

В. П. ПЛІС

старший викладач кафедри електропостачання
та енергетичного менеджменту
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0000-0002-0675-4407

ТЕСТУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ТЕРМІНАЛІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В РОЗРАХУНКОВИХ РЕЖИМАХ

Цифровізація у електроенергетиці є невід'ємною частиною цифрової економіки. Не менш важливим завданням при підготовці фахівців електротехнічних спеціальностей є цифровізація освітнього процесу. Для її вирішення потрібне впровадження програмних комплексів, із застосуванням яких майбутні фахівці зможуть моделювати об'єкти електроенергетичної системи, але на більшій комфортній та безпечній платформі. Необхідно проведення дослідження функціональних можливостей мікропроцесорних терміналів релейного захисту та автоматизації шляхом їх комп'ютерного моделювання з урахуванням поведінки захистів у характерних для елемента, що захищається режимах роботи. У роботі розглянуто питання моделювання цифрового пристрою релейного захисту на прикладі струмої відсічки для асинхронного електродвигуна напругою 6 кВ при трифазному короткому замиканні з можливістю перегляду результатів моделювання. Синтезовані: імітаційна модель схеми струмової відсічки асинхронного двигуна; підсистема, що дозволяє моделювати коротке замикання асинхронного двигуна при регульованих уставках струму і часу. У ході проведення експерименту на моделі є можливість розрахувати параметри спрацьовування захистів мікропроцесорного терміналу і перевірити правильність роботи захистів, а також вивчення нормальних та аварійних режимів роботи об'єкта, що захищається. Оцінка результатів моделювання дозволяє забезпечити налаштування мікропроцесорного захисту. Спільне використання розробленої моделі та експериментального стенду дозволяють досягти найповнішого дослідження функціональних можливостей мікропроцесорних пристроїв релейного захисту. Порівняння результатів експериментів з моделями дозволяє стверджувати, що розбіжності між розрахунковими та експериментальними даними не перевищують 4–6 %, в статичних режимах, та 12–14 %, в динамічних режимах.

Ключові слова: цифровий релейний захист, мікропроцесорний термінал захисту, моделювання, експериментальний стенд, асинхронний двигун.

V. P. PLIS

Senior Lecturer at the Department of Power Supply and Energy Management
Odesa National Polytechnic University
ORCID: 0000-0002-0675-4407

TESTING OF MICROPROCESSOR TERMINALS OF RELAY PROTECTION IN CALCULATION MODES

Digitalization in the electric power industry is an integral part of the digital economy. An equally important task when training specialists in electrical engineering specialties is the digitalization of the educational process. To solve it, it is necessary to introduce software systems, with the use of which future specialists will be able to model objects of the electric power system, but on a more comfortable and safer platform. It is necessary to study the functionality of microprocessor terminals for relay protection and automation by means of their computer modeling, taking into account the behavior of protection in operating modes characteristic of the protected element. The paper discusses the issues of modeling a digital relay protection device using the example of a current cut-off for a 6 kV asynchronous electric motor with a three-phase short circuit with the ability to view the modeling results. Synthesized: a simulation model of the current cut-off circuit of an asynchronous motor; a subsystem that allows you to simulate a short circuit of an asynchronous motor with adjustable current and time settings. During the experiment on the model, it is possible to calculate the operation parameters of the microprocessor terminal protections and check the correct operation of the protections, as well as study the normal and emergency operating modes of the protected object. Evaluation of the simulation results allows for adjustment of the microprocessor-based protection device. The combined use of the developed model and experiment allows us to achieve the most complete study of the functionality of microprocessor relay protection devices.

Key words: digital relay protection, microprocessor protection terminal, simulation, experimental stand, induction motor.

Постановка проблеми

Забезпечення надійного та безвідмовного функціонування електроустановок тісно пов'язане з підвищенням технічного рівня релейного захисту та автоматизації (РЗА), впровадженням комплексної автоматизації для управління нормальними, аварійними та післяаварійними режимами роботи, що зумовлено безперервністю процесів виробництва, розподілу та споживання електроенергії. Мікропроцесорні (МП) пристрої заміняють традиційний релейний захист (РЗ), поєднуючи функції захисту, автоматики, керування та сигналізації. Їх використання підвищує чутливість захисту та зменшує час спрацьовування, що знижує збитки від перерв в електропостачанні. Також можливе створення автоматизованих систем керування підстанціями та їх інтеграція з автоматизованою системою керування технологічним процесом верхнього рівня. Це відкриває перспективи використання МП терміналів як основних пристроїв РЗА в електричних мережах для подальшого просування в напрямку ідеальної моделі Smart Grid. Широке використання РЗ на МП основі та його переваги потребують додаткових досліджень для визначення, які функціональні можливості МП терміналів слід використовувати.

Сучасні технічні та програмні засоби дозволяють створювати дуже складні та детальні динамічні моделі реальних систем. Нині метод математичного моделювання є найпоширенішим методом дослідження засобів РЗА. Завдяки високій точності та практично необмеженим можливостям з урахування нелінійностей будь-якого характеру дослідження, проведене за допомогою математичної моделі, нерідко називають експериментом на моделі. Дослідження та моделювання принципу роботи МП пристроїв РЗА, наприклад, у програмному середовищі «Matlab Simulink», є гарною практикою для розуміння реальних процесів, що відбуваються в мережі, при виникненні аварійного режиму, тобто, режиму короткого замикання (КЗ). У ході проведення експерименту на моделі є можливість розрахувати параметри спрацьовування захистів мікропроцесорного терміналу і перевірити правильність роботи захистів, а також вивчення нормальних та аварійних режимів роботи об'єкта, що захищається. Оцінка результатів моделювання дозволяє забезпечити налаштування МП пристрою захисту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні автоматизовані системи РЗА використовують багатофункціональні МП пристрої, що поєднують різні види захисту та засоби запобігання аваріям [1].

Використання нової елементної бази змінює не самі принципи роботи РЗА, лише розширює її функціональні можливості, що робить експлуатацію зручнішою. Саме з цих причин застарілі електромеханічні та мікроелектронні реле замінюються МП пристроями [2]. Несправність, що виникає в об'єкті захисту – асинхронному двигуні, може призвести до матеріальних збитків, втрат часу та нещасних випадків на робочому місці, знижуючи загальну надійність системи [3, 4]. Важливою характеристикою сучасних систем релейного захисту є можливість інтеграції в інформаційні мережі, що підтримує ідеї «Цифрової підстанції» та «Розумної мережі» (Smart Grid). [5, 6]. Оскільки потік електроенергії в розподілених генеруючих мережах стає двоспрямованим, що призводить до мережевих проблем, інтелектуальні мережі допомагають у виробництві, передачі, підстанціях, розподілі та споживанні електроенергії для створення чистої, безпечної, захищеної, надійної, ефективної та стійкої системи. [7].

Особливістю сучасних мікропроцесорних систем РЗА є використання відкритої логіки. Дана технологія є мовою програмування візуально-символічного типу, засновану на логічних схемах, яка дозволяє згодом змінювати алгоритми програмного забезпечення пристрою. Користувач має можливість налаштувати програмні параметри пристрою під конкретні завдання [8, 9]. Завдання релейного захисту – швидко виявити та відключити пошкодження, мінімізувати шкоду, а якщо йдеться про роботу електродвигуна у ненормальних режимах роботи – запобігти аваріям та збільшити термін служби електродвигунів. Для виконання цього необхідно вибрати оптимальні характеристики та параметри спрацьовування (уставки) захисту. Оптимальне налаштування захисту можливе, тільки за наявності повної інформації про двигун, що захищається: його важливості в технологічному процесі, характері навантаження, можливості забезпечення самозапуску, умовах експлуатації [10, 11].

Формування мети дослідження

Метою роботи є розробка віртуальних моделей релейних захистів, інтегрованих із схемами енергетичних систем. Завдання дослідження полягало в детальному аналізі процесів, що протікають як первинних силових ланцюгах енергосистем, так і в ланцюгах релейних захисту. Аналіз параметрів спрацьовування захистів мікропроцесорного терміналу та вивчення нормальних та аварійних режимів роботи об'єкта, що захищається, дозволяє забезпечити налаштування мікропроцесорного терміналу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Віртуальні моделі мають як переваги, так і недоліки в порівнянні з випробувальними стендами [12]. Їхня позитивна властивість – завдяки блочному принципу побудови можна легко змінювати не лише параметри, а й конфігурацію первинної мережі, тоді як на стенді конфігурація мережі, як правило, задана жорстко. Недолік – налаштування віртуальних захистів відрізняється від налаштування їх прототипів – реальних реле та терміналів.

Сучасні технічні та програмні засоби дозволяють створювати дуже складні та детальні динамічні моделі реальних систем, з застосуванням програмного середовища «Matlab Simulink». Широкого поширення це середовище набуло завдяки універсальності, наявності великої кількості розширень та бібліотек. Силова частина електричної системи виконана за допомогою блоків бібліотеки SimPowerSystems, а релейний захист стандартними блоками Simulink, що відображають логіку та алгоритм роботи [13, 14].

Спрощена схема фрагмента електричної системи та розроблена імітаційна модель схеми релейного захисту асинхронного короткозамкненого двигуна в середовищі «Matlab Simulink» представлена на рис. 1. Ця модель складається з наступних основних елементів: джерело напруги, силовий трансформатор, блок лінії електропередачі, вимикач навантаження, блок мікропроцесорного захисту, блок навантаження, блок імітатора короткого замикання, 3-фазні перетворювачі (датчики) струму та напруги, а також вимірвальні прилади.

Вплив мережі враховувався введенням у моделі передвключених активно-індуктивних опорів, що являють собою результуючі опори живлячих мереж енергосистеми, трансформаторів головної понижувальної підстанції, кабельних ліній. Механічна характеристика агрегату С-5А, при пуску та вибігу на холостому ході апроксимувалась квадратичною залежністю

$$M_c = 0,007 + (0,2 - 0,007) \cdot \omega_r^2, \quad (1)$$

а при роботі під навантаженням прийнята незалежною від швидкості, відповідно до рекомендацій для моделювання навантаження поршневого компресора [15].

При моделюванні прийнято значення моменту опору $M_c = 0,663$. Зазначений момент опору відповідає тривалому режиму роботи компресора, що спостерігався протягом кількох останніх років.

Синтезовано блок «Protection terminal», що відповідає властивостям реального МП терміналу РЗА. Зовнішній вигляд блоку наведено на рис. 2.

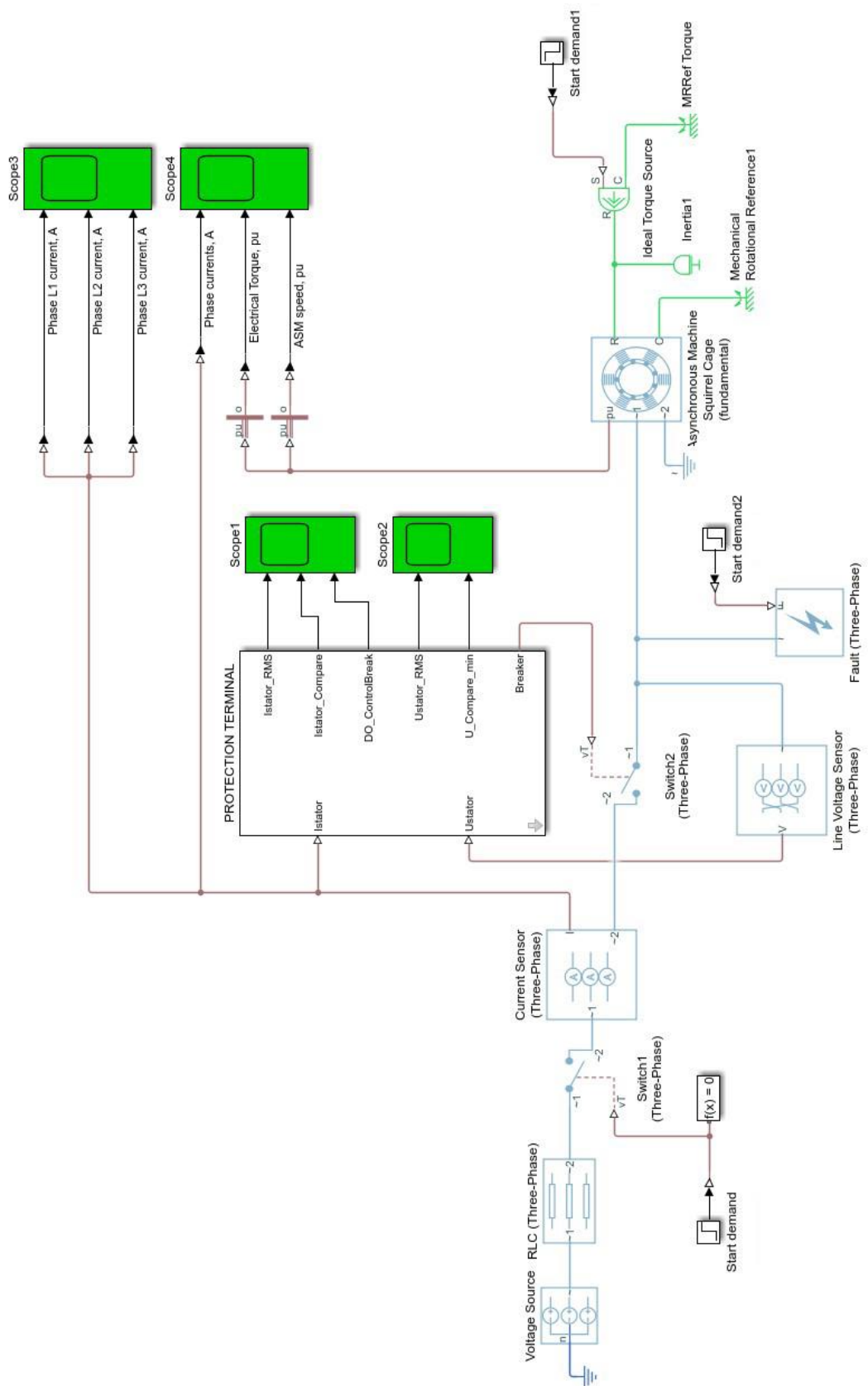


Рис. 1. Спрощена схема фрагмента електричної системи та релейний захист електродвигуна

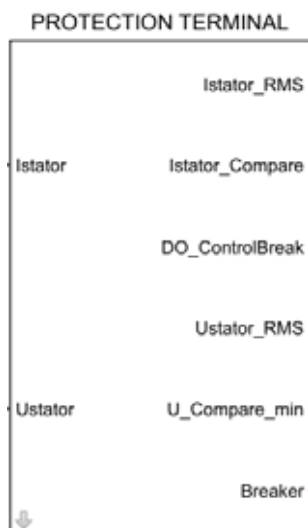


Рис. 2. Зовнішній вигляд блоку «Protection terminal»

Фрагмент вмісту блоку «Protection terminal» наведено на рис. 3.

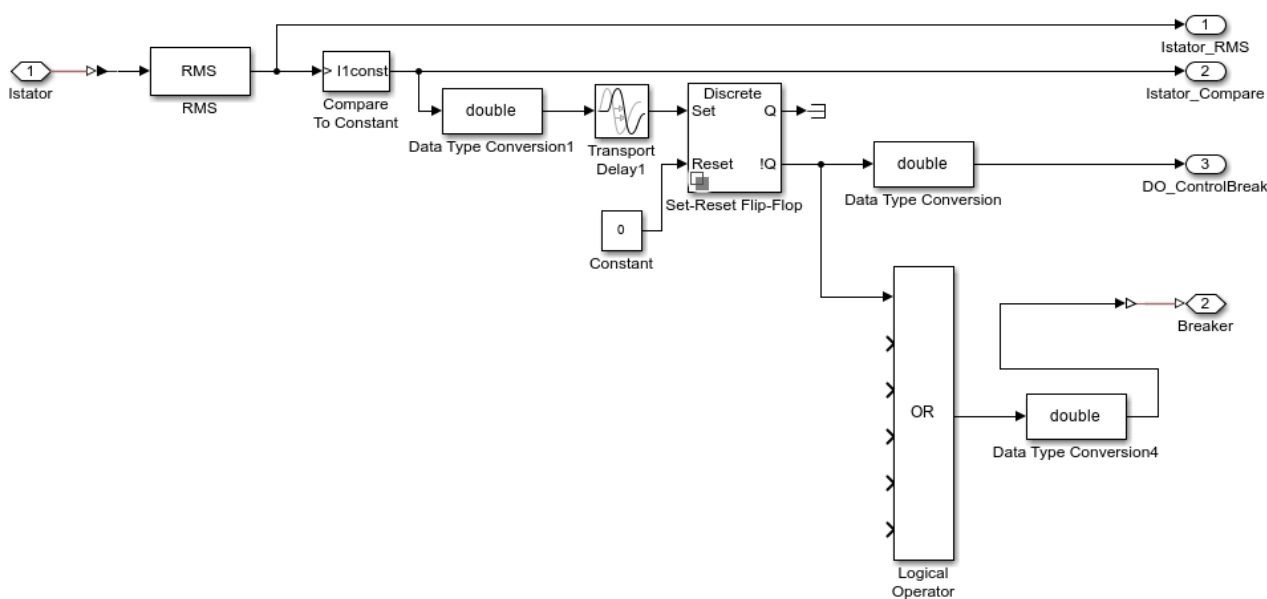


Рис. 3. Фрагмент схеми реалізації струмової відсічки в блоці «Protection terminal»

Було здійснено розрахунок значень уставок (табл. 1). Після розрахування значень уставок (табл. 1) [16, 17], вони були введені у відповідні графи діалогового вікна блоку «Protection terminal». Приклад введених значень уставок приведений на рис. 4.

Алгоритм дії віртуального блоку захисту наступний: при перевищенні (применшенні) струму вище (нижче) заданої величини надходить сигнал відключення вимикача.

Таблиця 1

Розрахунок уставок терміналу релейного захисту

№ п/п	Назва захисту	Формули розрахунку	Розрахунок	Уставка
1.	Захист від багатофазних замикань (струмова відсічка, СВ)	$I_{CB\ c.з.} = k_{відб.} \cdot k_{опер.} \cdot I_{макс.}$ $I_{макс.} = k_{пуск.} \cdot I_{ном.}$ $t_{c.з.} = 0,01\ c.$	$I_{макс.} = 5,7 \cdot 55,6 = 316,9\ A,$ $I_{CB\ c.з.} = 1,14 \cdot 1,3 \cdot 316,9 = 469,6\ A.$	470 А 0,01 с
2.	Захист від мінімальної напруги (ЗМН)	$U_{c.зmn1} = (0,6 \div 0,7) U_{ном.дв.}$ $t_{зmn1} = 0,5 \div 0,9\ c,$ $U_{c.зmn2} = (0,4 \div 0,5) U_{ном.дв.}$ $t_{зmn2} = 3 \div 9\ c.$	$U_{c.зmn1} = 0,65 \cdot 6000 = 3900\ B.$ $t_{зmn1} = 0,7\ c.$ $U_{c.зmn2} = 0,45 \cdot 6000 = 2700\ B.$ $t_{зmn2} = 7\ c.$	3900 В 0,7 с 2700 В 7 с
3.	Мінімальний струмовий захист	$I_{c.з.} = (0,2 \div 0,6) \cdot I_{ном.дв.}$ $t_{c.з.} = 2 \div 5\ c.$	$I_{c.з.} = 0,2 \cdot 55,6 = 11,2\ A,$ $t_{c.з.} = 4\ c.$	11,2 А 4 с
4.	Захист від блокування ротора	$I_{c.з.БП} = \frac{k_{пуск.} \cdot I_{ном.дв.}}{1,2 \cdot k_{поверн.}}$ $t_{c.з.БП} \approx (0,2 \div 0,4) \cdot t_{пуску.}$	$I_{c.з.БП} = \frac{5,7 \cdot 55,6}{1,2 \cdot 0,95} = 278\ A,$ $t_{c.з.БП} \approx 0,3 \cdot 1,86 = 0,558\ c.$	278 А 0,558 с
5.	Захист від затягнутого пуску двигуна	$I_{c.з.ЗП} = \frac{k_{пуск.} \cdot I_{ном.дв.}}{1,2 \cdot k_{поверн.}}$ $t_{c.з.ЗП} \geq (1,5 \div 2) \cdot t_{пуску.}$	$I_{c.з.ЗП} = \frac{5,7 \cdot 55,6}{1,2 \cdot 0,95} = 278\ A,$ $t_{c.з.ЗП} \geq 1,77 \cdot 1,86 = 3,29\ c.$	278 А 3,3 с



Рис. 4. Приклад введених параметрів блоку «Protection terminal»

Перевірка адекватності розроблених математичних моделей та програм здійснювалася порівнянням отриманих результатів моделювання та параметрів реального об’єкту:

- в середовищі «Matlab Simulink»;
- за допомогою комп’ютерної програми авторської розробки на мові програмування загального призначення «C++» у середовищі розробки «Qt Creator»;
- в результаті експериментів перехідних процесів при пусках та вибігах вхолосту асинхронного двигуна поршневого компресора С-5А потужністю 447,6 кВт цеху перевантаження аміаку АТ «Одеський припортовий завод».

На рис. 5–7 наведені розрахункові осцилограми миттєвих значень струму статора АД, отримані в результаті моделювання в середовищі «Matlab Simulink».

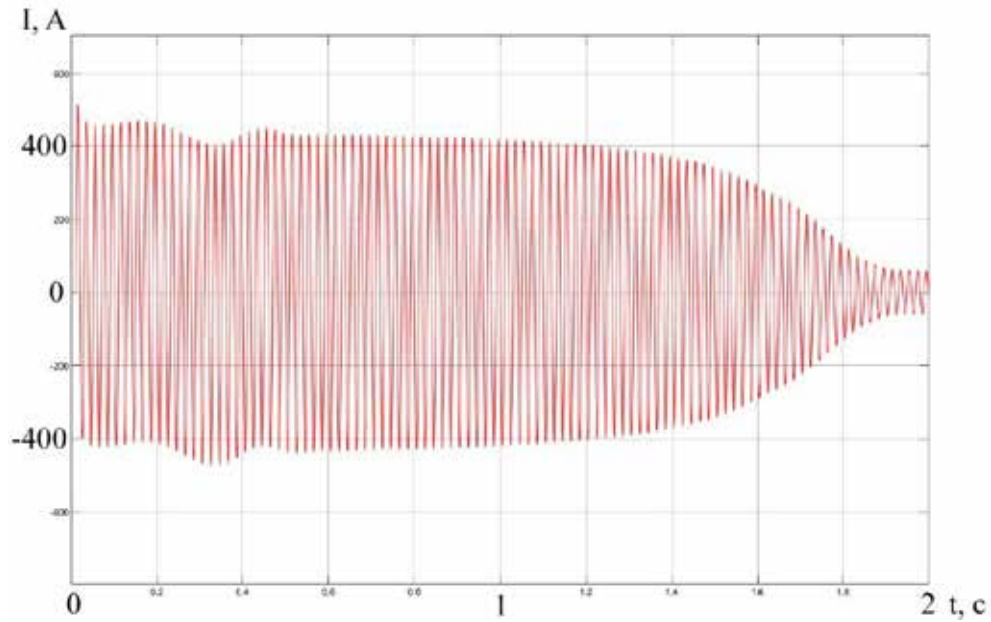


Рис. 5. Розрахункова крива (Matlab) зміни миттєвого значення струму статора АД компресора С-5А потужністю 447 кВт напругою 6 кВ при пуску вхолосту

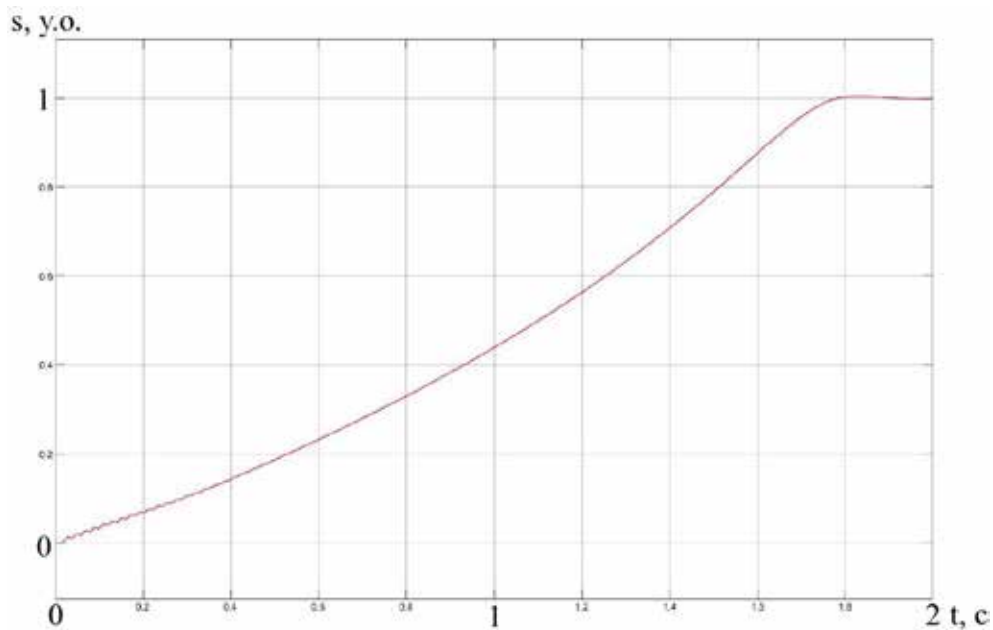


Рис. 6. Розрахункова крива (Matlab) зміни ковзання АД компресора С-5А потужністю 447 кВт напругою 6 кВ при пуску вхолосту

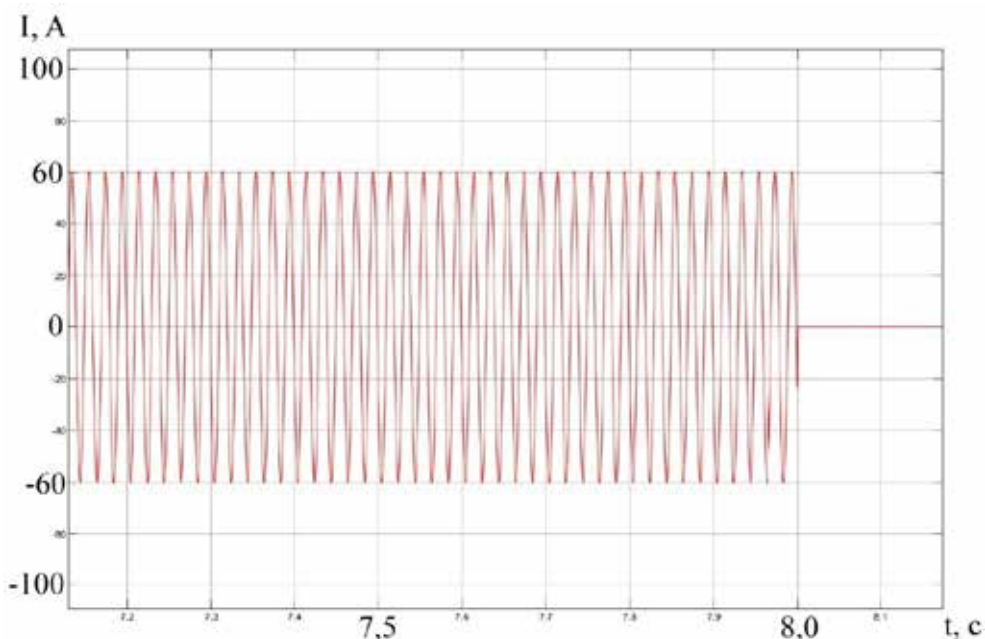


Рис. 7. Розрахункова крива (Matlab) зміни струму статора АД компресора С-5А потужністю 447 кВт напругою 6 кВ при роботі вхолосту та подальшому відключенні

Під час проведення досліджень використовувалася комп’ютерна програма власної розробки з урахуванням диференціальних рівнянь АД на базі узагальненої машини, записаної в нерухомій системі координат α, β і системі координат, що обертається з синхронною швидкістю [18]:

$$\left. \begin{aligned} d\Psi_{s\alpha}/dt &= U_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_{s\alpha}; \\ d\Psi_{s\beta}/dt &= U_{s\beta} - i_{s\beta} R_{s\beta}; \\ d\Psi_{r\alpha}/dt &= U_{r\alpha} - i_{r\alpha} R_{r\alpha} - \omega_r \Psi_{r\beta}; \\ d\Psi_{r\beta}/dt &= U_{r\beta} - i_{r\beta} R_{r\beta} - \omega_r \Psi_{r\alpha}; \\ d\omega_r/dt &= (M_{em} - M_c)/J; \\ M_{em} &= \frac{mp}{2} L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $d\Psi_{s\alpha}, d\Psi_{s\beta}, d\Psi_{r\alpha}, d\Psi_{r\beta}$ – потокозчеплення статора і ротора в координатах $\alpha, \beta, 0$; $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}$ – проекції напруг статора і ротора на осі координат; $\alpha, \beta, 0$; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ – струми в обмотках статора і ротора; $R_{s\alpha}, R_{s\beta}, R_{r\alpha}, R_{r\beta}$ – активні опори статора і ротора; ω_r – кутова швидкість обертання ротора; M_{em} – електромагнітний момент АД; M_c – момент опору на валу; J – момент інерції ротора; m – кількість фаз; p – кількість пар полюсів; L_m – взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора.

В результаті моделювання у середовищі розробки «Qt Creator» отримані осцилограми, що наведені на рис. 8 та 9.

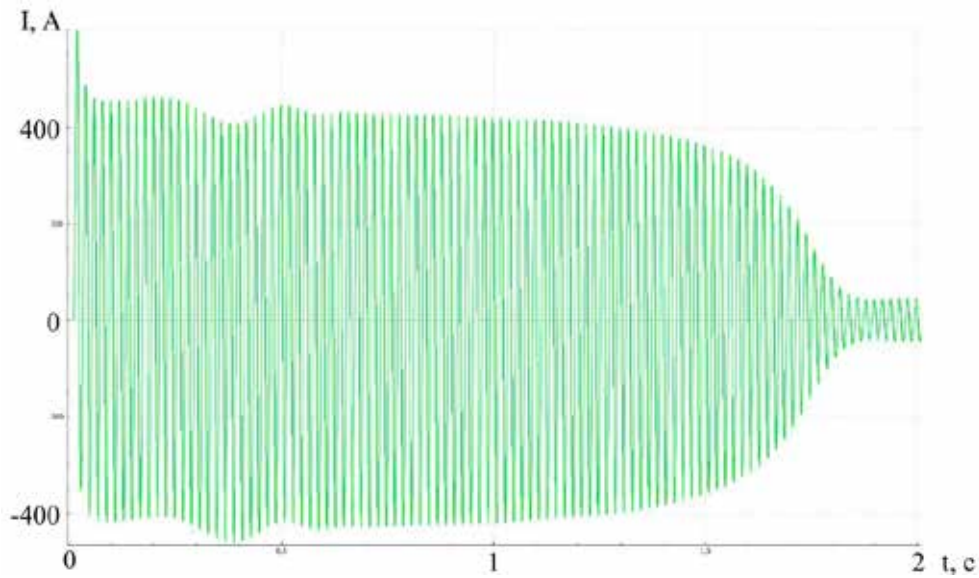


Рис. 8. Розрахункова крива (Qt Creator) зміни миттєвого значення струму статора АД компресора С-5А потужністю 447 кВт напругою 6 кВ при пуску вхолосту

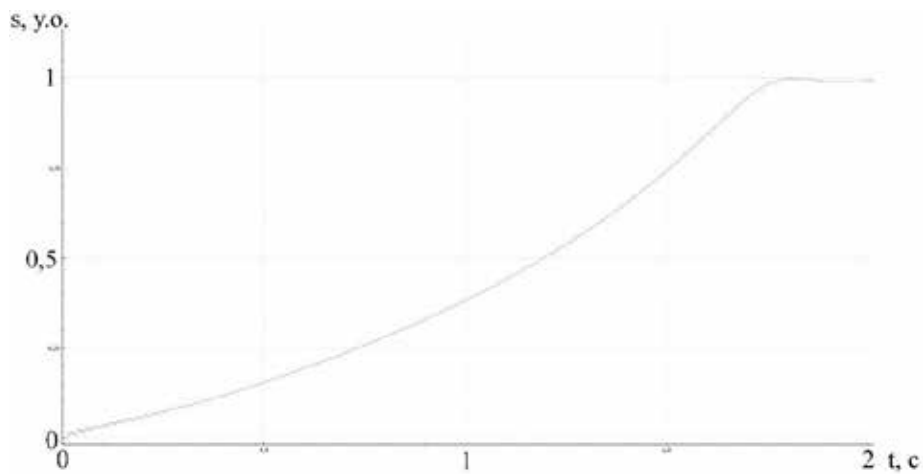


Рис. 9. Розрахункова крива (Qt Creator) зміни ковзання АД компресора С-5А потужністю 447 кВт напругою 6 кВ при пуску вхолосту

Експериментальні осцилограми зміни фазних струмів, фазних напруг та ковзання АД компресора С-5А потужністю 447,6 кВт під час пуску та вибігу на холостому ході наведено на рис. 10–12.

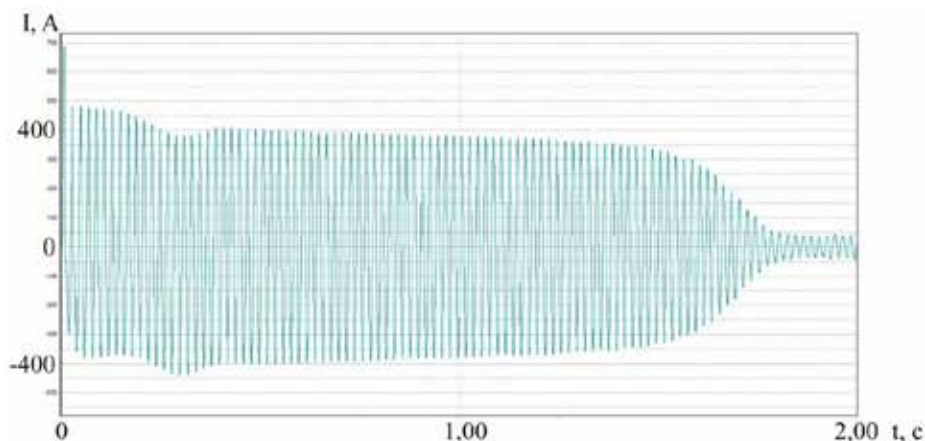


Рис. 10. Експериментальна крива зміни миттєвих значень струму статора АД компресора С-5А потужністю 447 кВт напругою 6 кВ при пуску вхолосту

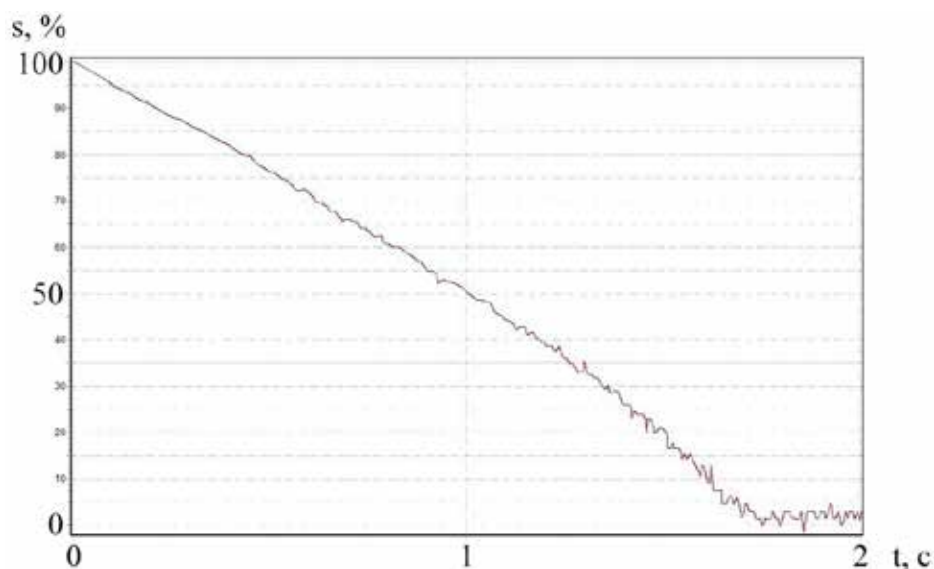


Рис. 11. Експериментальна крива зміни ковзання АД компресора С-5А потужністю 447 кВт напругою 6 кВ при пуску вхолосту

Порівняння результатів експериментів з моделями дозволяє стверджувати, що розбіжності між розрахунковими та експериментальними даними не перевищують 4–6 %, в статичних режимах, та 12–14 %, в динамічних режимах.

Висновки

Розроблені моделі дозволяють досліджувати мікропроцесорні термінали релейного захисту, перевіряти реакцію їх захистів на зміну значень струмів та напруги. За допомогою моделей можливо програмно формувати характерні режими роботи об'єкта, що захищається, контролювати вихідні сигнали відключення та сигналізації, розраховувати і виставляти уставки ступенів захисту, візуалізувати динаміку роботи захисту двигуна при КЗ, а також використовувати принцип блокування захисту для налаштування. Багаторазові випробування захисту дозволяють судити про коректність алгоритмів його роботи та правильність розрахунку уставок. Спільне використання розробленої моделі та експериментального стенду дозволяють досягти найповнішого дослідження функціональних можливостей мікропроцесорних пристроїв релейного захисту.

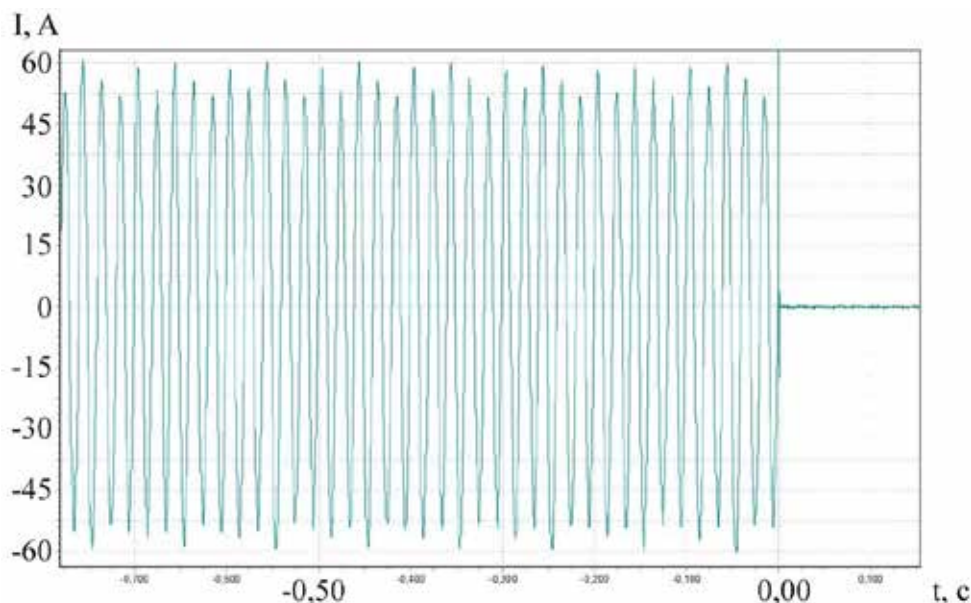


Рис. 12. Експериментальна крива зміни струму статора АД компресора С-5А потужністю 447 кВт напругою 6 кВ при роботі вхолосту та подальшому відключенні

Список використаної літератури

1. Adefarati T., Bansal R. An overview of smart grid in protection perspective. *Power system protection in smart grid environment*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2019. P. 3–31. URL: <https://doi.org/10.1201/9780429401756-1>.
2. Radimov S. M., Plis V. P. Relay protection devices functionality comparative analysis. *Herald of advanced information technology*. 2023. Vol. 6, no. 3. P. 227–239. URL: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.15>.
3. A comprehensive review of conventional and intelligence-based approaches for the fault diagnosis and condition monitoring of induction motors / R. R. Kumar et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 23. P. 8938. URL: <https://doi.org/10.3390/en15238938>.
4. Broken rotor bar fault diagnosis techniques based on motor current signature analysis for induction motor – a review / S. Halder et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 22. P. 8569. URL: <https://doi.org/10.3390/en15228569>.
5. Wang J., Wang Z. Research and implementation of virtual circuit test tool for smart substations. *Procedia computer science*. 2021. Vol. 183. P. 197–204. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.050>.
6. IOT integrated smart grid management system for effective energy management / N. S. Madhuri et al. *Measurement: sensors*. 2022. P. 100488. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100488>.
7. Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: a review / S.-E. Razavi et al. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2019. Vol. 105. P. 157–167. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.050>.
8. Memon A. A., Kauhaniemi K. An adaptive protection for radial AC microgrid using IEC 61850 communication standard: algorithm proposal using offline simulations. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 20. P. 5316. URL: <https://doi.org/10.3390/en13205316>.
9. Adaptive protection combined with machine learning for microgrids / H. Lin et al. *IET Generation, transmission & distribution*. 2019. Vol. 13, no. 6. P. 770–779. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6230>.
10. Development of an intelligent system for distance relay protection with adaptive algorithms for determining the operation setpoints / O. Akhmedova et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 973. URL: <https://doi.org/10.3390/en14040973>.
11. Induction motor condition monitoring for sustainable manufacturing / J. Zhang et al. *Procedia manufacturing*. 2019. Vol. 33. P. 802–809. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.101>.
12. Shabovta M., Besarab O., Plis V. Development of the experimental stand for studying and testing digital protection terminals. *Problems of the regional energetics*. 2023. No. 1(57). P. 17–27. URL: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.02>.
13. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink. Berkeley, CA: Apress, 2022. 605 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8748-4>.
14. Ashok Kumar L., Indragandhi V., Uma Maheswari Y. MATLAB®/Simulink. *Software tools for the simulation of electrical systems*. 2020. P. 1–35. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819416-4.00001-6>.

15. Bibik O. V., Mazurenko L. I., Shykhnenko M. O. Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. No. 4. P. 12–16. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.4.02>.
16. Релейний захист і автоматика / С. В. Панченко та ін.; ред. В. М. Баженов. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Т. 1. 250 с.
17. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем. Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2015. 504 с.
18. Кухарчук В. В., Ведміцький Ю. Г., Граняк В. Ф. Вимірювання параметрів обертального руху електроmechanічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2019. 152 с.

References

1. Adefarati, T., & Bansal, R. (2019). An overview of smart grid in protection perspective. *Power system protection in smart grid environment* (p. 3–31). CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429401756-1>.
2. Radimov, S. M., & Plis, V. P. (2023). Relay protection devices functionality comparative analysis. *Herald of Advanced Information Technology*, 6(3), 227–239. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.15>.
3. Kumar, R. R., Andriollo, M., Cirrincione, G., Cirrincione, M., & Tortella, A. (2022). A comprehensive review of conventional and intelligence-based approaches for the fault diagnosis and condition monitoring of induction motors. *Energies*, 15(23), 8938. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15238938>.
4. Halder, S., Bhat, S., Zychma, D., & Sowa, P. (2022). Broken rotor bar fault diagnosis techniques based on motor current signature analysis for induction motor – a review. *Energies*, 15(22), 8569. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228569>.
5. Wang, J., & Wang, Z. (2021). Research and implementation of virtual circuit test tool for smart substations. *Procedia Computer Science*, 183, 197–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.050>.
6. Madhuri, N. S., Shailaja, K., Saha, D., P, R., Glory, K. B., & Sumithra, M. (2022). IOT integrated smart grid management system for effective energy management. *Measurement: Sensors*, 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100488>.
7. Razavi, S.-E., Rahimi, E., Javadi, M. S., Nezhad, A. E., Lotfi, M., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P. S. (2019). Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 157–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.050>.
8. Memon, A. A., & Kauhaniemi, K. (2020). An adaptive protection for radial AC microgrid using IEC 61850 communication standard: Algorithm proposal using offline simulations. *Energies*, 13(20), 5316. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205316>.
9. Lin, H., Sun, K., Tan, Z.-H., Liu, C., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2019). Adaptive protection combined with machine learning for microgrids. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(6), 770–779. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6230>.
10. Akhmedova, O., Soshinov, A., Gazizov, F., & Ilyashenko, S. (2021). Development of an intelligent system for distance relay protection with adaptive algorithms for determining the operation setpoints. *Energies*, 14(4), 973. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14040973>.
11. Zhang, J., Wang, P., Gao, R. X., Sun, C., & Yan, R. (2019). Induction motor condition monitoring for sustainable manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 33, 802–809. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.101>.
12. Shabovta, M., Besarab, O., & Plis, V. (2023). Development of the experimental stand for studying and testing digital protection terminals. *Problems of the Regional Energetics*, (1(57)), 17–27. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.02>.
13. Eshkabilov, S. (2022). *Beginning MATLAB and Simulink*. Apress. 605 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8748-4>.
14. Ashok Kumar L., Indragandhi V., & Uma Maheswari Y. (2020). MATLAB®/Simulink. *Software tools for the simulation of electrical systems* (p. 1–35). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819416-4.00001-6>.
15. Bibik, O. V., Mazurenko, L. I., & Shykhnenko, M. O. (2019). Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 12–16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.4.02>.
16. Panchenko, S. V., Blyndiuk, V. S., Bazhenov, V. M., Odiehov, M., & Semenenko, Yu. (2020). Releinyi zakhyst i avtomatyka (V. M. Bazhenov, Red.; T. 1). UkrDUZT.
17. Kidyba, V. P. (2015). Releinyi zakhyst elektroenerhetychnykh system. Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika».
18. Kukharchuk, V. V., Vedmitskiy, Yu. H., & Hraniak, V. F. (2019). Vymiriuvannia parametriv obertalnoho rukhu elektromekhanichnykh peretvoriuvachiv enerhii v perekhidnykh rezhymakh roboty. VNTU.