

УДК 621.316.13: 621.316.95

О. Г. Серета, О. С. Кобозев, кандидати техн. наук

### ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ МАКСИМАЛЬНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ ДО СТРУМІВ ВІДДАЛЕНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ

**Анотація.** Показано необхідність модернізації систем релейно-струмового захисту трифазних електричних кіл і наведено науково-технічне обґрунтування пропозицій щодо її проведення за рахунок застосування цифрових технологій з метою підвищення чутливості до віддалених коротких замикань та реалізації вимог «віддаленого» резервування.

**Ключові слова:** віддалене резервування, швидкодіючий селективний захист, мікропроцесорний пристрій захисту

O. G. Sereda, PhD., O. S. Kobozev, PhD.

### OVERCURRENT PROTECTION SENSITIVITY INCREASE TO THE REMOTE SHORT CIRCUIT CURRENTS

**Abstract.** The paper shows the need for and given the scientific and technical offers justification for the three phase electrical circuits current protection modernization through the use of digital technologies to improve the sensitivity to remote short circuit and the «remote» backup requirements implement.

**Keywords:** remote backup, fast acting selective protection, microprocessor protection device

A. G. Sereda, A. S. Kobozev, кандидати техн. наук

### ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ К ТОКАМ УДАЛЕННОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**Аннотация.** Показана необходимость модернизации систем релейно-токовой защиты трехфазных электрических цепей и дано научно-техническое обоснование предложений по её выполнению за счет применения цифровых технологий с целью повышения чувствительности к удаленным коротким замыканиям и реализации требований «дальнего» резервирования.

**Ключевые слова:** дальнейшее резервирование, быстродействующая селективная защита, микропроцессорное устройство защиты

**Вступ.** 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 [1, 2].

**Актуальність.** Підвищення чутливості максимального струмового захисту до струмів віддалених коротких замикань (КЗ), значення яких можуть бути меншими за пускові струми підключених до мережі електродвигунів (ЕД), або струмів перевантаження, можливе за рахунок швидкого, протягом 20 мс після виникнення струму збурення, тобто до загасання аперіодичної складової, визначення додаткових параметрів електричного кола, що захищається. Швидко визначення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  електричного кола зі струмом збурення та симетричної складової цього струму дає змогу підвищити чутливість автоматичних вимикачів та реалізувати швидкодіючий інтегральний селектив-

ний захист, захист від віддалених КЗ та забезпечити режим «віддаленого» резервування.

Якщо максимальний струмовий захист електричних кіл здійснюють за допомогою аналогових електронних розчеплювачів, швидке визначення  $\cos \varphi$  та діючого значення симетричної складової струму КЗ неможливе [3]. Застосування цифрових технологій дозволяє швидко, не чекаючи закінчення перехідного процесу, коли ще існує аперіодична складова струму, визначити зазначені параметри.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Коли електричне коло знаходиться під навантаженням, струмом збурення є не повне значення струму у фазі  $I_{\phi}$ , а приріст струму  $\Delta I_{\phi}$ , який визначається як різниця між струмом  $I_{\phi}$ , що фіксується датчиками, та струмом передісторії  $I_{п}$ , який протікав в електричному колі (навантаженні) до виникнення збурення:

$$\Delta I_{\phi} = I_{\phi} - I_{п}. \quad (1)$$

Характер зміни в часі струмів збурення електричного кола в кожній фазі істотно за-

лежать від випадкового параметра – моменту часу виникнення струму збурення, що характеризується кутом  $\psi$  [4]. Тому за миттєвими значеннями струмів збурення в кожній фазі  $\Delta i_{(a,b,c)}$  визначити величину діючого значення симетричної складової  $\Delta I_\phi$  неможливо. Розрахунок величини  $\Delta I_\phi$  здійснюється з використанням «силової» функції електричного кола, яка являє собою залежність від часу суми квадратів миттєвих значень струмів збурення в усіх фазах [5]:

$$S[\Delta i_{(a,b,c)}^2(t)] = \Delta i_a^2 + \Delta i_b^2 + \Delta i_c^2 =$$

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

де  $t$  – час;  $\tau = \frac{L}{R} = \frac{\sin \phi}{\omega \cdot \cos \phi}$  – стала часу електричного кола.

Характер зміни (рис. 1) й значення «силової» функції  $S(t)$  не залежать від  $\psi$ , але істотно залежать від значення  $\cos \phi$  електричного кола та складової  $\Delta I_\phi$ . Якщо підставити в рівняння (2) миттєві дискретні значення  $\Delta i_{j(a,b,c)}$ , досить швидко можливо визначити величини  $\Delta I_\phi$  та  $I_\phi$ . Критерієм спрацьовування захисту є порівняння величини струмової уставки розчеплювача автоматичного вимикача саме з повним струмом фази  $I_{\phi(a,b,c)}$ .

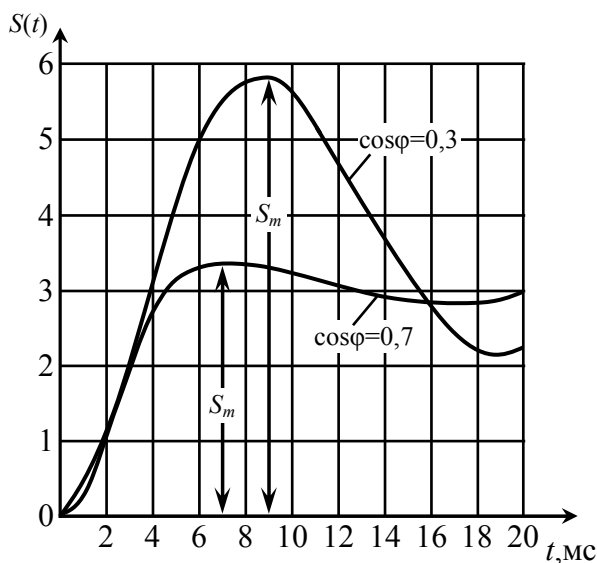


Рис. 1. Характер зміни «силової» функції

При визначенні величини  $I_\phi$  в роботі [3] значення  $\cos \phi$  електричного кола відоме (за-

дане), тому що основним призначенням швидкодіючого струмового захисту є миттєве спрацьовування при максимальному значенні струму електричного кола, тобто при КЗ на відвідних затискачах автоматичного вимикача. Таким чином, забезпечується швидке й точне спрацьовування захисту  $I$  «відсікання» за рахунок швидкого визначення діючого значення  $I_\phi$  симетричної складової струму КЗ та порівняння її зі значенням струмової уставки «відсікання»  $I_i$  [1; 2]. Зазначимо, що при реалізації захисту  $I$  селективність роботи апаратів захисту не вимагається. Реалізація селективного захисту забезпечується за рахунок спрацьовування автоматичного вимикача 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 визначення величини  $I_\phi$ . Недоліком такого технічного рішення є те, що не забезпечується необхідна чутливість розчеплювача для реалізації захисту від віддалених КЗ. Для забезпечення високої чутливості до струмів віддалених КЗ потрібно «відстроюватись» від пускових струмів потужних ЕД, значення яких можуть бути більшими за значення струмів віддалених КЗ.

В роботі [6] для «відстроювання» від пускових струмів електродвигунів 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 [3], є величина повного струму у фазі  $I_\phi$ . Проте при використанні як критерію спрацьовування захисту струму  $I_\phi$  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 [3] і [6] можливо забезпечити інтегральний селективний захист електричних кіл навіть якщо заздалегідь невідоме значення  $\cos \phi$ . Проте не можливо повною мірою підвищити швидкодію селективного захисту, тому що розрахунок інтеграла  $Q_{(a,b,c)}$ , здійснюється тільки після визначення  $I_\phi$ . Оскільки мінімальне значення  $S_{min}$  функції (2), необхідне для ви-

значення коефіцієнта  $K_S$  і відповідного значення  $\cos\varphi$ , досягається лише через 16÷18 мс після виникнення струму збурення (рис. 1), то мінімальний час спрацьовування інтегрального селективного захисту не може бути реалізованим меншим за час одного періоду зміни струму  $T=20$  мс. Проте фактичний час спрацьовування захисту від інтегральної уставки  $Q_{sd}$  може бути зменшеним. Крім того, використання як критерію спрацьовування струмового захисту величини повного струму у фазі  $I_\phi$  не дозволяє «відстроїтися» від струмів перевантаження, тобто підвищення чутливості до струмів віддалених КЗ буде здійснено не повною мірою.

У той же час 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 АВВ, Schneider Electric, Siemens, використовуються недостатньо. Разом з вимикачами застосовуються зовнішні пристрої, що реагують на ті аварійні ситуації, на які не можуть реагувати вимикачі, наприклад, реле захисту Seram [7]. Крім того, часострумові захисні характеристики вимикачів зазначених фірм взагалі не мають інтегральної селективної уставки  $Q_{sd}$  [7 – 10].

Таким чином, ані кожне з розглянутих технічних рішень окремо, ані їх сукупність не дозволяє забезпечити оптимальну захисну характеристику розчеплювача автоматичного вимикача, а саме, підвищену чутливість до струмів віддалених КЗ та необхідну швидкодію при реалізації інтегрального селективного захисту.

**Мета дослідження.** Розробка науково обґрунтованих технічних рішень з підвищення чутливості максимального струмового захисту до струмів віддалених КЗ за рахунок використання комплексного критерію спрацьовування, який поєднує декілька параметрів електричного кола, що захищається.

**Матеріали дослідження.** На відміну від [3; 6] до складу комплексного критерію спрацьовування захисту додатково вводиться значення струму збурення електричного кола  $\Delta I_\phi$ , яке дозволяє за рахунок можливості «відстроїтися» від струмів перевантаження,

суттєво підвищити чутливість захисту до струмів віддалених КЗ, а також за рахунок швидкої ідентифікації виду струму збурення електричного кола (віддалене КЗ або пуск ЕД) збільшити швидкодію захисту.

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

$$\Delta i_{j(a,b,c)} = i_{jT_1} - i_{jT_n}, \quad (3)$$

де  $i_{jT_1}$  – миттєве значення струму в кожній фазі електричного кола протягом поточного періоду  $T_1$  зміни струму;  $i_{jT_n}$  – значення струму в попередній період зміни струму  $T_n$  (струм передісторії).

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

$$Q_{(a,b,c)} = \int_0^T \Delta i_{j(a,b,c)}^2 dt = \sum_0^T \Delta i_{j(a,b,c)}^2 \Delta t. \quad (4)$$

Значення  $Q_{(a,b,c)}$  порівнюється зі значенням інтегральної уставки  $Q_{sd}$  розчеплювача автоматичного вимикача. 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  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  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  $T$

$$Q_\Sigma = \sum_0^T Q_{(a,b,c)}. \quad (5)$$

Діленням величини  $Q_\Sigma$  на максимальне значення  $S_m$  суми квадратів миттєвих значень струмів  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  (2) визначається час:

$$t_{sm} = Q_\Sigma / S_m. \quad (6)$$

За величиною  $t_{sm}$  визначають величину коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  електричного кола зі струмом збурення (рис. 2).

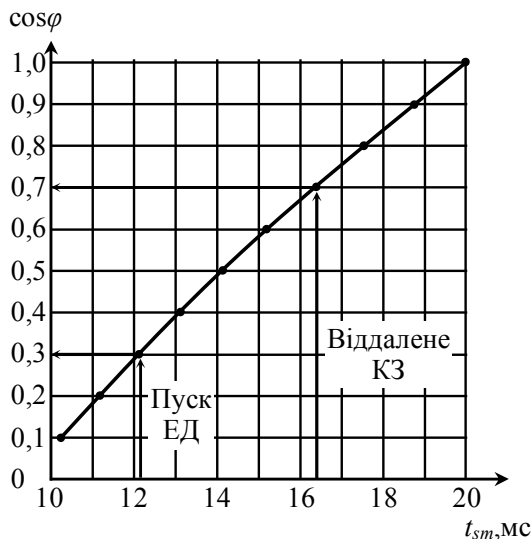


Рис. 2. Визначення  $\cos \varphi$

На рис. 1 наведено залежності функції  $S(t)$  для двох значень коефіцієнта потужності електричного кола, характерних для пуску-розгону ЕД ( $\cos \varphi = 0,3$ ) та віддаленого КЗ ( $\cos \varphi = 0,7$ ). Час  $t_{sm}$  – це час, протягом якого еквівалентна термічна дія струмів збурення, сума квадратів яких дорівнює  $S_m$ , дорівнюватиме фактичній термічній дії струмів збурення за час періоду зміни струму. Тобто фізична суть часу  $t_{sm}$  – це час еквівалентної термічної дії на мережу максимальної суми квадратів струмів усіх трьох фаз, яка залежить від величини  $\cos \varphi$ . Математично час  $t_{sm}$  визначається з рівняння

$$\int_0^T S[\Delta i_{(a,b,c)}^2(t)] dt = \int_0^{t_{sm}} S_m dt \quad (7)$$

При  $\cos \varphi = 0,3$  і  $\cos \varphi = 0,7$  значення  $t_{sm}$  істотно відрізняються один від одного (12,2 і 16,4 мс відповідно), що свідчить про важливість часу  $t_{sm}$  для надійного визначення  $\cos \varphi$ .

Залежність коефіцієнта потужності електричного кола  $\cos \varphi$  від часу  $t_{sm}$  використовується також для визначення величини струму  $\Delta I_\phi$ , виходячи з виразу, що пов'язує максимальне значення  $S_m$  суми квадратів струмів збурення у фазах зі значеннями струму збурення  $\Delta I_\phi$  електричного кола

$$S_m = 3\Delta I_\phi^2 \cdot K_y^2, \quad (8)$$

де  $K_y$  – ударний коефіцієнт струму КЗ в електричному колі, значення якого визначають з відомої залежності  $K_y = f(L/R)$  [11].

Звідки

$$\Delta I_\phi = \sqrt{\frac{S_m}{3 \cdot K_y}} \quad (9)$$

Виходячи з поєднання знайдених значень сукупності параметрів електричного кола, що захищається:  $\Delta I_\phi$ ,  $\cos \varphi$  та виду струму збурення, виробляють один з керуючих сигналів на спрацьовування захисту:

- якщо струм збурення двофазний, виробляють керуючий сигнал на формування часів витримки спрацьовування селективного захисту  $t_{sd}$  й  $t_Q$ ;

- якщо струм збурення трифазний і значення струму  $\Delta I_\phi$  більше за величину уставки «відсікання»  $I_i$ , то при будь-якому  $\cos \varphi$  виробляють керуючий сигнал на миттєве спрацьовування захисту;

- якщо струм збурення трифазний, значення струму  $\Delta I_\phi$  більше за величину струмової уставки  $I_{sd}$ , що вибрана з урахуванням забезпечення пуску-розгону ЕД, включених в електричне коле, що захищається, то при будь-якому  $\cos \varphi$  виробляють керуючий сигнал на формування часів  $t_{sd}$  й  $t_Q$ ;

- якщо струм збурення трифазний, значення струму  $\Delta I_\phi$  більше за величину струмової уставки  $I'_{sd}$ , що вибрана з урахуванням захисту від віддалених коротких замикань, а значення  $\cos \varphi$  тотожне або більше за задану величину  $K_m$  ( $\cos \varphi > K_m$ ), то виробляють керуючий сигнал на формування часів  $t_{sd}$  й  $t_Q$ ;

- якщо за час, що дорівнює двом періодам зміни струму (40 мс при частоті мережі 50 Гц), не сталося спрацьовування захисту, визначають величини  $\Delta I_\phi$  у фазах як різницю діючого значення повного струму у фазі  $I_\phi$  за третій період  $T_3$  зміни струму після виникнення струму  $\Delta I_\phi$  та діючого значення струму  $I_n$  (1) і у випадку, якщо значення  $\Delta I_\phi < I'_{sd}$ , виробляють керуючий сигнал на блокування спрацьовування захисту.

Підвищення чутливості до струмів віддаленого КЗ забезпечується за рахунок того, що критерієм спрацьовування захисту є сукупність параметрів електричного кола: вид струму збурення (дво- або трифазний), величина  $\cos \varphi$  і значення  $\Delta I_\phi$ , що забезпечує надійну ідентифікацію струму збурення. Підкреслимо, що для ідентифікації струму збурення використовується значення не повного струму у фазі  $I_\phi$ , а його приріст  $\Delta I_\phi$ , обумовлений збуренням

електричного кола. Визначення  $\Delta I_\phi$  та  $\cos \varphi$  здійснюється дуже швидко протягом одного періоду зміни струму, а завдяки безперервному моніторингу величини  $\Delta I_\phi$  забезпечується «відстроювання» від струмів перевантаження. Швидкий моніторинг струму збурення означає, що значення  $\Delta I_\phi$  в пам'яті мікропроцесора оновлюються кожний період зміни струму, кожні 20 мс. Значення струму навантаження сукупності споживачів підключених до лінії, що захищається, не може бути більшим за значення робочого струму  $I_r$  лінії. Отже струм збурення електричного кола, обумовлений підключенням одного споживача, також не може бути більше  $I_r$ . Оскільки вірогідність одночасного підключення до лінії декількох споживачів в проміжок часу 20 мс надзвичайно мала [12], то запропонований струмовий захист в зоні струмів КЗ не реагує на струми перевантаження. Тобто використання як одного з критеріїв спрацьовування захисту струму  $\Delta I_\phi$  виключає негативний вплив на точність захисту заздалегідь існуючих струмів навантаження.

Визначення  $\cos \varphi$ , а потім і значення  $\Delta I_\phi$  здійснюється на підставі аналізу величин інтегралів (4) квадратів струмів збурення у фазах. Тому розрахунок інтегралів здійснюють раніше визначення величини  $\Delta I_\phi$ , саме у момент часу коли миттєве значення струму збурення в одній з фаз  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  стає більшим за величину  $\sqrt{2}I'_{sd}$ . Це дає змогу забезпечити час спрацьовування інтегрального селективного захисту меншим, ніж 20 мс, тобто підвищити швидкість захисту в порівнянні з [3]. Використання комплексного критерію спрацьовування захисту, що поєднує декілька параметрів, дозволяє помітно спростити алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою при реалізації максимального струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених КЗ. Адже розрахунок інтегралів (4) одночасно використовується як для реалізації інтегрального селективного захисту, так і захисту від віддалених КЗ.

Реалізація підвищеної чутливості захисту до струмів КЗ передбачає, що в зоні КЗ захист має дві струмові уставки. Значення однієї з уставок  $I_{sd}$  вибирається за умови, щоб захист не спрацював у разі пуску-розгону ЕД. Друга струмова уставка  $I'_{sd}$  вибирається за умови, щоб захист спрацював у разі виникнення від-

даленого КЗ, величина струму при якому може бути меншою значення пускового струму або струму перевантаження.

Блок-схему, що ілюструє алгоритм роботи мікропроцесорного розчеплювача (або іншого пристрою захисту) при реалізації максимального струмового захисту з підвищеною чутливістю до струмів віддалених КЗ, наведено на рис. 3. Окремі обчислювальні й логічні операції, які здійснює мікропроцесорний пристрій, умовно показано у вигляді модулів. Фізично вказані модулі не існують, їх зображення наведено для зручності викладу функціонування мікропроцесорного пристрою. Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб.

1. У модулі 1 сигнали миттєвих значень струму  $i_{j(a,b,c)}$  у фазах  $a, b, c$  від датчиків струму ДС після аналогово-цифрового перетворення заносять в оперативну пам'ять, де вони безперервно оновлюються шляхом заміни старих значень новими. В ковзному режимі за час, що дорівнює двом періодам зміни струму ( $T_n$  і  $T_1$ ), знаходять миттєві значення струмів збурення електричного кола  $\Delta i_{j(a,b,c)}$ , а також значення  $I_n$  та  $I_\phi$ .

2. У модулі 2 відбувається порівняння миттєвих значень струмів  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  з величиною  $\sqrt{2}I'_{sd}$  і у випадку  $\Delta i_{j(a,b,c)} > \sqrt{2}I'_{sd}$  виробляється сигнал на визначення параметрів струму збурення: дво- або трифазний,  $\cos \varphi$ ,  $\Delta I_\phi$ .

3. У модулі 3 за значеннями  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  проводять аналіз виду струму збурення. У разі, якщо струм двофазний, виробляють керуючий сигнал на формування часів витиримки спрацьовування селективного захисту  $t_{sd}$  й  $t_Q$ .

4. У модулі 4 за значеннями  $\Delta i_{j(a,b,c)}$  визначають інтеграли  $Q_{(a,b,c)}$  за період часу  $T_1$ , їх суму  $Q_\Sigma$  й еквівалентний час  $t_{sm}$ , а потім відповідні значення  $\cos \varphi$  та  $\Delta I_\phi$ .

5. У логічному модулі 5 виробляють сигнал на спрацьовування захисту «відсікання» у випадку якщо значення  $\Delta I_\phi > I_i$  й вид струму збурення трифазний. Час спрацьовування захисту  $t_i$  визначається часом визначення величини  $\Delta I_\phi$  і залежить від того, відоме значення  $\cos \varphi$  для електричного кола зі струмом  $\Delta I_\phi \geq I_i$  чи ні. Якщо значення  $\cos \varphi$  відоме, то час  $t_i$  дорівнюватиме моменту, коли сума  $S = \sum_{a,b,c} \Delta i_j^2$

(2) досягне максимуму  $S_m$ .

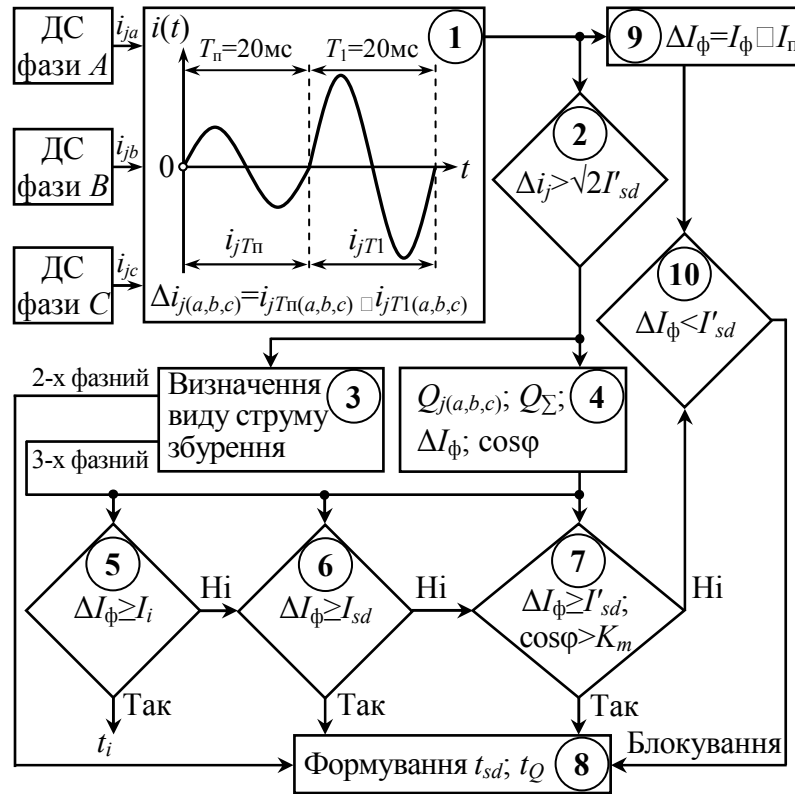


Рис. 3. Блок-схема алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою захисту

6. У логічному модулі 6 виробляють сигнал на формування часів  $t_{sd}$  й  $t_Q$ . Сигнал «Так» виробляється у випадку, якщо вид струму трифазний і значення  $\Delta I_\phi$  більше за струмову уставку  $I'_{sd}$ , вибрану з урахуванням забезпечення нормального запуску ЕД, включених в електричне коло, що захищається. При цьому  $\cos \varphi$  може набувати будь-якого значення.

7. У логічному модулі 7 виробляють сигнал на формування часів  $t_{sd}$  й  $t_Q$ . Сигнал "Так" виробляється, якщо вид струму трифазний, значення  $\Delta I_\phi$  більше за струмову уставку  $I'_{sd}$ , вибрану з урахуванням захисту від віддалених КЗ, а значення  $\cos \varphi$  тотожне або більше за задану величину  $K_m$  ( $\cos \varphi \geq K_m$ ).

8. У модулі 8 формують сигнал на спрацювання захисту з витримкою часу  $t_{sd}$  й  $t_Q$ . Сигнал «Так» визначається моментом часу, що відповідає рівності  $Q_{(a,b,c)} = Q_{sd}$ .

9. У модулі 9, якщо за час двох періодів зміни струму після виникнення струму збурення не відбулось спрацювання захисту від інтегральної уставки  $Q_{sd}$ , визначають значення  $\Delta I_\phi$  як різницю діючих значень повного струму у фазі  $I_\phi$ , визначеного за третій період  $T_3$  зміни струму, та струму  $I_\Pi$ .

10. У модулі 10 порівнюють значення  $\Delta I_\phi$ , визначене в модулі 9, з величиною  $I'_{sd}$ , якщо  $\Delta I_\phi < I'_{sd}$  виробляють керуючий сигнал «ні» в модуль 8 формування часів  $t_{sd}$  й  $t_Q$ . Тим самим блокується спрацювання селективного захисту від модулів 6; 7 і 8.

**Результати досліджень.** Мікропроцесорний розчеплювач автоматичного вимикача при роботі за наведеним алгоритмом формує досконалішу в порівнянні з існуючими часо-струмову характеристику захисту, наведену на рис. 4.

Ділянка 1–2 часо-струмової характеристики формується так само, як і в існуючих захистах від струмів перевантаження – час спрацювання  $t$  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  $\Delta I_\phi > I'_{sd}$ , або за ламаною 2–7–8 у разі віддаленого КЗ, чи реалізації режиму резервування. Якщо струм збурення  $\Delta I_\phi$  ідентифікований як пусковий ЕД, то струмова уставка захисту збільшується від величини  $I'_{sd}$  до значення  $I_{sd}$ . Відрізок характеристики від струму  $I'_{sd}$ , що дорівнює уставці віддаленого КЗ, до струму  $I_i$ , рівного

установці «відсікання», формується часовим і інтегральним модулями. Обидва модулі паралельно формують час спрацьовування селективного захисту за двома різними залежностями.

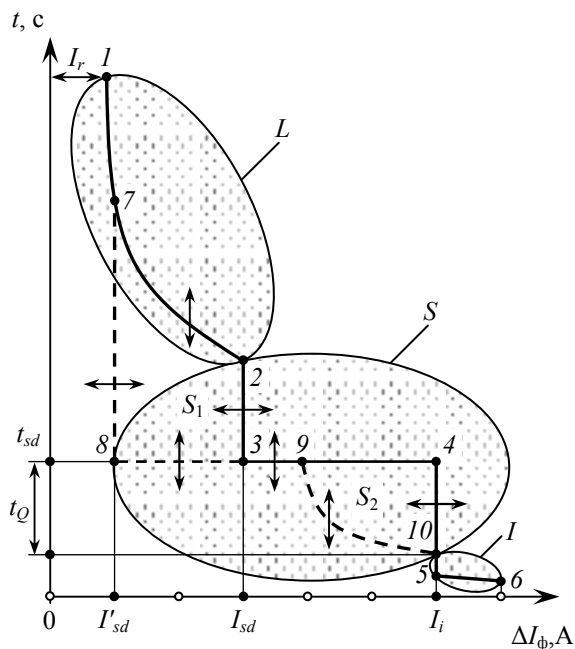


Рис. 4. Часо-струмова захисна характеристика мікропроцесорного розчеплювача після модернізації:

$L$  – захист зони перевантаження;  $S$  – захист зони КЗ;  $S_1$  – захист віддаленого КЗ;  $S_2$  – швидкодіючий інтегральний селективний захист;  $I$  – захист «відсікання»

Час спрацьовування, що формується часовим модулем  $t_{sd} = \text{const}$ , не залежить від струму, а час спрацьовування  $t_Q$ , що формується інтегральним модулем, визначається величиною інтеграла  $Q_{(a,b,c)}$ , тобто знаходиться в зворотній залежності від квадрата величини  $\Delta I_\phi$ . 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  $\Delta I_\phi$  (ділянка 9–10) час спрацьовування захисту зменшуються внаслідок того, що інтегральна уставка  $Q_{sd}$ , яка забезпечує селективність, враховує особливості роботи вимикача, що стоїть нижче. В результаті цього інтеграл відключення електричного кола вимикачем, що стоїть вище, за інтегральною уставкою  $Q_{sd}$  виявляється меншим інтеграла відключення цього ж електричного кола вимикачем, що стоїть нижче, з фіксованою витрим-

кою 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  $\Delta I_\phi$  значення  $I_i$  захист спрацьовує без умисної затримки спрацьовування – ділянка 10–5–6.

**Висновок.** Запропонований струмовий захист формує удосконалену захисну часо-струмову характеристику, яка забезпечує режим «віддаленого» резервування, а також підвищену швидкодію селективного захисту.

Список використаної літератури:

1. Райнин В. Е. Выключатели с новыми защитными характеристиками для повышения качества защиты электрических сетей низкого напряжения / В. Е. Райнин, А. С. Кобозев // Электротехника. – 2010. – № 11. – С. 18 – 24.
2. Сосков А. Г. Модернизация системы защиты городских электрических сетей 0,4 кВ за счет использования микропроцессорной техники в расцепителях выключателей / А. Г. Сосков, А. С. Кобозев // Світлотехніка та електроенергетика. – 2010. – № 2. – С. 53 – 63.
3. Пат. 73195 України МПК Н 02 Н 3/08. Спосіб максимального струмового захисту електроустановок / Г. М. Гапоненко, Ю. М. Агафонов, С. Г. Рассомахін, В. М. Шлокін. – № 2003010807; заявл. 30.01.2003; опубл. 15.06.2005. Бюл. № 6.
4. Бару А. Ю. Быстродействующая система защиты мощных тиристорных преобразователей на основе токоограничивающих автоматических выключателей / А. Ю. Бару, В. П. Богатирьев, Ю. Л. Шинднес, А. Г. Середа // Электротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ „ХПІ“. – 2002. – № 2. – С. 15 – 17.
5. Райнин В. Е. Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения / В. Е. Райнин, А. С. Кобозев // Электротехника. – 2009. – № 2. – С. 44 – 51.
6. Пат. 81981 України МПК Н 02 Н 7/00, Н 01 Н 73/00. Система захисту розгалужених трифазних електричних кіл від струмів віддалених коротких замикань / Г. М. Гапоненко, В.

В. Омельченко, О. С. Кобозев. – № 200604596; заявл. 25.04.2006; опубл. 25.02.2008. Бюл. № 4.

7. Руководство по устройству электроустановок. Технические решения «Шнейдер Электрик» / Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – 469 с.

8. Координация защит низкого напряжения / Техническая коллекция Schneider Electric. – 2008. – № 3. – 47 с.

9. Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers / Technical Application Papers. – 2008. – 56 с.

10. Автоматические выключатели 3VT в литом корпусе / Автоматические выключатели Siemens. Каталог LV 36. – 2010. – 265 с.

11. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.

12. Венцель, Е.С. Теория вероятности и её инженерные приложения / Е.С. Венцель – М. : Академия, 2003. – 455 с.

Отримано 03.12.2012

#### References

1. Rainin V. E., (2010), Circuit breakers with new security features to improve the electric low-voltage networks protection quality / V. E. Rainin, A. S. Kobozev // *Russian Electrical Engineering*. – No. 11. – Pp. 18 – 24 [in Russian].

2. Soskov A. G., (2010), The modernization of the system of protection of the city electric networks 0,4 kV through the use of microprocessor technology in trips breakers / A. G. Soskov, A. S. Kobozev // *Light and Power Engineering*. – No. 2. – Pp. 53 – 63 [in Ukrainian].

3. Pat. 73195 Ukraine MPK N 02 N 3/08. Electric Equipment Overcurrent Protection Method / G. M. Gaponenko, U. M. Agafonov, S. G. Rossomahin, V. M. Sholkin. – No. 2003010807; announced 30.01.2003; published 15.06.2005. Bull. No. 6 [in Ukrainian].

4. Baru A. U., (2002), Fast system of powerful thyristor converters protection based current-limiting circuit breakers / A. U. Baru, V. P. Bogatyrov, U. L. Shindnes, A. G. Sereda // *Electrical Engineering and Electrical Mechanics*. – Kharkiv : NTU “KhPI”. – No. 2. – Pp. 15 – 17 [in Ukrainian].

5. Rainin V. E., (2009), Improvements of protective characteristics of automatic low-voltage circuit breakers / V. E. Rainin, A. S. Kobozev // *Russian Electrical Engineering*. – Vol. 80. – No. 2. – Pp. 102 – 108 [in Russian].

6. Pat. 81981 Ukraine MPK N 02 N 7/00, N 01 N 73/00. The Protection System of Branched Three-Phase Electrical Chains by Remote Short-Circuit Current / G. M. Gaponenko, V. V. Omelchenko, O. S. Kobozev. – No. 200604596; announced 25.04.2006; published 25.02.2008, Bull. № 4 [in Ukrainian].

7. Electrical installation guide. Technical solutions “Schneider Electric” / *Technical collection Schneider Electric*. – 2009. – 469 p. [in Russian].

8. Low voltage protection coordination / *Schneider Electric technical collection*. – 2008. – No. 3. – 47 p. [in Russian].

9. Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers / *Technical Application Papers*. – 2008. – 56 p. [in English].

10. 3VT Mounded Case Circuit Breaker / The Siemens circuit breakers. Directory LV 36. – 2010. – 265 p. [in Russian].

11. ISO 28249-93. Short-circuit in electrical equipment. Calculation methods in AC electrical equipment of voltage up to 1 kV.

12. Wenzel, E.S. Probability theory and its engineering applications / E.S. Wenzel – Moscow, *Academy*, 2003. – 455 p. [in Russian].



Середа

Олександр Григорійович, канд. техн. наук, доц. каф. електричних апаратів Нац. технічного ун-ту «Харківський політехніч.ін-т» Україна, м. Харків, т. (057) 707-68-64, e-mail: n\_v\_sereda@mail.ru



Кобозев

Олександр Сергійович, канд. техн. наук, провідний науковий співробітник АТ «ЕНАС», Україна, м. Харків.