ввести граничні параметри пошуку (рекомендується встановлювати їх згідно з мінімальним та максимальним значенням експериментальної кривої ВЕЗ), а також вірогідність помилки p_o (за замовченням – 0,05) та надійність розрахунку λ (за замовченням – 99%). Слід зазначити, що зі зменшенням p_o та збільшенням λ буде зростати час розрахунку параметрів моделі.

Single-layer equivalent model

$\rho = 230.06 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$

$\Delta = 0.02129\%$

Two-layer equivalent model

$t_e = 1.1 \text{ m}$

$\rho_{1e} = 918.16 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$

$\rho_{2e} = 180.00 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$

$h_{1e} = 4.08 \text{ m}$

$\Delta = 0.02779\%$

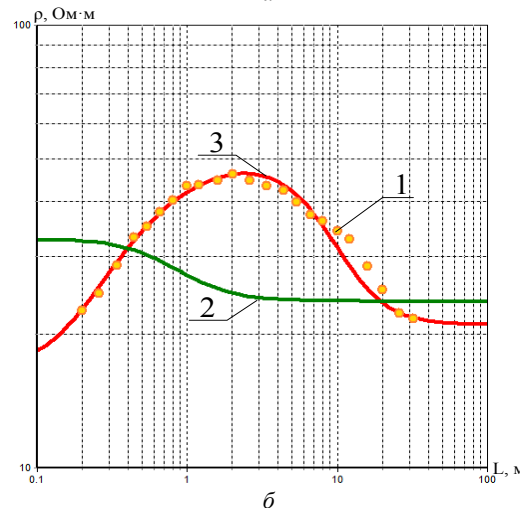


Рис. 5 – а – блоки одношарової та двошарової еквівалентних моделей; б – відображення результатів розрахунку на графіку: 1 – експериментальні значення; 2 – крива еквівалентування двошаровою моделлю ґрунту; 3 – крива інтерпретації тришаровою моделлю ґрунту

Запуск процедури відбувається при натисканні кнопки розрахунку – «Calculation» (див. рис. 6, а) або кнопки «Space» на клавіатурі. Графічне відображення кривої ВЕЗ (рис. 6, б) здійснюється вибором пункту. Після закінчення процедури автоматичної

інтерпретації отримані результати розрахунку параметрів моделі (ρ_1 , ρ_2 та h_1) виводяться у відповідні комірки. Максимальне відхилення результатів розрахунку від експериментальних даних δ та достовірність моделі γ (допустимі значення даних параметрів вибираються згідно з умовами задачі, що вирішується) рекомендовано досягнути значення $\delta \leq 10\%$, а $\gamma \leq 95\%$. Якщо було отримано занадто велике значення δ або низьке γ , то можливими варіантами задля підвищення точності розрахунку є:

- збільшення граничних параметрів пошуку;
- зменшення вірогідності помилки рош. та (або) збільшення надійності розрахунку λ ;
- видалення явно помилкової точки з блоку вихідних даних, якщо вона не відповідає тенденції розміщення експериментальної кривої ВЕЗ.

Практична апробація

З метою перевірки отриманих результатів було виконано практичну апробацію програмного засобу шляхом порівняння результатів вимірювання опору заземлювального пристрою з результатами розрахунку.

Calculation parameters		Results
ρ_{1min} = 3.1 Ohm*m	ρ_{1max} = 1508 Ohm*m	ρ_1 = 368.57 Ohm*m
ρ_{2min} = 3.1 Ohm*m	ρ_{2max} = 1508 Ohm*m	ρ_2 = 27.63 Ohm*m
h_{1min} = 0.7 m	h_{1max} = 20 m	h_1 = 5.27 m
$\rho_{out.}$ = 0.05 %	λ = 99 %	δ = 27.00000 %
		γ = 99.09610 %

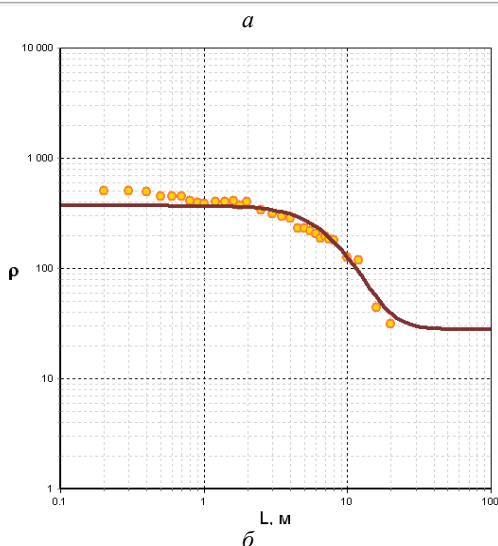


Рис. 6 – Фрагменти вікна програми для автоматичної інтерпретації ВЕЗ:

- а – параметри розрахунку та його результат;
- б – відображення результатів розрахунку на графіку

Значення опору заземлювального пристрою, як критерій було обрано з наступних причин:

– опір є єдиним нормованим параметром системи заземлення, який може бути визначено експериментальним шляхом на основі прямих вимірювань;

– на відміну від напруги дотику та напруги на заземлювальному пристрої практично не залежить від точності визначення топології заземлювачів в локальній точці вимірювання, величини вимірювального струму та короткого замикання, опору поверхні ґрунту тощо.

Вихідними даними для розрахунку слугували: топологія заземлювальної сітки, визначена індукційним методом та електрофізичні характеристики тришарового ґрунту, що були отримані при інтерпретації результатів ВЕЗ з допомогою VEZ-3EQ. Розрахунок опору системи заземлення було виконано з використанням програмного комплексу «LiGro» [12]. Аналіз проведено на основі результатів електромагнітної діагностики стану заземлювального пристрою 82 діючих підстанцій класом напруги 35 кВ одного з облэнерго України, розташованого на півночі країни. З вибірки були виключено 17 об'єктів у яких було зафіксовано чотири та більше шарів ґрунту, а також на яких не виконувалося вимірювання опору заземлювального пристрою.

Вихідні дані, а також результати порівняння зведено в таблиці. Зокрема, наведено:

- умовне позначення підстанцій (№ ПС);
- результати інтерпретації ВЕЗ: питомий опір першого (ρ_1), другого (ρ_2) та третього (ρ_3) шарів ґрунту, товщина першого (h_1) та другого шарів (h_2);
- виміряне (R_e) та розрахункове (R_c) значення опору системи заземлення;
- відносне відхилення розрахункового значення від виміряного (δ).

За результатами аналізу можна відмітити, що для 40 підстанцій із 65 розрахункове значення не відрізняється більше ніж на 10 % від виміряного. При цьому з 25 підстанцій у яких похибка перевищує 10 % – для 21 значення δ є позитивним, що вказує на завищення розрахункового опору. Така закономірність спостерігається для тих об'єктів де ефективно працюють природні заземлювачі (фундаменти обладнання та конструкцій підстанції: порталів, блискавковідводів, заборів тощо, які розташовуються на глибині 0,8 – 3,5 м). Зокрема, це характерно для підстанцій у яких другий шар ґрунту має найменший питомий опір, а також об'єктів з сумарною товщиною верхніх шарів до 3,5 м і третім шаром з найменшим питомим опором. Зокрема це стосується об'єктів № 3, №9, №21, №22, №35, №45, №47, №48 та №50. Крім того, значний вплив можуть давати кабелі, що відходять розподільчих пристроїв та тросові блискавкоприймачі, що характерно для підстанцій №13 та №32 відповідно. Загалом, для розглянутих підстанцій середнє абсолютне відхилення складає 8,77 %, що задовольняє вимогам для інженерних розрахунків.

Таблиця – Підтвердження адекватності розробленої програми

№ ПС	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	ρ_3 , Ом·м	h_1 , м	h_2 , м	R_e , Ом	R_c , Ом	δ , %	№ ПС	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	ρ_3 , Ом·м	h_1 , м	h_2 , м	R_e , Ом	R_c , Ом	δ , %
№1	53	28	15	1,9	9,2	0,62	0,64	3,9	№34	910	260	164	0,4	2	5,60	5,53	-1,3
№2	44	28	50	1,4	13,2	0,70	0,73	5,0	№35	195	44	75	0,9	2,6	1,17	1,35	15,0
№3	160	49	190	0,4	8,9	1,27	1,53	20,5	№36	35	60	30	0,2	0,7	1,00	0,78	-22,4
№4	68	36	14	0,7	10,7	0,75	0,68	-8,8	№37	22,5	50	19	0,2	9,2	0,62	0,68	10,0
№5	69	12,5	60,3	1,1	9	0,60	0,68	13,1	№38	49	63	24	0,7	6,5	1,00	0,90	-9,6
№6	55	43,5	23	0,6	6,9	0,99	0,91	-7,7	№39	108	50	24	0,9	4,9	1,15	1,23	6,7
№7	166,5	38	90	0,5	6,1	1,16	1,22	5,0	№40	1150	20	900	1,4	3,2	9,70	8,37	-13,7
№8	72,8	22	34,4	1,2	5,5	0,81	0,92	12,7	№41	320	27	250	0,4	5	1,33	1,47	10,3
№9	210	72	60	0,3	1	1,06	1,40	31,7	№42	47	800	250	2,4	4,1	2,60	2,66	2,4
№10	550	36	46	0,4	4,2	1,12	1,21	7,7	№43	49,8	19	220	1,9	15,9	0,90	0,95	6,0
№11	610	31	115	0,6	1,5	2,37	2,47	4,0	№44	195	60	125	0,5	7,5	1,79	1,79	0,1
№12	17	49,5	21	0,2	4,7	0,96	0,76	-20,4	№45	73	28	139	1,2	3,8	1,25	1,49	19,3
№13	50	21	46,5	1,8	4,9	0,88	1,11	27,0	№46	54	64	18	0,2	1,9	0,50	0,52	4,5
№14	34	2	2000	1,1	5,5	0,87	0,74	-14,7	№47	120	47	210	0,8	1,5	2,00	2,52	26,2
№15	42,7	20	34	1,8	12,8	0,61	0,56	-7,4	№48	65	35,4	140	0,6	16,8	0,67	0,91	35,5
№16	79	35	30	1,3	4,3	0,87	0,83	-5,2	№49	25	42	14	0,1	12,1	0,56	0,59	5,7
№17	41	59	33,5	0,3	2	0,78	0,85	9,5	№50	49	17,6	39	1	17	0,76	0,90	18,2
№18	27	41	15	1,3	12,8	0,60	0,60	0,3	№51	350	45	77	0,4	4	0,95	1,03	8,6
№19	1250	1770	130	0,4	1,4	7,20	7,54	4,8	№52	48	23	79	1,5	15,5	0,63	0,63	0,0
№20	95	55	35	0,4	11	1,20	1,32	9,7	№53	56,6	18	20	2,9	12,8	0,44	0,50	13,0
№21	980	100	30	0,6	3,2	0,84	0,96	14,4	№54	95	35	14,2	0,8	1,2	0,53	0,64	20,8
№22	101,4	160	30	0,9	5,5	1,09	1,23	13,3	№55	4400	765	101	0,8	5,3	10,1	10,1	0,0
№23	33	58	21	0,1	11,4	0,79	0,79	0,2	№56	950	240	80	0,3	17,3	3,81	3,80	-0,2
№24	82	31,5	13	0,4	7,4	0,71	0,59	-16,5	№57	200	62	450	0,4	8,4	2,80	2,83	1,2
№25	66	36,3	16,5	1,4	19,4	0,70	0,70	1,1	№58	28,5	17	120	7	11	0,68	0,69	2,1
№26	47,7	136	60,8	2	9,1	1,37	1,37	0,1	№59	61	12,5	31	1,7	4,2	0,87	1,01	15,6
№27	91	29	41,8	2,1	12,6	0,90	0,96	7,1	№60	460	37,8	77	0,5	6,6	1,06	1,14	7,2
№28	65	450	80	0,7	1,7	2,60	2,75	5,6	№61	515	132	93	0,3	2,7	2,24	2,17	-2,8
№29	36	28	16,2	0,5	2,2	0,30	0,33	9,0	№62	210	28,5	130	1,7	12,2	1,74	1,73	-0,5
№30	36	8,4	180	1,5	25	0,50	0,48	-3,7	№63	63	49	13	0,7	8,1	0,99	1,18	19,9
№31	5690	1200	260	0,9	5,2	21,1	23,7	12,1	№64	47	48	24	0,8	9	0,61	0,71	16,1
№32	65	85	37	0,2	1,2	0,61	0,69	13,2	№65	102	44	13	0,6	5,2	0,56	0,57	2,0
№33	68	90	38	0,2	1	1,29	1,22	-5,4									

Розроблена в дослідженні програма була застосована для інтерпретації результатів ВЕЗ при електромагнітній діагностиці стану заземлювальних пристроїв понад 450 енергооб'єктів України (зокрема двох атомних станцій, підстанцій НЕК «Укренерго», «ДТЕК Донецькобленерго», «ДТЕК Високовольтні мережі», «ДТЕК Дніпрообленерго» «Миколаївобленерго», «Кіровоград-обленерго» тощо) класами напруги від 35 кВ до 750 кВ.

Висновки

Сформовано вимоги для засобів інтерпретації результатів ВЕЗ в межах контролю стану діючих та проєктування нових заземлювальних пристроїв. Узагальнено алгоритм роботи та вирази, які необхідно використовувати для аналізу результатів зондування установкою Веннера.

Реалізовано та детально описано принцип роботи програмного засобу VEZ-3EQ під час виконання контролю стану заземлювального пристрою. Розроблена програма характеризується простотою роботи, інтуїтивно зрозумілим та дружнім інтерфейсом. Зручністю інтерактивної та автоматичної роботи.

Виконано практичну апробацію програмного засобу для інтерпретації результатів ВЕЗ під час обстеження стану діючих енергетичних об'єктів. У

якості критерію було обрано опір заземлювального пристрою, що пояснюється можливістю прямих вимірювань та незалежністю від точності визначення топології заземлювачів в локальній точці вимірювання, величини вимірювального струму та короткого замикання, опору поверхні ґрунту. Було встановлено, що електрофізичні характеристики, визначені з використанням програмного засобу VEZ-3EQ сумісно з експериментально-розрахунковим методом електромагнітної діагностики та програмного комплексу «LiGro», дозволяють визначити опір системи заземлення діючої підстанції з похибкою до 8,8 %.

Список літератури

1. Глебов О. Ю. К вопросу определения сопротивления заземляющего устройства по его конструктивным параметрам. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2018. № 36 (1312). С. 14-20.
2. Arnaudovski-Toseva V., Grcev L. Image and exact models of a vertical wire penetrating a two-layered earth. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2011. Vol. 53. no. 4. P. 968-976. doi: 10.1109/TEMC.2011.2149533.
3. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Koliushko G. M., Plichko A. V. Testers for Measuring the Electrical Characteristics of Grounding Systems by IEEE Standards. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 216-220. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250116.

- Colominas I., Navarrina F., Casteleiro M. Analysis of transferred Earth potentials in grounding systems: a BEM numerical approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. 1. P. 339-345. doi:10.1109/TPWRD.2004.835035.
- IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding. NY: IEEE, 2013. 226p. doi:10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
- IEEE Standard 81-2012. IEEE Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system. NY: IEEE, 2012. 86 p. doi:10.1109/ieeestd.2012.6392181.
- Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009. Київ : Мінпаливенерго України, 2010. 54 с.
- Коліушко Д. Г., Руденко С. С., Коліушко Г. М. Електрофізичні характеристики ґрунту в місцях розташування енергооб'єктів України. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 3. С. 67-72.
- Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Апроксимація функції, що характеризує тришарову модель ґрунту, методом найменших квадратів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2011. № 16. С. 126-132.
- Dolan E. D., Lewis R. M., Torczon V. J. On the local convergence of pattern search. *SIAM Journal on Optimization*. 2003. 14 (2). P. 567–583. doi:10.1137/S1052623400374495.
- Петков О. О., Коліушко Д. Г., Лінк І. Ю. Визначення параметрів двошарової моделі ґрунту за результатами вертикального електричного зондування, проведеного в районі розташування підстанцій. *Електрифікація та автоматизація сільського господарства*. 2004. 2(7). С.3-11.
- Koliushko D. G., Rudenko S. S., Istomin O. Ye., Saliba A. N. Simulation of electromagnetic processes in the grounding system with a short circuit in the operating high-voltage substation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. no. 4. P. 75–80. doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.11.
- Arnautovski-Toseva V., Grcsev L. Image and exact models of a vertical wire penetrating a two-layered earth. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 4, pp. 968-976, doi: 10.1109/TEMC.2011.2149533.
- Koliushko D. G., Rudenko S. S., Koliushko G. M., Plichko A. V. Testers for Measuring the Electrical Characteristics of Grounding Systems by IEEE Standards. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2020, pp. 216-220, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250116.
- Colominas I., Navarrina F., Casteleiro M. Analysis of transferred Earth potentials in grounding systems: a BEM numerical approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, 1, pp. 339-345, doi:10.1109/TPWRD.2004.835035.
- IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding. NY, IEEE, 2013. 226 p. doi:10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
- IEEE Standard 81-2012. IEEE Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system. NY. IEEE, 2012. 86 p. doi: 10.1109/ieeestd.2012.6392181.
- Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p.
- Koliushko D. G., Rudenko S. S. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 67-72.
- Koliushko D. G., Rudenko S. S. Approximation of a function characterizing a three-layer soil model by the least squares method. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2011, 16, pp. 126-132.
- Dolan E. D., Lewis R. M., Torczon V. J. On the local convergence of pattern search. *SIAM Journal on Optimization*, 2003, 14 (2), pp. 567–583, doi: 10.1137/S1052623400374495.
- Petkov A. A., Koliushko D. G., Link I. Y. Determination of parameters two-layer model of ground on the results for the vertical electric sounding conducted in the vicinity of substation. *Elektrifikatsiya ta avtomatizatsiya silskogo gospodarstva – Electrification and automation of agriculture*, 2004, 2(7), pp.3-11.
- Koliushko D. G., Rudenko S. S., Istomin O. Ye., Saliba A. N. Simulation of electromagnetic processes in the grounding system with a short circuit in the operating high-voltage substation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 4, pp. 75–80, doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.11.

References (transliterated)

- Glebov O. Y. To the question of determining the grounding system resistance according to its design parameters. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 2018, 36(1312), pp.14-20.

Відомості про авторів (About authors)

Коліушко Денис Георгійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Denis Koliushko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher, Senior researcher of the Department of Automated electromechanics systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0003-3112-4260; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Руденко Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Serhii Rudenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-2544-1545, e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Програмний засіб інтерпретації результатів вертикального електричного зондування у вигляді тришарової геоелектричної структури. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 2 (16). С. 18-25. doi:10.20998/2413-4295.2023.02.03.

Please cite this article as:

Koliushko D., Rudenko S. Software for interpreting the results of vertical electrical sounding in the form of a three-layer geoelectric structure. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 2(16), pp. 18-25, doi:10.20998/2413-4295.2023.02.03.

Надійшла (received) 16.04.2023
Прийнята (accepted) 18.05.2023