

М. В. ПЕТРОВСЬКИЙ, І. О. КРАМСЬКИЙ, І. М. ДЯГОВЧЕНКО, С. М. ЛЕБЕДКА, І. І. БОРЗЕНКОВ

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СТРУМОВИХ РЕЛЕ ТА РЕЛЕ НАПРЯМКУ ПОТУЖНОСТІ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ MATLAB

Під час пандемій та військових агресій продовження навчання забезпечується активним впровадженням дистанційних технологій навчання. Значну кількість процесів, що відбуваються в реальному житті, можна описати за допомогою математичних моделей. Подальша їх реалізація в програмному коді та готовому програмному продукті дозволяє ефективно застосовувати їх у віртуальних дослідженнях схем релейного захисту. Для правильного функціонування будь-якого віртуального реле або комплексу захистів необхідно побудувати модель, що враховує реальні характеристики його складових елементів. У випадку відсутності останніх визначити їх дослідним шляхом. Для створення віртуальної лабораторної роботи з дослідження реле струму РТ-40 на основі параметрів, вказаних в паспорті на даний апарат, створено алгоритм, що дозволяє користувачу в інтерактивному режимі із застосуванням різних елементів схеми (повзунків, регуляторів та ін.) визначити основні характеристики реле: струм спрацювання, струм відпускання та час спрацювання в залежності від струму через реле. Алгоритм програми «Дослідження характеристик реле напрямку потужності RBM-171» використовує кутові характеристики та характеристики чутливості реального реле RBM-171, які було перетворено в цифровий вигляд. Для реле RBM-178, що має відмінну від попереднього стенда схему підключення та кут максимальної чутливості, створено окремий стенд «Дослідження реле напрямку потужності RBM-178». Логіка його роботи базується на визначенні струмів та напруг нульової послідовності за допомогою метода симетричних складових. В усіх лабораторних схемах є візуалізація та індикація станів елементів схем, що присутні на стендах. Це надає змогу користувачу отримати більш точні результати та наблизитись до випробування реле в реальних лабораторних умовах.

Ключові слова: віртуальний стенд, реле, коротке замикання, уставка реле, струм спрацювання, характеристика.

M. V. PETROVSKIY, I. A. KRAMSKIY, I. M. DIAHOVCHENKO, S. M. LEBEDKA, I. I. BORZENKOV

DEVELOPMENT OF MODELS OF CURRENT RELAYS AND POWER DIRECTION RELAYS IN THE MATLAB SOFTWARE

During pandemics and military aggressions, the continuation of education is ensured by the active implementation of distance learning technologies. A significant number of real-life processes can be described using mathematical models. Their further implementation in the program code and the finished software product allows them to be effectively used in virtual studies of relay protection schemes. For the correct functionality of any virtual relay or protection complex, it is necessary to build a model that takes into account the real characteristics of its constituent elements. In case of absence of the latter, they should be determined empirically. To create a virtual laboratory work on the study of the RT-40 current relay, based on the parameters specified in the passport for this device, an algorithm was created that allows the user to interactively determine the main characteristics of the relay: tripping current, release current, and response time depending on the current through the relay using various circuit elements (sliders, regulators, etc.). The algorithm of the program "Research of characteristics of power direction relay RBM-171" uses the angular characteristics and sensitivity characteristics of the real relay RBM-171, which were converted into digital form. For the RBM-178 relay, which has a different connection scheme and maximum sensitivity angle from the previous test stand, a separate test stand "Study of the RBM-178 power direction relay" was created. The logic of its operation is based on the detection of zero-sequence currents and voltages using the method of symmetrical components. All laboratory circuits have visualization and indication of the states of the circuit elements present on the stands. This allows the user to achieve more accurate results and get closer to testing relays in real laboratory conditions.

Keywords: virtual simulator, relay, short circuit, relay setting, operation current, characteristic.

Вступ. Під час пандемій та військових агресій продовження навчання забезпечується активним впровадженням дистанційних технологій. Значну кількість процесів, що відбуваються в електротехнічному обладнанні, можна описати за допомогою математичних моделей [1–3], реалізація яких у вигляді програмного продукту дозволяє ефективно застосовувати їх у віртуальних дослідженнях схем релейного захисту без застосування лабораторних пристроїв.

У процесі реалізації віртуальних лабораторних робіт актуальним питанням є вибір інструмента для побудови математичної моделі. Використання готових бібліотек програмування дозволяє спростити це завдання. Для вирішення поставленої задачі було обрано App Designer [4–7], що дозволяє створювати професійні програми, не будучи професійним розробником програмного забезпечення. Він забезпечує повністю інтегровану версію редактора MATLAB та великий набір інтерактивних компонентів інтерфейсу користувача.

Мета статті. Розробка програмних комплексів віртуальних лабораторних робіт, що дозволяють проводити моделювання характеристик електромагнітних реле: реле струму РТ-40 та реле напрямку потужності RBM-171, RBM-178, які можуть бути використані при вивченні дисципліни «Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем» [8–10].

«Дослідження електромагнітного реле струму РТ-40». Метою даної лабораторної роботи є ознайомлення з конструкцією та принципом роботи електромагнітного реле змінного струму РТ-40 [8–10], а також визначення основних його характеристик (струм спрацювання, струм повернення, коефіцієнт повернення, час спрацювання реле) [1–3].

При запуску програми з дослідження реле струму РТ-40 з'являється вікно у вигляді стенда з необхідними елементами для проведення віртуальної лабораторної роботи (рис. 1).

© М. В. Петровський, І. О. Крамський, І. М. Дяговченко, С. М. Лебедка, І. І. Борзенков, 2023

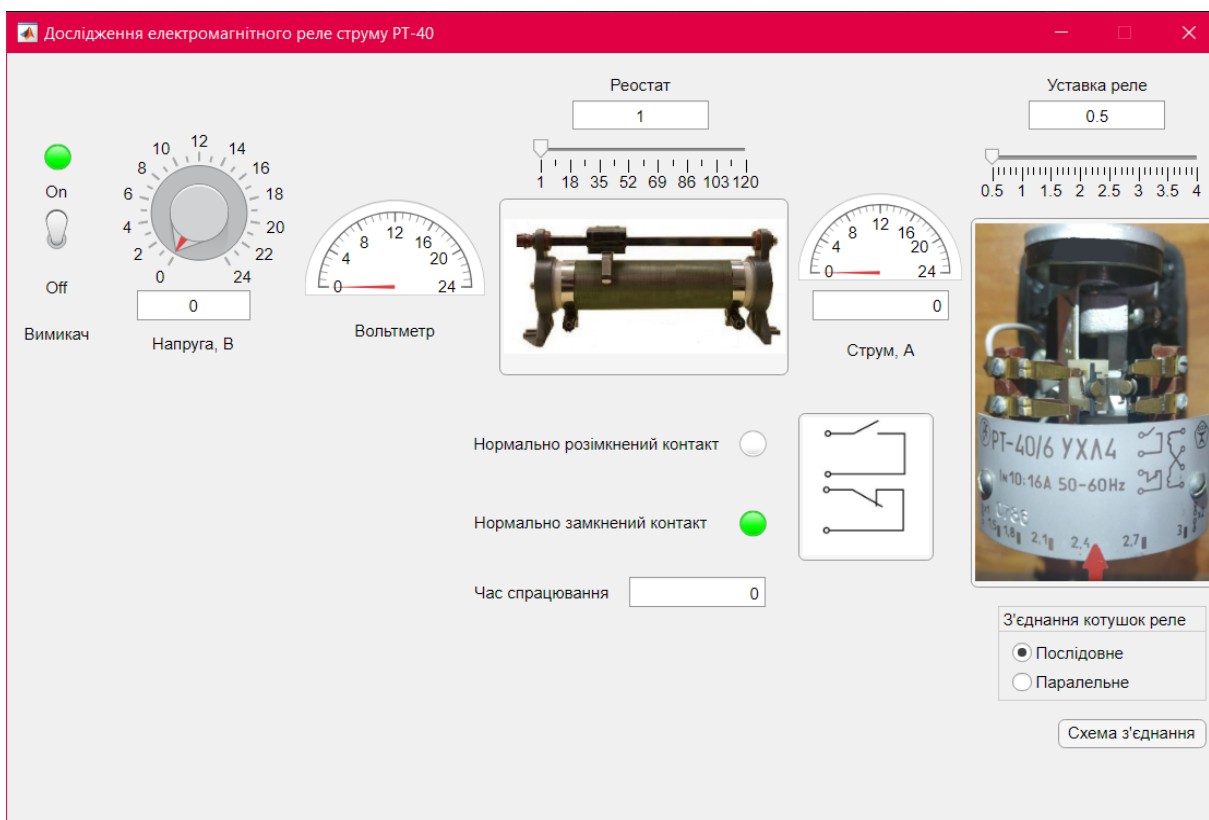


Рисунок 1 – Інтерфейс програми «Дослідження електромагнітного реле струму РТ-40»

Стенд складається з таких елементів: вмикач, регульоване джерело змінної напруги 24 В, вольтметр, реостат, амперметр, реле струму, контактів реле. Лампа над вимикачем сигналізує про наявність напруги – зелений колір або відсутність напруги – білий колір. Індикаторні лампи біля контактів показують стан контактів реле. Якщо контакт є замкнутими індикаторна лампа має зелений колір, якщо розімкненими – білий колір. Вимикач є інтерактивним елементом, тобто під час моделювання його положення можна змінювати, що дає змогу досліджувати характеристику часу спрацювання від струму.

За допомогою інтерактивних повзунків можна змінювати значення опору реостата та величину уставки реле відповідно. Так як при застосуванні даних елементів виникають певні незручності, а саме неможливість встановлення точного значення параметра елемента, то програмою передбачено поля для їх ручного введення.

Котушки реле РТ-40 можна підключити двома способами: паралельно та послідовно [8–10]. Щоб обрати спосіб підключення на стенді передбачено панель «З'єднання котушок».

Для перегляду схем підключення елементів необхідно натиснути кнопку «Схема з'єднання». Після чого з'явиться вікно. У даному вікні існує дві вкладки – «Послідовне з'єднання» (рис. 2) та «Паралельне

з'єднання» (рис. 3). При переході на вкладки відображаються схеми з'єднання котушок.

Результати дослідження. Встановлюємо за допомогою інтерактивного повзунка або введення в полі «Реостат» значення опору реостата 10 Ом. Встановлюємо значення уставки, що дорівнює $I_{уст} = 1,8 \text{ A}$ та обираємо схему з'єднання котушок – послідовне (рис. 4). Результати проведення цього досліду зведено до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати досліду з визначення характеристик реле РТ-40

$I_{с.р.}, \text{ A}$	1,806	1,803	1,808	1,802	1,803
$I_{пов}, \text{ A}$	1,439	1,436	1,436	1,433	1,434
$k_{пов}$	0,796	0,798	0,794	0,795	0,795

Визначимо залежність часу спрацювання реле серії РТ-40 при послідовному з'єднанні обмоток від співвідношення $I_p/I_{спр}$ для значення струму спрацювання 1,8 А [8]. Результати зведено в табл. 2. Крива залежності наведена на рис. 5.

Таблиця 2 – Залежність часу спрацювання від співвідношення $I_p/I_{спр}$

$I_p/I_{спр}$	1	1,6	2,2	2,8	3,4
$t, \text{ c}$	0,1	0,079	0,058	0,037	0,03

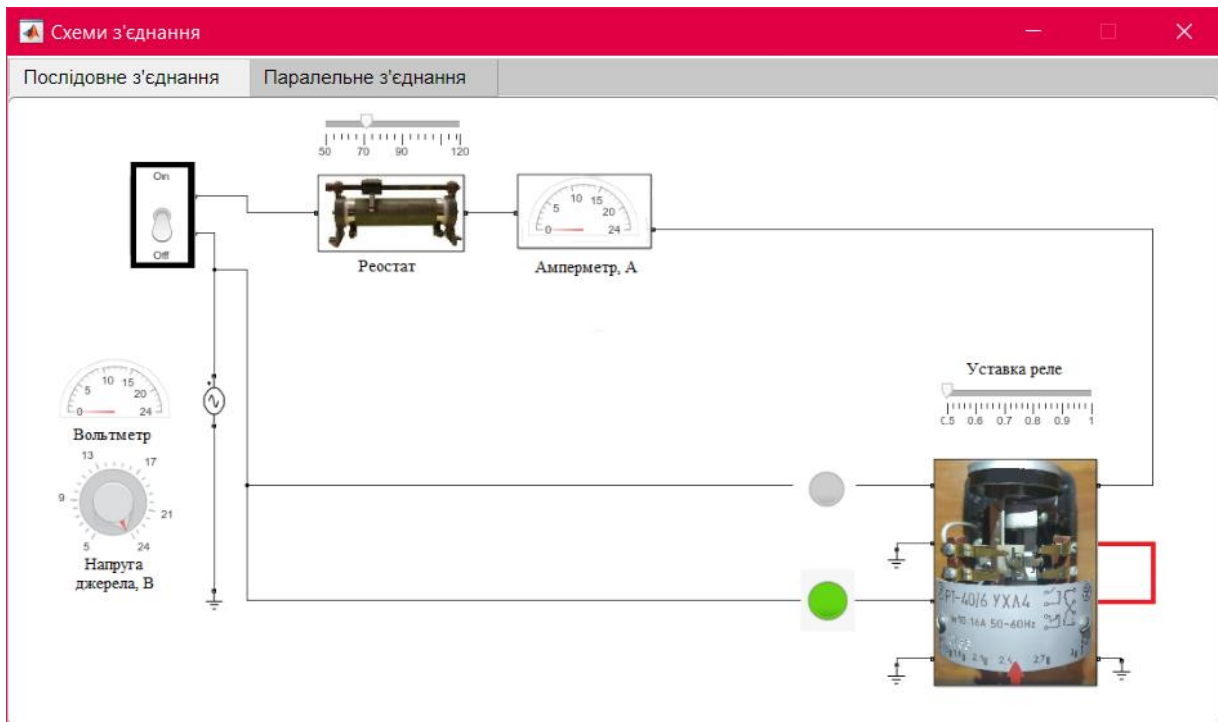


Рисунок 2 – Вкладка «Послідовне з'єднання»

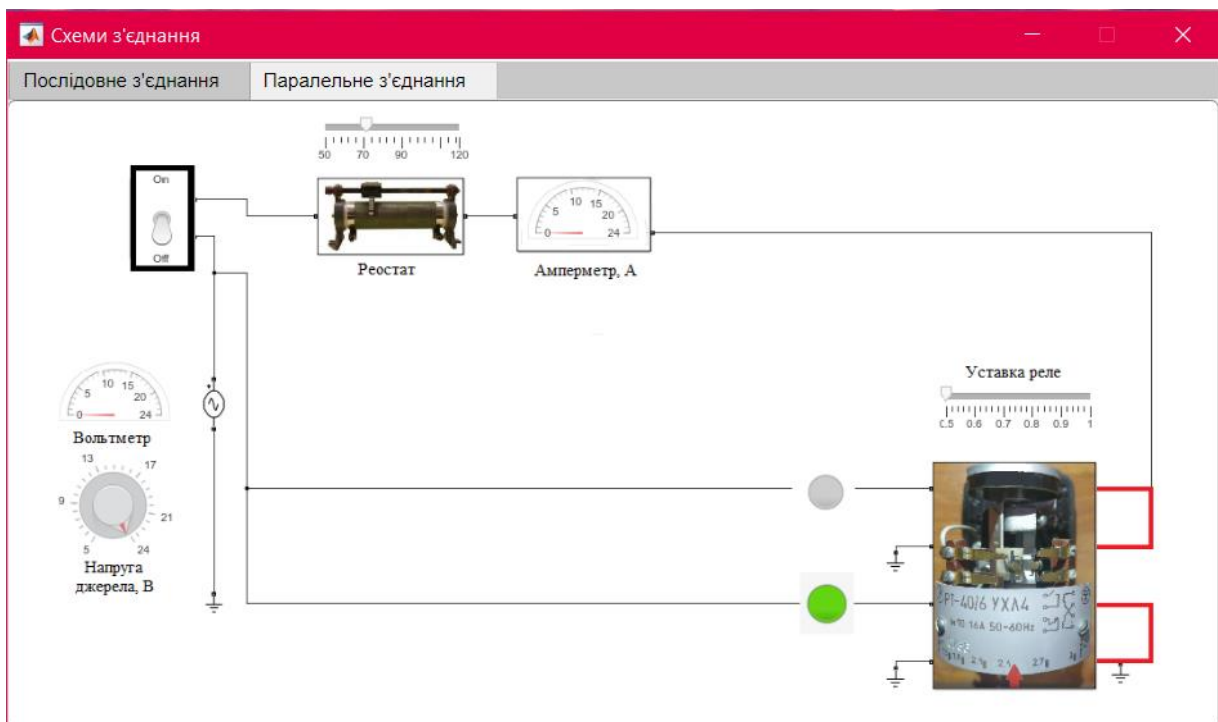


Рисунок 3 – Вкладка «Паралельне з'єднання»

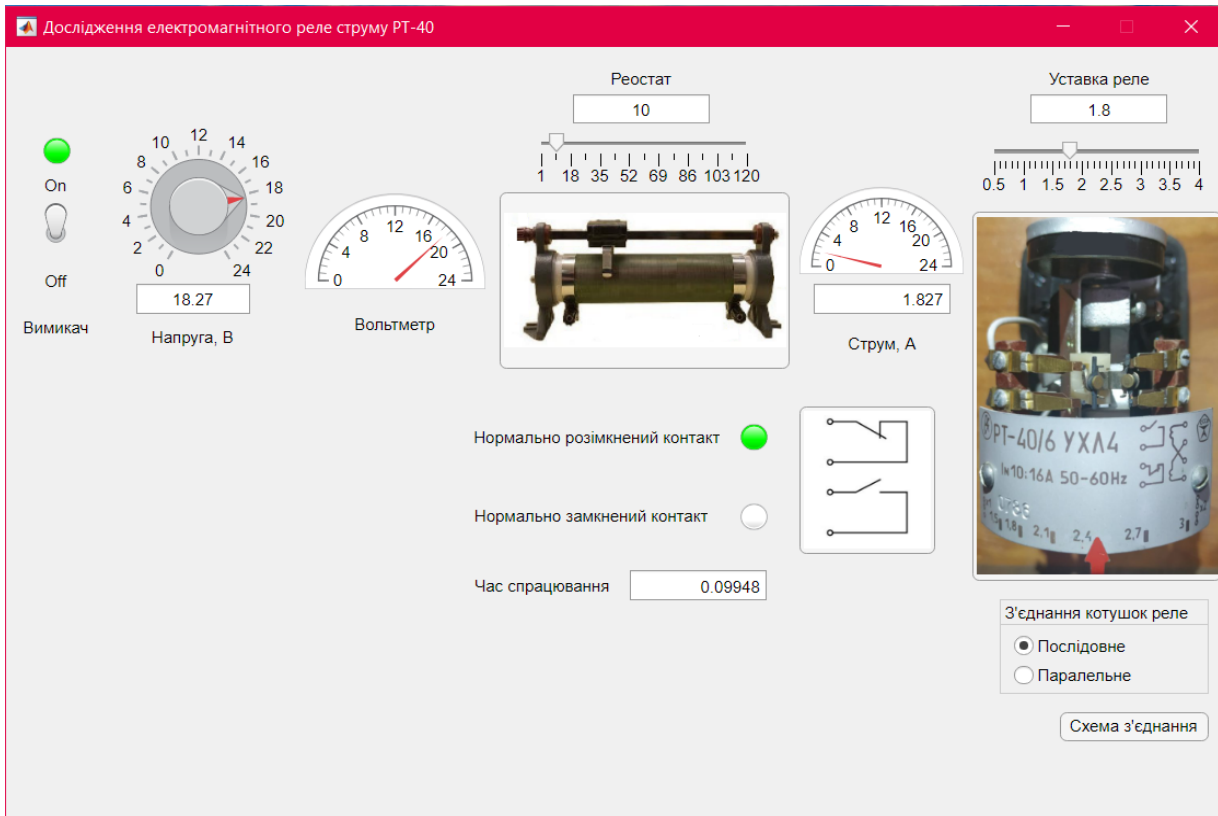
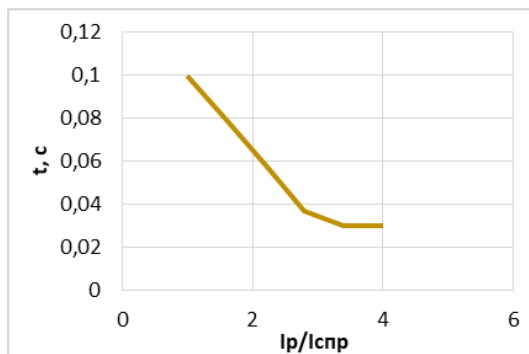


Рисунок 4 – Проведення досліду з визначення характеристик реле РТ-40

Рисунок 5 – Залежність часу спрацювання реле від співвідношення $I_p/I_{сп}$

«Дослідження характеристик реле напрямку потужності РБМ-171». Мета роботи – отримати експериментальні характеристики реле РБМ-171. Стенд складається з двох симетричних джерел живлення (рис. 6) G1 та G2 номінальною напругою 10 кВ, що з'єднані із лінією електропередавання W1 високовольтними вимикачами Q1 та Q2, що входять до складу підстанцій ПС1 та ПС2. До підстанції ПС1 також входять вимикачі Q3 [1–3]. Від цієї підстанції отримує живлення регульоване навантаження S_1. За допомогою інтерактивного повзунка або поля для введення, можна встановити значення навантаження, а

за допомогою регулятора можна встановити фазовий зсув. Аналогічно можна налаштувати навантаження S_2. Щоб встановити необхідне значення напруги на виході трансформатора напруги можна ввести значення у відповідному полі або за допомогою регулятора.

Керування роботою схеми відбувається за рахунок групи вимикачів. Під час вмикання одного із джерел залишається лише один активний вимикач, що відповідає навантаженню, яке необхідно підключити. При ввімкненні вимикача навантаження елементи, що відносяться до нього стають активними. Всі значення виводяться на панель «Результати досліду», де визначаються, такі параметри реле, як: струм, напруга, кут реле.

Для підключення реле РБМ-171 до електричної мережі використано 90-градусну схему ввімкнення [8–10]. Обмотка напруги реле підключена через трансформатор напруги до лінійної напруги, а струмова через трансформатор струму, первинна обмотка якого встановлена в фазі А.

Для спостереження за станом контакту реле в схемі передбачена лампа-індикатор та контакт, що замикається у випадку спрацювання.

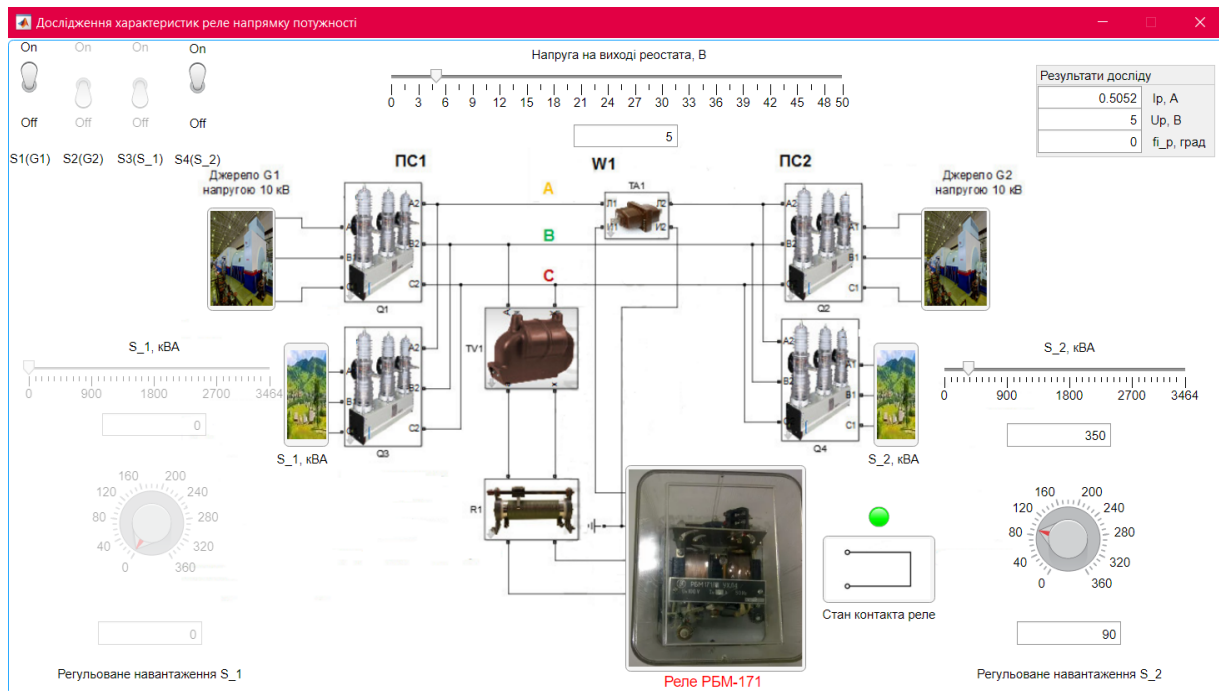


Рисунок 6 – Інтерфейс програми «Дослідження характеристик реле напрямку потужності РБМ-171»

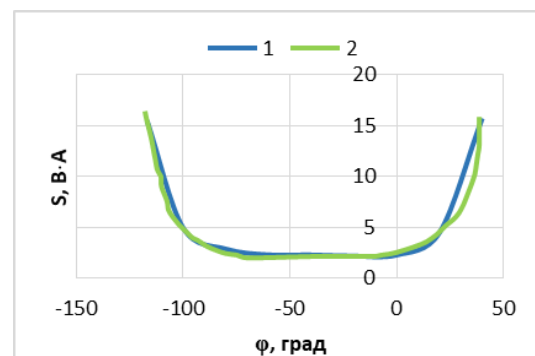
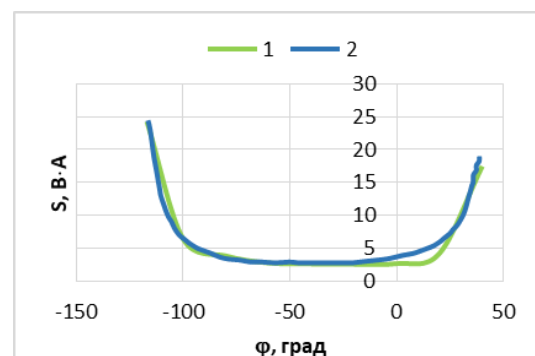
Результати дослідження. Порівняємо кутову характеристику, отриману з віртуального стенду з реальною характеристикою реле РБМ-171. Визначаємо характеристику реле при струмі, що дорівнює 0,5 А та 5 А та будуємо графіки. Для виконання дослуду необхідно ввімкнути вимикачі S1(G1) та S1(S_2). За допомогою повзунка встановити значення потужності, щоб струм реле відповідав значенню $I_p = 0,5 A$. Змінюємо значення регулятора фазного зсуву навантаження і напругу на виході реостата, та фіксуємо значення необхідних параметрів для побудови кутової характеристики. За отриманими результатами будуємо графік залежності $S_p = f(\phi_p)$ рис. 7 та 8.

Порівняємо характеристику чутливості отриману в досліді із реальною характеристикою реле РБМ-171. Повзунок, що регулює фазний зсув встановити в таке положення, щоб кут ϕ_p відповідав значенню куту максимальної чутливості $\phi_{мч} = -30^\circ$. За допомогою повзунків змінюємо величини навантаження та напруги, фіксуємо їх значення у випадку спрацювання. Будуємо залежність (рис. 9).

«Дослідження характеристик реле напрямку потужності РБМ-178». Мета цієї лабораторної роботи – отримати експериментальні характеристики реле РМ-178. Стенд для дослідження реле РБМ-178 має аналогічні елементи з стендом для дослідження реле РБМ-171. Відмінність полягає в тому, що за допомогою повзунків встановлюємо струм короткого замикання.

Реле напрямку потужності включається на струм і напругу нульової послідовності – щоб забезпечити таке підключення реле його вмикають на суму фазних струмів і напруг [5]. Трансформатори струму і напруги, включені на суму фазних струмів і напруг, утворюють фільтри струму і напруги нульової

послідовності (рис. 10). Для визначення цих параметрів в алгоритмі передбачено використання методу симетричних складових [11].

Рисунок 7 – Кутова характеристика при $I_p = 0,5 A$:
1 – характеристика, знята під час дослуду;
2 – реальна характеристикаРисунок 8 – Кутова характеристика при $I_p = 5 A$:
1 – характеристика, знята під час дослуду;
2 – реальна характеристика

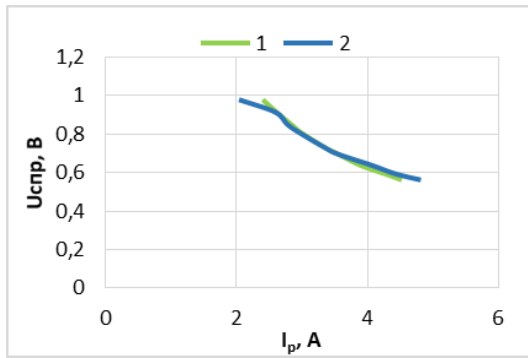


Рисунок 9 – Характеристика чутливості:
1 – характеристика, знята під час досліді;
2 – реальна характеристика

Результати дослідження. Проведемо аналогічні до РБМ-171 досліді, побудуємо та порівняємо характеристики з реальними. Залежності потужності спрацювання реле від кута між напругою та струмом

$S_p = f(\varphi_p)$ для двох значень струму реле показані на рис. 11 та 12.

Висновки. Розроблені віртуальні схеми релейного захисту «Дослідження електромагнітного реле струму РТ-40», «Дослідження характеристик реле напрямку потужності РБМ-171», «Дослідження характеристик реле напрямку потужності РБМ-178» надають змогу користувачеві проводити дослідження, визначати основні характеристики без застосування безпосередньо реальних елементів схеми.

Щоб впевнитись у правильності роботи віртуальних моделей проведено порівняння характеристик, отриманих за допомогою розроблених віртуальних стендів, та характеристик, що вказані в паспорті відповідних типів реле. Відхилення в показниках виявилися незначними, що вказує на правильність розроблених методик та алгоритмів, що застосовані при створенні віртуальних стендів захисту.

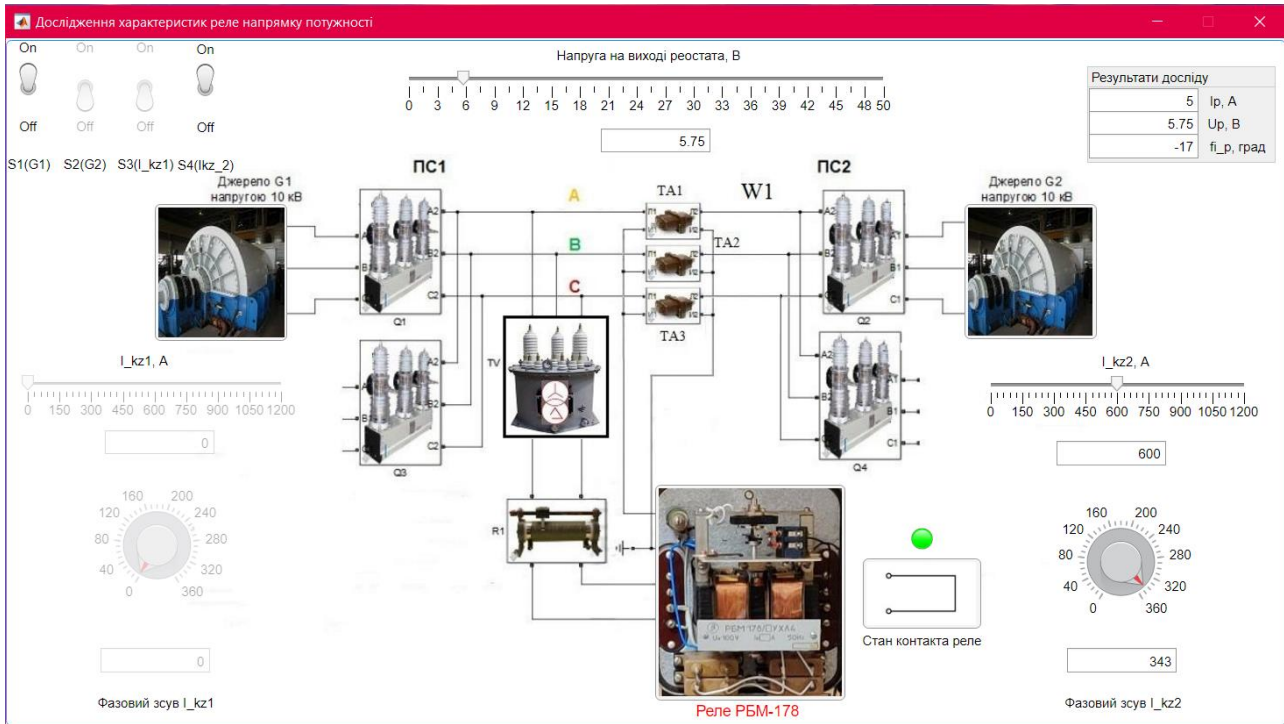


Рисунок 10 – Інтерфейс програми «Дослідження характеристик реле напрямку потужності РБМ-178»

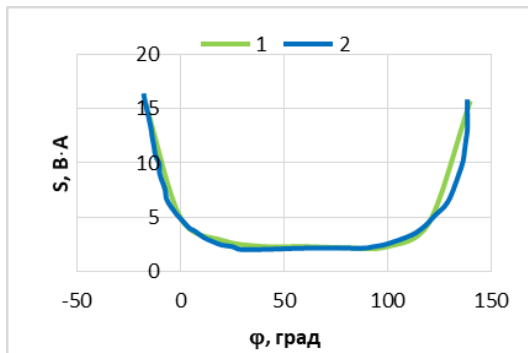


Рисунок 11 – Кутова характеристика при $I_p = 0,5$ А:
1 – характеристика, знята під час досліді;
2 – реальна характеристика

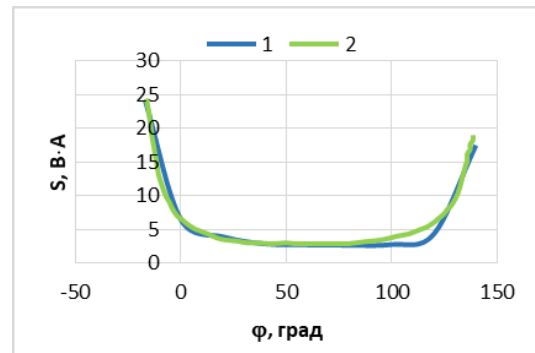


Рисунок 12 – Кутова характеристика при $I_p = 5$ А:
1 – характеристика, знята під час досліді;
2 – реальна характеристика

Список літератури

1. Панченко С. В., Блиндок В. С., Баженов В. М., Одегов М. М., Семенов Ю. О. Релейний захист і автоматика. Ч. 1 : навч. посіб. Харків : УкрДУЗТ, 2020. 250 с.
2. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем : навч. посіб. Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", 2013. 500 с.
3. Козярський Д. П., Майструк Е. В., Козярський І. П. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем. Ч. 2. Чернівці : Чернів. нац. ун-т, 2019. 133 с.
4. Palm W. J. MATLAB for engineering applications. Boston : WCB/McGraw-Hill, 1998. 526 p.
5. Moaveni S. Engineering fundamentals: an introduction to engineering. 6th ed. Nelson Education Limited, 2019. 896 p.
6. Lent C. S. Learning to program with MATLAB: building GUI tools. Wiley, 2022. 320 p.
7. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink. Berkeley, CA : Apress, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8748-4>.
8. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Основи релейного захисту та автоматизації електричних систем» для студентів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форми навчання / уклад. С. В. Василець. Рівне : Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування, 2017. 40 с.
9. Махлін П. В., Шрам О. А., Іваненко Є. П. Конструкції та принципи дії реле на різних елементних базах : навчальний посібник. Запоріжжя : Національний університет «Запорізька політехніка», 2020. 112 с.
10. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з «Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем» / уклад.: М. В. Петровський, С. С. Жемаєв. Суми : Сум. держ. ун-т, 2021. 71 с.
11. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папайка Ю. А., Несен Л. І. Перехідні процеси в системах електропостачання. 5-те вид. Дніпро : Нац. гірн. ун-т, 2016. 600 с.
2. V. P. Kidyba, *Releinyi Zakhyst Elektroenerhetychnykh System [Relay Protection of Electric Power Systems]*. Lviv: Lviv Polytechnic National University Press, 2013. (in Ukrainian)
3. D. P. Kozaryskiy, E. V. Maistruk, and I. P. Kozaryskiy, *Osnovy Releinoho Zakhystu Ta Avtomatyzatsii Enerhosystem [Fundamentals of Relay Protection and Automation of Power Systems]*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 2019. (in Ukrainian)
4. W. J. Palm, *MATLAB for Engineering Applications*. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1998.
5. S. Moaveni, *Engineering Fundamentals: An Introduction to Engineering*, 6th ed. Nelson Education Limited, 2019.
6. C. S. Lent, *Learning to Program With MATLAB: Building GUI Tools*. Wiley, 2022.
7. S. Eshkabilov, *Beginning MATLAB and Simulink*. Berkeley, CA: Apress, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8748-4>.
8. S. V. Vasylets, Comp., *Metodychni Vkazivky Do Vykonnannya Laboratornykh Robit Z Navchalnoi Dystsypliny «Osnovy Releinoho Zakhystu Ta Avtomatyzatsii Elektrichnykh System» Dlia Studentiv Za Spetsialnistiu 141 «Elektroenerhetyka, Elektrotekhnika Ta Elektromekhanika» Dennoi Ta Zaочної Formy Navchannia [Methodical Instructions for Laboratory Work in the Discipline "Fundamentals of Relay Protection and Automation of Electrical Systems" for Students of Speciality 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" of Full-Time and Part-Time Study]*. Rivne: National University of Water and Environmental Engineering, 2017. (in Ukrainian)
9. P. V. Makhlin, O. A. Shram, and Ye. P. Ivanenko, *Konstruktzii ta pryntsyipy dii rele na riznykh elementnykh bazakh [Relay designs and principles of operation on different element bases]*. Zaporizhzhia: National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 2020. (in Ukrainian)
10. M. V. Petrovskiy and S. S. Zhemaiev, Comps., *Metodychni Vkazivky Do Vykonnannya Laboratornykh Robit Z "Osnovy Releinoho Zakhystu Ta Avtomatyzatsii Enerhosystem" [Methodical Instructions for Laboratory Work on the "Fundamentals of Relay Protection and Automation of Power Systems"]*. Sumy: Sumy State University, 2021. (in Ukrainian)
11. H. H. Pivniak, I. V. Zhezhelenko, Y. A. Papaika, and L. I. Nesen, *Perekhidni Protsey v Systemakh Elektropostachannia [Transient Processes in Electricity Supply Systems]*, 5th ed. Dnipro: National Mining University, 2016. (in Ukrainian)

Надійшло (received) 29.05.2023

References

1. S. V. Panchenko, V. S. Blyndiuk, V. M. Bazhenov, M. M. Odiehov, and Yu. O. Semenenko, *Releinyi Zakhyst I Avtomatyka [Relay Protection and Automation]*. Kharkiv: UkrSURT, 2020. (in Ukrainian)

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Петровський Михайло Васильович (Mykhailo Vasylovych Petrovskiy) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-3136>; e-mail: m.petrovskiy@etech.sumdu.edu.ua.

Крамський Ігор Олександрович (Ihor Oleksandrovych Kramskiy) – інженер-конструктор електротехнічного бюро ПАТ «СУМІХІМПРОМ»; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4606-3280>; e-mail: kramskuiigor@gmail.com.

Дяговченко Ілля Миколайович (Iliya Mykolaiovych Diahovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8575-8280>; e-mail: i.diahovchenko@etech.sumdu.edu.ua.

Лебеда Сергій Миколайович (Serhii Mykolaiovych Lebedka) – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач, заступник завідувача кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5221-3812>; e-mail: s.lebedka@etech.sumdu.edu.ua.

Борзенков Ігор Іванович (Ihor Ivanovych Borzenkov) – Сумський державний університет, асистент, начальник електровимірювальної лабораторії центру «Електротехнологій» кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7775-9571>; e-mail: i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua.