

<http://dx.doi.org/10.15589/evn20140104>

УДК 621.316.925.1:621.316.578.1

С 32

IMPROVEMENT OF THE PROTECTIVE PROPERTIES OF THE EMERGENCY AUTOMATICS OF SHIP POWER SUPPLY SYSTEMS

ПОКРАЩЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОТИАВАРІЙНОЇ АВТОМАТИКИ СУДНОВИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Oleksandr H. Sereda

lexus_suba@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8978-9735

Iryna S. Varshamova

varshamova_i@rambler.ru

ORCID: 0000-0001-7411-2302

Nataliia H. Fonta

nataliya-fonta@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-5593-1409

О. Г. Серeda,

канд. техн. наук, доц.;

І. С. Варшамова,

асистент;

Н. Г. Фонта,

канд. техн. наук, доц.

National Polytechnic University «KhPI», Kharkiv

Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків

Abstract. The urgency of the increase of the sensitivity of the relay protection devices to the remote short-circuit currents under the implementation of the remote backup of the protection failure of the ship power supply systems has been proved. The aim of the study is the improvement of the protective properties of the ship overcurrent protection systems through the increase of the sensitivity of the relay protection devices to the short-circuit currents using the complex criteria of the emergency modes identification to provide the selectivity and the remote backup. It is shown how the digital processing of the current sensors signals allows enhancing the abilities of the used protection in the automatic circuit breaker trip elements. The possibility of the identification of the current inrush type in the transient mode of the initiation of the electrical circuit disturbance is proved. The scientific and technical argument for the application of the complex criterion of the identification of the starting current of the asynchronous motor is given. The algorithm of the operation of the microprocessor protection device under the blocking of the automatic circuit breakers operation is suggested. It will provide the guaranteed start-up and the acceleration of the asynchronous motor. The study results can be used in the design of the new overcurrent protection systems of the ship power supply systems and the modernization of the current ones. The improvement of the protective properties of the emergency automatics is achieved by the means of the remote backup of the failures of the relay protection devices. The new protective property of the microprocessor circuit breaker trip allows performing the remote backup of the protection failures and improving significantly the fire safety of the ship power supply systems.

Keywords: remote backup; microprocessor trip; relay protection.

Анотація. Обґрунтовано актуальність підвищення чутливості апаратів релейного захисту до струмів віддалених коротких замикань при реалізації віддаленого резервування відмов захистів. Доведено можливість ідентифікації виду різкого зростання струму в перехідному режимі виникнення збурення електричного кола.

Ключові слова: віддалене резервування; мікропроцесорний розчіплювач; релейний захист.

Аннотация. Обоснована актуальность повышения чувствительности аппаратов релейной защиты к токам удаленных коротких замыканий при реализации дальнего резервирования отказов защит. Доказана возможность идентификации вида броска тока в переходном режиме возникновения возмущения электрической цепи.

Ключевые слова: дальнее резервирование; микропроцессорный расцепитель; релейная защита.

REFERENCES

- [1] Baranov A.P. *Sudovye avtomatizirovannyye elektroenergeticheskie sistemy* [Ship automated power systems]. Saint Peterburg, Sudostroenie Publ., 2005. 528 p.
- [2] Belyaev A.V. *Vybor apparatury, zashchit i kabeley v setyakh 0,4 kV* [Selection of the equipment, protection and cables in the 0.4 kV networks]. Saint Peterburg, PEIPK Publ., 2008. 230 p.

- [3] Belyaev A.V., Edlin M.A. Dalnee rezervirovanie otkazov zashchit i vyklyuchateley v setyakh 0,4 kV [Remote backup of the switches and protection failures in the 0.4 kV networks]. *Elektricheskie stantsii* [Electric stations], 2002. no. 12. pp. 51–55.
- [4] Bogomolov V.S. *Sudovye elektroenergeticheskie sistemy i ikh ekspluatatsiya* [Ship power systems and their operation]. Moscow, Mir Publ., 2006. 320 p.
- [5] Baru A. Yu., Bogatirov V.P., Shindnes Yu.L., Sereda A.G. Bystrodeystvuyushchaya sistema zashchity moshchnykh tiristornykh preobrazovateley na osnove tokoogranichivayushchikh avtomaticheskikh vyklyuchateley [Fast-acting system of the thyristor converters protection based on the current-limiting automatic circuit breakers]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika* [Electrical Engineering & Electromechanics], 2002, no. 2, pp. 15–17.
- [6] Venttsel Ye.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow, KNORUS Publ., 2013. 480 p.
- [7] *Vyklyuchateli avtomaticheskie tipa VA53-43 i VA55-43. Rukovodstvo po ekspluatatsii GZhIK.641353.014RE* [Circuit breakers of the VA53-43 and VA55-43 types. GZhIK.641353.014RE Operation guide]. Kursk, KEAZ Publ., 2010. 33 p.
- [8] Kobozev A.S., Sereda A.G., Zhornyak L.B., Morgun V.V. Modernizatsiya zashchity elektroustanovok sobstvennykh nuzhd AES napryazheniem 0,4 kV [Modernization of the protection of the NPP electrical auxiliaries of the 0.4 kV voltage]. *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka* [Electrical engineering and electrical energy industry], 2012, no. 2, pp. 66–72.
- [9] Koboziev O.S., Sereda O.H. *Sposib shvydkodiiuchoho maksimalnoho strumovoho zakhystu z vysokoii chutlyvisti do strumiv viddalenykh korotkykh zamykan* [Method of the high-speed overcurrent protection with the high sensitivity to the remote short-circuit currents] Patent UA, no. 101084, 2011.
- [10] Haponenko H.M., Ahafonov Yu.M., Rassomakhin S.H., Shlokin V.M. *Sposib maksimalnoho strumovoho zakhystu elektroustanovok* [Method of the overcurrent protection of the electric plants] Patent UA, no. 73195, 2003.
- [11] Haponenko H.M., Omelchenko V.V., Koboziev O.S. *Systema zakhystu rozghaluzhenykh tryfaznykh elektrychnykh kil vid strumiv viddalenykh korotkykh zamykan* [System of the protection of the branched three phase electrical circuits from the remote short circuits] Patent UA, no. 81981, 2006.
- [12] Raynin V.Ye., Kobozev A.S. Vyklyuchateli s novymi zashchitnymi kharakteristikami dlya povysheniya kachestva zashchity elektricheskikh setey nizkogo napryazheniya [Switches with advanced protective properties for the quality improvement of the protection of the electrical networks of the low voltage]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2010, no. 11, pp.18–24.
- [13] Raynin V.Ye., Kobozev A.S. Sovershenstvovanie zashchitnykh kharakteristik avtomaticheskikh vyklyuchateley nizkogo napryazheniya [Improvement of the protective properties of the automatic circuit breakers pof the low voltage]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2009, no. 2, pp. 44–51.
- [14] Solovev A.L. Metodika rascheta ustavok zashchit Sepam [Method of calculation of the Sepam protection installations]. *Tekhnicheskaya kolleksiya Schneider Electric* [Schneider Electric Technical Collection], 2006, no. 3, 71 p.
- [15] Soskov A.G., Kobozev A.S. Modernizatsiya sistemy zashchity gorodskikh elektricheskikh setey 0,4 kV za schet ispolzovaniya mikroprotssornoy tekhniki v rastseptyakh vyklyuchateley [Modernization of the system of protection of the urban 0.4 kV electric networks through the use of microprocessor technology in the circuit breaker trips]. *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka* [Lighting engineering and electrical energy industry], 2010, no.2, pp. 53–63.
- [16] *TU 16-522.136-78. Vyklyuchateli avtomaticheskie serii AK50B. Tekhnicheskie usloviya* (Automatic circuit breakers of the AK50B series. Specifications). Available at: <http://www.etm.ru/files/ak50b.pdf> (Accessed 03 November 2013).
- [17] Garlapati S., Hua Lin, Sambamoorthy S., Shukla S.K., Thorp J.S. Agent Based Supervision of Zone 3 Relays to Prevent Hidden Failure Based Tripping. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (4. 10 – 6.10.2010)*. 2010, pp. 256–261.
- [18] Tan J.C., Crossley P.A., Kirschen D., Goody J., Downes J.A. An Expert System for the Back-up Protection of a Transmission Network. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, issue 2, pp. 508–514.
- [19] Chowdhury B.H., Baravc S. Creating Cascading Failure Scenarios in Interconnected Power Systems. *IEEE Power Engineering Society General Meeting (18.06 – 22.06.2006)*. Montreal, 2006.
- [20] Chang C.S., Feng T., Khambadkone A.M., Kumar S. Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform. *Electric Power Applications IEE Proceedings*, 2000, vol. 147, issue 6, pp. 520–526.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогодні захист розгалужених суднових систем електропостачання від струмів коротких замикань (КЗ) переважно забезпечується автоматичними вимикачами (АВ) з різними витримками часу на відключення на різних ступенях захисту. Існуючий ступінчасто-часовий принцип селективного захисту формує некоректну захисну характеристику всієї системи захисту з точки зору забезпечення пожежної безпеки [8, 19]. При ступінчасто-часовому селективному захисті чим ближче до джерела живлення розташований вимикач і чим більший очікуваний струм КЗ, тим більша примусова витримка часу на відключення. При цьому істотно зростає термічна й динамічна дія аварійного струму на елементи електричного кола, а також енергія електричної дуги. Це ускладнює забезпечення високого рівня пожежної безпеки суднових електроустановок. Більш досконалою буде захисна характеристика, коли при переході на більш високий ступінь захисту (ближчий до джерела живлення) час спрацьовування не збільшується [8, 18].

Крім того, примусові затримки спрацьовування вимикача, ближчого до джерела живлення, в системі селективного захисту в порівнянні з часом відключення струму КЗ вимикачем, ближчим до споживача, істотно ускладнюють підвищення надійності захисту за рахунок віддаленого резервування відмов [17, 20]. Суть віддаленого резервування (ВР) полягає в тому, що при відмові будь-якого вимикача резервний захист аварійної ділянки електричного кола здійснюється вимикачем, розташований на вищому ступені захисту [20]. Надійність захисту ділянки електричної мережі визначається ймовірністю безвідмовної роботи вимикача, що захищає цю ділянку. Однак, гарантоване виробником значення 0,95 ймовірності безвідмовної роботи АВ при виконанні захисних функцій не відповідає сучасним вимогам. Тому важливим напрямком підвищення надійності є перехід до захисту не одним, а системою з двох апаратів. Згідно з [6], при ймовірності безвідмовної роботи кожного апарата, що дорівнює 0,95, ймовірність безвідмовної роботи системи захисту з двох таких апаратів становить 0,9975. Таким чином, при реалізації ВР ймовірність відмов захисту суттєво знижується. Однак, щоб забезпечити такий високий показник надійності, необхідно забезпечити близькі часи спрацьовування верхнього та нижнього ступенів захисту. Це означає, що на всіх ступенях захисту вимикачі повинні мати однакову чутливість до струмів КЗ, особливо віддалених. При ступінчасто-часовому принципі селективного захисту час спрацьовування селективного вимикача, встановленого ближче до джерела, може бути неприпустимо більшим за час

спрацьовування вимикача, встановленого ближче до навантаження. У зв'язку з цим вимогу високої швидкодії селективного захисту, необхідного для підвищення рівня пожежної безпеки електроустановок й надійності струмового захисту, важко забезпечити.

Застосування цифрових технологій значно покращує захисні властивості автоматичних вимикачів, призначених для релейно-струмового захисту трифазних електричних кіл як з пристроями автоматичного повторного вмикання (АПВ), так і без них [12, 15].

Недоліки існуючих систем захисту проілюструємо на прикладі системи захисту суднової електроустановки, наведеної на рис. 1 [1, 4]. Джерелом електроенергії 0,4 кВ є основний G_1 та резервний G_2 генератори.

При живленні електроустановки від основного генератора G_1 захист має чотири ступені селективності. У розподільчому щиті РЩ на IV прикінцевому ступені захисту встановлені вимикачі $QF_{4.1}$ – $QF_{4.2}$ типу АК-50Б. Для вимикачів АК-50Б на номінальний робочий струм $I_{r4} = (8...25)$ А струм граничної комутаційної здатності становить $I_{cu} = 11$ кА [16], тому за вимикачем III ступеня встановлено реактор, який обмежує струм КЗ до $I_{cc} = 10$ кА. Час відключення зазначеного струму вимикачем АК-50Б становить приблизно 20 мс. На III ступені розташований вимикач $QF_{3.1}$ типу А3724СМ на номінальний струм $I_{r3} = 250$ А з примусовою витримкою часу на відключення $t_{sd3} = 0,1$ с. У головному розподільчому щиті ГРЩ на II ступені встановлений вимикач $QF_{2.2}$ типу А3794СМ на номінальний струм $I_{r2} = 630$ А з витримкою часу на відключення $t_{sd2} = 0,25$ с. Вимикачі I ступеня $QF_{1.1}$ та $QF_{1.2}$ типу ВА55-43 на номінальний робочий струм $I_{r1} = 1250$ А мають витримку часу спрацьовування $t_{sd1} = 0,4$ с. Граничний струм селективності вимикачів ВА55-43 дорівнює $I_{cu} = 33,5$ кА [7], тому для забезпечення повної селективності нижче $QF_{1.1}$ встановлений реактор, який обмежує струм КЗ до $I_{cc} = 30$ кА.

Щоб вимикач $QF_{1.1}$ першого ступеня захисту з робочим струмом 1250 А мав достатню чутливість для резервного захисту ділянки електричного кола, що захищається нижчим вимикачем $QF_{2.2}$, струмові уставки їх мікропроцесорних розчіплювачів (МПР) у зоні струмів КЗ повинні дорівнювати $I_{sd1} = I_{sd2}$. Однак обрана за умовою пуску електродвигуна М1 уставка $I_{sd1} = 3750$ А вимикача $QF_{1.1}$ виявляється більшою за уставку $I_{sd2} = 1260$ А вимикача $QF_{2.2}$. Вочевидь, що в діапазоні струмів КЗ від 1260 до 3750 А вищий вимикач $QF_{1.1}$ не може захистити ділянку електричного кола за вимикачем $QF_{2.2}$ в разі відмови останнього. Аналогічні протиріччя мають місце на інших ступенях захисту.

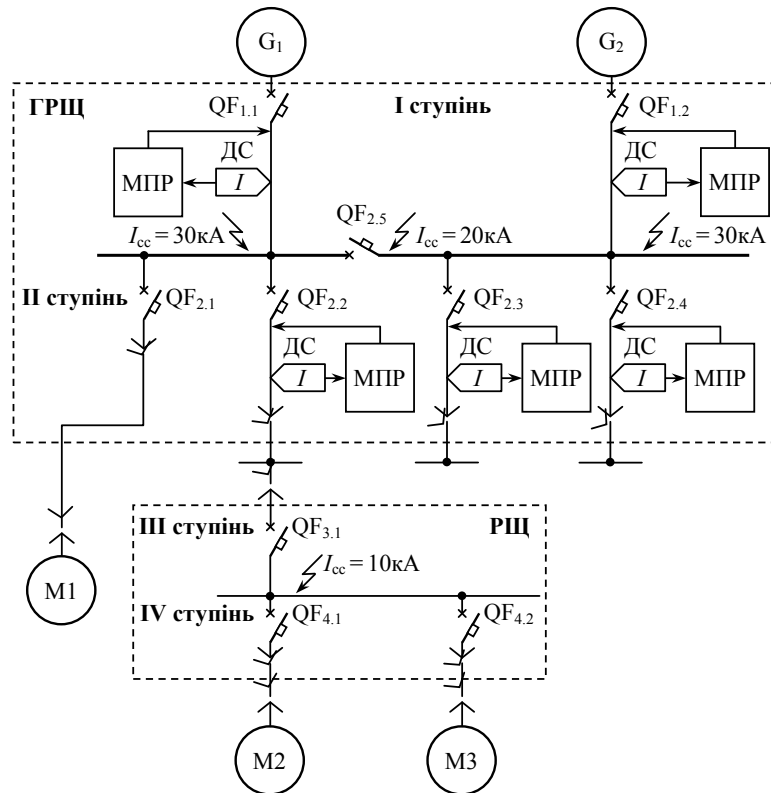


Рис. 1. Фрагмент схеми суднової системи електропостачання

На рис. 2 позначені зони струмів КЗ, в яких вимикач, розташований вище, не виконує функцію резервного захисту ділянки, коли нижній вимикач відмовив. Підвищити чутливість апаратів захисту до струмів КЗ можливо шляхом відстроювання від пускових струмів потужних асинхронних електродвигунів (ЕД), значення яких можуть бути більшими за значення струмів віддалених КЗ. Для цього необхідно швидко ідентифікувати вид струму збурення: чи є він струмом віддаленого КЗ у кінці фідера, що захищається, чи пусковим струмом ЕД сусіднього фідера.

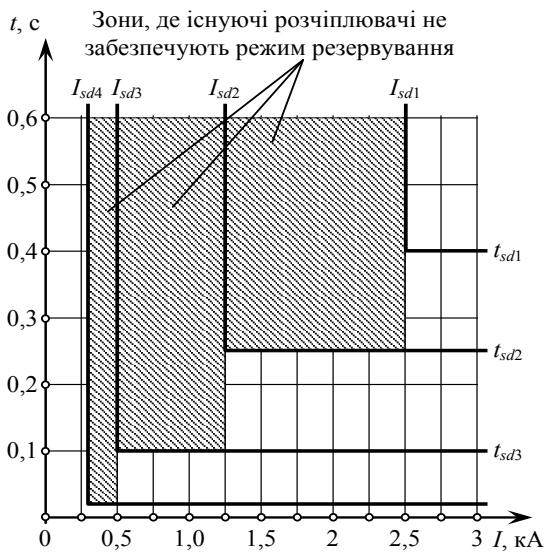


Рис. 2. Карта селективності чотириступеневого захисту

Підвищення чутливості максимального струмового захисту до струмів віддалених КЗ, значення яких можуть бути меншими за пускові струми підключених до мережі ЕД, можливе за рахунок швидкого, до загасання аперіодичної складової, визначення додаткових параметрів електричного кола, що захищається. Швидке визначення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ електричного кола зі струмом збурення дозволяє підвищити чутливість АВ, реалізувати захист від віддалених КЗ та забезпечити режим віддаленого резервування. Якщо максимальний струмовий захист електричних кіл здійснюють за допомогою аналогових електронних розчеплювачів, швидке визначення $\cos\phi$ та діючого значення симетричної складової струму КЗ неможливе [10]. В роботі [10] значення $\cos\phi$ електричного кола відоме (задане), тому що основним призначенням швидкодіючого струмового захисту є миттєве спрацювання при максимальному значенні струму електричного кола, тобто при КЗ на відповідних затискачах АВ. Таким чином забезпечується швидке спрацювання захисту I «відсікання» за рахунок швидкого визначення діючого значення I_{ph} симетричної складової струму КЗ та порівняння її зі значенням струмової уставки «відсікання» I_i [12, 15]. Зазначимо, що при реалізації захисту I селективність роботи апаратів захисту не вимагається. Реалізація селективного захисту забезпечується за рахунок спрацювання автоматичного вимикача від інтегральної уставки Q_{sd} . Недоліком такого технічного рішення є те,

що не забезпечується необхідна чутливість розчіплювача АВ до струмів віддалених КЗ.

У роботі [11] для відстроювання від пускових струмів ЕД використовується силова функція $S(t)$. За відношенням максимального S_{\max} до мінімального S_{\min} значення ($K_s = S_{\max} / S_{\min}$) здійснюється ідентифікація виду струму збурення електричного кола: віддалене КЗ, або пуск ЕД. Критерієм спрацьовування захисту, як і в [10], є величина повного струму у фазі I_{ph} . Проте при використанні в якості критерію спрацьовування захисту струму I_{ph} неможливо відстроїтися від короточасних струмів перевантаження в електричному колі, що захищається. Це означає, що висока чутливість до струмів віддалених КЗ забезпечується не завжди.

При поєднанні технічних рішень [10] і [11] можливо забезпечити інтегральний селективний захист електричних кіл навіть якщо заздалегідь невідоме значення $\cos\varphi$. Проте неможливо повною мірою підвищити швидкодню селективного захисту, тому що розрахунок інтегралу $Q_{(a,b,c)}$ здійснюється тільки після визначення I_{ph} . Оскільки мінімальне значення S_{\min} функції $S(t)$, необхідне для визначення коефіцієнта K_s і відповідного значення $\cos\varphi$, досягається лише через 16...18 мс після виникнення струму збурення, то час спрацьовування інтегрального селективного захисту не може бути мінімізованим. Крім того, використання як критерію спрацьовування струмового захисту величини повного струму I_{ph} не дозволяє відстроїтися від струмів перевантаження, тобто підвищення чутливості до струмів віддалених КЗ здійснено не повною мірою.

У роботі [20] розглянуті чотири методи розпізнавання виду струму збурення. Перші два методи використовують порівняння величин і швидкості зміни (di/dt) двох струмів. Решта методів використовують Фур'є та вейвлет перетворення. Доведено, що ці методи не забезпечують надійну ідентифікацію виду струму збурення, оскільки віддалене КЗ визначається імпедансом, який змінюється в часі внаслідок скін-ефекту.

Можливості цифрової техніки для аналізу процесів у електричних мережах, що захищаються, з метою ідентифікації аварійних ситуацій і відповідної реакції захисту при використанні вимикачів таких передових фірм, як ABB, Schneider Electric, Siemens, також використовуються недостатньо. Разом з вимикачами застосовуються зовнішні пристрої, що реагують на ті аварійні ситуації, на які не можуть реагувати АВ, наприклад, термінали БМРЗ-0,4 [3, 4] і реле захисту Sepam [14].

Таким чином, жодне з розглянутих технічних рішень окремо, ні їх сукупність не дозволяє забезпечити необхідну координацію розчіплювачів АВ, а саме підвищену чутливість до струмів віддалених КЗ та оптимальну швидкодню селективного захисту.

МЕТА СТАТТІ – обґрунтувати необхідність та запропонувати спосіб підвищення чутливості апаратів релейного захисту до струмів КЗ з використанням додаткових критеріїв ідентифікації аварійних режимів для забезпечення селективності та віддаленого резервування.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В алгоритмі спрацьовування розчіплювача АВ необхідно до існуючої струмової уставки I_{sd} зони КЗ, яка обирається з урахуванням струму прямого пуску ЕД, ввести додаткову уставку I'_{sd} , меншу за I_{sd} і узгоджену з очікуваним струмом віддаленого КЗ. Менша уставка повинна бути заблокована при пусках ЕД і активована при віддалених КЗ.

Ударний струм КЗ у будь-якій фазі буде найбільшим, якщо замикання відбудеться в момент, коли фазна електрорушійна сила (ЕРС) проходить через нуль. Для цього випадку зміна фазного струму в часі t описується рівнянням

$$i = I_m \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) + \sin(\varphi - \psi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

де I_m – амплітудне значення періодичної складової струму КЗ у фазі; $\varphi = \arctg(\omega L/R)$ – кут зсуву, на який періодична складова фазного струму відстає від фазної ЕРС; L, R – індуктивність та активний опір фази; $\tau = \frac{L}{R} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\omega} = \frac{\sin\varphi}{\omega \cdot \cos\varphi}$ – стала часу електричного кола;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота мережі; f – робоча частота мережі; ψ – момент виникнення КЗ.

Характер зміни в часі струму в будь-якій фазі електричного кола істотно залежить від такого випадкового фактора, як момент виникнення збурення, що характеризується кутом ψ [3]. Тому за миттєвим значенням струму $i_{j(a,b,c)}$ в кожній фазі a, b, c , отриманим від датчиків ДС (див. рис. 1), аналізувати характер перехідного процесу збурення електричного кола неможливо. Скористаємося силовою функцією електричного кола $S(t)$, яка характеризує сумарні електродинамічні зусилля в трифазній системі струмів і являє собою залежність у часі суми квадратів миттєвих значень струмів усіх трьох фаз [13]:

$$S(t) = \sum_{a,b,c} i_j^2 = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t), \quad (2)$$

де i_j – миттєве (дискретне) значення струму; $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ – миттєві значення струмів у фазах a, b, c відповідно:

$$i_a(t) = I_m \left[\sin\left(\omega t + \psi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\psi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \quad (3)$$

$$i_b(t) = I_m \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \quad (4)$$

$$i_c(t) = I_m \left[\sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\psi - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \quad (5)$$

ψ – початковий кут ЕРС у фазі b (момент виникнення струму збурення).

Після підстановки рівнянь (3)–(5) у (2) та перетворення отриманого виразу рівняння для силової функції приймає наступний вигляд:

$$S(t) = 3I_{ph}^2 \left[1 - 2a \frac{t}{\tau} \cos \omega t + e^{-\frac{2t}{\tau}} \right], \quad (6)$$

де I_{ph} – діюче значення періодичної складової струму.

З рівняння (6) випливає, що характер зміни в часі функції $S(t)$ в перехідному режимі виникнення струму

збурення електричного кола не залежить від кута ψ , але істотно залежить від коефіцієнта потужності $\cos\varphi$.

На рис. 3 подано сімейство кривих силової функції, побудованих за рівнянням (6), для випадків трифазного збурення електричного кола з різним $\cos\varphi$, але однаковим значенням I_{ph} , що дорівнює 1.

Чим менший $\cos\varphi$ електричного кола, тим більшої величини досягає функція $S(t)$ у перший період перехідного режиму. Таким чином, шляхом обчислення в реальному масштабі часу максимального S_{max} і мінімального S_{min} значень силової функції в перший період виникнення збурення електричного кола можна швидко визначити $\cos\varphi$ та ідентифікувати вид струму збурення. В [9] ідентифікація струму збурення базується саме на основі аналізу функції $S(t)$.

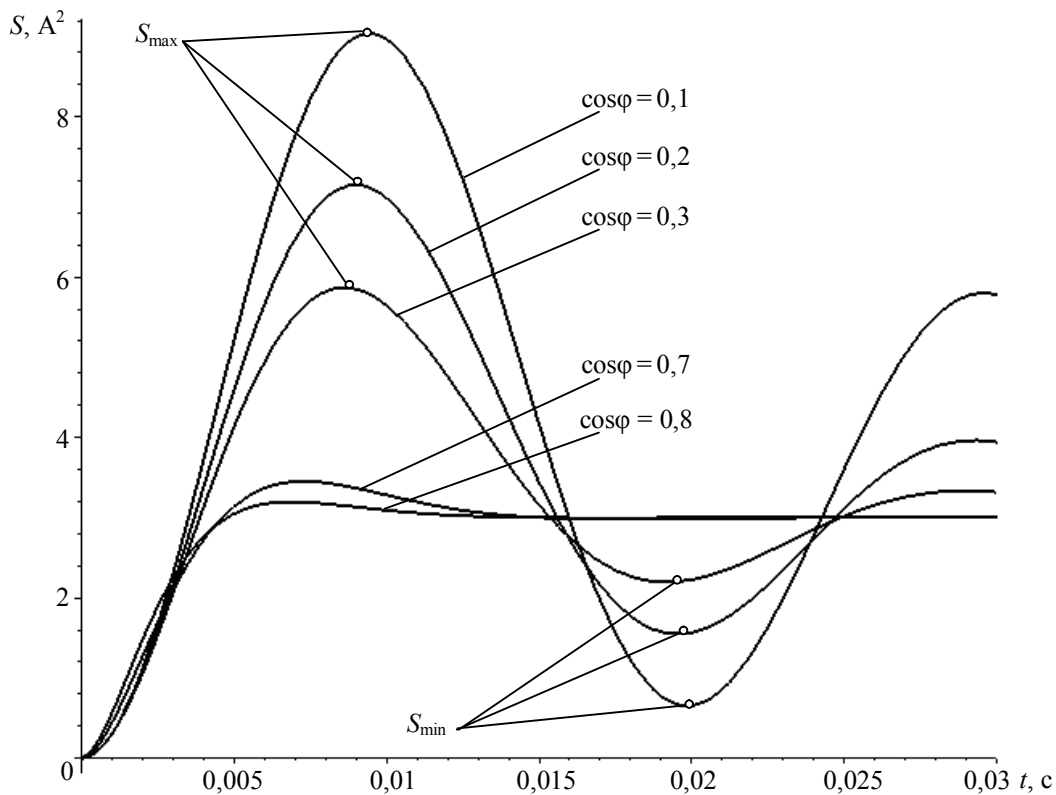


Рис. 3. Зміна силової функції в перехідному режимі виникнення струму збурення електричного кола

Реалізація селективного захисту забезпечується за рахунок спрацьовування АВ від інтегральної уставки Q_{sd} . При цьому розрахунок інтегралів $Q_{(a,b,c)}$ квадратів струмів збурення $\Delta i_{j(a,b,c)}^2$ починається після активації уставки I'_{sd} . Коли електричне коло знаходиться під навантаженням, струмом збурення є не повне значення струму у фазі I_{ph} , а приріст струму ΔI_{ph} , який визначається як різниця між повним струмом I_{ph} у фазі, що фіксується датчиками, та струмом передісторії I_{pr} , який протікав в електричному колі (навантаженні) до виникнення струму збурення:

$$\Delta I_{ph} = I_{ph} - I_{pr}. \quad (7)$$

Розрахунок величини ΔI_{ph} здійснюється з використанням функції $S(t)$, характер зміни якої істотно залежить від значення $\cos\varphi$ та складової I_{ph} . Якщо підставити в рівняння (2) миттєві дискретні значення струмів збурення $\Delta i_{j(a,b,c)}$, то в рівнянні (6) слід замінити складову I_{ph} на величину ΔI_{ph} . Так досить швидко можливо визначити величину ΔI_{ph} . До складу комплексного критерію спрацьовування захисту вводиться саме струм збурення ΔI_{ph} , який дозволяє за рахунок можливості відстроїтися від струмів перевантаження, суттєво підвищити чутливість захисту до струмів віддалених КЗ, а за рахунок швидкої ідентифікації виду струму збурення електричного кола (віддалене КЗ або пуск ЕД) збільшити швидкість захисту.

Вимірювання миттєвих значень струму $i_{j(a,b,c)}$ в кожній фазі електричного кола та їх аналого-цифрове перетворення здійснюють через однакові проміжки часу Δt . Зі зрушенням часового інтервалу на Δt здійснюють розрахунок миттєвих значень струмів збурення $\Delta i_{j(a,b,c)}$:

$$\Delta i_{j(a,b,c)} = i_{j(a,b,c)T_1} - i_{j(a,b,c)T_0}, \quad (8)$$

де i_{jT_1} – миттєві значення струму в кожній фазі електричного кола протягом поточного періоду T_1 зміни струму; i_{jT_0} – миттєві значення струму в попередній період зміни струму T_0 (струм передісторії).

Розрахунок інтегралів $Q_{(a,b,c)}$ квадратів миттєвих значень приросту струму в кожній фазі здійснюється за формулою

$$Q_{(a,b,c)} = \int_0^T \Delta i_{j(a,b,c)}^2 dt = \sum_0^T \Delta i_{j(a,b,c)}^2 \Delta t. \quad (9)$$

Значення $Q_{(a,b,c)}$ порівнюється зі значенням інтегральної уставки Q_{sd} розчіплювача АВ. Момент часу, що відповідає $Q_{(a,b,c)} = Q_{sd}$, використовують для формування витримки часу спрацьовування інтегрального селективного захисту t_Q . Розрахунок інтегралів $Q_{(a,b,c)}$ починається в момент часу, коли миттєве значення струму збурення $\Delta i_{j(a,b,c)}$ в одній з фаз стане більшим за величину $\sqrt{2}I'_{sd}$, де I'_{sd} – значення струмової уставки, вибраної з урахуванням захисту від віддалених КЗ. Якщо струм збурення трифазний, то сумарний інтеграл усіх трьох фаз за час періоду зміни струму T

$$Q_{\Sigma} = \sum_0^T Q_{(a,b,c)}. \quad (10)$$

Шляхом ділення величини Q_{Σ} на максимальне значення S_{max} суми квадратів миттєвих значень струмів $\Delta i_{j(a,b,c)}$ (2) визначається час

$$t_m = Q_{\Sigma} / S_{max}. \quad (11)$$

За величиною t_m визначають величину коефіцієнта потужності $\cos\phi$ електричного кола. Час t_m – це час, протягом якого еквівалентна термічна дія струмів збурення, сума квадратів яких дорівнює S_{max} , дорівнюватиме фактичній термічній дії струмів збурення за час періоду зміни струму. Тобто, це час еквівалентної термічної дії на мережу максимальної суми квадратів струмів усіх трьох фаз, яка залежить від величини $\cos\phi$.

При $\cos\phi = 0,3$, характерних для запуску ЕД, і $\cos\phi = 0,7$, характерних для віддаленого КЗ, значення t_m істотно відрізняються один від одного (12,2 і 16,4 мс відповідно), що свідчить про вагомість часу t_m для надійного визначення величини $\cos\phi$. Таким чином, шляхом аналізу функції $S(t)$ в перший період виникнення струму збурення можливо швидко ідентифікувати вид надструму та відстроїтися від пускових струмів ЕД.

Розрахунок величини ΔI_{ph} здійснюється з використанням функції $S(t)$, характер зміни якої істотно залежить від значення $\cos\phi$ та складової I_{ph} . Якщо підставити в рівняння (2) миттєві дискретні значення струмів збурення $\Delta i_{j(a,b,c)}$, то в рівнянні (6) слід замінити складову I_{ph} на величину ΔI_{ph} .

Залежність коефіцієнта потужності електричного кола $\cos\phi$ від часу t_{sm} використовуємо для визначення величини ΔI_{ph} з виразу

$$S_{max} = 6 \cdot \Delta I_{ph}^2 (1 + \sin\phi e^{t_{pk}/\tau})^2, \quad (12)$$

звідки

$$\Delta I_{ph} = \sqrt{\frac{S_{max}}{6 \cdot (1 + \sin\phi e^{t_{pk}/\tau})^2}}. \quad (13)$$

Необхідне відстроювання від такої можливої перешкоди, як струми перевантаження в сусідніх фідерах, що збільшують фазний струм захисного апарату, здійснюється завдяки безперервному швидкому моніторингу величини ΔI_{ph} , коли значення ΔI_{ph} у пам'яті мікропроцесора оновлюються кожний період зміни струму. Струм навантаження сукупності споживачів, підключених до довгої лінії, що захищається, не може бути більшим за робочий струм I_r лінії. Отже, струм збурення електричного кола, обумовлений підключенням одного споживача, також не може бути більшим за I_r . Оскільки вірогідність одночасного підключення до лінії декількох споживачів у проміжок часу 20 мс надзвичайно мала [7], то запропонований захист у зоні струмів КЗ не реагує на струми перевантаження. Тобто, використання у якості одного з критеріїв спрацьовування захисту струму ΔI_{ph} виключає негативний вплив на точність захисту заздалегідь існуючих струмів навантаження. Визначення величини $\cos\phi$, а потім і значення ΔI_{ph} здійснюється на підставі аналізу інтегралів (9). Тому розрахунок вказаних інтегралів здійснюють раніше визначення величини ΔI_{ph} , саме у момент часу, коли миттєве значення струму збурення $\Delta i_{j(a,b,c)}$ в одній з фаз стає більшим за величину $\sqrt{2}I'_{sd}$. Це дозволяє забезпечити час спрацьовування інтегрального селективного захисту меншим, ніж 20 мс, тобто підвищити швидкодію захисту в порівнянні з [10].

Мікропроцесорний розчіплювач автоматичного вимикача формує досконалішу часоштовову характеристику захисту, наведену на рис. 4.

Використання комплексного критерію спрацьовування захисту, що поєднує декілька параметрів, дозволяє спростити алгоритм роботи мікропроцесорного розчіплювача при реалізації швидкодіючого струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених КЗ. Адже розрахунок інтегралів (9) одночасно використовується як для реалізації інтегрального селективного захисту, так і для захисту від віддалених КЗ.

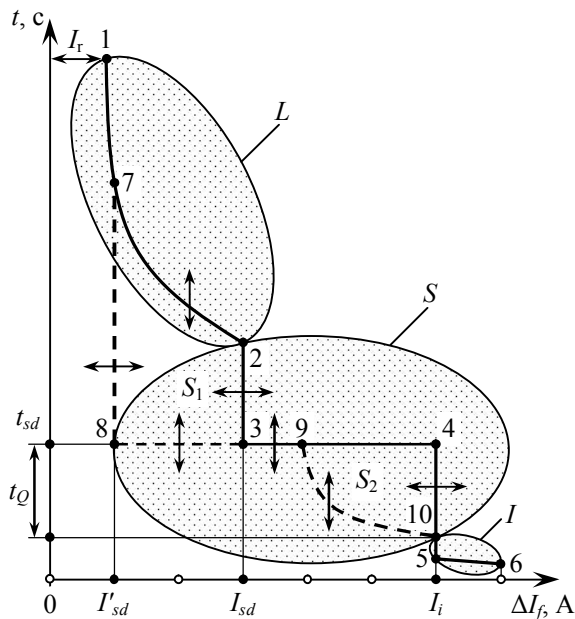


Рис. 4. Часострумova захисна характеристика мікропроцесорного розчіплювача після модернізації: *L* – захист зони перевантаження; *S* – захист зони КЗ; *S*₁ – захист віддаленого КЗ; *S*₂ – швидкодіючий інтегральний селективний захист; *I* – захист «відсікання»

Ділянка 1–2 часострумovoї характеристики (див. рис. 4) формується так само, як і в існуючих захистах від струмів перевантаження – час спрацьовування *t* зворотно залежить від величини повного струму у фазі. Перехід від зони перевантаження *L* до зони КЗ *S*, залежно від виду струму збурення, може відбуватися або за лінією 2–3, якщо $\Delta I_{ph} > I_{sd}$ або за ламаною 2–7–8 у разі віддаленого КЗ, чи реалізації режиму резервування. Якщо струм збурення ΔI_{ph} ідентифікований як пусковий ЕД, то струмова уставка захисту збільшується від величини I'_{sd} до значення I_{sd} . Відрізок характеристики від струму, що дорівнює уставці віддаленого КЗ $\Delta I_{ph} = I'_{sd}$ до струму, що дорівнює уставці «відсікання» $\Delta I_{ph} = I_r$, формується часовим та інтегральним модулями. Обидва модулі паралельно формують час спрацьовування селективного захисту по двох різних залежностях. Час спрацьовування, що формується часовим модулем, не залежить від струму $t_{sd} = \text{const}$, а час спрацьовування t_Q , що формується інтегральним модулем, визначається величиною інтеграла $Q_{(a,b,c)}$, тобто знаходиться в зворотній залежності від квадрата величини ΔI_{ph} . Завдяки паралельному формуванню часів t_{sd} й t_Q при порівняно невеликих струмах час спрацьовування обмежується фіксованою витримкою часу t_{sd} (ділянки 8–4 або 9–4), а при великих значеннях ΔI_{ph} (ділянка 9–10) час спрацьовування захисту зменшується внаслідок того, що інтегральна уставка Q_{sd} , яка забезпечує селективність, враховує особливості роботи вимикача, що стоїть нижче. В результаті інтеграл відключення електричного кола вимикачем, що стоїть вище, за інтегральною уставкою Q_{sd} виявляється меншим від

інтегралу відключення цього ж електричного кола вимикачем, що стоїть нижче, з фіксованою витримкою часу на відключення. Тобто, за наявності у вимикачів інтегральної уставки Q_{sd} , величина якої вибирається в два рази більшою, ніж інтеграла відключення апарата, що стоїть нижче, час спрацьовування селективного захисту виходить значно меншим. Зменшення часу спрацьовування селективного захисту характеризується ділянкою 4–10. У разі перевищення струмом збурення ΔI_{ph} значення I_i захист спрацьовує без умисної затримки спрацьовування – ділянка 10–5–6. Таким чином, запропонований захист забезпечує високу чутливість до струмів віддалених КЗ і режим віддаленого резервування.

Підвищена швидкодія селективного захисту при струмах КЗ досягається застосуванням замість ступінчасто-часового методу більш швидкодіючого, інтегрального способу. При цьому селективна робота вимикачів різних ступенів забезпечується не тільки шляхом відповідного вибору часових затримок на відключення t_{sd} , а і різними значеннями інтеграла Джоуля очікуваного струму КЗ. Інтегральний спосіб селективного захисту використовують у запобіжниках. Проте використання запобіжників не дозволяє забезпечити високу швидкодію з наступних причин:

- зони струмів перевантаження і струмів КЗ захисної характеристики запобіжника взаємозв'язані, тому досягти мінімального зсуву захисних характеристик у зоні КЗ двох послідовно ввімкнених запобіжників не вдається;
- значення інтегралів плавлення нестабільні через конструктивні, технологічні та експлуатаційні розкиди параметрів запобіжників;
- на інтеграл плавлення запобіжника, встановленого вище, істотно впливають струми «передісторії», коли струм КЗ в одному з фідерів, що захищаються нижчим запобіжником, може бути порівняний з сумарним струмом навантаження сусідніх фідерів.

Зазначені недоліки при реалізації інтегрального селективного захисту можуть бути усунені шляхом застосування АВ з мікропроцесорними розчіплювачами. Проте для забезпечення високої швидкодії інтегрального захисту і виключення невизначеності необхідно швидко відстроїтися від аперіодичної складової струму КЗ, оскільки струмові уставки апаратів захисту задаються діючим значенням періодичної складової струму. Діюче значення періодичної складової струму КЗ звичайно знаходять повільним методом інтегрування миттєвого значення за час, не менший трьох періодів (60 мс для робочої частоти 50 Гц). Швидко визначення, протягом одного першого періоду після виникнення КЗ (20 мс) зазначеного параметра, можливе за допомогою функції $S(t)$. Виходячи з формули (6), вираз для діючого значення періодичної складової струму збурення ΔI_{ph} при трифазному

КЗ має наступний вигляд:

$$\Delta I_{ph} = \sqrt{\frac{S(t)}{3 \left[1 - 2e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega t + e^{-\frac{2t}{\tau}} \right]}} \quad (14)$$

Застосування рівняння (14) для визначення діючого значення періодичної складової струму та використання інтеграла Q_{Σ} як додаткового критерію формування інтегральної уставки Q_{sd} дозволяє істотно підвищити швидкість захисту саме при граничних струмах КЗ. Це пов'язано з тим, що час спрацьовування в даному випадку зворотно пропорційний квадрату струму, а струм, що пропускається через вимикачі вищих ступенів захисту, з різних причин завжди більший, ніж через нижні вимикачі.

Проілюструємо дію інтегрального селективного захисту на прикладі електроустановки, наведеної на рис. 1. На рис. 5,а показані послідовно ввімкнені вимикачі з додатковими струмовими уставками I'_{sd} на

яких виконаний селективний захист однієї гілки даної електроустановки. Лінія 1 (рис. 5,б) відповідає карті ступінчасто-часової селективності, а лінія 2 відповідає швидкодіючому інтегральному селективному захисту. Вочевидь, що час спрацьовування захисту при максимальному для електроустановки значенні струму КЗ, що дорівнює 30 кА, при інтегральній селективності можливо знизити на час t_Q (див. рис. 4) з 0,4 с до 0,1 мс (рис. 5,б). При цьому істотно знижуються термічне та електродинамічне навантаження на елементи електроустановки при КЗ.

Модернізацію існуючих суднових електроустановок за рахунок реалізації запропонованих технічних рішень можна провести без будь-яких змін структури системи електропостачання, що істотно знижує часові та фінансові затрати такої модернізації. Заміні підлягають лише аналогові напівпровідникові розчіплювачі селективних вимикачів I–III ступенів захисту на мікропроцесорні блоки з інтегральною уставкою Q_{sd} .

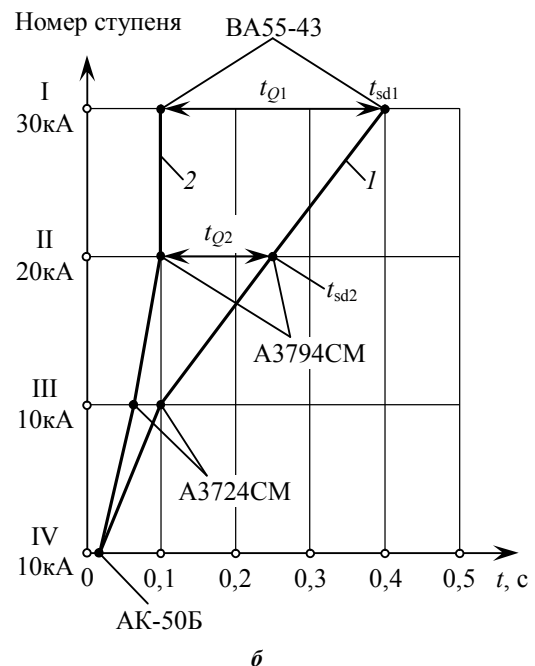
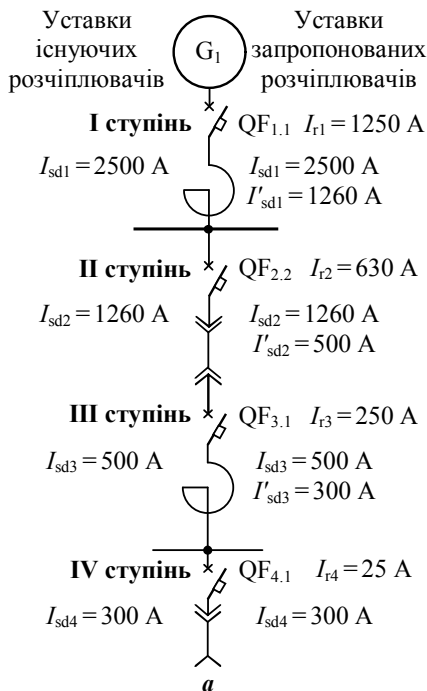


Рис. 5. Підвищення швидкодії селективного захисту

ВИСНОВКИ

Покращення захисних властивостей протиаварійної автоматики сунових систем електропостачання досягається шляхом віддаленого резервування відмов апаратів релейного захисту.

Часо-струмові захисні характеристики існуючих автоматичних вимикачів у зоні струмів КЗ формують некоректну з технічної точки зору карту селективного захисту суднових електроустановок, коли на більш високих ступенях захисту поряд зі збільшенням очікуваного струму КЗ збільшується і час спрацьовування захисту.

Підвищення чутливості до струмів віддаленого КЗ забезпечується за рахунок надійної ідентифікації струму збурення шляхом використання комплексного критерію спрацьовування захисту, який об'єднує величину $\cos \phi$ і значення струму збурення електричного кола ΔI_{ph} .

Більш досконала, з елементами адаптивності, часо-струмова захисна характеристика мікропроцесорного розчіплювача автоматичного вимикача дозволяє істотно покращити якість релейного захисту суднових систем електропостачання шляхом віддаленого резервування відмов захистів та істотно підвищити рівень пожежної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Баранов, А. П.** Судовые автоматизированные электроэнергетические системы [Текст] : учебник для вузов / А. П. Баранов. – С.Пб. : Судостроение, 2005. – 528 с.
- [2] **Беляев, А. В.** Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ [Текст] / А. В. Беляев. – С.Пб. : ПЭИПК, 2008. – 230 с.
- [3] **Беляев, А. В.** Дальнее резервирование отказов защит и выключателей в сетях 0,4 кВ [Текст] / А. В. Беляев, М. А. Эдлин // Электрические станции. – 2002. – № 12. – С. 51–55.
- [4] **Богомолов, В. С.** Судовые электроэнергетические системы и их эксплуатация [Текст] : учебник / В. С. Богомолов. – М. : Мир, 2006. – 320 с.
- [5] Быстродействующая система защиты мощных тиристорных преобразователей на основе токоограничивающих автоматических выключателей [Текст] / А. Ю. Бару, В. П. Богатырев, Ю. Л. Шинднес, А. Г. Серeda // Электротехника і електромеханіка. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2002. – № 2. – С. 15–17.
- [6] **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : КНОРУС, 2013. – 480 с.
- [7] Выключатели автоматические типа ВА53-43 и ВА55-43 [Текст] : руководство по эксплуатации ГЖИК.641353.014РЭ. – Курск : КЭАЗ, 2010. – 33 с.
- [8] Модернизация защиты электроустановок собственных нужд АЭС напряжением 0,4 кВ [Текст] / А. С. Кобозев, А. Г. Серeda, Л. Б. Жорняк, В. В. Моргун // Электротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя : ЗНТУ. – 2012. – № 2. – С. 66–72.
- [9] **Пат. 101084 Україна, МПК (2013.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00.** Спосіб швидкодіючого максимального струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань [Текст] / Кобозев О. С., Серeda О. Г. – № 101084 ; заявл. 19.07.2011 ; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. – 6 с.
- [10] **Пат. 73195 Україна, МПК Н 02 Н 3/08.** Спосіб максимального струмового захисту електроустановок [Текст] / Гапоненко Г. М., Агафонов Ю. М., Рассомахін С. Г., Шлокін В. М. – № 73195 ; заявл. 30.01.2003 ; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6. – 6 с.
- [11] **Пат. 81981 Україна, МПК Н 02 Н 7/00, Н 01 Н 73/00.** Система захисту розгалужених трифазних електричних кіл від струмів віддалених коротких замикань [Текст] / Гапоненко Г. М., Омельченко В. В., Кобозев О. С. – № 81981 ; заявл. 25.04.2006 ; опубл. 25.02.2008, Бюл. № 4.
- [12] **Райнин, В. Е.** Выключатели с новыми защитными характеристиками для повышения качества защиты электрических сетей низкого напряжения [Текст] / В. Е. Райнин, А. С. Кобозев // Электротехника. – 2010. – № 11. – С. 18–24.
- [13] **Райнин, В. Е.** Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения [Текст] / В. Е. Райнин, А. С. Кобозев // Электротехника. – № 2. – 2009. – С. 44–51.
- [14] **Соловьев, А. Л.** Методика расчета уставок защит Sepam [Текст] / А. Л. Соловьев // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2006. – № 3. – 71 с.
- [15] **Сосков, А. Г.** Модернизация системы защиты городских электрических сетей 0,4 кВ за счет использования микропроцессорной техники в расцепителях выключателей [Текст] / А. Г. Сосков, А. С. Кобозев // Світлотехніка та електроенергетика. – 2010. – № 2. – С. 53–63.
- [16] **ТУ 16-522.136-78.** Выключатели автоматические серии АК50Б [Электронный ресурс] : технические условия / Утв. ВПО «Союзэлектроаппарат». Гр. Е71. ДК 29.120.40. – Режим доступа: <http://www.etm.ru>.
- [17] Agent Based Supervision of Zone 3 Relays to Prevent Hidden Failure Based Tripping [Text] / S. Garlapati, Hua Lin, S. Sambamoorthy, S. K. Shukla, J. S. Thorp // IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 4–6 October 2010. – 2010. – P. 256–261.
- [18] An Expert System for the Back-up Protection of a Transmission Network [Text] / J. C. Tan, P. A. Crossley, D. Kirschen, J. Goody, J. A. Downes // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15, iss. 2. – P. 508–514.
- [19] **Chowdhury, B. H.** Creating Cascading Failure Scenarios in Interconnected Power Systems [Text] / B. H. Chowdhury, S. Baravc // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 18–22 June 2006, Montreal, Canada.
- [20] Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform [Text] / C. S. Chang, T. Feng, A. M. Khambadkone, S. Kumar // Electric Power Applications IEE Proceedings. – 2000. – Vol. 147, iss. 6. – P. 520–526.

© О. Г. Серeda, І. С. Варшимова, Н. Г. Фонта

Надійшла до редколегії 20.11.13
Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. А. А. Ставинський
Статтю розміщено у Віснику НУК № 1, 2014