

Д.Г. Коліушко, С.С. Руденко

ПРОГРАМА ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ «VEZ-4A»

В роботі було запропоновано алгоритм роботи програми для інтерпретації результатів вертикального електричного зондування ґрунту в рамках діагностики стану заземлювальних пристроїв. Математичний апарат для реалізації алгоритму побудовано на базі методів точкового джерела струму, найменших квадратів, Хука-Джівса та еквівалентування. Наведено огляд та основні функції розробленої програми. Бібл. 7, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: вертикальне електричне зондування, заземлення, ґрунт, установка Веннера.

В работе был предложен алгоритм работы программы для интерпретации результатов вертикального электрического зондирования ґрунта в рамках диагностики состояния заземляющих устройств. Математический аппарат для реализации алгоритма построен на базе методов точечного источника тока, наименьших квадратов, Хука-Джівса и эквивалентирования. Приведено описание и основные функции разработанной программы. Библ. 7, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: вертикальное электрическое зондирование, заземление, ґрунт, установка Веннера.

Вступ. Однією з основних задач першого етапу електромагнітної діагностики стану заземлювального пристрою [1, 2] електроустановок різних класів напруги є проведення вертикального електричного зондування ґрунту (ВЕЗ). Якість інтерпретації результатів ВЕЗ та визначення структури ґрунту в значній мірі впливає на точність розрахунку нормованих електричних параметрів: опору заземлювального пристрою, напруги дотику та напруги на заземлювальному пристрої.

На даний час відомий ряд спеціалізованих комп'ютерних програм для 1D, 2D та 3D інтерпретації ВЕЗ. Основою для їх побудови є метод Дар-Заррук [3] або аналітичне чи засноване на методі оптичної аналогії рішення задачі про електричне поле точкового джерела струму, розташованого на поверхні геоелектричної структури. При цьому розглядається джерело постійного, стаціонарного або квазістаціонарного струму [4, 5]. Проте, математичний апарат та спеціалізовані програми, що визначають структуру багат шарового ґрунту на основі даних ВЕЗ, слугують для вирішення вузькоспрямованих геологічних задач та не адаптовані до застосування при діагностиці стану заземлювальних пристроїв, а використання існуючих універсальних палеток та методу модулів є трудомістким і неоднозначним [6]. У рамках проведення електромагнітної діагностики стану заземлювальних пристроїв застосовуються програми для інтерпретації ВЕЗ у вигляді дво- і тришарових геоелектричних структур, наприклад «ВЭЗ-2Авто» та «ВЭЗ-3», які не дозволяють охопити всі існуючі в Україні ґрунти.

Статистичний розподіл ґрунтів за числом шарів в місцях розташування енергооб'єктів України показує, що абсолютна більшість ґрунтів мають тришарову структуру – 72,7 %, близько 17 % є чотиришаровими і тільки 8,3 % – двошаровими [2]. Таким чином, створення програмного засобу для інтерпретації результатів ВЕЗ з числом шарів не менше чотирьох дозволить охопити 98 % всіх ґрунтів України в місцях розташування енергооб'єктів.

Метою роботи є створення програмного засобу для інтерпретації результатів вертикального електричного зондування чотиришарового ґрунту.

Матеріали дослідження. Найбільш поширеною для проведення ВЕЗ є установка Веннера, яка пред-

ставляє собою чотириелектродну симетричну систему (рис. 1). Міжелектродна відстань є рівною між усіма сусідніми електродами й позначається величиною L . Глибина зондування складає половину відстані між струмовими електродами АВ або $1,5 \cdot L$ [3]. Таким чином, збільшення міжелектродної відстані збільшує глибину зондування установки.

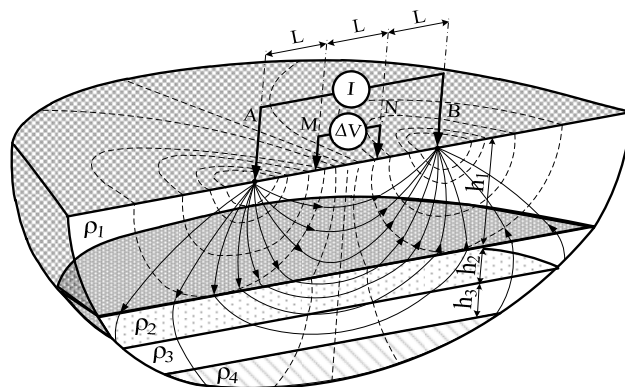


Рис. 1. Зондування ґрунту за допомогою установки Веннера

Результатом виміру є залежність уявного питомого електричного опору (ПЕО) ρ_y від міжелектродної відстані, яка визначається за відомим виразом [4, 7]:

$$\rho_y = 2\pi L \frac{U_{VES}}{I_{VES}}, \quad (1)$$

де L – відстань між електродами; U_{VES} – виміряна напруга в ході проведення ВЕЗ; I_{VES} – виміряний струм в ході проведення ВЕЗ.

Для проведення інтерпретації в основу програми закладені вирази для визначення уявного ПЕО ρ_y , як функції від величини L у багатшаровому середовищі з плоско-паралельними межами поділу при проведенні ВЕЗ установкою Веннера:

– при двошаровій структурі [7]:

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

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; L – відстань між найближчими електродами; – при тришаровій структурі:

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

де q_n – коефіцієнт розкладання підінтегральної функції [4].

Формули (2) і (3), отримані на підставі виразу для потенціалу електричного поля точкового джерела струму у багатошаровому середовищі [4], при розташуванні його та точки спостереження на поверхні ґрунту. При цьому (3) було отримано з застосуванням методу невизначених коефіцієнтів.

У рамках вдосконалення методики електромагнітної діагностики стану заземлювального пристрою, на основі аналітичного вирішення задачі про електричне поле точкового джерела струму, розташованого на поверхні чотиришарового провідного напівпростору з плоско-паралельними межами поділу, авторами було розроблено математичний апарат [5] для інтерпретації результатів зондування та еквівалентування [2] багатошарових структур у розрахункові моделі.

З метою побудови програмного засобу авторами використано отримане раніше рішення [5] вказаної задачі за умови розташування точки спостереження на поверхні чотиришарового ґрунту. У вказаному випадку уявний ПЕО буде мати вигляд:

$$\rho_y = \rho_1 + \rho_1 \sum_{j=1}^3 \left(4K_{j+1,j} \cdot \sum_{n=0}^{k_{ur}} \left[\frac{K_n L}{\sqrt{L^2 + (2h_j + 2n)^2}} - \frac{K_n L}{\sqrt{4L^2 + (2h_j + 2n)^2}} \right] \right), \quad (4)$$

де $K_{j+1,j}$ – коефіцієнт неоднорідності ґрунту, який визначається як $K_{j+1,j} = \frac{\rho_{j+1} - \rho_j}{\rho_{j+1} + \rho_j}$; K_n – коефіцієнти,

отримані у результаті розкладання функції, що характеризує багатошарове середовище; n – номер члену ряду; k_{ur} – кількість членів ряду.

Функція, що характеризує багатошарове середовище, має вигляд [5]:

$$F'_Z(\lambda) = \frac{1}{F_Z(\lambda)}, \quad (5)$$

де $F_Z(\lambda)$ визначається, як:

$$F_Z(\lambda) = 1 - K_{2,1}e^{-2\lambda h_1} - K_{3,2}e^{-2\lambda h_2} - K_{4,3}e^{-2\lambda h_3} + K_{2,1}K_{3,2}e^{-2\lambda(h_2-h_1)} + K_{2,1}K_{4,3}e^{-2\lambda(h_3-h_1)} + K_{3,2}K_{4,3}e^{-2\lambda(h_3-h_2)} - K_{2,1}K_{3,2}K_{4,3}e^{-2\lambda(h_3-h_2-h_1)}.$$

Значення K_n з виразу (4) знаходиться при розв'язанні за методом найменших квадратів системи рівнянь, складеної для апроксимації функції, що характеризує багатошарове середовище (5), за методикою, наведеною в [5], з урахуванням числа шарів ґрунту та $h_n=2 \cdot n$.

На підставі виразів (1) – (4) і з використанням методу найменших квадратів для апроксимації функції, що характеризує багатошаровий ґрунт, у програмному середовищі Delphi була розроблена програма для інтерпретації результатів ВЕЗ у вигляді чотиришарової геоелектричної структури «VEZ-4A», інтерфейс якої наведено на рис. 2.

Розроблена програма дозволяє виконувати як інтерактивну, так і автоматичну інтерпретацію результатів ВЕЗ.

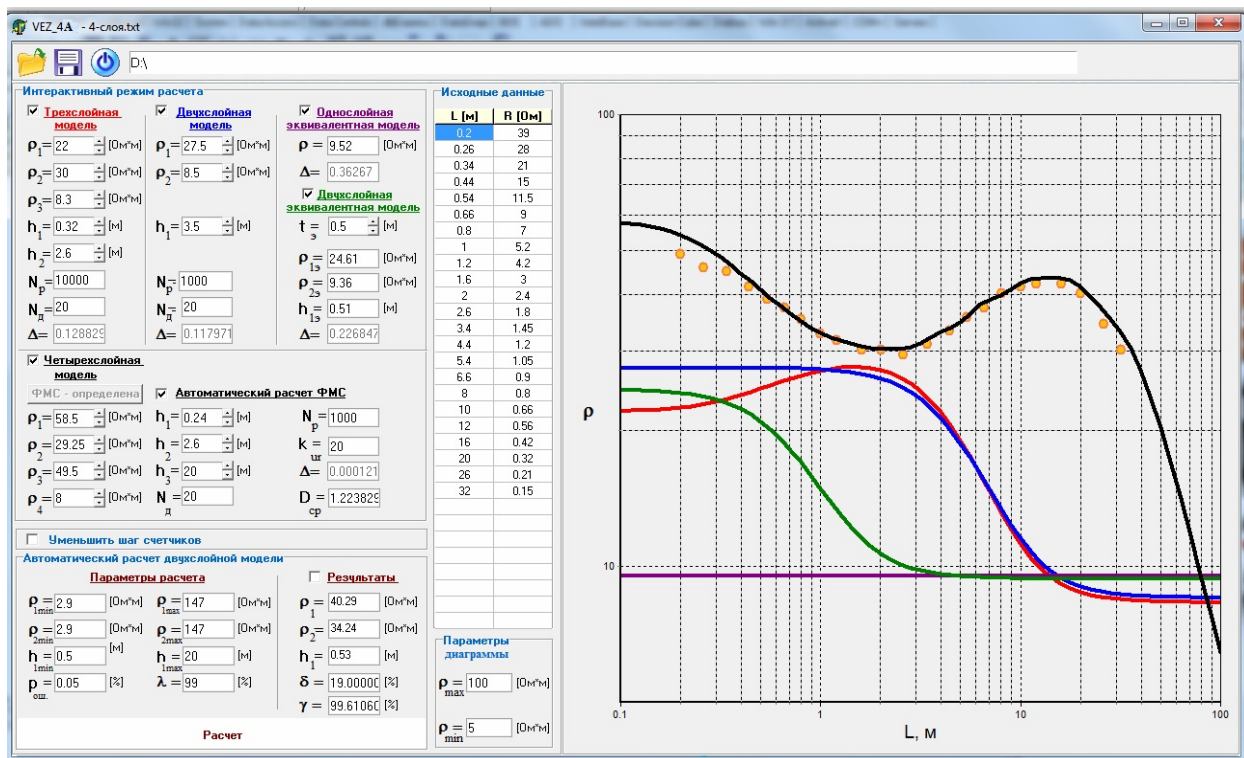


Рис. 2. Робоче вікно програми для інтерпретації багатошарових ґрунтів «VEZ-4A»

При апроксимації функції, що характеризує багатшарове середовище, слід розглядати інтервал зміни безрозмірного параметру $\lambda \in [0; \infty]$. Необхідна кількість членів ряду k_{ur} визначається відносною похибкою апроксимації D_{cp} вихідної функції (5), рекомендоване значення якої (див. рис. 2) не більше 1 %. При цьому $F'_{\lambda}(\lambda) = 1$ при $\lambda \rightarrow \infty$.

Особливістю програми є те, що алгоритм окрім стандартних також містить наступні блоки (див. рис. 3):

- блок автоматичної інтерпретації у вигляді двошарової моделі Block 1;
- блок інтерактивної інтерпретації у вигляді двошарової моделі Block 2;
- блок інтерактивної інтерпретації у вигляді тришарової моделі Block 3;
- блок інтерактивної інтерпретації у вигляді чотиришарової моделі Block 4.

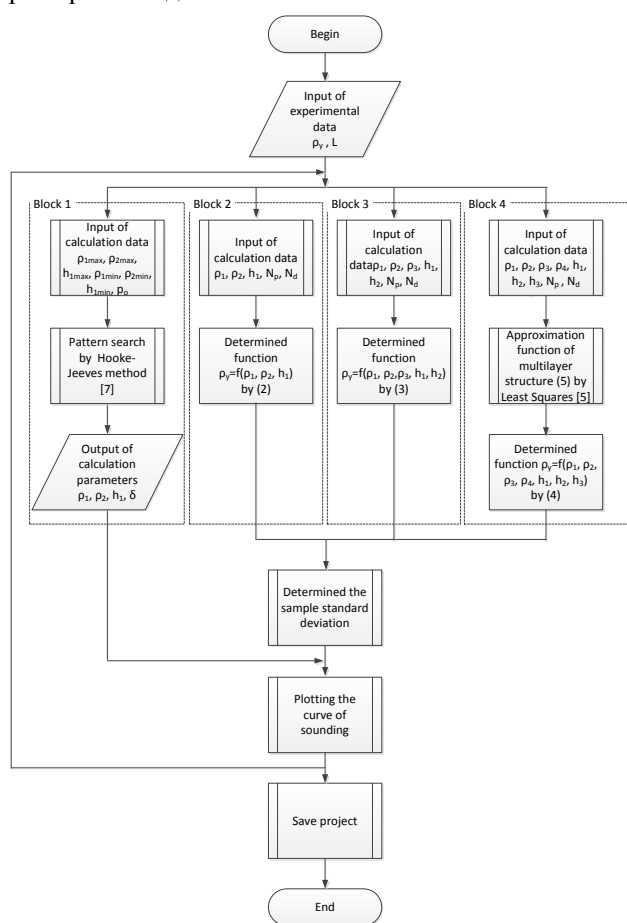


Рис. 3. Алгоритм роботи програми

До стандартних блоків слід віднести наступні:

- введення експериментальних даних (Input of experimental data ρ_{γ}, L);
- визначення стандартного середньоквадратичного відхилення (Determined the sample standard deviation);
- побудови кривих ВЕЗ (Plotting the curve of sounding);
- збереження проекту (Save project).

Методика та вирази для блоку еквівалентування (не зазначено в алгоритмі), що були використані в програмі, наведено в [2].

Запуск розрахунку та графічне відображення кривих ВЕЗ відбувається при виборі відповідної моделі (Block 1 – Block 4).

Змінюючи параметри моделей – ПЕО шарів та їх товщину – досягають найбільшої відповідності кривої ВЕЗ результатам експерименту. При цьому контроль за відповідністю здійснюється двома способами:

- 1) візуальним порівнянням експериментальних точок та розрахункової кривої ВЕЗ на графіку;
- 2) аналізом значення стандартного середньоквадратичного відхилення Δ (її найменше значення відповідає максимальній точності).

Змінювати параметри моделей також можна двома способами:

- 1) безпосереднім введенням значення параметру в поле;
- 2) змінювати значення покроковим способом за допомогою компоненту Delphi «UpDown».

Крок вказаного компоненту є плаваючим і залежить від абсолютного значення параметру.

Для автоматичної інтерпретації результатів ВЕЗ у блоці «Автоматический расчет двухслойной модели» у розділі «Параметры расчета» необхідно задати граничні параметри пошуку (на початку роботи автоматично встановлюються згідно з мінімальним та максимальним значенням експериментальної кривої ВЕЗ, у подальшому можуть бути змінені користувачем), вірогідність помилки p_{ou} (типове значення 0,05) та надійність розрахунку λ (типове значення 99 %). Слід зазначити, що зі зменшенням p_{ou} та збільшенням λ буде зростати час розрахунку.

Запуск процедури відбувається при натисканні кнопки «Расчет» або кнопки «Space» на клавіатурі, а графічне відображення кривої ВЕЗ – при виборі відповідного компоненту «CheckBox» для кожної моделі ґрунту.

У блоці «Результаты» виводяться отримані значення розрахунку параметрів моделі (ρ_1, ρ_2 та h_1), а також максимальне відхилення результатів розрахунку від експериментальних даних δ та достовірність моделі γ (припустимі значення даних параметрів обираються згідно з умовами задачі, що вирішується, рекомендоване ж 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 у розділі «Параметры расчета»;
- зменшення вірогідності помилки p_{ou} та (або) збільшення надійності розрахунку λ ;
- видалення явно помилкової точки з блоку «Исходные данные», якщо вона не відповідає тенденції розміщення експериментальної кривої ВЕЗ.

Висновки.

1. Авторами розроблено алгоритм роботи програми, особливістю якого є можливість інтерпретації результатів ВЕЗ в інтерактивному або автоматичному режимі у вигляді дво-, три- та чотиришарового ґрунту.

2. Реалізовано програму для інтерпретації результатів ВЕЗ на базі математичної моделі з визначення

потенціалу електричного поля точкового джерела струму, розташованого у чотиришаровому провідному напівпросторі.

3. Створена програма «VEZ-4A» дозволяє охопити близько 98 % ґрунтів в місцях розташування енергооб'єктів України.

Розроблена програма для інтерпретації результатів ВЕЗ була успішно використана при проведенні електромагнітної діагностики стану заземлювальних пристроїв для 10 підстанцій класом напруги 150 кВ, 20 підстанцій класом напруги 110 кВ та ВРП-750 кВ Рівненської АЕС у 2015-2016 рр.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 – [Чинний від 2010–03–29]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
2. Колиушко Д.Г., Руденко С.С., Колиушко Г.М. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 3. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.
3. Шевнин В.А., Колесников В.П. Оценка глубинности ВЭЗ для однородной и слоистой среды // *Георазрез*. – 2011. – №1(8). – С. 1-9. – Электронный ресурс / Режим доступа: http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otchenka_glubinnosti_VEZ.pdf.
4. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. *Заземляющие устройства электроустановок*. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
5. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Интерпретация результатов вертикального электрического зондирования в виде четырехслойного геоэлектрического полупространства // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2015. – №12(1121). – С. 324-329.
6. Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г., Руденко С.С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №4. – С. 65-70. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.
7. Петков О.О., Колиушко 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.

REFERENCES

1. *Natsional'nyy standart Ukrayiny. SOU 31.2-21677681-19:2009. Viprobuвання та kontrol' prystroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktziya*. [National Standard of Ukraine SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction]. Kyiv, Minenergougillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. (Ukr).
2. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.

3. Shevnin V.A., Kolesnikov W.P. Rating depth VES for the uniform and layered medium. *Electronic Journal «GEORazrez»*, 2011, no.1(8), pp. 1-9. Available at: http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otchenka_glubinnosti_VEZ.pdf (Accessed 10 November 2013). (Rus).

4. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).

5. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Interpretation the results of the vertical electrical sounding as the geoelectrical half space with four layer. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.12(1121), pp. 324-329. (Rus).

6. Koliushko G.M., Koliushko D.G., Rudenko S.S. On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 65-70. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.

7. 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. *Electrification and automation of agriculture*, 2004, no.2(7), pp. 3-11. (Ukr).

Поступила (received) 06.04.2017

Колиушко Денис Георгійович¹, к.т.н., с.н.с.,

Руденко Сергій Сергійович¹, м.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.

A computer program for interpretation of the data of vertical electrical sounding VEZ-4A.

Purpose. Creating a computer program for interpreting the results of vertical sounding the soil in the form of multilayer model most typical for Ukraine. **Methodology.** The algorithm of the program is constructed on determination the soil structure with the help of the method of point source current, method of analogy and method of equivalent. The option of automatic interpretation based on Hook-Jeeves method. The program is implemented in the programming language Delphi. **Results.** The computer program «VEZ-4A» has a possibility of the interactive and automatic interpretation sounding results in the multi-layered geoelectrical model. **Originality.** In first time the computer program for analyzing and interpreting results of the soil sounding by Wenner configuration was created on the base of the analytical solution for field of current point source located in four-, three- or two-layer structure. In paper the review is presented and basic functions of our program are analyzed. **Practical value.** The program «VEZ-4A» is created and adapted for use in the electromagnetic diagnostics of grounding of existing power plants and substations. References 7, tables 1, figures 3.

Key words: vertical electrical sounding, grounding, soil, Wenner installation.