

УДК 621.3

## ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО СТЕНДУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

**О. С. Кириченко<sup>1</sup>**, кандидат технічних наук, доцент

**І. М. Сидорика<sup>2</sup>**, кандидат технічних наук, доцент

**Д. Д. Марченко<sup>1</sup>**, кандидат технічних наук

<sup>1</sup> Миколаївський національний аграрний університет

<sup>2</sup> Національний університет кораблебудування  
ім. адмірала Макарова

*Проведено електротепловий аналіз елементів навчально-дослідного лабораторного стенду електротехнічної лабораторії. Отримано картини розподілу електричного потенціалу та температури для різних значень сили постійного струму, що протікає через вольфрамовий резистор. Встановлено залежність температури від величини сили струму для адіабатичної теплової моделі резистора. Показано зручність використання чисельних методів розрахунку для наочної візуалізації фізичних процесів в електрообладнанні електротехнічної лабораторії.*

**Ключові слова:** електротепловий аналіз, навчально-дослідний стенд, електротехнічна лабораторія, моделювання, температурне поле.

**Постановка проблеми.** Відповідно до державних освітніх стандартів України проходження лабораторного практикуму з дисципліни електротехніка та основи електроніки передбачає практичне освоєння студентами експериментальних методів дослідження електричних кіл і закріплення теоретичних знань і навичок, а також знайомство з електричними вимірюваннями.

В даний час в навчальному процесі широко використовуються лабораторні практикуми з комп'ютерного моделювання електричних кіл і електронних схем з використанням спеціального програмного забезпечення, наприклад Electronics Workbench, проте воно в повному обсязі не може замінити реальної практичної роботи з електричними схемами і вимірювальними приладами на реальному лабораторному стенді.

---

© Кириченко О.С., Сидорика І.М., Марченко Д.Д., 2017

Похибка при визначенні параметрів і режимів роботи електричних кіл розрахунковим шляхом і отриманих експериментально відрізняються на величину, що становить в деяких випадках до 10-15 %. Однією з причин, яка впливає на величину похибки, є тепловиділення в елементах електричного кола, що призводить до збільшення розкиду їх параметрів, яке раніше не враховувалося. Проведення електротеплового аналізу елементів навчально-дослідного лабораторного стенду та врахування його результатів дозволить істотно підвищити точність розрахунків і наблизити їх до результатів експериментальних досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведено огляд ряду робіт [1-3, 5, 6], присвячених проведенню лабораторних досліджень електричних кіл постійного і змінного струмів. В них виокремлено необхідні для розрахунків довідкові дані, виконано порівняння підходів до розрахунку. Проте, в усіх розглянутих роботах похибка при визначенні параметрів елементів і режимів роботи електричних кіл розрахунковим шляхом і визначених експериментально відрізняються, оскільки не враховано тепловиділення в елементах електричного кола.

Проведення електротеплового аналізу елементів навчально-дослідних лабораторних стендів і дослідження його впливу на параметри елементів дозволить підвищити точність експерименту і зменшити величину похибки за рахунок врахування впливу тепла за рахунок врахування тепловиділення.

**Мета роботи** – проведення електротеплового аналізу елементів навчально-дослідного лабораторного стенду електротехнічної лабораторії та дослідження впливу тепла на параметри елементів і величину похибки.

**Викладення основного матеріалу.** У навчальному процесі на кафедрі теоретичної електротехніки НУК імені адмірала Макарова при проходженні лабораторного практикуму з дисципліни електротехніка та основи електроніки використовується універсальний навчально-дослідний лабораторний стенд УНДС-1, що передбачає практичне освоєння здобувачами вищої освіти експериментальних методів дослідження електричних кіл і закріплення теоретичних знань і навичок.

Навчально-дослідний стенд УНДС-1 і його структуру показано на рис. 1 і рис. 2 відповідно.

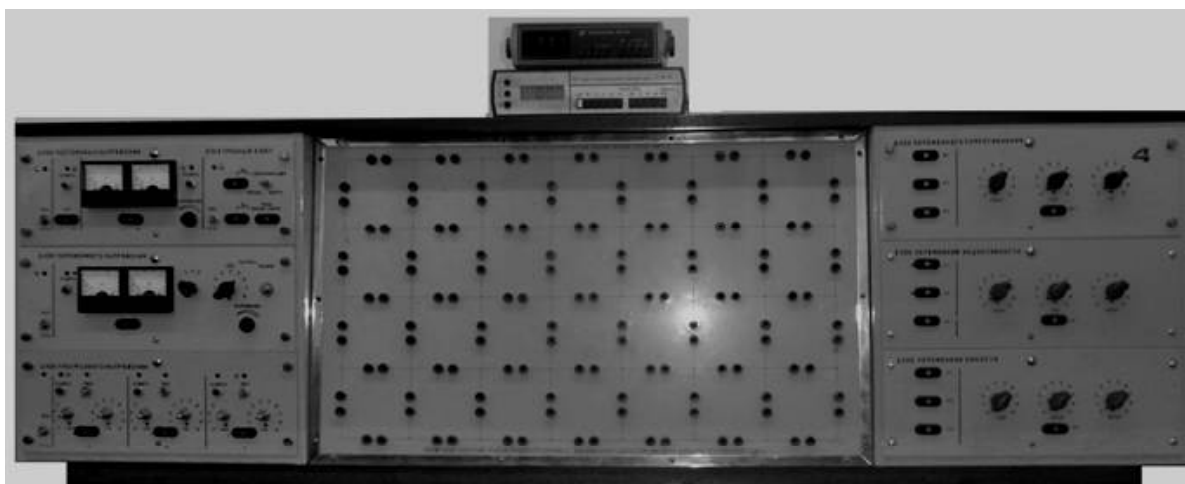


Рис. 1. Навчально-дослідний стенд УНДС-1 електротехнічної лабораторії

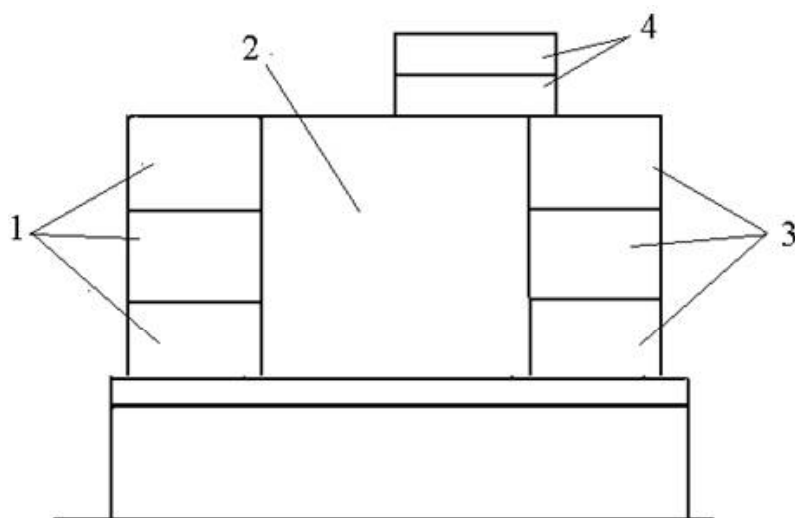


Рис. 2. Структура навчально-дослідного стенду УНДС-1: 1 – блоки живлення; 2 – набірне поле; 3 – блоки змінних елементів; 4 – універсальні цифрові прилади

Навчально-дослідний лабораторний стенд УНДС-1 дозволяє проводити такі лабораторні роботи:

– дослідження режимів роботи при різних методах розрахунку лінійних кіл постійного струму з одним або двома джерелами живлення. На практиці проводиться експериментальна перевірка законів Ома і Кірхгофа, методу еквівалентного генератора. Дослідження режимів роботи та методів розрахунку нелінійних кіл постійного струму.

– визначення параметрів і дослідження режимів роботи електричного кола змінного струму з послідовним і паралельним з'єднанням елементів R, L, C. Досліджуються резонансні явища.

– визначення параметрів і дослідження режимів роботи трифазного кола при з'єднанні споживачів в зірку або трикутник.

– дослідження перехідних процесів при різних режимах роботи електричного кола постійного і змінного струму з активно-реактивними параметрами та ін.

Структура навчально-дослідного стенду УНДС-1 (рис. 2):

– блоки живлення: постійної напруги (регульованій і нерегульованій), змінної однофазної регульованої напруги з частотами від 1 до 8 кГц, змінної трифазної регульованої напруги з кроком 1В;

– набірне поле, в якому встановлено комутаційні гнізда, за допомогою яких збирають електричні кола;

– блоки змінних елементів: резистивного – дозволяють змінювати опір в межах 0..999 Ом з кроком 10 Ом; індуктивного – в – межах 0..99,9 Гн з кроком 0,1 Гн; ємнісного – з магазином конденсаторів, які дають можливість змінювати ємність в межах 0..9,99 мкФ з кроком 0,01 мкФ;

– універсальні цифрові прилади, комутаційна апаратура.

Електротепловий аналіз елементів навчально-дослідного стенду УНДС-1 аналітично проводиться з використанням рівняння теплопровідності в декартовій системі координат  $x, y, z$  [4, 11]:

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + p_0, \quad (1)$$

де  $c, \rho$  – теплоємність і густина відповідно;

$\theta, t$  – температура та час відповідно;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коефіцієнти теплопровідності уздовж координат  $x, y, z$ ;

$p_0 = f(x, y, z, t)$  – теплопродуктивність одиниці об'єму досліджуваного об'єкта, яка залежить від координат та часу.

Диференціальне рівняння (1) в загальній постановці описує нестационарне температурне поле в тривимірному анізотропному просторі.

Під час виконання моделювання теплових полів елементів навчально-дослідного стенду УНДС-1 в усталених режимах їх роботи похідна температури від часу в лівій частині рівняння теплопроводності (1) буде дорівнювати нулю, при цьому саме рівняння перетвориться до вигляду:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + p_0 = 0. \quad (2)$$

Слід зазначити, що рівняння (2) не має аналітичного розв'язку при його застосуванні для аналізу електротеплових процесів елементів навчально-дослідного стенду УНДС-1 довільної конструкції. Зважаючи на це, а також для кращої наочної візуалізації, для проведення моделювання теплових полів елементів навчально-дослідного стенду створено математичну модель для чисельного розв'язку. До основних переваг математичних моделей на основі чисельних методів розрахунку належать наочна візуалізація фізики процесів за рахунок зручного представлення та інтерпретації результатів в графічній і/або табличній формі.

Зважаючи на постійний розвиток електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, необхідно врахувати, що наявні математичні моделі, як правило, не здатні або здатні не повною мірою відтворити фізичні процеси, що відбуваються в конструктивно нових типах елементів навчально-дослідних лабораторних стендів. Використання систем автоматизованого проектування (САПР) дозволяє вирішити подібні проблеми з використанням чисельних методів розрахунку.

Чисельні (обчислювальні) методи – методи розв'язування математичних задач у чисельному вигляді.

Багато чисельних методів є частиною бібліотек математичних програм, які застосовують в системі підготовки науковців і фахівців технічних спеціальностей в якості важливої складової навчання та досліджень.

Як чисельні методи розрахунку набули поширення так звані «сіткові» методи розрахунку, зокрема, метод скінченних різниць і метод скінченних елементів.

Основами для чисельних (обчислювальних) методів є:

- рішення систем лінійних рівнянь;
- інтерполювання і наближене обчислення функцій;
- чисельне інтегрування;
- чисельне рішення системи нелінійних рівнянь;
- чисельне рішення звичайних диференціальних рівнянь;
- чисельне рішення рівнянь в часткових похідних (рівнянь математичної фізики);
- рішення задач оптимізації.

Метод скінченних різниць (МСР) – це чисельний метод рішення диференціальних рівнянь, заснований на заміні похідних різницевиими схемами. Даний метод є сітковим методом.

Метод скінченних елементів (МСЕ) – це чисельний метод рішення диференціальних рівнянь з частковими похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні завдань прикладної фізики. Метод широко використовується для вирішення завдань електротехніки, механіки деформованого твердого тіла, теплообміну, гідродинаміки і т.п.

Метод скінченних елементів є складнішим за метод скінченних різниць в реалізації. Проте в методу скінченних елементів є ряд переваг, що виявляються на реальних завданнях: довільна форма розрахункової області; сітку можна зробити більш рідкісною в тих місцях, де особлива точність не потрібна.

Довгий час широкому поширенню МСЕ заважала відсутність алгоритмів автоматичного розбиття області на «майже рівносторонні» трикутники (похибка, залежно від варіації методу, обернено пропорційна синусу або найгострішого, або самого тупого кута в розбитті). Втім, це завдання вдалося успішно вирішити (алгоритми, засновані на триангуляції Делоне), що дало можливість створювати повністю автоматичні кінцево-елементні системи автоматизованого проектування (САПР).

На сьогодні метод скінченних елементів перетворився в інструмент розв'язку рівнянь в часткових похідних, що зустрічаються в електротехніці, механіці та теплотехніці. Даний метод по суті є універсальним засобом передбачення фізики поведінки досліджуваних об'єктів. Паралельне використання методів САПР дозволило завдяки інтеграції обчислювальних

алгоритмів і їх зв'язку з сучасними інтерактивними графічними методами звільнити науковців і фахівців від трудомістких операцій, пов'язаних з програмуванням, ручним введенням даних і перетворенням вихідних сигналів в шукані результати.

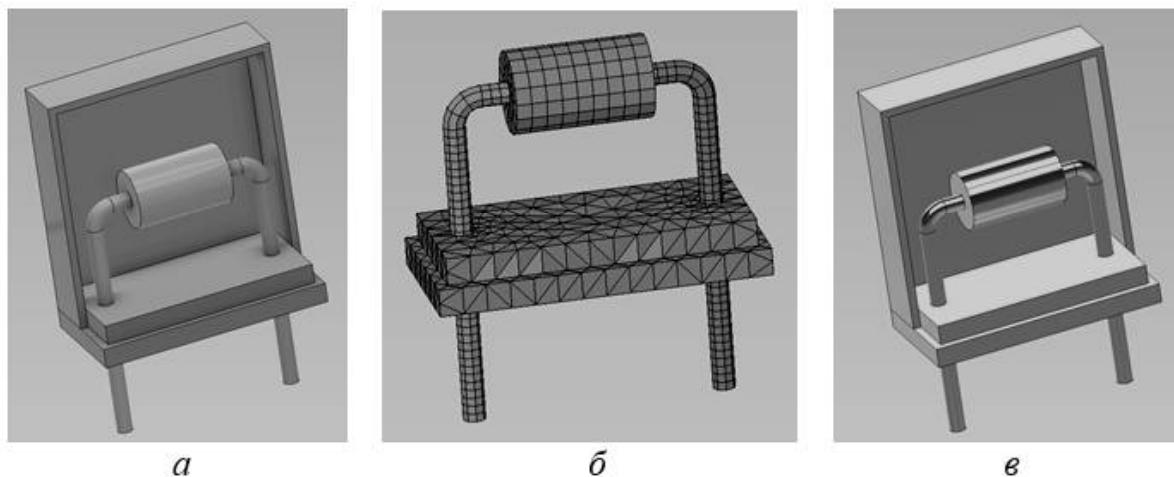


Рис. 3. Резистор циліндричної форми з вольфраму зі сталевими контактними виводами, який розміщено в ізоляційному полімерному корпусі з кришкою: а – геометрична 3D-модель; б – кінцево-елемента 3D-модель; в – реалістична 3D-модель

На рис. 3 наведено геометричну, кінцево-елементу та реалістичну 3D-моделі резистора навчально-наукового лабораторного стенду з теоретичної електротехніки, алгоритми створення таких моделей наведено в [7-10, 12]. Геометрично 3D-модель резистора представляє собою циліндр діаметром  $\varnothing 15$  мм та довжиною 25 мм, діаметр контактних виводів резистора становить  $\varnothing 4$  мм, а їх довжина – 55 мм. Резистор розміщено в ізоляційному корпусі з кришкою, габаритні розміри корпусу становлять  $60 \times 30$  мм (корпус показано в розрізі). У розрахунках використано такі електротехнічні матеріали: вольфрам – для резистора, сталь – для контактних виводів і поліетилен – для ізоляційного корпусу і кришки.

На рис. 4 проілюстровано розподіл електричного потенціалу та температурного поля по резистору з контактними виводами при протіканні постійного струму [3]. Области білого та чорного кольору – це відповідно зони з мінімальними та максимальними значеннями електричного потенціалу та температури, а області з градацією сірого кольору – це зони з проміжними зна-

ченнями величин. У результаті електротеплового аналізу отримано різні значення нагріву резистора при різній величині сили струму, що протікає через нього, на основі яких побудовано електротеплові характеристики резистора. Отримана теплова модель є адіабатичною, а тому отримані числові значення для температури необхідно розглядати як верхню теплову межу.

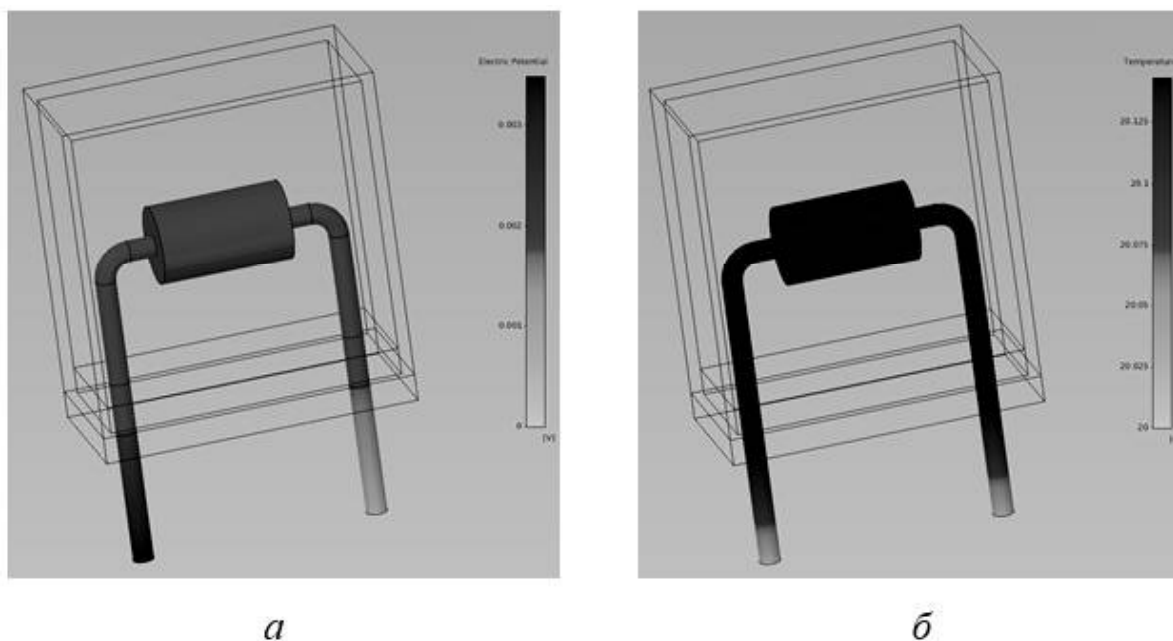


Рис. 4. Розподіл електричного потенціалу (а) та температурного поля (б) по резистору циліндричної форми з вольфраму зі сталевими контактними виводами при протіканні постійного струму

**Висновки.** Проведення електротеплового аналізу дало змогу встановити розподіл основних електричних і теплових величин по об'єму елемента навчально-дослідного лабораторного стенду.

Виявлено вплив тепла на точність розрахунків при визначенні параметрів і режимів роботи електричних кіл розрахунковим шляхом і визначених експериментально. Врахування тепловиділення підвищило загальну точність розрахунків параметрів електрокіл, оскільки похибка склала не більше 5-7 %.

Список використаних джерел:

1. Алехин В. А. Миниатюрная электротехническая лаборатория МЭЛ. Часть 1. Методические указания по выполнению лабораторных работ / В. А. Алехин. – М. : МИРЭА, 2007.
2. Алехин В. А. Миниатюрная электротехническая лаборатория МЭЛ. Часть 2. Методические указания по выполнению лабораторных работ / В. А. Алехин. – М. : МИРЭА, 2007.
3. Кириченко О.С. Електротепловий аналіз елементів навчально-дослідного лабораторного стенду з теоретичної електротехніки / О. С. Кириченко // Перспективна техніка і



технології – 2017 : матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів – Миколаїв : МНАУ, 2017. – С. 50-53.

4. Кучерявая И.Н. Компьютерное моделирование тепловых процессов в однофазном трансформаторе с учетом анизотропии тепловых свойств активных элементов / И.Н. Кучерявая // Техническая электродинамика. – Киев, 2014. – № 1. – С. 20 – 27.

5. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Електротехніка, промислова електроніка та електрообладнання» для студентів неелектротехнічних спеціальностей / уклад. О. М. Наливайко, Т. В. Кірієнко. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – 69 с.

6. Методичні вказівки до лабораторних робіт з теоретичних основ електротехніки для студентів всіх форм навчання / уклад. В. С. Бойко, Є. А. Кудря, І. А. Курило та ін. – К. : НТТУ "КПІ" 2001. – 40 с.

7. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.

8. Большаков В. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex / В. Большаков, А. Бочков, А. Сергеев. – СПб. : Питер, 2010. – 336 с.

9. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

10. Романычева Э. Т. Инженерная и компьютерная графика / Э. Т. Романычева, Т. Ю. Соколова. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 592 с.

11. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

12. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

***А. С. Кириченко, И. М. Сидорика, Д. Д. Марченко Электротепловой анализ элементов учебно-исследовательского лабораторного стенда электротехнической лаборатории.***

*Проведен электротепловой анализ элементов учебно-исследовательского лабораторного стенда электротехнической лаборатории. Получены картины распределения электрического потенциала и температуры для различных значений силы постоянного тока, протекающего через вольфрамовый резистор. Установлена зависимость температуры от величины силы тока для адиабатической тепловой модели резистора. Показано удобство численных методов расчета для наглядной визуализации физических процессов в электрооборудовании электротехнической лаборатории.*

***Ключевые слова:*** электротепловой анализ; учебно-исследовательский стенд; электротехническая лаборатория; моделирование; температурное поле.

***O. Kyrychenko, I. Sidorika, D. Marchenko. Electrothermal analysis of elements of the educational and research laboratory stand of the electrotechnical laboratory.***

*The electrothermal analysis of the elements of the educational and research laboratory stand of the electrotechnical laboratory was carried out. The patterns of electric potential distribution and temperature distribution for various values of the direct current flowing through the tungsten resistor are obtained. The temperature dependence on the magnitude of the current intensity for the adiabatic thermal model of the resistor is established. The convenience of numerical calculation methods for evident visualization of physical processes in the electrical equipment of the electrotechnical laboratory is shown.*

***Keywords:*** electrothermal analysis; educational and research stand; electrotechnical laboratory; modeling; temperature field.