

ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

В.Ю. Рамиш, кандидат технічних наук, доцент

М.В. Потапенко, кандидат технічних наук, доцент

В.Л. Шаршонь, старший викладач

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і
природокористування України "Бережанський агротехнічний інститут"*

E-mail: m.potapenko19@gmail.com

Анотація. Розглянуто проблему оцінки ефективності функціонування мікропроцесорного релейного захисту об'єктів електроенергетичних систем. Актуальність дослідження зумовлена важливістю пристроїв релейного захисту у забезпеченні своєчасного виявлення та усунення аварійних режимів, запобіганні пошкодження обладнання та підтриманні стійкості енергосистеми. Традиційні підходи до оцінки якості функціонування зводяться до врахування апаратурних та експлуатаційних втрат або обмежуються відсотком правильних дій реле, що не завжди дозволяє точно оцінити ефективність системи.

Метою дослідження є розробка інтегрального критерію оцінки ефективності функціонування мікропроцесорного релейного захисту, який враховує функціонально-метрологічні втрати, спричинені похибками вимірювань, затримками спрацьовування та іншими особливостями реалізації алгоритмів захисту.

Для аналізу втрат запропоновано їх класифікацію на групи: функціонально-метрологічні, пов'язані з налаштуванням уставок та властивостями селективності і чутливості; опосередковані апаратурні, що виникають через відмови компонентів та помилки персоналу; незалежні від уставок, включаючи пошкодження обладнання та інфраструктури.

Для кількісної оцінки ефективності запропоновано інтегральний показник $m(E)$, що враховує всі елементи каналу релейного захисту, дозволяє оцінити ймовірнісні характеристики втрат та потенційного ефекту захисту. Для оцінки надійності використовується нормалізований показник відмов m_{Σ} , який включає відмови реле, неправильні дії захисту та помилки персоналу.

Інтегральний підхід дозволяє комплексно оцінювати ефективність, технічну досконалість та економічну доцільність використання мікропроцесорних пристроїв релейного захисту, прогнозувати їх поведінку в аварійних ситуаціях, оптимізувати налаштування уставок та підвищувати адаптивність і надійність системи в реальних умовах експлуатації. Використання ймовірнісно-статистичного методу забезпечує об'єктивність оцінки та дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо

модернізації та оптимізації систем релейного захисту електроенергетичних об'єктів.

Ключові слова: *microprocessor relay protection, electric power system, functional and metrological losses, technical efficiency, integral criterion*

Актуальність. Оцінка якості роботи релейного захисту займає важливе місце в ієрархії електроенергетичних завдань, оскільки від правильного функціонування пристроїв релейного захисту залежить своєчасне виявлення та ліквідація аварійних режимів, запобігання пошкодженню обладнання, а також збереження стійкості енергосистеми в цілому.

Об'єктивними критеріями для порівняння різних типів пристроїв релейного захисту є показники, що характеризують їх надійність і якість функціонування [1]. До таких показників належать: параметри потоку неправильних спрацьовувань, відмов у спрацьовуванні, помилкових та зайвих спрацьовувань, ймовірність безвідмовної роботи та ін. Ці параметри визначають довірчий інтервал можливих значень відповідної випадкової величини, що дозволяє здійснювати статистично обґрунтовану оцінку якості роботи пристроїв захисту.

Для оцінки саме ефективності функціонування релейного захисту використовують показники періодичності різних дій або відмов [2]. Вони характеризуються середньою тривалістю між повторними діями одного пристрою, що визначається як відношення кількості пристроїв до кількості їх спрацьовувань протягом року.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У наявних підходах до оцінювання якості функціонування релейного захисту враховується або сукупність можливих втрат (апаратурних, зумовлених впливом зовнішнього середовища, помилками експлуатаційного чи монтажного персоналу, а також функціональних втрат), або лише апаратурні втрати. При цьому як у першому, так і в другому випадку слід відзначити значну складність і трудомісткість відповідних розрахунків. У результаті на практиці фактично єдиним показником, що використовується для оцінювання якості роботи релейного захисту, залишається відсоток правильних дій, на основі якого визначається надійність захисту.

Мета дослідження – розробка інтегрального критерію оцінки ефективності функціонування мікропроцесорного релейного захисту, який враховує функціонально-метрологічні втрати, спричинені похибками вимірювань, затримками спрацьовування та іншими особливостями реалізації алгоритмів захисту.

Матеріали і методи дослідження. Втратами функціонування релейного захисту є відмови спрацьовування при пошкодженні об'єкта, що захищається, помилкові спрацьовування при відсутності пошкодження і зайві спрацьовування при пошкодженні зовнішніх, незахищених захистом об'єктів.

Втрати релейного захисту в функціональному плані виникають у зв'язку з проявом неповноти властивостей селективності та чутливості, що визначаються налаштуванням захисту та існуванням безлічі режимно-комутаційних станів мережі [3].

Аналіз втрат пристроїв релейного захисту показав, що їх можна поділити на такі складові:

1) безпосередньо пов'язані з уставками, що залежать від режимно-комутаційного стану мережі та видів КЗ, які носять назву функціонально-метрологічні (або функціональні, якщо не розглядати похибки вимірювань). Обумовлені як метрологічним функціонуванням апаратури, так і функціонуванням мережі (без урахування апаратурних відмов та інших радикальних впливів, зокрема помилок персоналу, стихійних явищ);

2) опосередковано пов'язані зі уставками (апаратурні відмови компонентів схем та конструкцій каналів релейного захисту, помилки персоналу при налаштуванні чи профілактичних роботах, стихійні явища, що призводять до фізичної зміни параметрів каналу та, як наслідок, уставки);

3) не пов'язані з уставками, зокрема, пошкодження апаратури, дії персоналу та стихійні явища, що призводять до зміни не каналів функціонування, а лише інфраструктури релейного захисту (ізоляції, корпусу, апаратури).

Функціонально-метрологічні втрати обумовлені використанням детермінованого експертного методу налаштування релейного захисту в умовах

випадкового характеру електричних величин та явищ в електроенергетичній системі. У зв'язку з неможливістю у ряді складних і неоднозначних випадків прямого дотримання детермінованих дій виникають втрати налаштування захисту, пов'язані з невиконанням вимоги селективності (зайві та помилкові дії) або чутливості (відмови спрацьовування).

Результати досліджень та їх обговорення. Якість функціонування мікропроцесорного релейного захисту оцінюється повнотою його властивостей. Базові властивості захисту визначаються вимогами селективності, чутливості, швидкодії та надійності [4].

Доцільно розробити інтегральний критерій оцінювання ефективності функціонування мікропроцесорного релейного захисту, що враховує всі функціонально-метрологічні втрати, пов'язані з неефективним налаштуванням захисту. При цьому, з метою забезпечення зручності та доступності практичного використання, критерій повинен враховувати лише зазначені функціонально-метрологічні втрати.

Цей критерій за умови прямої функціональної залежності від величини параметра реагування мікропроцесорного релейного захисту можна використовувати для оптимізації налаштування (установок) релейного захисту як перед введенням в експлуатацію, так і в процесі експлуатації. Налаштування, при використанні ймовірно-статистичного апарату, забезпечить урахування випадкового характеру електричних величин, що порівняно з існуючим детермінованим підходом є більш об'єктивним, зважаючи на ймовірнісні властивості багатьох процесів в електроенергетичних системах.

Наявність функціонально-метрологічних втрат, обумовлена метричним принципом функціонування релейного захисту, його налаштуванням та функціонуванням мережі. Відповідно критерій, що враховує лише вказані функціонально-метрологічні втрати, який доцільно назвати критерієм технічної ефективності релейного захисту та визначати як відношення технічного ефекту E_T , що представляє собою різницю потенційного ефекту E_n і втрат B , до потенційного ефекту:

$$E_{\text{еф}} = \frac{E_{\text{т}}}{E_{\text{п}}} = \frac{E_{\text{п}} - B}{E_{\text{п}}}. \quad (1)$$

Релейний захист призначений для фіксації та усунення рідкісних випадкових подій коротких замикань на об'єктах, що захищаються. Втрати B (відмови спрацьовування, помилкові та надлишкові дії), що виникають при цьому, є також випадковими. У зв'язку з цим, технічний ефект $E_{\text{т}}$ виражається у вигляді ймовірнісних характеристик чи показників. Відповідно, потенційний ефект $E_{\text{п}}$, тобто такий, що має фіксувати релейний захист, а саме, короткі замикання, має бути виражений в ймовірнісній мірі стану КЗ, який має бути виявлений та усунений релейним захистом.

Втрати ефекту є більш рідкі порівняно з потенційним ефектом. Тому пряме визначення ймовірності подій, що призводять до втрат, є статистично ненадійним. У той же час ці події відбуваються разом з іншими більш представницькими подіями і становлять частку (умовну ймовірність) від цих подій [5]. Наприклад, відмова у спрацьовуванні відбувається при КЗ, яка є представницькою подією. Ймовірності втрат відмов спрацьовування та зайвих дій розрахунковим шляхом можна визначити через ймовірності відповідно до внутрішніх та зовнішніх КЗ, а ймовірності втрат помилкових дій – через ймовірності відповідно до робочих експлуатаційних режимів, ненормальних асинхронних та неповнофазних режимів тощо, які є більш представницькими порівняно з хибними діями в цих режимах.

У зв'язку з використанням мікропроцесорних пристроїв релейного захисту для оцінки ефективності відповідних заходів стає необхідним комплексний підхід різних систем захисту та їх особливостей [6]. Для цього доцільно використовувати інтегральний показник ефективності, що враховує всі елементи в складі каналу релейного захисту (вимірювальні трансформатори струму і напруги, кабелі, власне пристрої мікропроцесорного релейного захисту, кола оперативного струму, вихідні кола захисту та ін.):

$$m(E) = \frac{k_1}{T_{\text{сер}}} + \sum_{i=1}^n k_{\text{в},i} q_{\text{з},i} \omega_{\text{нз}} + \sum_{j=1}^m k_{\text{в},j} q_{\text{з},j} \omega_{\text{з}}, \quad (2)$$

де $m(E)$ – математичне сподівання зниження ефективності через неідеальні характеристики пристроїв релейного захисту; k_1 , $k_{\text{в},i}$, $k_{\text{в},j}$ – коефіцієнти, що враховують вартість наслідків відмови в процесі функціонування (у грошовому чи

іншому еквіваленті); $q_{з,i}$, $q_{з,j}$ – коефіцієнти неготовності (або усереднені на розрахунковому інтервалі часу значення функцій неготовності) системи релейного захисту, що враховують як відмови у функціонуванні через неідеальний технічний рівень, так і відмови через неідеальну надійність; $\omega_{нз}$, $\omega_з$ – параметри потоків пошкоджень відповідно поза зоною захисту та на об'єкті, що захищається; T – середнє напрацювання на відмову.

Показник $m(E)$ дає змогу достовірно оцінити ефективність інвестицій у заходи, спрямовані на удосконалення релейного захисту електроенергетичних систем, зокрема під час впровадження мікропроцесорних пристроїв релейного захисту. Використання цього показника дозволяє кількісно порівнювати різні варіанти технічних рішень, визначати доцільність оновлення обладнання та оптимізувати розподіл фінансових ресурсів у процесі модернізації системи захисту. В той же час $m(E)$ істотно залежить від вартісних характеристик, що відображає переважно економічний аспект ефективності, тоді як показники надійності, технічної досконалості та функціональної ефективності визначаються опосередковано з економічної точки зору.

Для оцінки надійності функціонування мікропроцесорного релейного захисту пропонується використовувати нормалізований показник відмов:

$$m_{\Sigma} = \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{n} \right) \cdot 100, \quad (3)$$

де n – кількість реле певного типу, що перебували в експлуатації протягом визначеного періоду.

Цей показник враховує такі три типи відмов:

– відмови реле, не пов'язані з неправильними діями релейного захисту, але такі, що потребують ремонту або заміни елементів, блоків, модулів чи програмного забезпечення, яке вийшло з ладу (m_1).

– неправильні дії релейного захисту, тобто зайві та помилкові спрацьовування, а також відмови при КЗ всередині області дії (m_2);

– помилки персоналу, пов'язані з експлуатацією, тестуванням та програмуванням реле, що впливають на правильність спрацьовування цього реле, але виявлені до настання неправильної дії релейного захисту (m_3).

Загальною властивістю виразів (2) та (3) є їх інтегральний підхід, що дозволяє комплексно оцінювати ефективність мікропроцесорного релейного захисту. Завдяки цьому можна врахувати не лише окремі технічні параметри пристроїв, а й широкий спектр факторів, що впливають на їх роботу в реальних умовах. Використання інтегральних показників забезпечує більш об'єктивну та всебічну оцінку, дозволяючи визначати надійність і стійкість релейного захисту, прогнозувати його поведінку під час різних аварійних та непередбачуваних ситуацій, а також приймати обґрунтовані рішення щодо модернізації та оптимізації систем захисту.

Зважаючи на те, що функціонування релейного захисту здійснюється в електроенергетичній системі, яка за своєю природою є недетермінованою та підпадає під вплив численних випадкових і ймовірнісних факторів, інтегральні підходи дозволяють враховувати ці ймовірнісні умови при оцінці характеристик захисту та оптимізації його уставок. Це забезпечує підвищену адаптивність і надійність релейних систем, що особливо важливо для забезпечення безперервності та стабільності роботи електроенергетичних систем.

Висновки і перспективи. Запропонований інтегральний підхід до оцінки ефективності функціонування мікропроцесорного релейного захисту, що базується на урахуванні функціонально-метрологічних втрат, пов'язаних із налаштуванням захисту та випадковим характером електричних величин.

Інтегральні показники $m(E)$ і m_{Σ} забезпечують комплексну оцінку ефективності, надійності та стійкості релейного захисту, враховуючи як технічні, так і економічні аспекти функціонування системи. Використання ймовірнісно-статистичного підходу дозволяє оптимізувати налаштування уставок пристроїв, підвищити адаптивність та надійність захисту в реальних умовах експлуатації електроенергетичних систем.

Список використаних джерел

1. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем. Навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. 504 с
2. Казанський С.В., Матеєнко Ю.П., Сердюк Б.М. Надійність електроенергетичних систем: навчальний посібник. К.: НТУУ «КПІ», 2011. 216 с.

3. Гришук Ю. С., Тимошенко Р. Ф. Аналіз надійності мікропроцесорних пристроїв релейного захисту. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2010. №16. С. 21–28.

4. Кутін, В. М., Кутіна М. В., Ілюхін М. О. Засоби діагностування релейного захисту та автоматизації електроенергетичних систем: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 120 с.

5. Васілевський О. М., Ігнатенко О. Г. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2013. 160 с.

6. Ridwan M. I., Yen K. L., Musa A., Yunus B. Application of Life Data Analysis for the Reliability Assessment of Numerical Overcurrent Relays. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2010. № 48. P. 969–975.

References

1. Kidyba, V.P. (2015). Releinyi zakhyst elektroenerhetychnykh system. Navchalnyi posibnyk [Relay protection of power systems. Study guide]. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 504.

2. Kazanskyi, S.V., Mateienko, Yu.P., Serdiuk, B.M. (2011). Nadiinist elektroenerhetychnykh system: navchalnyi posibnyk [Reliability of electric power systems: study guide]. K.: NTUU «KPI», 216.

3. Hryshchuk, Yu.S., Tymoshenko, R.F. (2010). Analiz nadiinosti mikroprotsesornykh prystroiv releinoho zakhystu [Reliability analysis of microprocessor relay protection devices]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut»*, 16, 21-28.

4. Kutin, V.M., Kutina, M.V., Iliukhin, M.O. (2017). Zasoby diahnostuvannia releinoho zakhystu ta avtomatyky elektroenerhetychnykh system: navchalnyi posibnyk [Means of diagnosing relay protection and automation of electric power systems: study guide]. Vinnytsia: VNTU, 120.

5. Vasilevskyi, O.M., Ihnatenko, O.H. (2013). Normuvannia pokaznykiv nadiinosti tekhnichnykh zasobiv: navchalnyi posibnyk [Standardization of reliability indicators of technical means: study guide]. Vinnytsia: VNTU, 160.

6. Ridwan, M.I., Yen, K.L., Musa, A., Yunus, B. (2010). Application of Life Data Analysis for the Reliability Assessment of Numerical Overcurrent Relays. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 48, 969-975.

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE QUALITY OF MICROPROCESSOR-BASED RELAY PROTECTION

V. Ramsh, M. Potapenko, V. Sharshon

Abstract. *The article discusses the problems of assessing the effectiveness of microprocessor-based relay protection of power system facilities. The relevance of the study is due to the importance of relay protection devices in ensuring timely detection and elimination of emergency modes, preventing equipment damage, and maintaining the stability of the power system. Traditional approaches to assessing performance quality boil down to taking into account equipment and operational losses or are limited to the percentage of correct relay actions, which does not always allow for an accurate assessment of system efficiency.*

The purpose of the study is to develop an integrated criterion for evaluating the effectiveness of microprocessor-based relay protection, which takes into account functional and metrological losses caused by measurement errors, response delays, and other features of the implementation of protection algorithms.

To analyze losses, it is proposed to classify them into groups: functional-metrological, related to the adjustment of settings and the properties of selectivity and sensitivity; indirect hardware, arising from component failures and personnel errors; independent of settings, including damage to equipment and infrastructure.

For quantitative assessment of effectiveness, an integral indicator $m(E)$ is proposed, which takes into account all elements of the relay protection channel and allows assessing the probabilistic characteristics of losses and the potential effect of protection. To assess reliability, a normalized failure rate m_{Σ} is used, which includes relay failures, incorrect protection actions, and personnel errors.

An integrated approach allows for a comprehensive assessment of the efficiency, technical excellence, and economic feasibility of using microprocessor relay protection devices, predicting their behavior in emergency situations, optimizing settings, and increasing the adaptability and reliability of the system in real operating conditions. The use of the probabilistic-statistical method ensures objectivity of assessment and allows making informed decisions on the modernization and optimization of relay protection systems for power facilities.

Key words: *wind power installation, wind potential, wind speed, repeatability of wind speeds, distribution function, forecasting*