

*В. В. ЧЕРКАШИНА, В. М. ЦЮПА*

## АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ РОБОТИ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Робота присвячена виявленню перспектив програмної реалізації диференційного релейного захисту. Метою статті був аналіз алгоритмів роботи пристроїв, що дозволило створити математичну модель в програмному середовищі MATLAB з перспективою інтеграції у вигляді єдиного регіонального серверу релейного захисту до об'єднаної енергетичної системи України. Встановлено що віртуальні моделі мають як переваги, так і недоліки порівняно з цифро-аналоговими пристроями. Їхня позитивна властивість – завдяки блоковому принципу побудови можна легко змінювати не тільки параметри, але й конфігурацію первинної мережі. Недолік – налаштування віртуальних захистів відрізняється від налаштування їхніх прототипів – реальних реле і терміналів. Оцінено існуючу широко застосовану методику, розглянуто актуальні алгоритми двоступеневого диференційного релейного захисту. Встановлено, що диференційний захист має два ступені – швидкодіючу диференціальну струмову відсічку та чутливий диференційний струмовий захист із гальмуванням від наскрізного струму і відбудовою від кидків струму намагнічування. Розроблено та наведено спрощену схему фрагмента електричної системи та диференціальний релейний захист трансформатора в середовищі MATLAB. Детально розглянуто алгоритми та встановлено, що за їх допомогою та допомогою розглянутих принципів диференціального захисту в пакеті Simulink реалізовано логіку роботи моделі аналогічно логіці мікропроцесорних захистів трансформаторів «РС-83ДТ2» ТОВ «РЗА СИСТЕМЗ» і SPAD 346 С фірми ABB. За результатами моделювання отримано осцилограми первинних струмів нормального режиму й аварійних режимів із зовнішнім та внутрішнім короткими замиканнями. Встановлено перспективність використання даної моделі та алгоритмів для розробки програмного рішення для сервера релейного захисту та для майбутньої інтеграції в об'єднану енергосистему.

**Ключові слова:** математична модель, релейний захист, диференційне реле, алгоритми, коротке замикання, діджиталізація.

*V. V. CHERKASHYNA, V. M. TSIUPA*

## ANALYSIS OF DIFFERENTIAL RELAY PROTECTION ALGORITHMS AND THEIR MODELLING IN MATLAB

The paper is devoted to identifying the prospects for software implementation of differential relay protection. The purpose of this study was to analyse the algorithms of the devices' operation, which allowed to create a mathematical model in the MATLAB software environment with the prospect of integration in the form of a single regional relay protection server into the unified energy system of Ukraine. It has been established that virtual models have both advantages and disadvantages compared to digital-analog devices. Their positive feature is that, due to the block principle of construction, it is possible to easily change not only the parameters but also the configuration of the primary network. The disadvantage is that the configuration of virtual protections differs from the configuration of their prototypes – real relays and terminals. The article evaluates the existing, widely used methodology and considers the actual algorithms of two-stage differential relay protection. It is established that differential protection has two stages: 1 – fast-acting differential current cut-off; 2 – sensitive differential current protection with inhibition from through current and recovery from magnetisation current surges. A simplified diagram of a fragment of the electrical system and differential relay protection of a transformer are developed and presented in MATLAB. The algorithms are considered in detail, and it is established that with their help and with the help of the considered principles of differential protection in the Simulink package, the logic of the model is implemented similarly to the logic of microprocessor-based transformer protection “RS-83DT2” of RZA Systems LLC and SPAD 346 C of ABB. Based on the modelling results, the oscillograms of primary currents of normal mode and emergency modes with external and internal short circuits are obtained. The conclusions establish the prospects of using this model and algorithms for the development of a software solution for the relay protection server and for future integration into the integrated power system.

**Keywords:** mathematical model, relay protection, differential relay, algorithms, short circuit, digitalisation.

**Вступ.** Сучасні технічні та програмні засоби дають змогу створювати дуже складні та детальні динамічні моделі реальних систем. Однією з передових систем комп'ютерного моделювання є середовище Matlab. Широкого поширення це середовище набуло завдяки універсальності, наявності великої кількості розширень і бібліотек.

Релейний захист – дуже відповідальна частина електричної системи. Від нього залежать надійність електропостачання споживачів, масштаби аварій, і часто безпека людей. Під час розрахунку уставок можливі випадкові помилки, які можуть призвести до серйозних наслідків (відмов, помилкових або зайвих дій). Також помилки можуть виникати через неврахування будь-яких чинників. Попередня перевірка на моделі дає змогу своєчасно виявляти багато з них. У межах цієї статті описано диференційний захист двообмоткового

трансформатора, є також розроблені в середовищі MATLAB програмовані моделі захисту ліній (поперечні диференціальні, струмові ступінчасті, максимальні струмові спрямовані захисти тощо), генераторів, блоків, алгоритми яких працюють на електричних принципах.

Відмінність представленої моделі релейного захисту від інших підходів, описаних у [1, 2], полягає в тому, що віртуальна модель останніх відображає тільки процеси, що протікають у первинній мережі. Зазначені моделі не містять блоків релейних захистів та елементів вимкнення пошкоджених ділянок і не дають змоги проаналізувати процеси, які відбуваються в первинних і вторинних колах мережі в момент виникнення аварійних режимів і подальшого вимкнення. Ці моделі також не дають можливості виставити та перевірити уставки релейних захистів.

Віртуальні моделі мають як переваги, так і недоліки порівняно з цифро-аналогові пристрої. Їхня позитивна властивість – завдяки блоковому принципу побудови можна легко змінювати не тільки параметри, а й конфігурацію первинної мережі. Недолік – налаштування віртуальних захистів відрізняється від налаштування їхніх прототипів – реальних реле і терміналів [3].

**Мета статті.** Метою представленої статті є розробка в середовищі MATLAB віртуальних моделей релейних захистів, інтегрованих зі схемами енергетичних систем. Така інтеграція дає змогу детально проаналізувати процеси, що протікають як у первинних силових колах енергосистем, так і в колах релейних захистів, що має величезне значення для програмної реалізації даного захисту для єдиного серверу регіонального релейного захисту.

**Побудова віртуальної моделі.** Силу частину електричної системи виконано за допомогою блоків бібліотеки SimPowerSystems, а релейний захист – стандартними блоками Simulink, що відображають логіку та алгоритм роботи. У моделі диференціального захисту трансформатора змодельовано 3-фазні первинні ланцюги енергетичних систем; генератори, трансформатори, лінії електропередачі, вимикачі, навантаження, а також 3-фазні перетворювачі (датчики) струму і напруги [4].

Спрощену схему фрагмента електричної системи та диференціальний релейний захист трансформатора в середовищі MATLAB наведено на рис. 1.

Структурна схема моделі розробленого диференційного захисту трансформатора показано на рис. 2.

Однією з особливостей диференціального релейного захисту трансформатора є фазовий зсув струмів під час трансформації, якщо обмотки трансформатора з'єднані в трикутник і зірку [5]. У цій моделі визначення величини струму і компенсація фазового зсуву в обмотках силового трансформатора здійснюються за допомогою внутрішніх цифрових датчиків струму. Завдяки цьому вимірювальні трансформатори струму можна з'єднати в зірку на низькій і високій сторонах. Похибка вимірювальних трансформаторів струму, що застосовуються в моделі диференціального захисту, може досягати 30 %.

Диференційний захист має два ступені:

1 – швидкодіюча диференціальна струмова відсічка;

2 – чутливий диференційний струмовий захист із гальмуванням від наскрізного струму і відбудовою від кидків струму намагнічування [6].

У першому ступені порівнюється діюче значення першої гармоніки диференціального струму з уставкою, заданою користувачем. Виділення сигналу частотою 50 Гц виконується фільтром першої

гармоніки. У блоці ОЕ сигнал переводиться у відносні одиниці, а потім порівнюється з уставкою. Переведення у відносні одиниці можливе, якщо введено номінальні вторинні струми обмоток силового трансформатора. Значення струмів задаються в діалоговому вікні налаштування захисту. Сигнал на вимкнення вимикача трансформатора з боку живлення надходить у разі перевищення струму вище заданої величини.

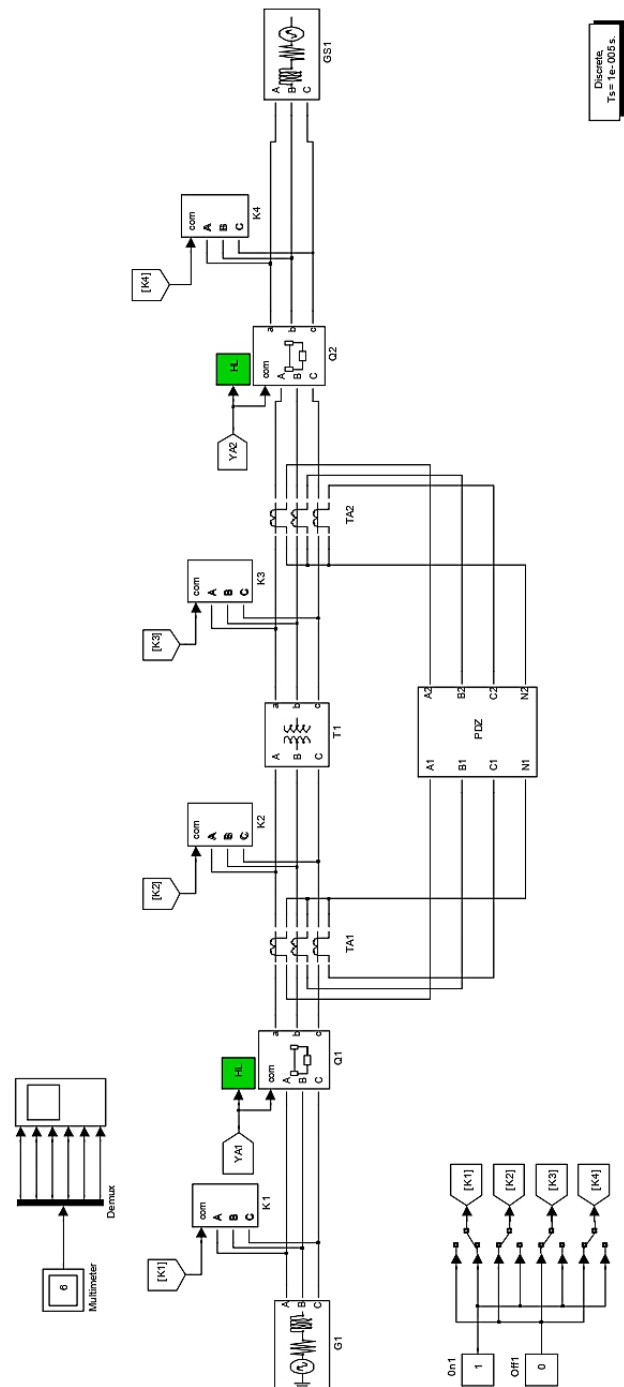


Рисунок 1 – Спрощена схема фрагмента електричної системи та диференційний релейний захист трансформатора

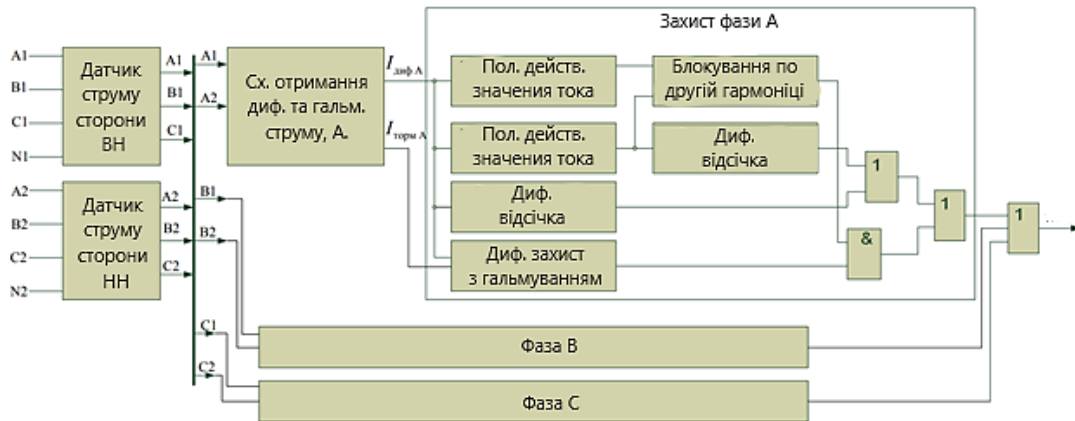


Рисунок 2 – Структурна схема диференційного захисту трансформатора

Другий ступінь призначений для захисту двообмоткового трансформатора як від пошкоджень, що супроводжуються великими значеннями струмів, так і від міжвиткових замикань, за яких значення аварійного струму менше за номінальний. За допомогою розглянутих раніше принципів диференціального захисту в пакеті Simulink реалізовано логіку роботи моделі аналогічно логіці мікропроцесорних захистів трансформаторів «PC-83ДТ2» ТОВ «РЗА СІСТЕМЗ» та SPAD 346 С [7] фірми АВВ. Блок-схему алгоритму роботи першого ступеня наведено на рис. 3.



Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму роботи першого ступеню захисту

У другому ступені за значеннями струмів обчислюється положення робочої точки на гальмівній характеристиці (рис. 4). Якщо величина диференціального струму більша за гальмівний, на виході формується сигнал на вимкнення. Якщо сигнал не блокується елементом заборони, то трансформатор вимикається. Блокування дії захисту за другою гармонікою в разі кидка струму намагнічування ґрунтується на контролі відношення діючого значення другої гармоніки до діючого значення першої гармоніки диференціального струму. Виділення сигналу частотою 100 Гц здійснюється фільтром другої гармоніки (ФДГ) [8].

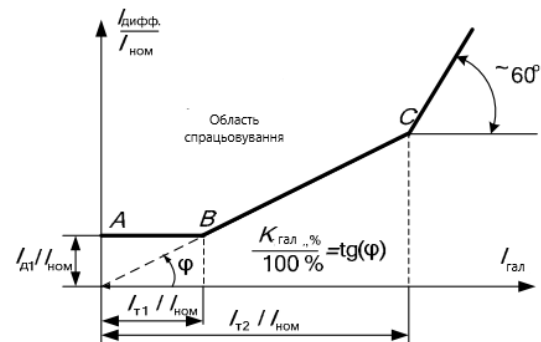


Рисунок 4 – Гальмівна характеристика спрацьовування

Гальмівна характеристика (рис.4) має три ділянки:

- ділянка 1 (відрізок A-B) визначається величиною мінімального диференційного струму спрацьовування  $I_{д1}/I_{ном}$  (віднесений до  $I_{ном.зов}$ ). На даній ділянці, довжина якого визначається величиною  $I_{д1}/I_{ном}$ , диференціальний струм має постійне значення [9]. Точка першого перелому характеристики виходить як перетинання уставки  $I_{д1}/I_{ном}$  з прямою, що проходить через початок координат та точку C [10].
- ділянка 2 (відрізок B-C) визначається двома уставками – нахилом прямої  $K_{гал, \%}$  (коефіцієнт гальмування) та  $I_{д2}/I_{ном}$ ;
- ділянка 3 (правіше точки C) розміщена під кутом  $60^\circ$  до осі  $I_{гал}$ . Таким чином, ламана A-B-C ділить площину на дві частини – область спрацьовування і

неспрацьовування. Якщо розрахункове співвідношення струмів лежить вище межі, то відбувається спрацьовування [11].

Логічна схема другого ступеня (диференційний захист із гальмуванням) наведена на рис. 5.

У роботі другого ступеня використовуються відносні значення диференціального і гальмівного струмів, що пройшли фільтрацію. Програмне опрацювання цих величин аналогічне диференціальному відсіканню за діючим значенням за першою гармонікою. Характеристика спрацьовування (гальмівна характеристика) визначається співвідношенням диференціального і гальмівного струмів [12].

Завдяки гальмівній характеристиці другий ступінь двообмоткового трансформатора чутливий як до пошкоджень, що супроводжуються великими значеннями струмів, так і до міжвиткових замикань, за яких значення аварійного струму менше за номінальний струм обмотки трансформатора. Другий ступінь придатний для трансформаторів з одностороннім і двостороннім живленням.

Важливо зазначити, що за прийнятого способу формування гальмівного струму гальмування відбувається при внутрішньому короткому замиканні навіть при односторонньому живленні. Однак у цьому разі гальмівний струм удвічі менший за диференційний і чутливість захисту визначається першою ділянкою характеристики [13].

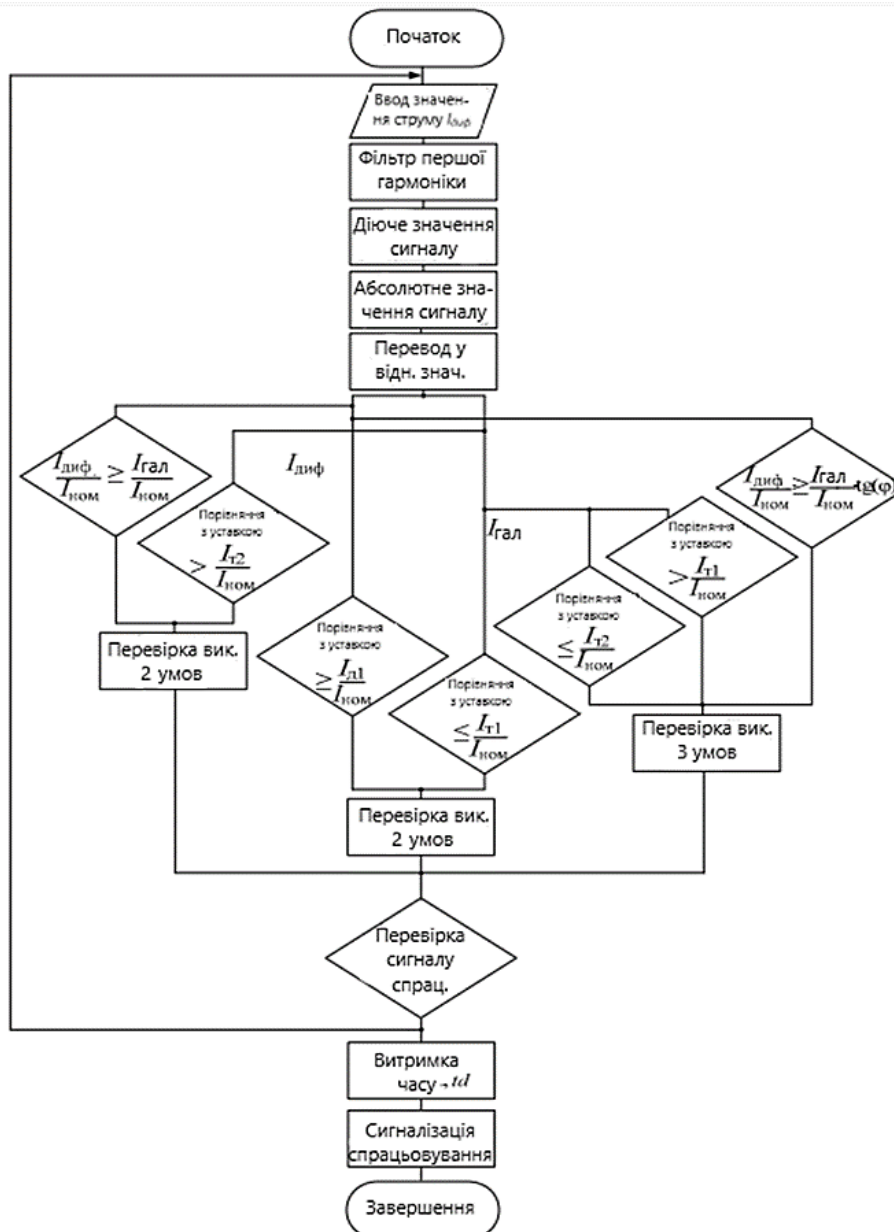


Рисунок 5 – Блок-схема роботи другого ступеня захисту

Осцилограми первинних струмів нормального режиму й аварійних режимів у разі короткого замикання поза зоною та в зоні дії диференційного захисту (точки К1 і К2, рис. 1) представлені на рис. 6 і рис. 7 відповідно. Слід зазначити, що на осцилограмах верхні три графіки показують струм, що протікає через вимикач Q1, нижні три графіки - струм, що протікає через вимикач Q2. Початковий часовий інтервал осцилограм (приблизно до 0,25 с) відповідає нормальному режиму номінального завантаження трансформатора, кінцевий інтервал – виникнення аварійного режиму і відключення вимикачів для короткого замикання у зоні дії диференційного захисту.

**Висновки.** Наведена модель дозволяє більш детально дослідити основні принципи диференційного захисту, що широко використовується в підстанціях різних напруг, з гальмуванням, що реагує на миттєві значення струмів. Це, в свою чергу, дозволяє реалізувати наведені алгоритми програмно і відкриває нові перспективи автоматизації захисту підстанцій. Модель дозволяє не тільки розглянути структуру, а й розглядати можливі сценарії в системі, завдяки тому, що в ній реалізовано алгоритми роботи першого та другого ступенів захисту, вихідні органи відключення та сигналізації.

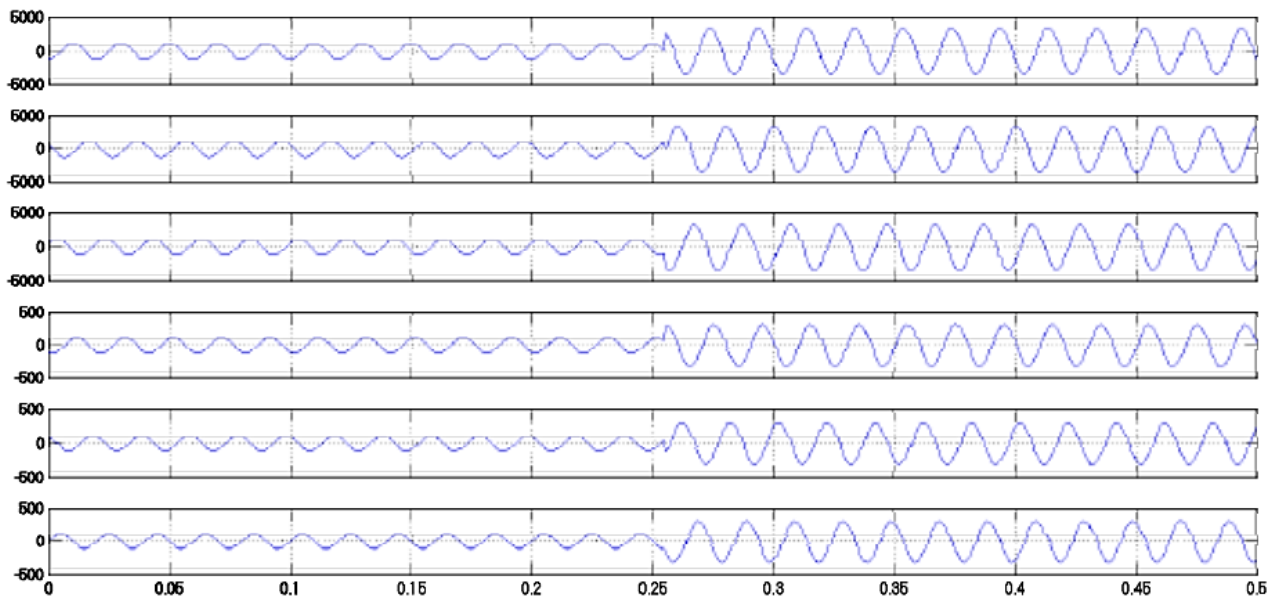


Рисунок 6 – Осцилограми струмів при зовнішньому короткому замиканні

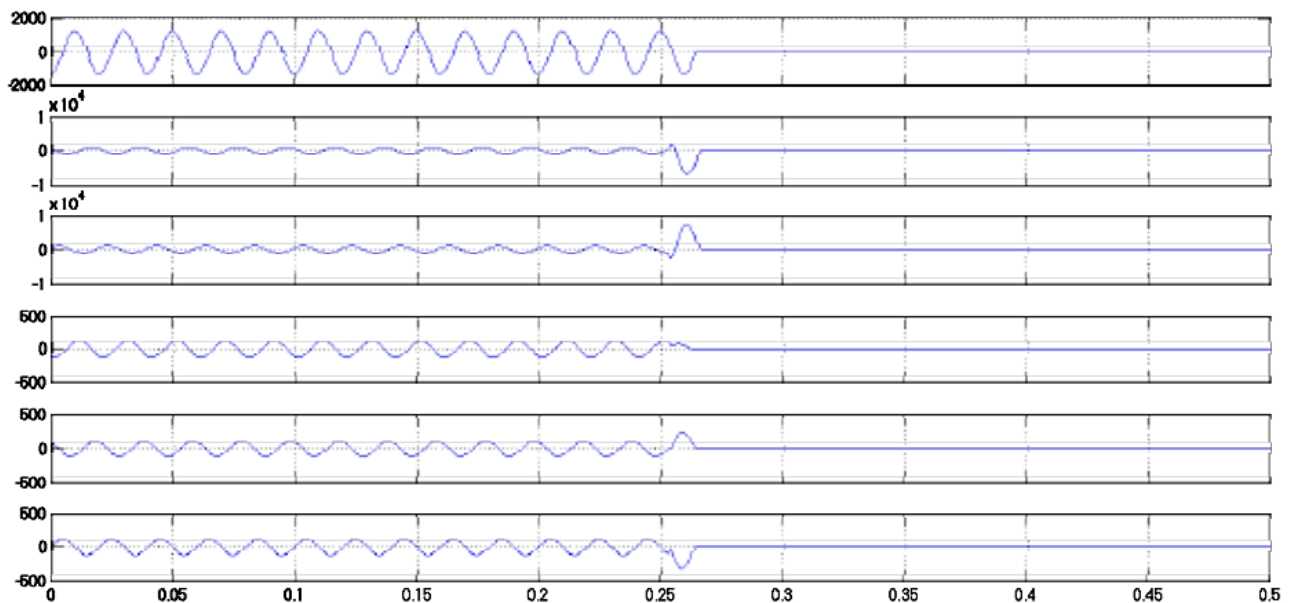


Рисунок 7 – Осцилограми струмів при внутрішньому короткому замиканні

## Список літератури

- Gers J. M., Holmes E. J. Protection of electricity distribution networks. 2nd ed. London: Institution of Electrical Engineers, 2004. 342 p.
- Андрієвський Е. Н. Експлуатація електроустановок в сільському господарстві. Москва: Енергоатомиздат, 1988. 143 с.
- Horowitz S. H., Phadke A. G., Niemira J. K. Power system relaying. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. 381 p.
- Wan H., Li K. K., Wong K. P. An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010. Vol. 46, no. 5. P. 2118–2124. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2010.2059492>.
- Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Правила улаштування електроустановок. Київ: Форт, 2017.
- Zeineldin H. H., Sharaf H. M., Ibrahim D. K., El-Zahab E. El-D. A. Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6, no. 1. P. 115–123. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsg.2014.2357813>.
- Fan J.-Z., Mu L.-S., Zhan X.-N., Wang H.-L. Data modeling for substation SCADA system based on IEC 61850 standard. *Automation of Electric Power Systems*. 2006. Vol. 30, no. 5. P. 43–48.
- Шабад М. А. Защита и автоматика электрических сетей агропромышленных комплексов. Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
- Zhan H., Wang C., Wang Y. et al. Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016. Vol. 7, no. 1. P. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2420667>.
- Boljevic S., Conlon M. Fault current level issues for urban distribution network with high penetration of distributed generation. *2009 6th International Conference on the European Energy Market (EEM 2009)*, Leuven, 27–29 May 2009. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/eem.2009.5311425>.
- Gajić Z., Brnčić I., Einarsson T., Ludqvist B. Practical experience from multiterminal line differential protection installations. *Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems*, Cheboksary, 9–13 September 2007. P. 1–6.
- Tang J. Wide area differential protection system: Doctor of Philosophy. 2006.
- Girgis A., Brahma S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. *2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering (LESCOPE)*, Halifax, NS, Canada, 11–13 July 2001. P. 115–119. DOI: <https://doi.org/10.1109/lesce.2001.941636>.

## References

- J. M. Gers and E. J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*, 2nd ed. London: Institution of Electrical Engineers, 2004.
- E. N. Andrievskii, *Ekspluatatsiia Elektroustanovok v Selskom Khoziaistve [Operation of Electrical Installations in Agriculture]*. Moscow: Energoatomizdat, 1988. (in Russian)
- S. H. Horowitz, A. G. Phadke, and J. K. Niemira, *Power System Relaying*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014.
- H. Wan, K. K. Li, and K. P. Wong, “An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 5, p. 2118–2124, Sep. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2010.2059492>.
- Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for electrical installations]*. Kyiv: Fort, 2017.
- H. H. Zeineldin, H. M. Sharaf, D. K. Ibrahim, and E. E.-D. A. El-Zahab, “Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 1, p. 115–123, Jan. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/tsg.2014.2357813>.
- J.-Z. Fan, L.-S. Mu, X.-N. Zhan, and H.-L. Wang, “Data modeling for substation SCADA system based on IEC 61850 standard,” *Automation of Electric Power Systems*, vol. 30, no. 5, p. 43–48, 2006. (in Chinese)
- M. A. Shabad, *Zashchita i Avtomatika Elektricheskikh Setei Agropromyshlennykh Kompleksov [Protection and Automation of Electrical Networks in Agro-Industrial Complexes]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1987.
- H. Zhan et al., “Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, p. 55–65, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2420667>.
- S. Boljevic and M. Conlon, “Fault current level issues for urban distribution network with high penetration of distributed generation,” in *2009 6th International Conference on the European Energy Market (EEM 2009)*, Leuven, May 27–29, 2009. p. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/eem.2009.5311425>.
- Z. Gajić, I. Brnčić, T. Einarsson, and B. Ludqvist, “Practical experience from multiterminal line differential protection installations,” in *Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems*, Cheboksary, Sep. 9–13, 2007. p. 1–6.
- J. Tang, “Wide area differential protection system,” Doctor of Philosophy, Florida State University, 2006.
- A. Girgis and S. Brahma, “Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system,” in *2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering (LESCOPE)*, Halifax, NS, Canada, Jul. 11–13, 2001. p. 115–119, doi: <https://doi.org/10.1109/lesce.2001.941636>.

Надійшла (received) 26.06.2023

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

**Черкашина Вероніка Вікторівна (Veronika Cherkashyna)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: [veronika.cherkashyna@khpri.edu.ua](mailto:veronika.cherkashyna@khpri.edu.ua).

**Цюпа Владислав Миколайович (Vladyslav Tsiupa)** – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4269-1941>; e-mail: [Vladyslav.Tsiupa@ieee.khpi.edu.ua](mailto:Vladyslav.Tsiupa@ieee.khpi.edu.ua).