

А. В. ГАДАЙ (канд. техн. наук, доц.)
Луцький національний технічний університет
haday@meta.ua

РОЗРОБКА МОДЕЛІ СТРУМОВОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В ПАКЕТІ MATLAB/SIMULINK

На базі MATLAB/SIMULINK побудована модель радіальної мережі з одностороннім живленням, яка дозволяє вивчати взаємозв'язок процесів в мережі у випадку нормального режиму роботи, і у випадку можливих пошкодження на різній віддалі від джерела живлення. В результаті дослідження встановлено, що запропонована модель пристрою релейного захисту підтверджує правильну поведінку реле максимального струму в різних режимах роботи мережі. Експлуатаційні характеристики пристрою були оцінені за трифазним коротким замиканням.

Наукова новизна полягає у розроблені моделі електричної мережі та пристрою максимального струмового захисту з усіма інверсними характеристиками витримки часу, передбаченими стандартами ANSI/IEEE та IEC.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання моделі для перевірки селективності та чутливості захисту у випадку зміни параметрів мережі в широкому діапазоні і у випадку проведення досліджень під час розробки та вдосконалення пристроїв релейного захисту, а також для навчання здобувачів освіти.

Ключові слова: *SIMULINK-модель, моделювання релейного захисту, струмовий захист, зворотно-залежна характеристика витримки часу.*

Вступ.

Будь-який пристрій релейного захисту є комбінацію різних типів реле – реле максимального струму, максимальної та мінімальної напруги, реле частоти тощо. Усі вони раніше були електромеханічними, а згодом напівпровідниковими. В даний час цифрові реле замінюють обидва типи. Вони мають більшу швидкодію, компактні та високу надійність [1-4].

Реле максимального струму використовуються для захисту системи розподілу та ліній електропередач від дії надструмів, що виникають в результаті короткого замикання або перевантаження. Крім того такі реле використовуються для захисту генераторів, силових трансформаторів та електродвигунів. Реле струму повинні забезпечувати зменшення руйнувань, заподіяної такими пошкодженнями; бути швидкодіючими, надійними і селективними. Для задоволення таких вимог, у цифрових пристроях релейного захисту використовуються переваги цифрової логіки, комунікацій, можливість зберігання та обробки інформації засобами сучасних мікропроцесорів [1-4].

Для перевірки правильності роботи релейного захисту зручно використовувати засоби симуляції режимів роботи електричних мереж. Така симуляція зручна під час проектування енергосистеми як дослідницький інструмент і під час навчання здобувачів освіти, щоб зрозуміти роботу пристроїв захисту в реальному часі. Наразі в світі використовують різноманітні програмні засоби – ETAP, DigSilent, Power World Simulator. Ці інструменти багатофункціональні, але малодоступні для вітчизняних закладів освіти та складні для навчання. MATLAB пропонує інструменти аналізу системи електропостачання з відкритим вихідним кодом. Цей набір інструментів охоплює багато елементів енергосистеми, але має незначну кількість модулів для компонентів системи захисту [5]. В роботах [6-8] розроблені моделі окремих реле максимального струму, а в [9] – побудована модель реле напрямку потужності. Перевірка селективності роботи захистів вимагає додаткових досліджень.

Матеріал і методика дослідження.

Захисні функції реле, як вхідні, так і вихідні елементи вимірювань, характеристики витримки часу і функціональна логіка роботи реле наведені в [1] і показані на рис 1.

Кількість вхідної енергії вимірюється величинами складових сигналів, тобто струмів і напруг, якщо необхідно. Їхній рівень та відповідний для цього стандарт зазначені в [10]. Вхідна енергія може приходити у формі перетворених хвиль струму і напруги або у вигляді даних через комунікаційний порт у формі відповідного протоколу. Отже, для вимірювального реле вказується тип енергії, що застосовується для функції захисту:

- вимірний струму фази;
- вимірний трифазний струм;
- вимірний струм нейтралі або диференціальний струм;
- вимірювана пряма, зворотна або нульова послідовність струму.

Крім того, встановлюється спосіб вимірювання вхідної енергії:

- значення діючого сигналу;

- діюче значення основної складової сигналу;
- діюче значення специфічної складової гармоніки сигналу;
- пікового значення сигналу;
- миттєве значення сигналу.

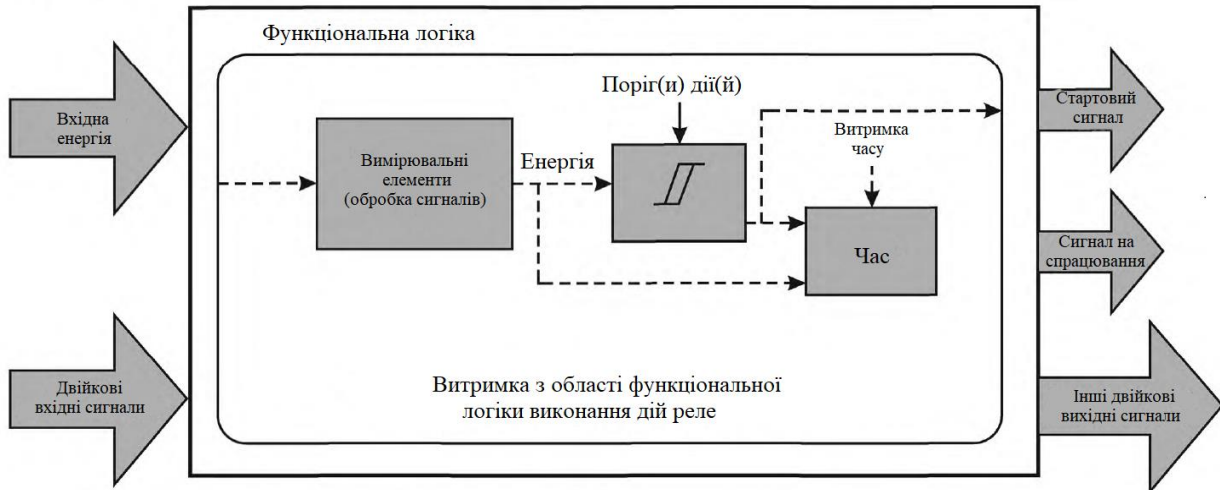


Рисунок 1 – Функціональний блок діаграм виконання захисту

Стандарт [10] встановлює два типи характеристик залежності часу:

- незалежну (тобто визначену часом витримки);
- залежну (тобто зворотно пропорційну часу витримки).

Часова характеристика визначається часом спрацювання від моменту стану, коли вхідна енергія перевищує значення уставки G_s , і до моменту, коли реле спрацьовує.

Незалежна характеристика часу визначається термінами, що визначають значення уставки характеристичної величини (G_s) та час спрацювання t_{op} . Якщо застосовується незалежна витримка часу, то реле часу з цією витримкою позначають як реле миттєвого спрацювання.

Для реле з залежною характеристикою часу залежність витримки часу обчислюється за формулою:

$$t(G) = TMS \left[\frac{k}{\left(\frac{G}{G_s} \right)^\alpha - 1} + c \right], \quad (1)$$

де $t(G)$ – теоретичний час спрацювання при постійному значенні G ; k , c , α – постійні, що характеризують вибір залежності; G – виміряне значення характеристичної величини; G_s – значення уставки; TMS – регульована уставка часу.

Графічна залежність характеристики часу наведено рис. 2.

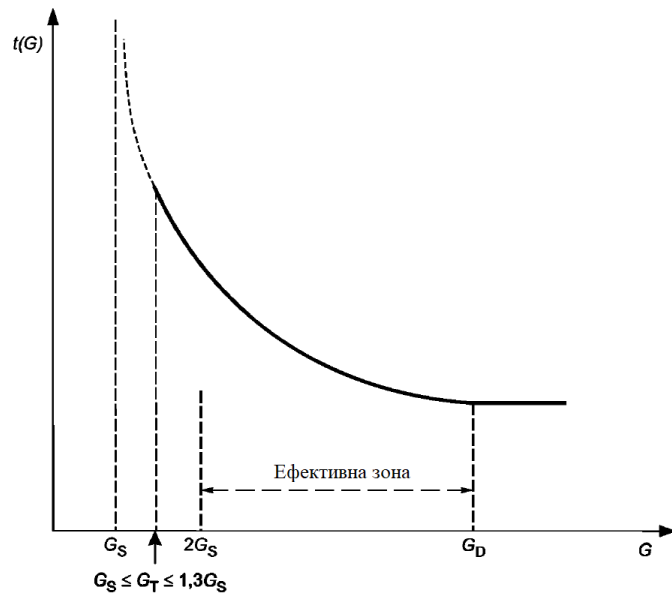


Рисунок 2 – Залежна характеристика часу

Для координації кількох реле із залежною характеристикою і даними умовами поведінка реле має забезпечувати залежність, наведену в формулі:

$$\int_0^{T_0} \frac{1}{t(G)} dt = 1, \tag{3}$$

де T_0 – час спрацювання, що змінюється величиною G ; $t(G)$ – теоретичний час спрацювання в с при постійному значенні G ; G – виміряне значення характеристичної величини.

Для забезпечення селективності часу між різними максимальними струмовими захистами в різних точках мережі, зазвичай використовуються різні витримки часу. Варіанти виконання показані на простому випадку трьох максимальних струмових захистів, які з'єднані послідовно (рис. 3). Найпростіше це зробити за допомогою незалежної витримки часу (рис. 4). У складніших випадках використовуються залежні від струму ампер-секундні характеристики (рис. 5).

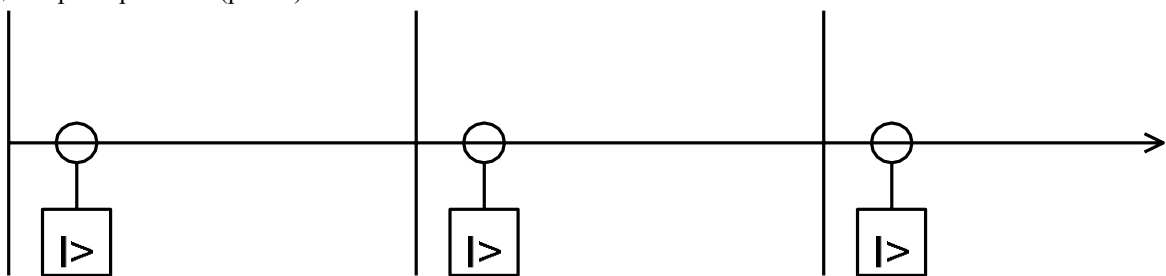


Рисунок 3 – Три максимальні струмові захисти, з'єднані послідовно

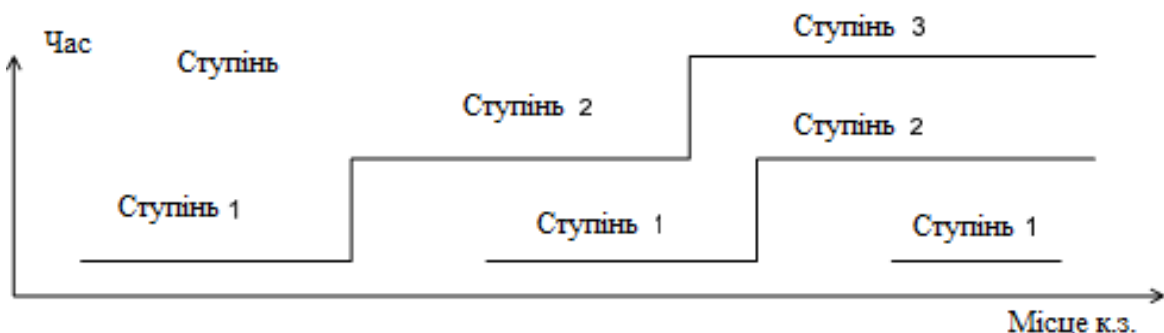


Рисунок 4 – Максимальні струмові характеристики із незалежними витримками часу

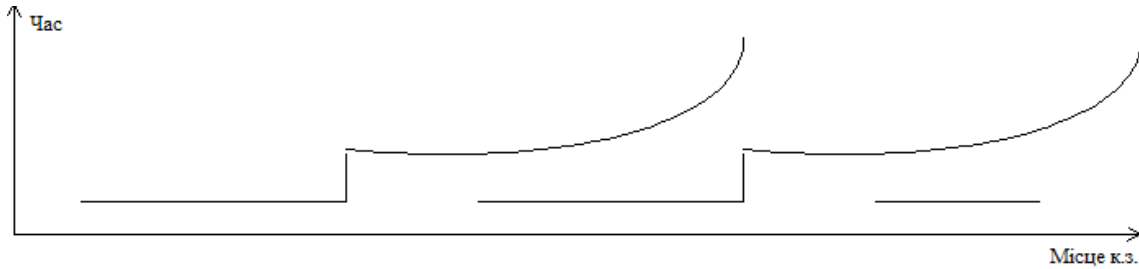


Рисунок 5 – Інверсні максимальні струмові характеристики зі ступенем миттєвого відключення

Інверсна ампер-секундна характеристика дозволяє мінімізувати час відключення пошкодження та гарантувати селективність. Для гарантії селективності захистів передбачається відлагодження часу спрацювання цих захистів. У простому випадку із двома послідовними захистами таке відлагодження залежить від наступних факторів:

- різниці між часом спрацювання цих захистів;
- час вимкнення вимикача, найближчого до місця пошкодження;
- часу повернення захисту;
- запас відлагодження від неточності.

Забезпечення селективного вимкнення пошкодження вимагає значної кількості розрахунків та побудови ампер-секундних характеристик усіх захистів в усьому діапазоні струмів пошкодження. Тому, для оцінки правильності роботи захистів доцільно провести їх імітаційне моделювання.

Для розподільної мережі 10 кВ типовою є радіальна схема живлення (рис. 6), яка складається джерела живлення, живлячої лінії Л1, трьох розподільних ліній Л2...Л4, в кінці яких розташоване комплексне навантаження S1...S3. На рис. 7 показана тестова модель такої мережі, яка складена засобами пакету Matlab/Simulink [12]. На вимикачах QF1...QF4 встановлено максимальний струмовий захист із залежною витримкою часу.

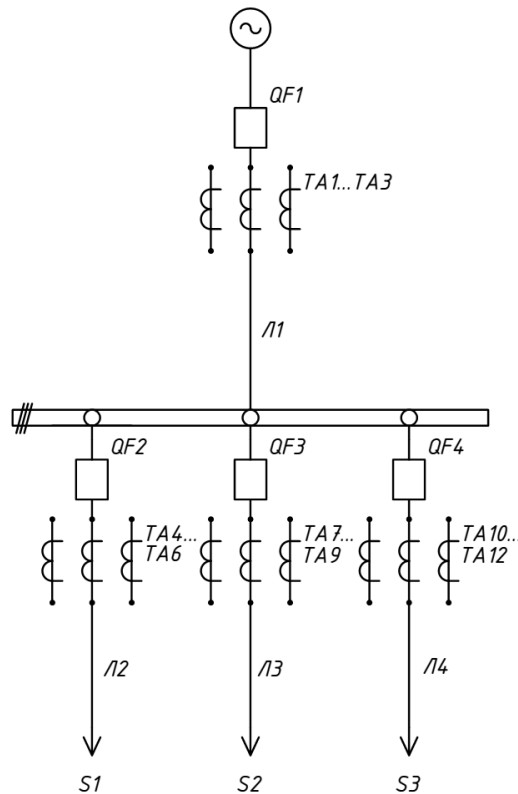


Рисунок 6 – Схема мережі 10 кВ

На основі ампер-секундних інверсних характеристик витримок часу складена модель пристрою релейного захисту з вимикаючим елементом (рис. 8). Сигнал на вимкнення вимикаючого елемента подається з виходу R пристрою релейного захисту, в залежності від витримки часу. Захист може спрацювати в режимі незалежної витримки часу або в режимі із залежною від струму інверсною витримкою часу. Для інверсної ампер-секундної характеристики передбачені два види стандартних кривих, що ґрунтуються на стандартах двох міжнародних організацій: ANSI/IEEE та IEC [11].

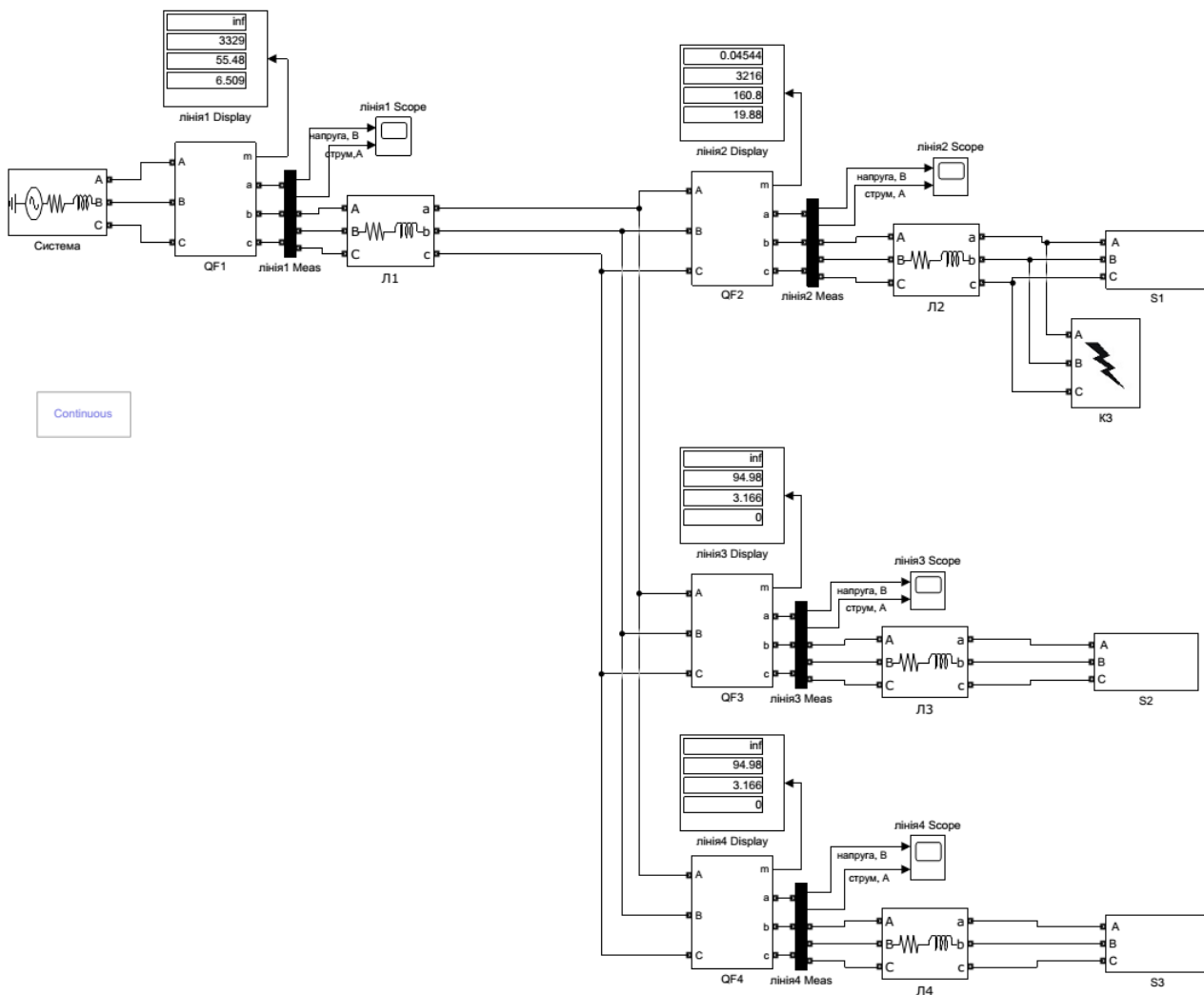


Рисунок 7 – Тестова модель мережі 10 кВ

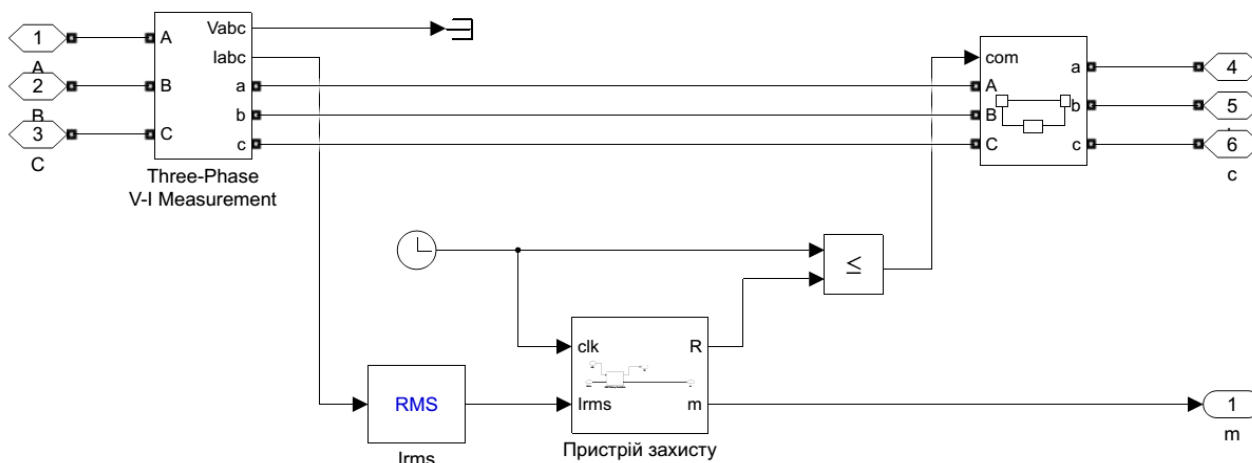


Рисунок 8 – Модель пристрою релейного захисту з вимикаючим елементом

Блок Display отримує сигнали з виходу m кожного пристрою QF і показує:

- час роботи пристрою;
- первинний струм трансформатора струму;
- вторинний струм трансформатора струму;
- кратність уставки.

На лінії Л2 через 0,05 с після запуску моделі виникає трифазне коротке замикання. Амплітудне значення струму короткого замикання становить 4,44 кА.

Уставки струму спрацювання та витримок часу захистів на QF1 та QF2 показані на рис. 9 та 10.

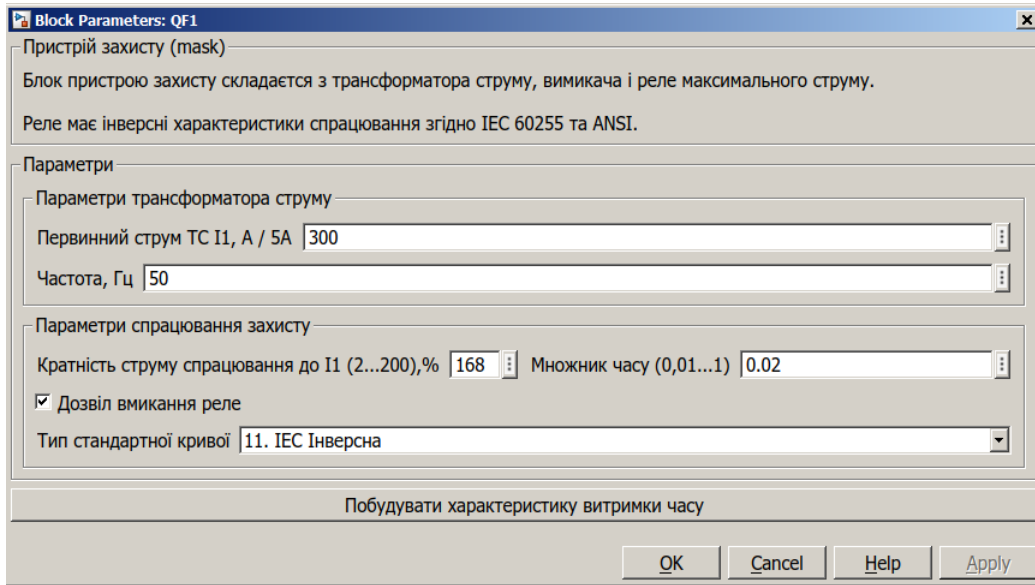


Рисунок 9 – Діалогове вікно пристрою захисту QF1

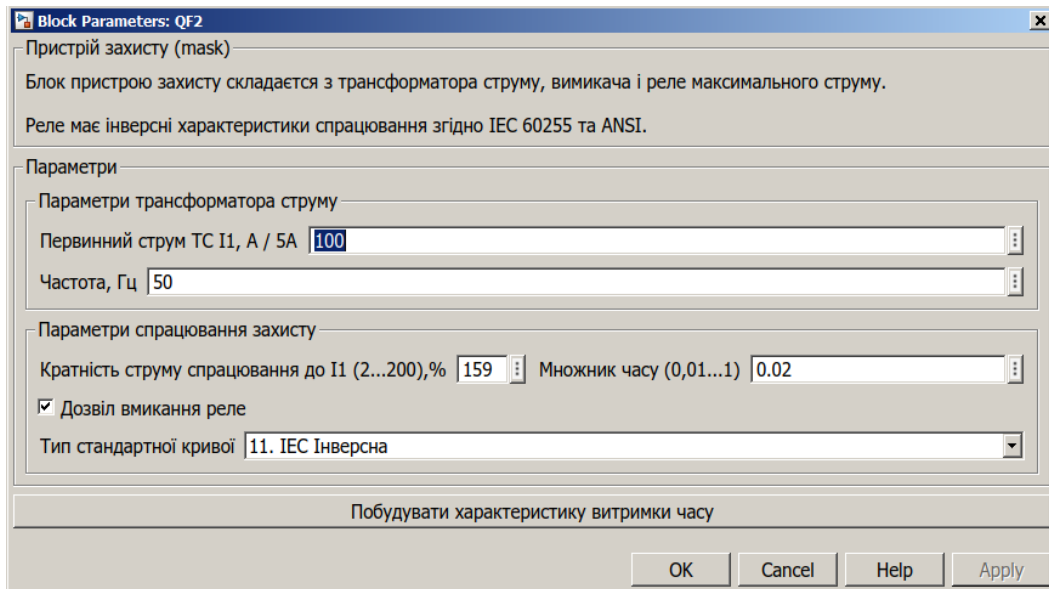


Рисунок 10 – Діалогове вікно пристрою захисту QF2

На рис. 11, 12 наведені графіки зміни струму та напруги в місцях встановлення захистів під час нормального режиму, виникнення короткого замикання та його вимкнення для селективного вимкнення пошкодження.

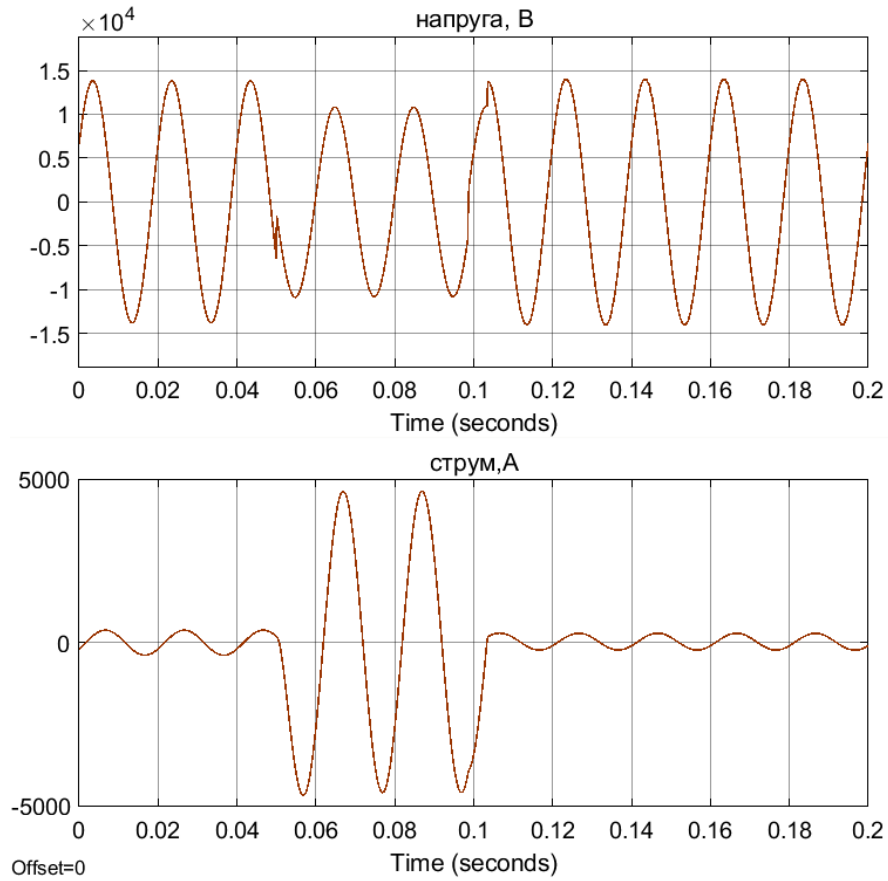


Рисунок 11 – Зміна струму та напруги на лінії Л1 за $TMS=0,02$

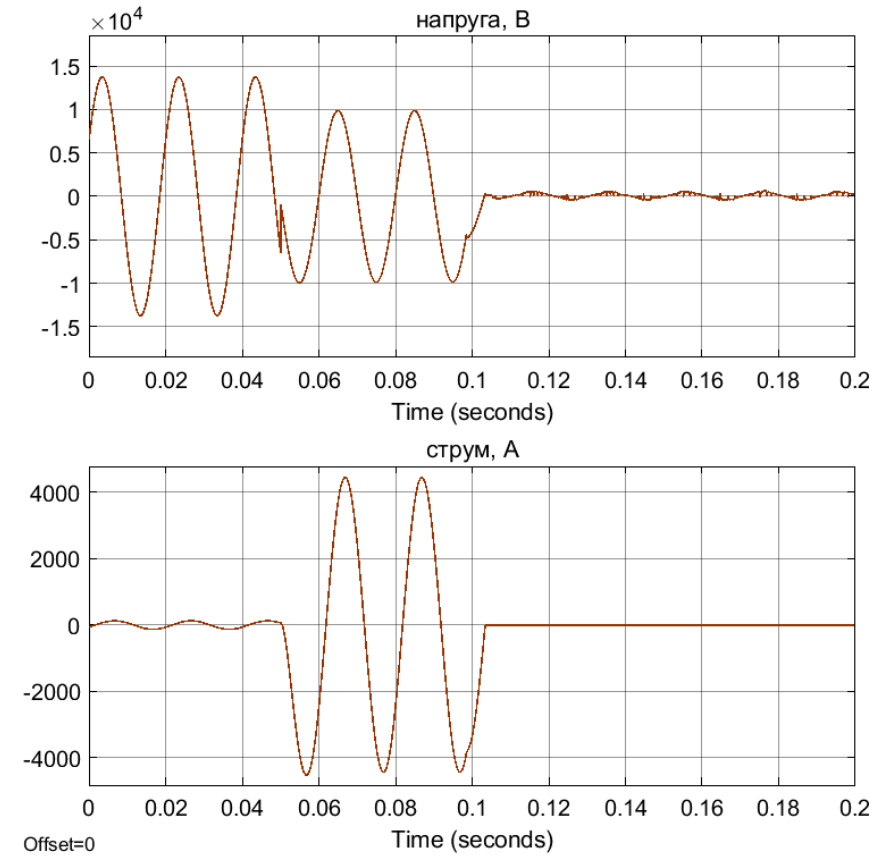


Рисунок 12 – Зміна струму та напруги на лінії Л2 за $TMS=0,02$

На рис. 13, 14 наведені графіки зміни струму та напруги в місцях встановлення захистів під час нормального режиму, виникнення короткого замикання та його вимкнення для неселективного вимкнення пошкодження.

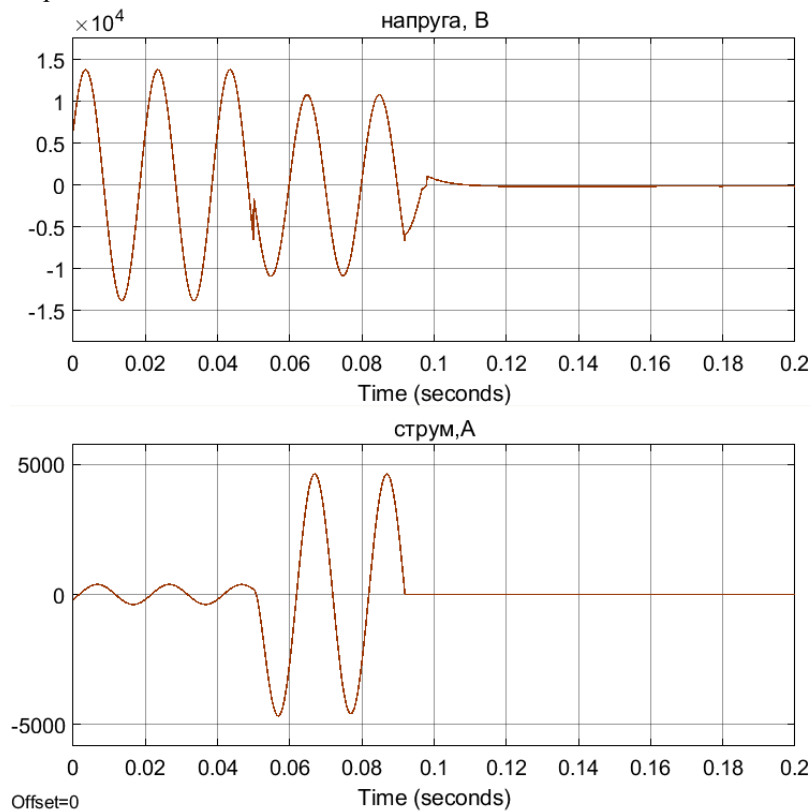


Рисунок 13 – Зміна струму та напруги на лінії Л1 за $TMS = 0,01$

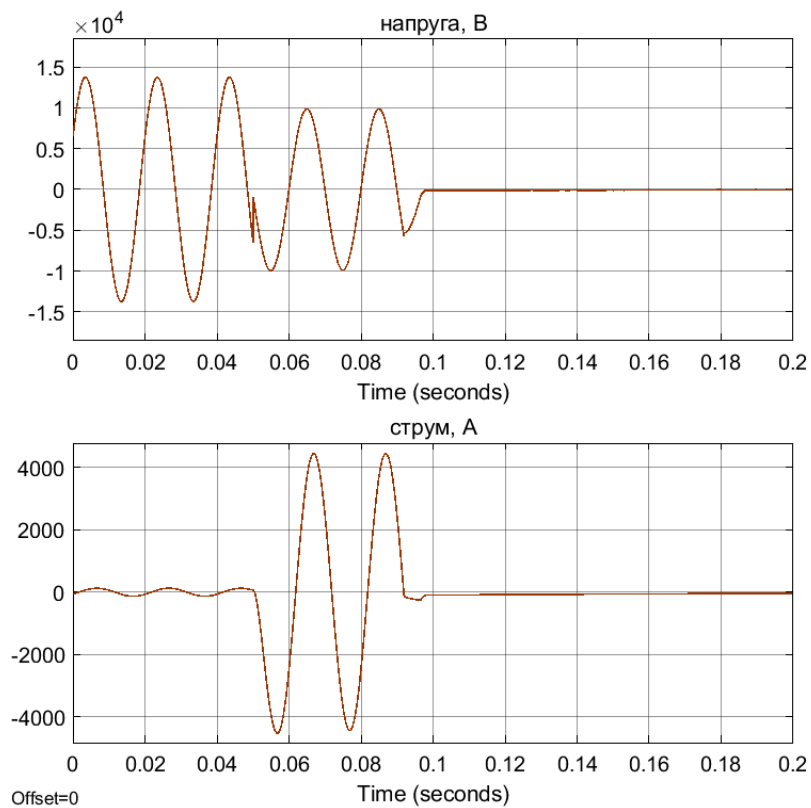


Рисунок 14 – Зміна струму та напруги на лінії Л2 за $TMS = 0,02$

В вказаних випадках захист працює із заданою витримкою часу і вимикає пошкодження. Поведінка пристрою захисту свідчить, що запропоновану модель можна використовувати в подальшій роботі для розробки алгоритмів струмових захистів ліній.

Висновки

На базі MATLAB/SIMULINK побудована модель радіальної мережі з одностороннім живленням, яка дозволяє вивчати взаємозв'язок процесів в мережі у випадку нормального режиму роботи, і у випадку можливих пошкодження на різній віддалі від джерела живлення. В результаті дослідження встановлено, що запропонована модель пристрою релейного захисту підтверджує правильну поведінку реле максимального струму в різних режимах роботи мережі. Експлуатаційні характеристики пристрою були оцінені за трифазним коротким замиканням. Поведінка пристрою захисту свідчить, що запропоновану модель можна використовувати в подальшій роботі для розробки алгоритмів струмових захистів ліній. Для вдосконалення моделі пристрою необхідно дослідити вплив параметрів моделювання, таких як дані джерела живлення, ліній електропередач, навантаження та вид пошкодження на параметри роботи пристрою захисту.

Наукова новизна полягає у розроблені моделі електричної мережі та пристрою максимального струмового захисту з усіма інверсними характеристиками витримки часу, передбаченими стандартами ANSI/IEEE та IEC.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання моделі для перевірки селективності та чутливості захисту у випадку зміни параметрів мережі в широкому діапазоні і у випадку проведення досліджень під час розробки та вдосконалення пристроїв релейного захисту, а також для навчання здобувачів освіти.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sidhu, T.S.; Sachdev, M.S.; Wood, H.C. Design of a microprocessor-based overcurrent relay. In: IEEE Western Canada Conference. 1991. P. 41-46.
2. Yalla V.V.S. Murty, a and W.J. Smolinskib. Design and implementation of a versatile digital directional overcurrent relay. In: J Electr Pow Syst Res January 1990. 18(1). P. 47-55.
3. Benmouyal G, Meisinger M, Burnworth J, Elmore WA, Freirich K, Kotos PA, Leblanc PR, Lerley PJ, McConnell JE, Mizener J, Pinto de Sa J, Ramaswami R, Sachdev MS, Strang WM, Waldron JE, Watansiroch S, Zocholl SE. IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays. In: J IEEE T Power Syst. 1999. 14(3). P. 868-872.
4. Jhanwar V, Pradhan, AK. Accurate Overcurrent Relay Algorithm using Fundamental Component. In: Power System Technology and IEEE Power India Conference. 2008.
5. Vahidi, B., Esmaeeli, E. MATLAB-SIMULINK-Based Simulation For Digital Differential Relay Protection of Power Transformer for Educational Purpose. In: J Comput Appl Eng Educ. 29 SEP 2010.
6. Aman, Muhammad Mohsin, et al. "Digital directional and non-directional over current relays: modelling and performance analysis." NED University Journal of Research. 2011. Vol. 8, No. 2. Dec. p. 70. Gale Academic OneFile, link.gale.com/apps/doc/A297138117/AONE?u=googlescholar&sid=googleScholar&xid=bedb4e49. Accessed 11 Feb. 2022.
7. Maji P., Ghosh G.. Designing Over-Current Relay Logic in Matlab. IJSER, Vol. 8, Issue 3, March 2017.
8. Hussin H., Idris M. H., Amirruddin M., Ahmad M. S., Ismail M. A., Abdullah F. S., and Mukhatar N. M.. Modeling and Simulation of Inverse Time Overcurrent Relay Using Matlab/Simulink. IEEE I2CACIS. 22 October 2016.
9. Шимук Д.С. Імітаційна модель функціонування направленої релейного захисту. Комунальне господарство міст. Серія: Енергоефективна техніка та технології в житлово-комунальному господарстві. 2014. Випуск 118(1).
10. IEC 60255-151:2009 Measuring relays and protection equipment – Part 151: Functional requirements for over/under current protection/
11. ABB. Устройство защиты, управления и автоматизации линии REF615. Техническое справочное руководство. Идентификационный номер 1MRS756887, версия продукта 4.0, редакция F. ABB. 11.05.2012.
12. Help Center Mathworks: веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/>.

REFERENCES

1. Sidhu, T.S.; Sachdev, M.S.; Wood, H.C. Design of a microprocessor-based overcurrent relay. In: IEEE Western Canada Conference. 1991. P. 41-46.
2. Yalla V.V.S. Murty, a and W.J. Smolinskib. Design and implementation of a versatile digital directional overcurrent relay. In: J Electr Pow Syst Res January 1990. 18(1). P. 47-55.
3. Benmouyal G, Meisinger M, Burnworth J, Elmore WA, Freirich K, Kotos PA, Leblanc PR, Lerley PJ, McConnell JE, Mizener J, Pinto de Sa J, Ramaswami R, Sachdev MS, Strang WM, Waldron JE, Watansiroch S, Zocholl SE. IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays. In: J IEEE T Power Syst. 1999. 14(3). P. 868-872.
4. Jhanwar V, Pradhan, AK. Accurate Overcurrent Relay Algorithm using Fundamental Component. In: Power System Technology and IEEE Power India Conference. 2008.
5. Vahidi, B., Esmaeeli, E. MATLAB-SIMULINK-Based Simulation For Digital Differential Relay Protection of Power Transformer for Educational Purpose. In: J Comput Appl Eng Educ. 29 SEP 2010.

6. Aman, Muhammad Mohsin, et al. "Digital directional and non-directional over current relays: modelling and performance analysis." NED University Journal of Research. 2011. Vol. 8, No. 2. Dec. p. 70. Gale Academic OneFile, link.gale.com/apps/doc/A297138117/AONE?u=googlescholar&sid=googleScholar&xid=bedb4e49. Accessed 11 Feb. 2022.

7. Maji P., Ghosh G.. Designing Over-Current Relay Logic in Matlab. IJSER, Vol. 8, Issue 3, March 2017.

8. Hussin H., Idris M. H., Amirruddin M., Ahmad M. S., Ismail M. A., Abdullah F. S., and Mukhtar N. M.. Modeling and Simulation of Inverse Time Overcurrent Relay Using Matlab/Simulink. IEEE I2CACIS. 22 October 2016.

9. Shimuk DS Simulation model of directional relay protection operation. Municipal utilities. Series: Energy efficient appliances and technologies in housing and communal services. 2014. Issue 118 (1).

10. IEC 60255-151:2009 Measuring relays and protection equipment – Part 151: Functional requirements for over/under current protection/

11. ABB. Устройство защиты, управления и автоматизации линии REF615. Техническое справочное руководство. Идентификационный номер 1MRS756887, версия продукта 4.0, редакция F. ABB. 11.05.2012.

12. Help Center Mathworks: веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/>.

Надійшла до редколегії

Рецензент:

A.V. HADAI¹

¹Lutsk National Technical University

Development of a model of current relay protection in the MATLAB/SIMULINK. Based on MATLAB / SIMULINK, a model of a radial network with one-way power supply and three radial lines with a complex load at the end of each line is built. The model allows you to study the relationship of processes in the network in the case of normal operation, and in the case of possible damage at different distances from the power supply. The proposed model of the current protection device consists of a three-phase current meter, a switching element and a display. In the dialog box of the device, the primary current of the transformer current, the mains voltage frequency, the multiplicity of the protection tripping current and the tripping time multiplier are set, and the type of the standard curve of the protection tripping time characteristic is selected. A protection device with inverse time delay characteristics measures the RMS value of three-phase AC. The switch-off signal is given from the output of the relay protection device, depending on the time delay. The display shows the operating time of the device, primary and secondary currents and setpoint multiplicity. The performance of the device was evaluated by a three-phase short circuit. As a result of research it is established that the offered model of the relay protection device confirms correct behavior of the relay of the maximum current in various operating modes of a network. The behavior of the protection device indicates that the proposed model can be used in further work to develop algorithms for current protection of lines. To improve the model of the device, it is necessary to investigate the influence of simulation parameters, such as data on power sources, power lines, load and type of damage on the parameters of the protection device.

The scientific novelty is the the developed models of the electric network and the device of the maximum current protection with all inverse characteristics of endurance of time provided by the ANSI / IEEE and IEC standards.

The practical significance of the work is the possibility of using the model to test the selectivity and sensitivity of protection in the event of changes in network parameters in a wide range and in the case of research in the development and improvement of relay protection devices and training.

Key words: *SIMULINK-model, modeling of relay protection, current protection, inversely dependent characteristic of time endurance.*