

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

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ СХЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ MATLAB

У сучасному навчальному процесі активно застосовуються інформаційні технології, які дозволяють реалізувати процес набуття знань на якісно новому рівні, що є особливо важливим для дистанційної форми навчання. Рівень їх розвитку дозволяє розробляти математичні моделі будь-яких процесів та явищ. В якості предмета дослідження обрано схеми релейного захисту. На основі їх роботи в програмному комплексі MATLAB розроблено віртуальні стенди, що дозволяють користувачеві наблизитись до реальних умов проведення лабораторних робіт. Програма «Дослідження максимального струмового захисту» дозволяє досліджувати роботу елементів схеми у результаті виникнення двофазного короткого замикання в електричній мережі, що складається з генератора, лінії електропередавання та навантаження. Для створення математичної моделі короткого замикання використано метод симетричних складових. При запуску моделі автоматично з'являються вікна, в яких у вигляді анімації будуються графіки залежності струмів, що протікають у кожній фазі та стан елементів від часу. На основі попередньо розроблених алгоритмів роботи реле струму РТ-40 та реле напрямку потужності РБМ-178 розроблено схему «Дослідження максимального спрямованого струмового захисту». У віртуальному стенді розглядається мережа з двостороннім живленням, до якої входять симетричні трифазні джерела змінної напруги, лінії електропередавання, високовольтні вимикачі, споживачі та направлений струмовий захист. Для забезпечення більшої функціональності передбачено введення необхідних параметрів елементів. За допомогою групи вимикачів можна в схемі промодувати дво- та трифазне коротке замикання. При запуску моделі розраховуються струми, які протікають в лінії у нормальному, аварійному та післяаварійному режимах. Після закінчення моделювання з'являються графіки залежності струмів, що протікають у кожній фазі, та стан елементів від часу. Програма «Дослідження дистанційного захисту» використовує алгоритми розрахунків струмів дво- та трифазних коротких замикань, що розроблені у попередніх стендах. Під час моделювання для спостереження за результатами та їх фіксування передбачено панель, де вказано основні характеристики реле. На стенді присутній графік, де відображаються кутові характеристики та значення опорів в різних точках короткого замикання. На стендах присутня світлова індикація – колір ламп – та візуальна – стан контактів.

Ключові слова віртуальний стенд, трифазне коротке замикання, дистанційний захист, математична модель, характеристика реле, релейна схема.

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

DEVELOPMENT OF COMPLEX RELAY PROTECTION MODELS IN THE MATLAB SOFTWARE

In the modern educational process, information technologies are actively used to realize the process of acquiring knowledge at a qualitatively new level, which is especially important for distance learning. The level of their development allows to develop mathematical models of any processes and phenomena. Relay protection schemes are chosen as the subject of research. Based on their functionality, virtual stands have been developed in the MATLAB software package, which allow the user to get closer to the real conditions of laboratory work. The program "Investigation of maximum current protection" allows to investigate the operation of circuit elements as a result of a two-phase short circuit in the electrical system that consists of the generator, power line and load. The symmetric method was used to create a mathematical model of short circuit. When you start the model, windows automatically appear, in which the graphs of the dependence of the currents flowing in each phase and the state of the elements from time to time are built in the form of animations. On the basis of previously developed algorithms of operation of the current relay RT-40 and the power direction relay RBM-178 the scheme "Research of the maximum directed current protection" is developed. The virtual stand considers a two-way power supply network, which includes: symmetrical three-phase AC sources, power lines, high-voltage switches, consumers and directional current protection. To ensure greater functionality, the introduction of the necessary parameters of the elements is provided. With the help of a group of switches, you can simulate a two- and three-phase short circuit in the circuit. When starting the model, the currents flowing in the line in normal, emergency and post-emergency modes are calculated. At the end of the simulation, graphs of the dependence of the currents flowing in each phase and the state of the elements over time appear. The program "Distance Protection Research" uses algorithms for calculating currents of two- and three-phase short circuits developed in previous stands. During the simulation, a panel with the main characteristics of the relay is provided for monitoring the results and recording them. There is a graph on the stand, which shows the angular characteristics and values of resistance at different points of the short circuit. The stands have light indication – lamps color – and visual indication – contacts status.

Keywords: virtual stand, three-phase short circuit, remote protection, mathematical model, relay characteristics, relay circuit.

Вступ. У сучасному навчальному процесі активно застосовуються інформаційні технології, які дозволяють реалізувати процес набуття знань на якісно новому рівні, що є особливо важливим для дистанційної форми навчання. 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 спрацювання типових схем релейних захистів: максимального струмового захисту, направленного струмового захисту

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

та дистанційного захисту, що можуть бути використані при вивченні дисципліни «Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем» [8–10].

«Дослідження максимального струмового захисту». Віртуальний лабораторний стенд імітує роботу електричної мережі 10 кВ і дає змогу ознайомитися з принципом функціонування двофазного максимального струмового захисту (МСЗ) [1–3, 8].

Живлення електричною енергією споживача RL1 (рис. 1), здійснюється від трифазного джерела змінної напруги, через високовольтний вимикач та лінію електропередавання.

На початку лінії електропередавання у фазах А та С встановлено трансформатори струму (ТС) TA1 та TA2 відповідно. ТС з'єднанні за схемою неповна зірка. До їх вторинних кіл підключено струмові реле KA1, KA2 типу РТ-40 [8–10]. Контакти відповідних реле (KA1.1 та KA2.2) ввімкнені паралельно в коло живлення реле часу KT1 (типу РВ – 100) постійним оперативним струмом. Нормально розімкнений контакт KT1.1 реле включений послідовно з проміжним реле РП-23, нормально розімкнений контакт KL1.1 ввімкнено в коло живлення вказівного реле та електромагніту відключення YAT1 вимикача Q1 через блокувальний допоміжний контакт SQ1 вимикача Q1. Для правильної роботи захисту розроблено математичні моделі кожного елемента схеми, які використано при реалізації алгоритму роботи програми.

Для встановлення початкових параметрів елементів схеми захисту в програмі передбачено панель «Блок управління схемою». Натиснувши кнопку «Параметри RL1» вводимо параметри навантаження (рис. 2). Після підтвердження вибору, з'являється повідомлення «Натисніть кнопку рекомендації!». Натиснувши кнопку «Рекомендації», з'являється вікно (рис. 3), у якому запропоновано параметри інших елементів стенду. Кнопки «Пуск» та «Стоп» призначені для запуску та зупинки симуляції. При переведенні вимикача в положення «On», у схемі відбувається двофазне коротке замикання (КЗ) фаз АС. Математична модель КЗ базується на методі симетричних складових, згідно [11].

При запуску моделі автоматично з'являються вікна, в яких у вигляді анімації будуються графіки залежності струмів, що протікають у кожній фазі, та стан елементів від часу. Про стан контакта свідчить лампа-індикатор, що розташована над ним. Якщо контакт нормально замкнений то при спрацюванні реле загорасться відповідна лампа. Колір лампи відповідає стану реле на графіку.

Результати дослідження. Попередньо встановивши необхідні параметри, запускаємо модель, натиснувши кнопку «Пуск». Оскільки положення вимикача «Off», то в мережі спостерігається нормальний режим. Переведення вимикача в положення «On» призводить до виникнення режиму КЗ між фазами А та С (рис. 4). Автоматично з'являються графіки струмів (рис. 5) та станів елементів (рис. 6).

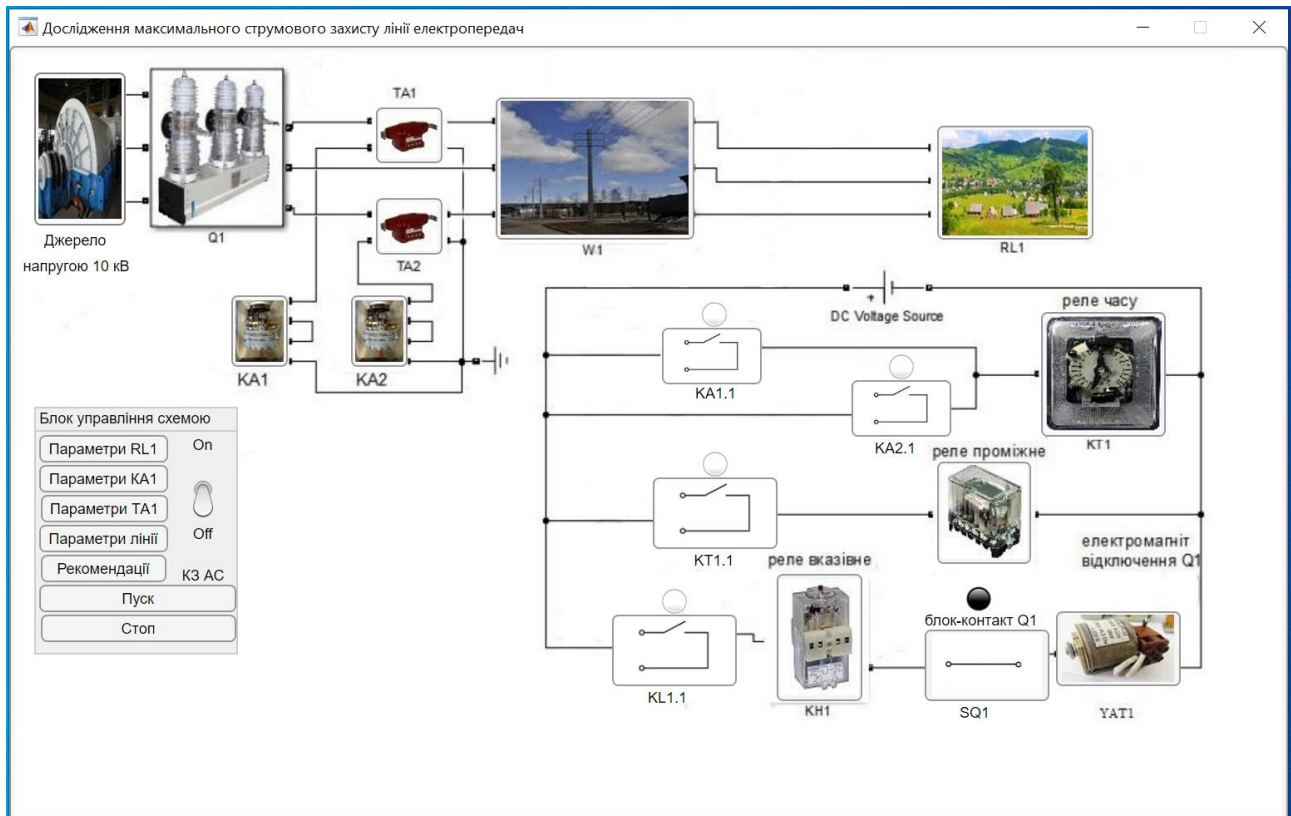


Рисунок 1 – Інтерфейс програми «Дослідження максимального струмового захисту лінії електропередавання»

Модель активно-індуктивного навантаження

Параметри

Номинальна напруга, кВ
10

Номинальна активна потужність, кВт
590

Номинальний коефіцієнт потужності
0.85

OK

Рисунок 2 – Введення параметрів навантаження

Рекомендації

Тип реле
РТ-40/20 (при послідовному з'єднанні котушок)
РТ-40/10 (при паралельному з'єднанні котушок)
Споживана потужність реле, В*А
0,2
Вторинний струм спрацювання, А
8,9175
Номинальний первинний струм трансформатора струму, А
75
Номинальний вторинний струм трансформатора струму, А
5

Рисунок 3 – Рекомендовані параметри інших елементів

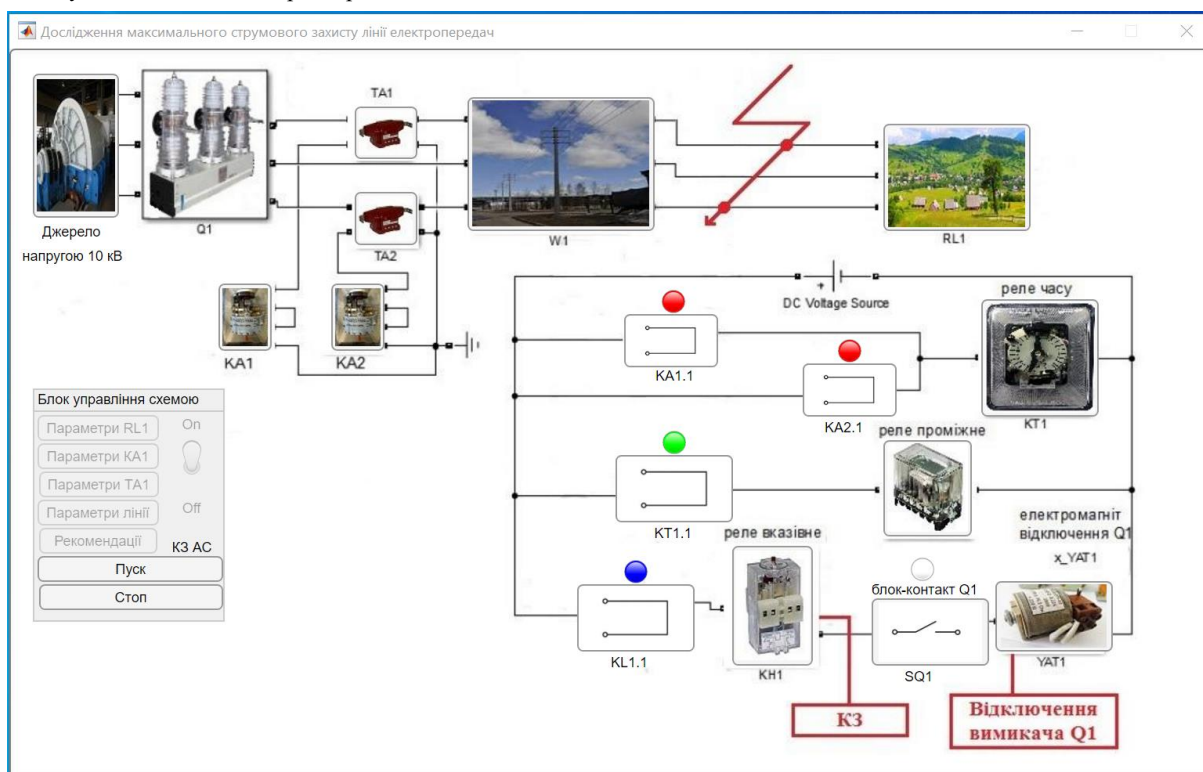


Рисунок 4 – Інтерфейс програми при проведенні дослідження

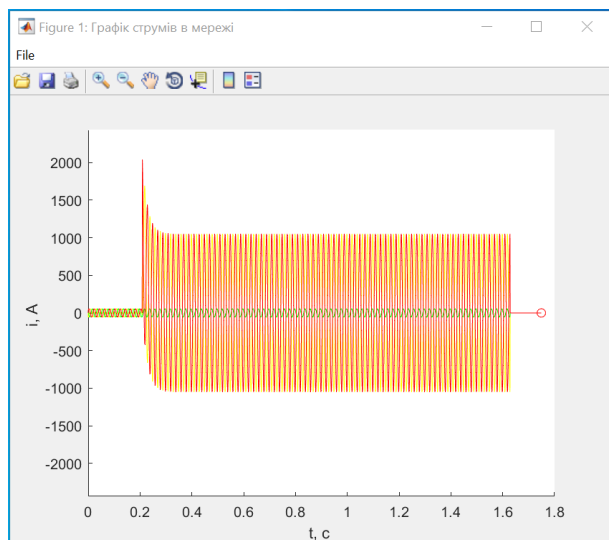


Рисунок 5 – Графік залежності струму від часу

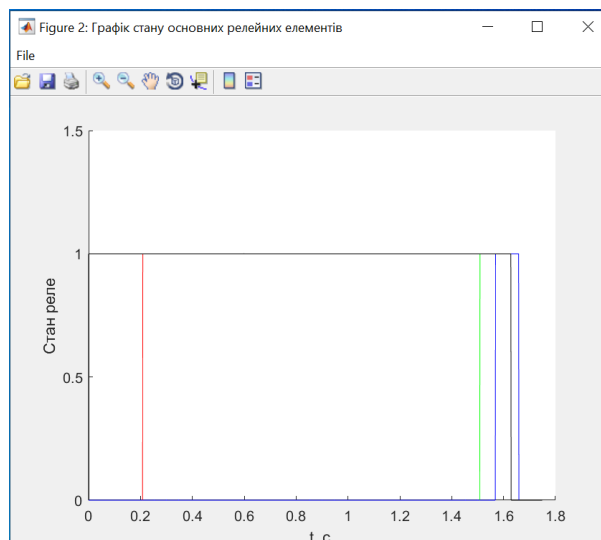


Рисунок 6 – Графік залежності станів елементів від часу

«Дослідження направленої максимального струмового захисту». Розроблений віртуальний стенд (рис. 7) дає змогу ознайомитись з принципом функціонування максимального струмового спрямованого захисту високовольтної лінії електропередавання [1–3, 8]. На рис. 7 показана мережа з двостороннім живленням, до якої входять: симетричні трифазні джерела змінної напруги G1 та G2, лінії електропередавання W1, W2, W3, W4, високовольтні вимикачі Q1, Q2, Q3, Q4, споживачі RL1, RL2, RL3. Джерело G1, навантаження RL1, вимикач Q1 відносяться до першої підстанції ПС1. Джерело G2, навантаження RL3, вимикач Q4 – до ПС3. Вимикачі Q2 та Q3, навантаження RL2 – до ПС2 [2, 8].

У місці підключення вимикача Q1 та лінії електропередавання W1 встановлено направлений струмовий захист A1, до якого входять трансформатори напруги TV1, TV2, що підключені на лінійну напругу фаз AB та BC відповідно,

трансформатори струмів TA1, TA2 у фазах A та C, реле струму KA1, KA2, реле напрямку потужності KW1 та KW2, що ввімкнені за 90-градусною схемою [2, 8]. Захист A2 встановлено у місці з'єднання вимикача Q2 та лінії W2, містить аналогічні елементи, що й захист A1. Відмінність даних захистів у тому, що вони підключені таким чином, що реагують, якщо потужність, що протікає в лінії, збігається з напрямком дії захисту. Для підтвердження введених параметрів треба натиснути кнопку «ОК».

Для вводу необхідних параметрів елементів необхідно натиснути на відповідний елемент, після чого з'являється вікно (рис. 8), що має вкладки «Елемент» та «Параметри». Перша вкладка призначена для перегляду елемента, а інша – для введення необхідних даних.

За допомогою групи вимикачів можна в схемі промодувати дво- та трифазне КЗ у точках K1 та K2. Коротке замикання у точці K1 знаходиться між лінією W1 та W2, у точці K2 – W3 та W4.

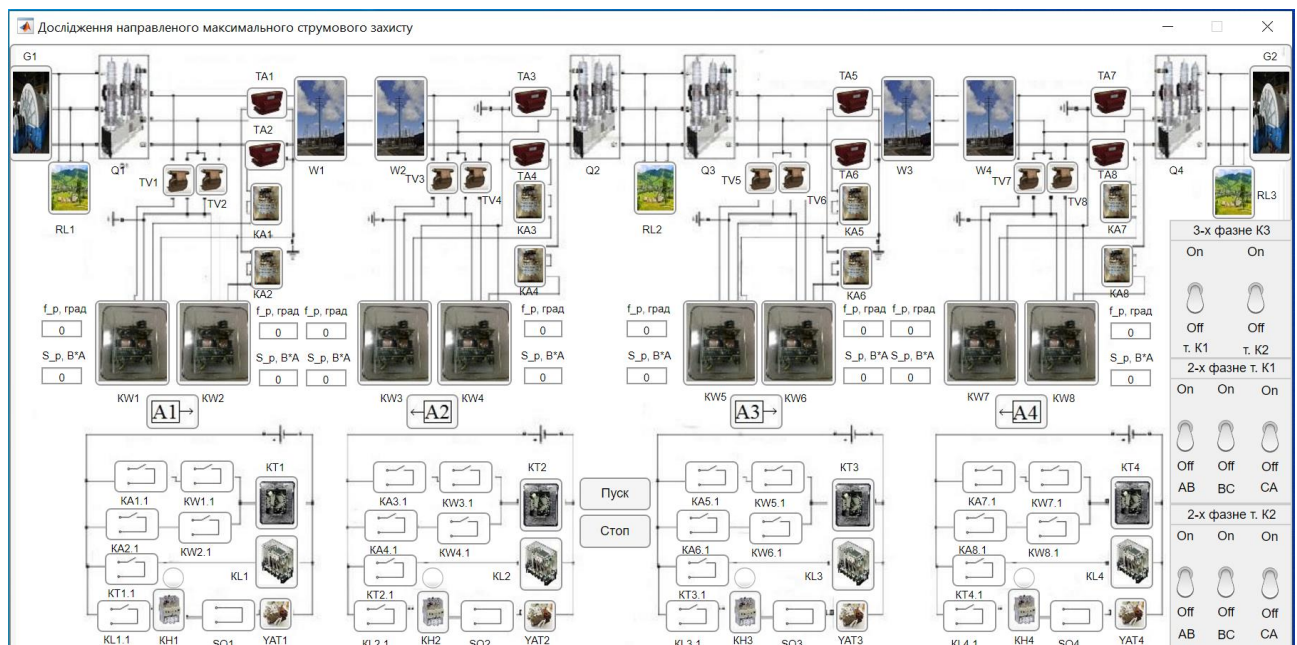


Рисунок 7 – Віртуальний стенд «Дослідження направленої максимального струмового захисту»

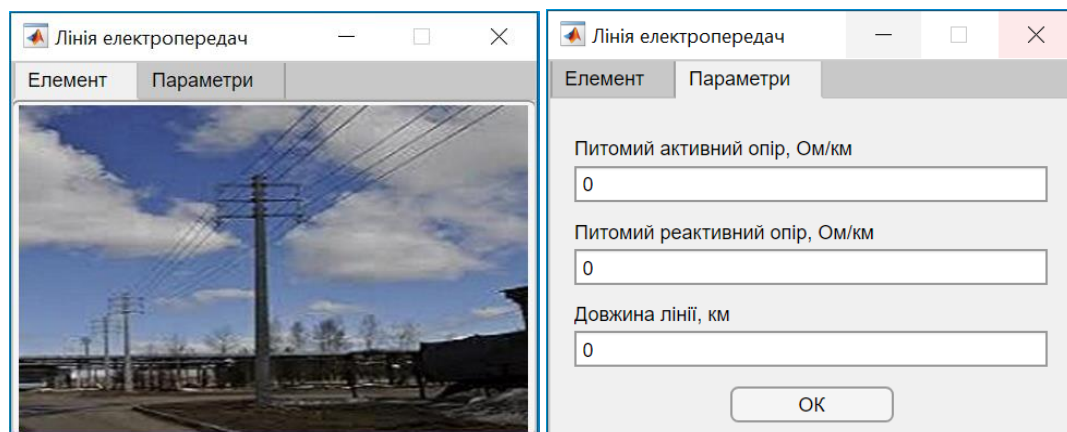


Рисунок 8 – Вікно вводу параметрів

Для запуску моделі необхідно натиснути кнопку «Пуск». Якщо усі вимикачі знаходяться в положенні «Off» в системі моделюється нормальний режим. При ввімкненні вимикача відбувається необхідне КЗ у потрібній точці. Після того як захист спрацював пошкоджена лінія відключається вимикачами. Потім з'являється вікно, у якому можна переглянути графіки струмів у фазах, де встановлено ТС, та графіки станів елементів. Щоб зупинити моделювання необхідно натиснути кнопку «Стоп».

Результати дослідження. Натискаємо кнопку «Пуск». Спочатку схема знаходиться в нормальному режимі. На панелі «3-х фазне КЗ», вимикач «т. К1» необхідно перевести в положення «On» Направлений МСЗ спрацює і вимикачі вимикають пошкоджену лінію. Лампа-індикатор червоного кольору свідчить про спрацювання направленої МСЗ (рис. 9). Після останнього режиму з'являється вікно, у якому можна дослідити графіки струмів (рис. 10) та стану елементів (рис. 11).

З графіка струмів (рис. 10) можна визнати час та струм нормального, аварійного та післяаварійного режимів. За формою кривої струмів можна визначити постійну часу перехідного процесу при вибраному типі короткого замикання.

«Дослідження роботи дистанційного захисту». Розроблений віртуальний стенд (рис. 12) дає змогу ознайомитись з принципом функціонування дистанційного захисту [1–3, 8]. У даній лабораторній роботі розглядається електромережа напругою 110 кВ із глухозаземленою нейтраллю, яка включає джерело, до якого під'єднано навантаження RL1, та за допомогою вакуумного вимикача Q1 лінію електропередавання W1. Ця лінія з'єднує першу підстанцію з другою, яка живить навантаження RL2. До другої підстанції лінією W2 під'єднано третю, що живить навантаження RL3.

Вимірювальні трансформатори TV1 – TV3 вимірюють фазні напруги мережі на шинах першої підстанції. Трансформатори струму TA1 – TA3 вимірюють струми приєднання лінії W1 першої підстанції. Сигнали з вимірювальних трансформаторів передаються у блок дистанційного захисту, який при виникненні КЗ в зоні дії захисту, подає команду відключення вимикача Q1 на електромагніт YAT.

Віртуальний стенд дозволяє досліджувати параметри захисту при різних характеристиках елементів навантаження RL1 – RL3, трансформаторів струму TA1 – TA3, трансформаторів напруги TV1 – TV3. Для введення характеристик обладнання мережі необхідно натиснути безпосередньо на елемент, після чого з'явиться вікно для вводу параметрів.

Для керування схемою дослідження дистанційного захисту передбачено панель «Управління схемою» (рис. 12). На даній панелі можна змінювати точку КЗ за допомогою бігунка. При його пересуванні змінюється відстань точки КЗ по відношенню до підстанції та відображається поточне положення точки КЗ на схемі. Також на панелі можна змінити тип КЗ (двофазне або трифазне).

Під час моделювання для спостереження результатів та їх фіксування передбачено панель «Результати», де відображаються основні характеристики реле дистанційного захисту.

Результати дослідження. Результат роботи віртуального стенду показаний на рис. 13. З рисунку видно, що при виникненні КЗ на початку лінії W2, в точці, яка відповідає 60 % від загальної довжини ділянки, що захищається, II та III ступені дистанційного захисту знаходяться у спрацьованому стані. Перший ступінь захисту не спрацьовує оскільки КЗ знаходиться поза зоною спрацювання. Кругові характеристики реле опору дистанційного захисту (рис. 13) дають додаткове уявлення про значення повного опору лінії та налаштованих зон захисту реле.

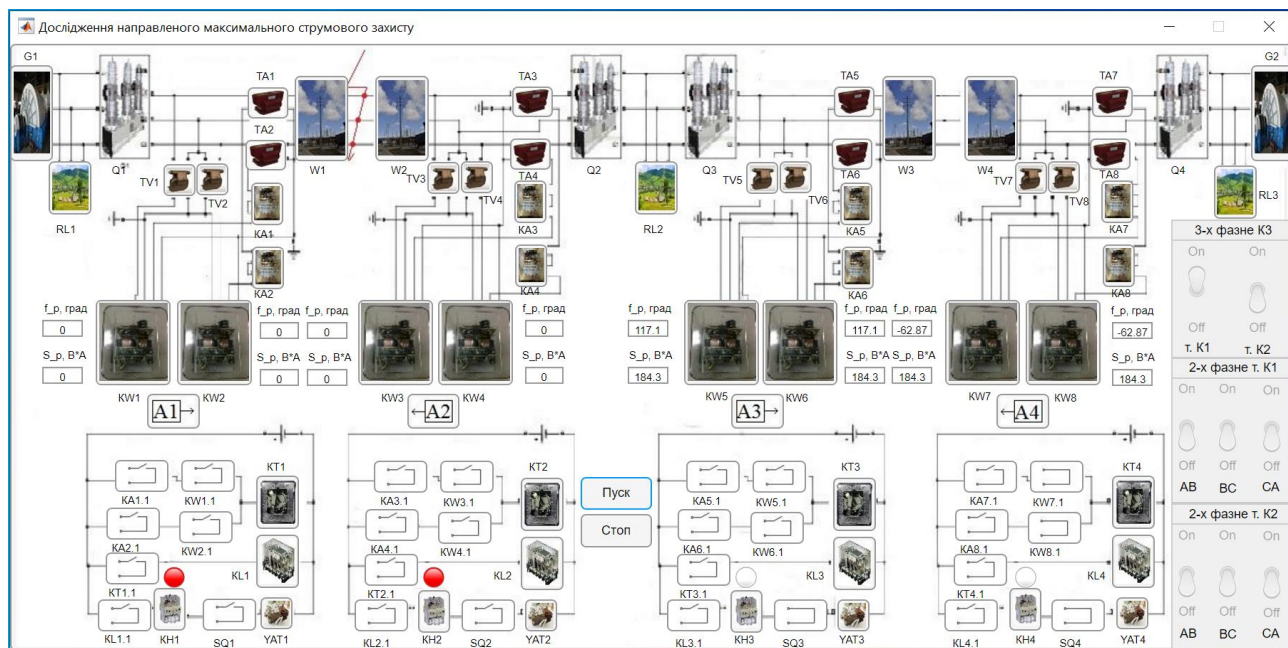


Рисунок 9 – Стан стенда після трифазного КЗ в точці К1

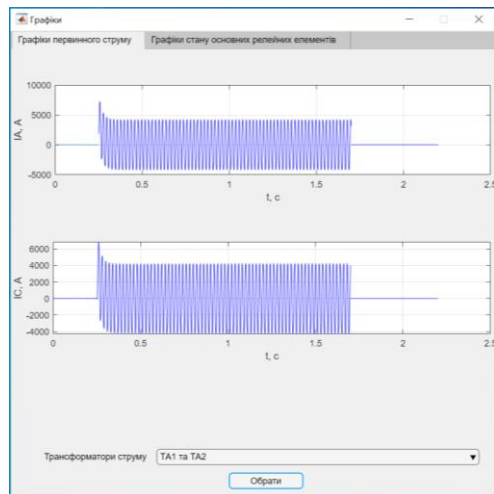


Рисунок 10 – Графік залежності струму від часу

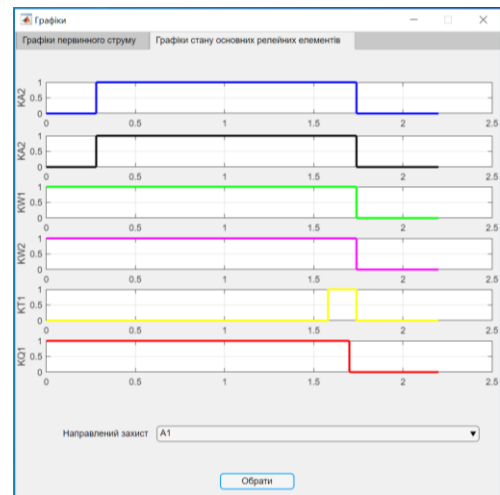


Рисунок 11 – Графік залежності станів елементів від часу

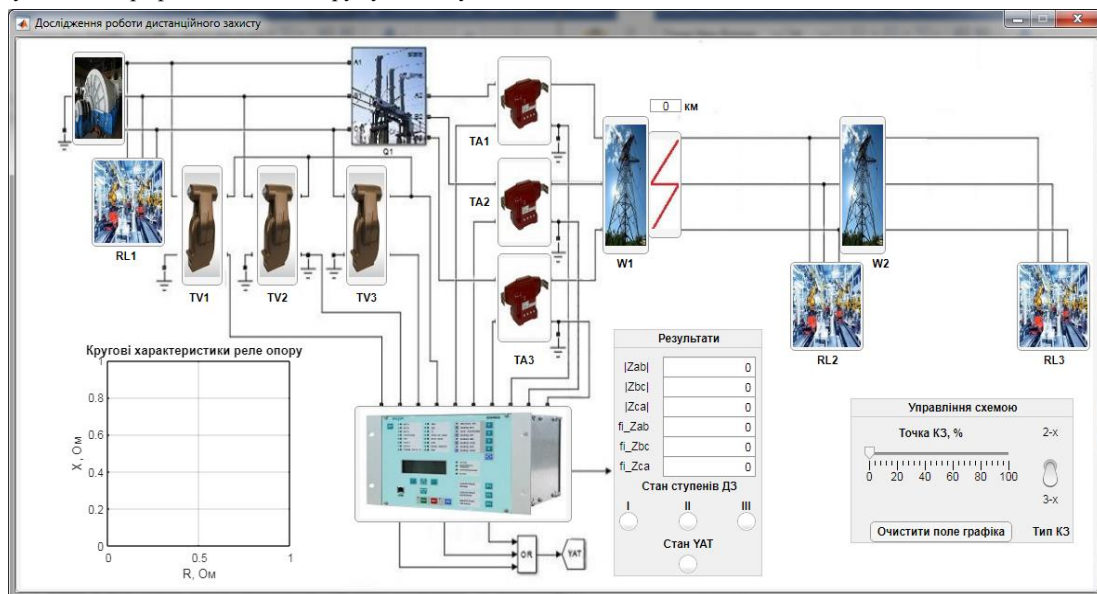


Рисунок 12 – Інтерфейс віртуального стенда «Дослідження роботи дистанційного захисту»

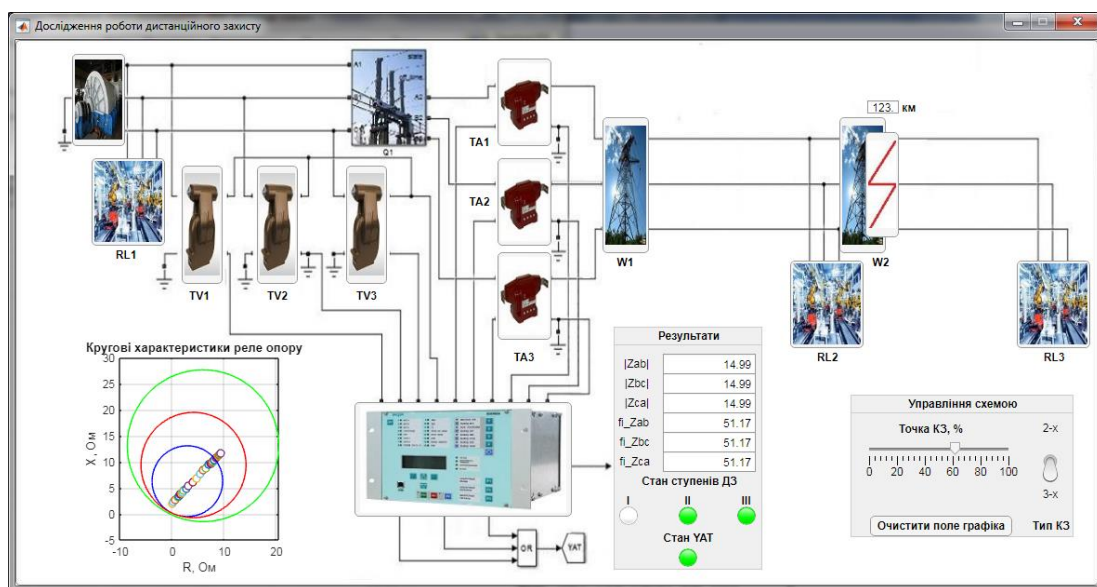


Рисунок 13 – Інтерфейс програми при проведенні дослідження

Висновки. Розроблені в роботі віртуальні стенди з дослідження максимального струмового захисту, направлено максимального струмового захисту та дистанційного захисту мають широкий функціонал щодо налаштування та візуалізації процесу спрацювання елементів захисту. Є можливість встановлення користувачем різних параметрів елементів схеми для дослідження різноманітних аварійних режимів та їх конфігурації. Також до переваг розроблених віртуальних стендів слід віднести можливість спостереження у часі за послідовністю спрацювання різних елементів захисту, що покращує розуміння стадій спрацювання складних захистів при розрахунку та налаштуванні їх уставок.

Таким чином розроблені в програмному комплексі MATLAB віртуальні стенди дозволяють користувачеві наблизитись до реальних умов проведення лабораторних робіт, що значно підвищує рівень підготовки інженерів електриків при роботі з реальними пристроями релейного захисту та автоматики.

Список літератури

1. Панченко С. В., Блиндюк В. С., Баженов В. М., Одегов М. М., Семененко 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: Видавництво Національного університету «Львівська Політехніка», 2013. 500 с.
3. Козарський Д. П., Майстрок Е. В., Козарський І. П. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем. Ч. 2. Чернівці: Чернівецький національний університет, 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: Національний університет водного господарства 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: Сумський державний університет, 2021. 71 с.
11. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А., Несен Л. І. Перехідні процеси в системах електропостачання. 5-те вид. Дніпро: Національний гірничий університет, 2016. 600 с.

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)
2. V. P. Kidyba, *Releinyi Zakhyst Elektroenergetychnykh System [Relay Protection of Electric Power Systems]*. Lviv: Polytechnic National University Press, 2013. (in Ukrainian)
3. D. P. Kozarskyi, E. V. Maistrak, and I. P. Kozarskyi, *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 Dysypliny «Osnovy Releinoho Zakhystu Ta Avtomatyzatsii Elektrichnykh System» Dlia Studentiv Za Spetsialnistiu 141 «Elektroenergetyka, Elektrotekhnika Ta Elektromekhanika» Dennoi Ta Zaochnoi 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, *Konstruktivna ta pryncypy 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. Petrovskyi 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 Protsepy v Systemakh Elektropostachannia [Transient Processes in Electricity Supply Systems]*, 5th ed. Dnipro: National Mining University, 2016. (in Ukrainian)

Надійшла (received) 30.05.2023

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

Петровський Михайло Васильович (Mykhailo Vasylovych Petrovskyi) – 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.petrovskyi@etech.sumdu.edu.ua.

Крамський Ігор Олександрович (Ihor Oleksandrovych Kramskyi) – 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 (Illia 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.

Лебедка 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 «Електротехнології» кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7775-9571>; e-mail: i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua.