

Хоециан К. В.; исполн.: К. В. Хоециан, А. Г. Карякина, А. М. Печенкина, В. Г. Козлова. – 1985. – 92 с. – Док. 4-527/95. 6. Cheng C. P. Simulation of resonance overvoltage during energization of high voltage power network / C. P. Cheng, Chen Shihe // Proceedings of International Conference on power Systems transients IPST 2003 in New Orleans, USA, October 9–13. – 2010. – P. 71–75. 7. Claus Leth Bak, Kim Sogaard Switching overvoltage when disconnecting a combined 400 kV cable/overhead line with permanently connected shunt reactor / Claus Leth Bak, Kim Sogaard // Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '08) WSEAS Press, 2008. – P. 109–117.

УДК 621.316.13

Г. М. Лисяк, І. І. Островка, І. О. Сабадаш  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електричних систем та мереж

## КВАДРАТИЧНО-ІНТЕГРАЛЬНИЙ МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ

© Лисяк Г. М., Островка І. І., Сабадаш І. О., 2016

**Розглянуто квадратично-інтегральний метод розпізнавання режимів трифазного короткого замикання та пуску потужних електродвигунів номінальною напругою 10 кВ.  
Ключові слова: розпізнавання, трифазне коротке замикання, пуск електродвигунів.**

**It is considered square-integrated method recognition regimes of three-phase short circuit and starting large motors rated voltage of 10 kV in the article.  
Key words: recognize, three-phase short circuit, starting motors.**

### Постановка проблеми

До пристроїв релейного захисту (РЗ) ліній електропересялення (ЛЕП) висунуто вимоги, основними з яких є надійність функціонування, селективність та швидкодія. Завдання селективності виконують різними способами, де не останнє значення має точність опрацювання інформації. Встановлюють факт аномального режиму способом порівняння поточних значень координат режиму з допустимими, що визначаються і задаються відповідними уставками. Крім того, для зменшення збитків від дії надструмів аварійних режимів необхідно якнайшвидше виявити пошкоджений елемент і відімкнути його від мережі пристроями РЗ[1].

У практиці експлуатації електричних мереж застосовуються складні алгоритми роботи пристроїв РЗ за наявності ліній значної довжини, коли важко відрізнити режим трифазного короткого замикання (КЗ) від нормального експлуатаційного режиму через те, що значення координат режиму бувають співмірними. Координати трифазного КЗ є подібними до накиду навантаження, багато спільного вони мають і у випадку пуску (самозапуску) потужних асинхронних електродвигунів.

### Аналіз останніх досліджень

Традиційним способом захисту ЛЕП мереж 6–35 кВ є струмові відсічки, струмові захисти з залежною чи незалежною витримкою часу та максимальний струмовий захист [2]. Час спрацювання струмової відсічки без витримки часу становить 0,06–0,1 с, що необхідно для узгодження роботи захисту з дією розрядників, що спрацьовують під час атмосферних розрядів. До захистів з дещо іншим підходом визначання аварійних ситуацій можна зарахувати спосіб швидкодіючого струмового захисту [3]. Критерієм спрацювання у є перевищення величини струму однієї з фаз значення струму «уставки».

На основі розрахунку інтегралу квадрата миттєвих значень приростів струму визначають час спрацювання інтегрального селективного захисту. Своєю чергою в [4] порівняно струми чотирьох режимів – три-, двофазного КЗ, накиду навантаження та пуску двигунів. До цих режимів застосовувався інтегральний та квадратично-інтегральний різницево-модульні методи їх ідентифікації.

### Постановка задачі

Останні десятиліття характеризуються надзвичайно швидким розвитком мікропроцесорної елементної бази. Звісно, що це також позначилось на розвитку електроенергетики. Здебільшого пристрої і системи захисту та автоматики, сьогодні, масово продукують, використовуючи мікропроцесорну елементну базу. Такі пристрої, порівняно з аналогами на електромеханічній базі, мають істотні переваги. На нашу думку, найбільшою перевагою є надзвичайна простота запам'ятовування і подальшого використання інформації. Крім того, вони забезпечують набагато вищу точність обробки інформації, зручні і, напевно, дешевші в експлуатації. На жаль, загалом, функціонують вони, використовуючи тисячократно випробувані протягом багатьох десятиліть алгоритми.

Сформульовано мету створити метод розпізнавання, реалізація якого не вимагатиме переналаштування за зміни конфігурації мережі чи її параметрів. Інакше кажучи, завданням є встановити чи образи режиму певних ситуацій є подібними, не зважаючи на конкретні параметри мережі, і якщо так, то вивчити можливості розпізнавання їх образів.

### Виклад основного матеріалу

Ефективним методом дослідження є цифрове моделювання. Воно забезпечує всебічний аналіз координат режимів різних процесів та ситуацій, можливість швидкої зміни параметрів моделі та отримання достовірних результатів.

На рис.1 та 2 наведено заступні схеми електромережі 10 кВ, в яку входять джерело ЕРС, силовий трансформатор ТМН–6300/110/10, повітряної ЛЕП виконаної проводом А–25 довжиною 40 км та навантаження (асинхронні електродвигуни серії А4-85/43-4У3 потужністю 630 кВт), для моделювання режиму трифазного КЗ та пуску електродвигунів відповідно. Цифрове моделювання аварійних ситуацій здійснювалось у програмному комплексі RE[5] з врахуванням відстані від джерела живлення до місця виникнення аномальної ситуації.

Для розроблення пристрів РЗ від КЗ необхідно дослідити образи координат режиму і під час виникнення КЗ, і під час його ліквідації та режиму автоматичного повторного ввімкнення (АПВ).

На рис. 3 наведені цифрограми струмів фаз на початку лінії, отримані моделюванням процесів електричної мережі, показаної на рис. 1 та 2 в режимах: а) трифазне КЗ на віддалі 1 км від джерела живлення; б) трифазне КЗ на віддалі 39 км від джерела живлення; в) пуск групи двигунів на віддалі 1 км від джерела живлення; г) пуск групи двигунів на віддалі 39 км від джерела живлення.

Як видно з рис. 3 всі образи струмів наведених режимів є подібними і характеризуються одночасним збільшенням струму у всіх фазах. Водночас, очевидно, що характер цієї зміни для обох режимів є різний. Також слід відзначити, що зі збільшенням відстані від джерела живлення до електродвигунів спостерігається зміна перебігу процесу їх пуску – він є тривалішим.

У [6] наведено застосування різницево-модульного методу ідентифікації трифазного КЗ та накиду навантаження. У результаті цих досліджень встановлено, що відрізнити режим трифазного КЗ від накиду навантаження можна за півперіоду промислової частоти. Однак цей метод не дозволяє чітко відрізнити образ координат режиму трифазного КЗ від образу координат режиму пуску двигунів. Розглянемо розв'язання цієї задачі за допомогою квадратично-інтегрального різницево-модульного методу [4], який передбачає обчислення інтегралу  $\Delta I(t)$  за виразом:

$$\Delta I(t)_{(A,B,C)} = \int_j^{\frac{0,01}{30} + j} H(t)_{(A,B,C)} dt , \quad (1)$$

де  $j = n \cdot \frac{0,01}{30}$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$ ;  $H(t)_{(a,b,c)}$  – різницево-модульні функції квадратів миттєвих значень струмів фаз [4].

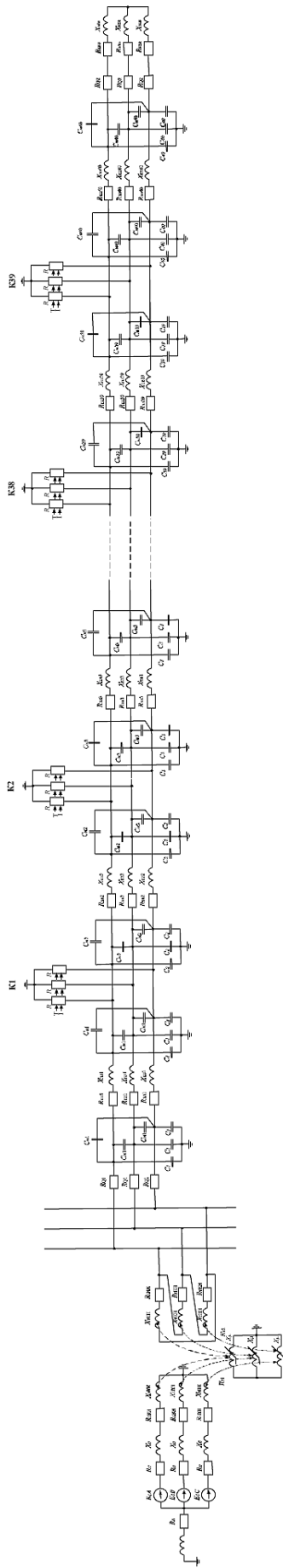


Рис.1. Заступна схема електромережі для моделювання трифазного КЗ

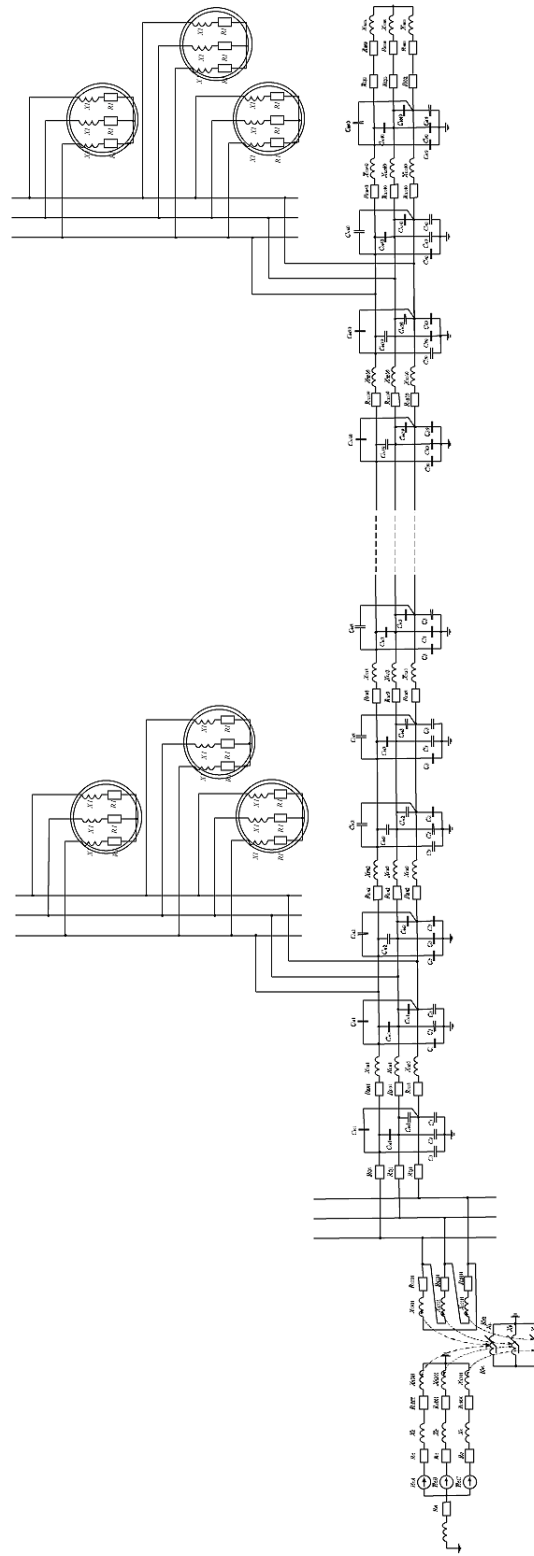


Рис.2. Заступна схема електромережі для моделювання пуску групи двигунів

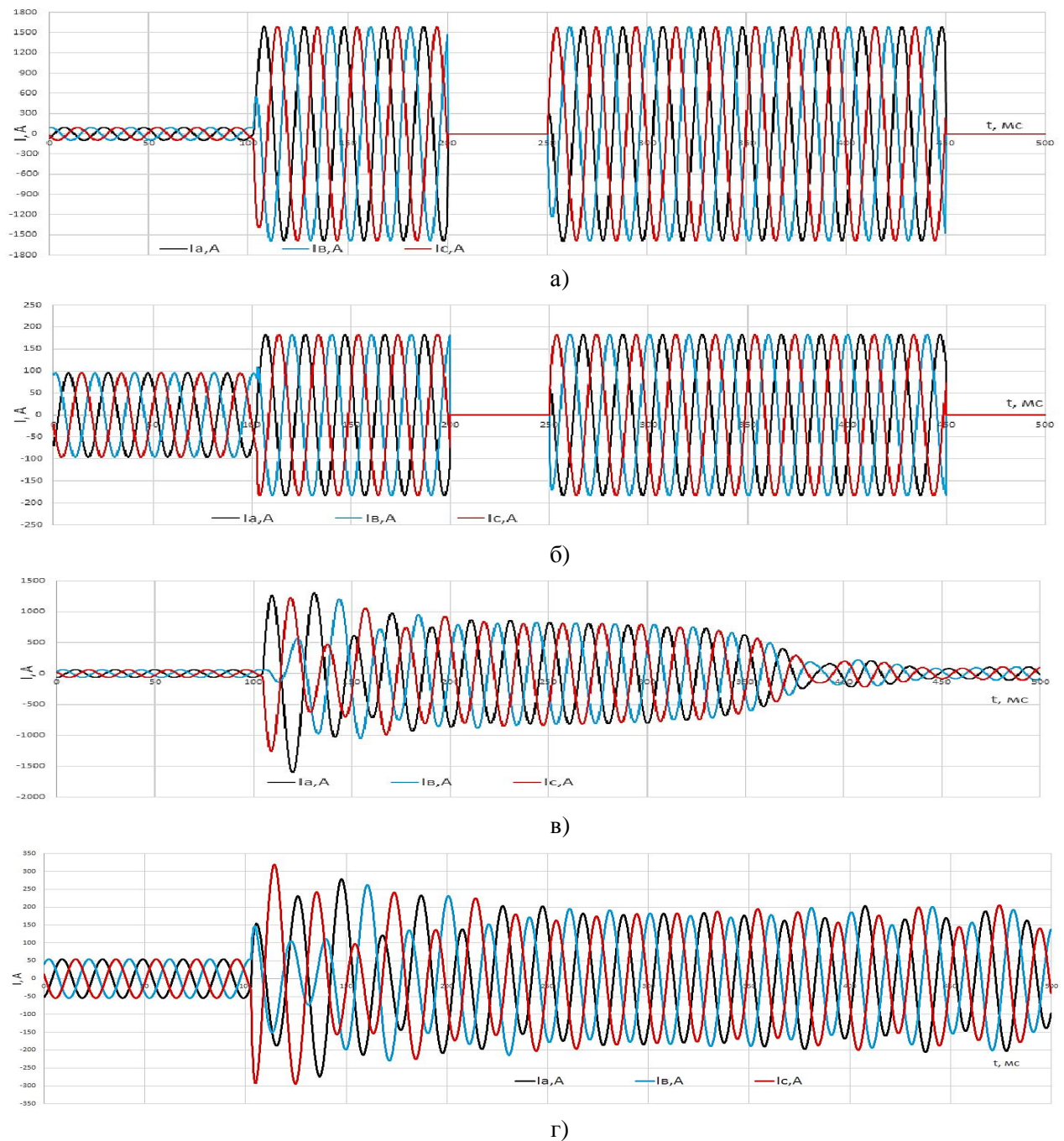


Рис. 3. Цифрограми струмів фаз на початку лінії за: а – трифазного КЗ на віддалі 1 км від джерела живлення; б – трифазного КЗ на віддалі 39 км від джерела живлення; в – пуску групи двигунів на віддалі 1 км від джерела живлення; г – пуску групи двигунів на віддалі 39 км від джерела живлення

На рис. 4, а, б наведені квадратично-інтегральні різницево-модульні характеристики (КІРМХ) миттєвих значень струмів поточного та попереднього періодів у випадку трифазного к.з на віддалі 1 км від джерела живлення та трифазного КЗ на віддалі 39 км від джерела живлення, а на рис. 4, в, г аналогічні характеристики у випадках пуску групи двигунів, встановлених на віддалі 1 км від джерела живлення та на віддалі 39 км від джерела живлення.

У табл. 1 наведено показники КІРМХ (рис. 4) для першого періоду аномальної ситуації: максимальне значення КІРМХ; швидкість зміни КІХ. Як видно з табл. 1, у випадку аномальної ситуації на відстані 1 км від джерела живлення є можливість відрізнити режим трифазного КЗ від режиму пуску електродвигунів за максимальним значення КІРМХ у фазах (у випадку трифазного КЗ воно практично є незмінним, на відміну від пуску електродвигунів, де максимальне значення КІРМХ відрізняється на порядок) та за швидкістю зміни КІРМХ. Однак на відстані 39 км від джерела живлення максимальні

значення КІРМХ та їх швидкість наростання за режиму пуску двигуна є значно більшими, ніж аналогічні КІРМХ режиму трифазного КЗ. Тобто зі зростанням відстань від джерела живлення до місця аномальної ситуації зменшується можливість її розпізнавання.

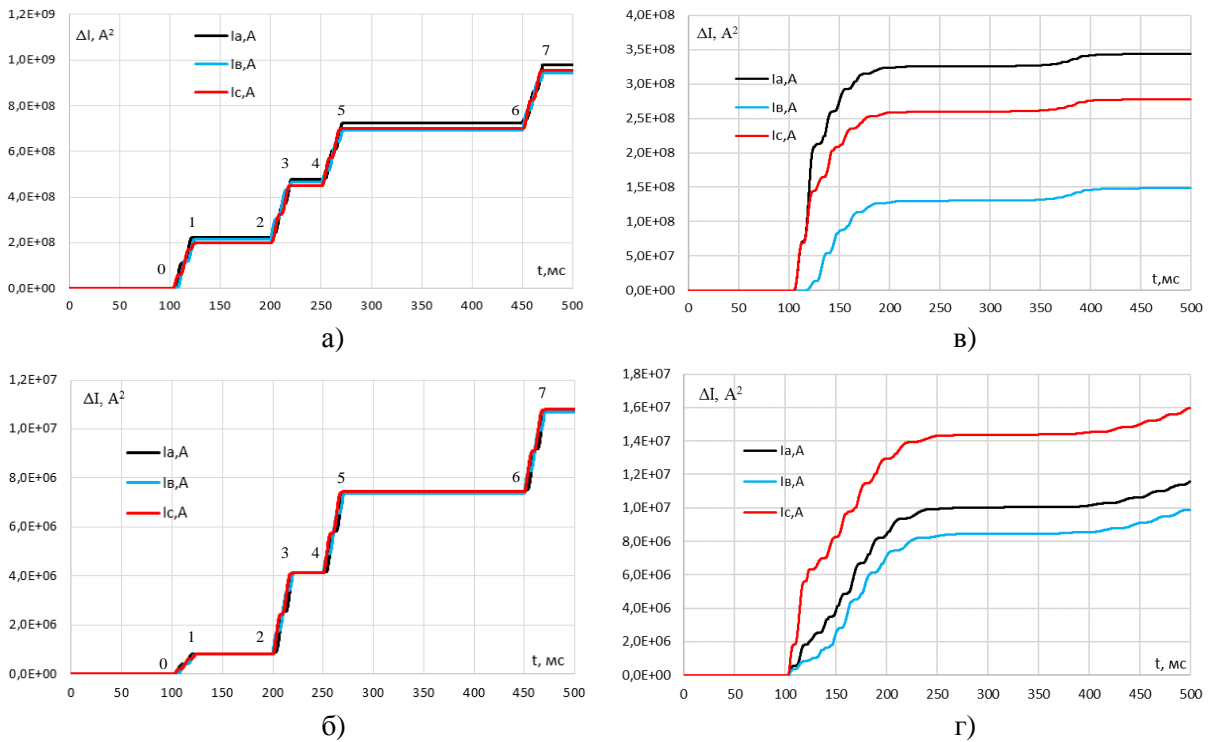


Рис. 4. Квадратично-інтегральні різницево-модульні характеристики фаз за: а – трифазного КЗ віддалі 1 км від джерела живлення; б – трифазного КЗ віддалі 39 км від джерела живлення; в – пуску групи двигунів віддалі 1 км від джерела живлення; г – пуску групи двигунів віддалі 39 км від джерела живлення

Таблиця 1

**Показники квадратично-інтегральної різницево-модульної характеристики залежно від виду аномальної ситуації та її місця виникнення**

Відст.	1 км				39 км			
	Режим трифазного КЗ		Режим пуску двигуна		Режим трифазного КЗ		Режим пуску двигуна	
	Макс. знач., A <sup>2</sup>	Швидк. зміни A <sup>2</sup> /мс	Макс. знач., A <sup>2</sup>	Швидк. зміни, A <sup>2</sup> /мс	Макс. знач., A <sup>2</sup>	Швидк. зміни, A <sup>2</sup> /мс	Макс. знач., A <sup>2</sup>	Швидк. зміни, A <sup>2</sup> /мс
А	2,24·10 <sup>8</sup>	1,12·10 <sup>10</sup>	2,08·10 <sup>8</sup>	1,04·10 <sup>10</sup>	8·10 <sup>6</sup>	4·10 <sup>8</sup>	2,06·10 <sup>7</sup>	1,03·10 <sup>9</sup>
В	2,06·10 <sup>8</sup>	1,03·10 <sup>10</sup>	1,27·10 <sup>7</sup>	6,35·10 <sup>8</sup>	8,11·10 <sup>6</sup>	4,05·10 <sup>8</sup>	9,12·10 <sup>6</sup>	1,03·10 <sup>9</sup>
С	1,93·10 <sup>8</sup>	9,65·10 <sup>9</sup>	1,44·10 <sup>8</sup>	7,2·10 <sup>9</sup>	7,95·10 <sup>6</sup>	3,97·10 <sup>8</sup>	6,31·10 <sup>7</sup>	1,03·10 <sup>9</sup>

На рис. 4, а, б наведені КІРМХ, коли відбувались такі події: 0-1 – перехідний процес після виникнення трифазного КЗ; 1-2 – усталений режим трифазного КЗ; 2-3 – вимкнення ЛЕП та ліквідація трифазного КЗ; 3-4 – ЛЕП вимкнена; 4-5 – перехідний процес після дії АПВ на трифазне КЗ; 5-6 – усталений режим трифазного КЗ; 6-7 – вимкнення ЛЕП та ліквідація трифазного КЗ. Видно, що у випадку ліквідації трифазного КЗ його КІРМХ (ділянки 2–3 та 6–7) подібні до ділянок де мало місце трифазне КЗ (0-1 та 4-5). Тобто КІРМХ появи трифазного КЗ та КІРМХ його ліквідації подібні і не можуть бути використані для ідентифікації аварійної ситуації, пов’язаної з трифазним КЗ.

Для подолання цих труднощів пропонується такий спосіб:

Ø миттєві значення координат режиму підносимо до квадрата

$$I(t)_{(A,B,C)} = (i(t)_{(A,B,C)})^2, \tag{2}$$

де  $i(t)$  – миттєве значення струму, А.

Ø знаходимо різницеву функцію відніманням поточного миттєвого значення координати режиму в квадраті ( $I_i$ ) від значення попереднього періоду ( $I_{i-2\pi}$ )

$$H(t)_{(A,B,C)} = I(t)_{(A,B,C)} - I(t-0,02)_{(A,B,C)}, \quad (3)$$

Ø знаходимо квадратично-інтегральну функцію згідно з формулою (1).

На рис. 5 показано результат обчислень квадратично-інтегральної характеристики (КІХ) для трифазного КЗ та пуску двигунів на відстанях 1 та 39 км від джерела живлення відповідно.

З рис. 5, а, б видно, що у випадку ліквідації трифазного КЗ його КІХ спадає (ділянки 2–3 та 6–7). Це дає змогу розрізнити процес появи трифазного КЗ від його ліквідації.

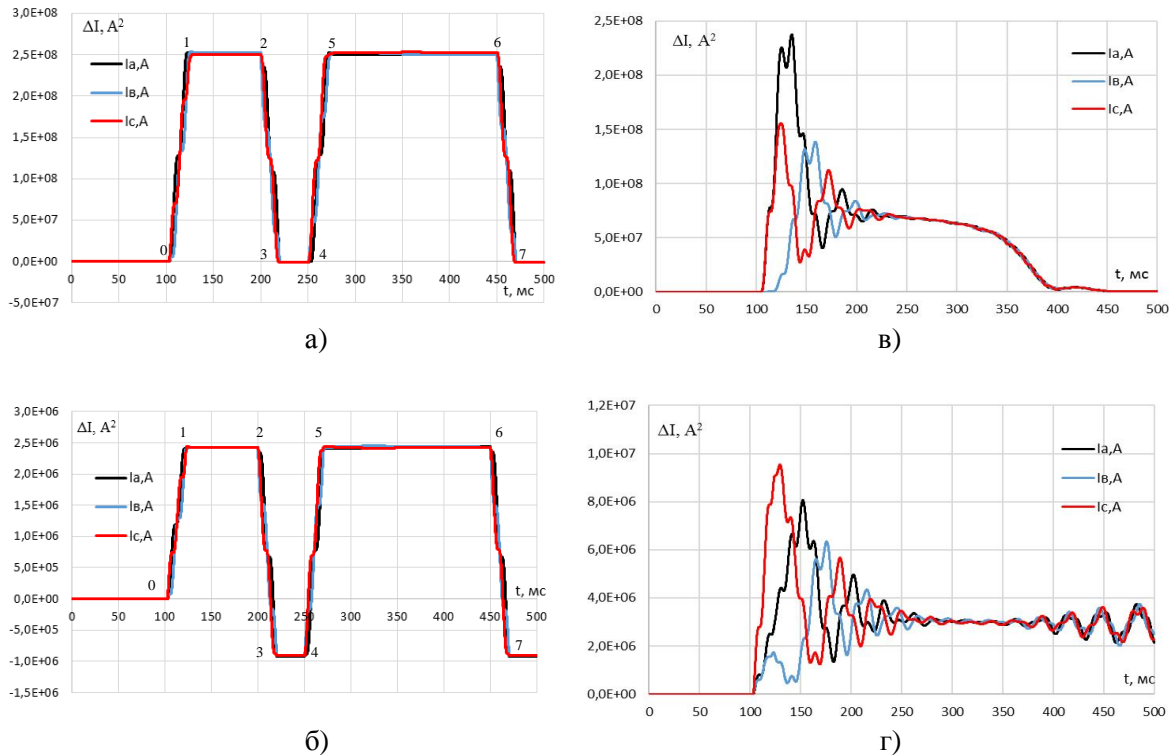


Рис. 5. Квадратично-інтегральні характеристики фаз за: а – трифазного КЗ на віддалі 1 км від джерела живлення; б – трифазного КЗ на віддалі 39 км від джерела живлення; в – пуску групи двигунів на віддалі 1 км від джерела живлення; г – пуску групи двигунів на віддалі 39 км від джерела живлення

З рис. 5 видно, що КІХ перехідного процесу трифазного КЗ відрізняється від КІХ перехідного процесу пуску двигунів. Причому на характеристику пуску двигунів (рис. 5, в, г) значно впливає відстань від місця їх встановлення до джерела живлення.

За пуску двигунів зміна інтегралів фаз  $\Delta I(t)_A$ ,  $\Delta I(t)_B$  та  $\Delta I(t)_C$  (табл. 2) не є однаковою (аналогічно до табл. 1). Амплітуда цих струмів є різною як і швидкість наростання КІХ. Своєю чергою КІХ струмів фаз за режиму трифазного КЗ є більше подібними. Тобто відрізнити режим трифазного КЗ від режиму пуску двигунів можна за величиною максимальних значень КІХ фаз А, В і С та їх швидкістю зміни.

Остаточною ознакою для розпізнавання аварійних ситуацій може бути порівняння самих перехідних КІХ (ПКІХ) фаз для обох досліджуваних режимів (рис. 6).

На рис.6 наведено результат порівняння ПКІХ фаз аномальних ситуацій (4).

$$k_{AB} = \frac{k_{\Delta A}}{k_{\Delta B}}, \quad k_{BC} = \frac{k_{\Delta B}}{k_{\Delta C}}, \quad k_{CA} = \frac{k_{\Delta C}}{k_{\Delta A}}, \quad (4)$$

де  $k_{\Delta A}$ ,  $k_{\Delta B}$ ,  $k_{\Delta C}$  – функції порівняння ПКІХ з еталонним образом аномальної ситуації (5).

$$k_{\Delta I(t)_{(A,B,C)}} = \frac{\Delta I(t)_{(A,B,C)}}{\Delta I_{\max(A,B,C)}}, \quad (5)$$

де  $\Delta I(t)_{(A,B,C)}$  – миттєві значення ПКІХ відповідних фаз;  $\Delta I_{\max(A,B,C)}$  – максимальне значення ПКІХ наприкінці першого періоду аномальної ситуації.

**Показники квадратично-інтегральної характеристики  
залежно від виду аномальної ситуації та її місця виникнення**

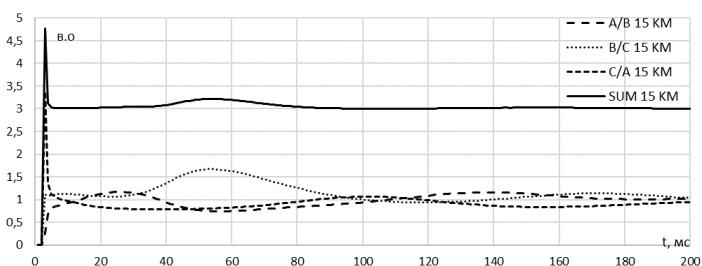
Відст.	1 км				39 км			
	Режим трифазного КЗ		Режим пуску двигуна		Режим трифазного КЗ		Режим пуску двигуна	
	Макс. знач., $A^2$	Швидк. зміни $A^2/мс$	Макс. знач., $A^2$	Швидк. зміни, $A^2/мс$	Макс. знач., $A^2$	Швидк. зміни, $A^2/мс$	Макс. знач., $A^2$	Швидк. зміни, $A^2/мс$
А	$2,53 \cdot 10^8$	$1,27 \cdot 10^{10}$	$2,25 \cdot 10^8$	$1,13 \cdot 10^{10}$	$2,41 \cdot 10^7$	$1,21 \cdot 10^9$	$3,08 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^9$
В	$2,33 \cdot 10^8$	$1,16 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^8$	$2,42 \cdot 10^7$	$1,21 \cdot 10^9$	$1,57 \cdot 10^7$	$7,85 \cdot 10^8$
С	$2,15 \cdot 10^8$	$1,09 \cdot 10^{10}$	$1,55 \cdot 10^8$	$7,75 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^9$	$9,08 \cdot 10^7$	$4,54 \cdot 10^9$

Еталонними ПКІХ виберемо режим трифазного КЗ та пуску електродвигунів на відстані від джерела живлення 1 км. Для кращої наочності порівняємо ПКІХ з еталонними ПКІХ у випадку аномальних ситуацій на відстані 15 та 39 км.

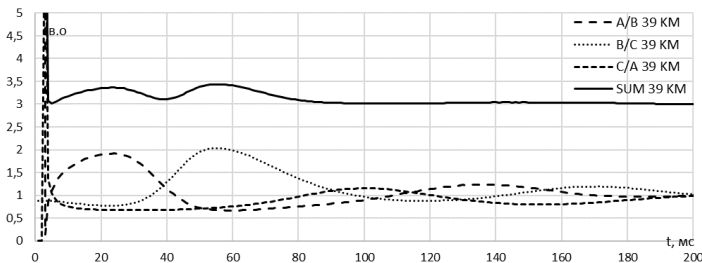
У випадку виникнення трифазного КЗ їх функція порівняння ПКІХ фаз перебуває в околі одиниці (рис. 6, а, б). Також видно, що сума ПКІХ трьох фаз практично дорівнює трьом.

З рис. 6, в, г видно, що порівняльні функції ПКІХ не є однаковими. Ця особливість пов'язана з впливом відстані від джерела живлення до встановлених двигунів. Проте ця відстань є завчасно відомою, оскільки встановлюють двигуни на енергетичних об'єктах відповідно до розроблених проектів. У той час, коли відстань від джерела живлення до місця виникнення трифазного КЗ є випадковою.

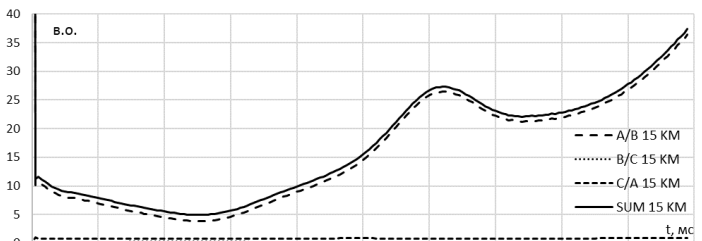
Також варто відзначити, що у випадку пуску електродвигунів кожній порівняльній функції властивий певний нахил. Наприклад, одне з міжфазних відношень прямує до певного значення, яке значно перевищує інші відношення (на рис. 6, в відношення А/В у момент часу 0,0124 с становить 26,4 в.о.; на рис. 6, г відношення В/С – 14,2 в.о. в момент часу – 0,0052 с), в той час коли друге відношення прямує до нуля (на рис. 6, в максимальне значення В/С – 0,344 в.о. в момент часу 0,0049 с; на рис. 6, г відношення А/В до моменту часу 0,0137 с становило менше за 0,181 в.о.), а третє – змінюється в околі певної величини (на рис. 6, в відношенні С/А змінюється в околі 1 в.о.; на рис. 6, г відношення С/А змінюється в околі 3 в.о.).



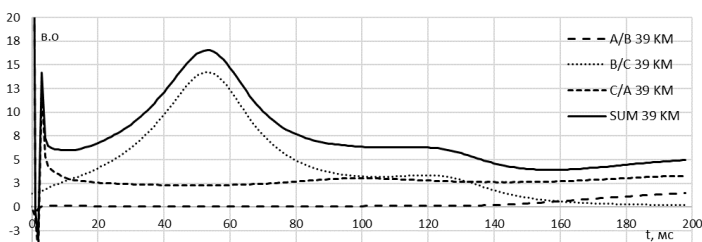
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Відношення ПКІХ фаз:

- а – трифазного КЗ на віддалі 15 км від джерела живлення;  
б – трифазного КЗ на віддалі 39 км від джерела живлення;  
в – пуску групи двигунів на віддалі 15 км від джерела живлення;  
г – пуску групи двигунів на віддалі 39 км від джерела живлення

## Висновки

1. Особливості квадратично-інтегральних різницево-модульних характеристик не дають змоги розпізнати режим трифазного КЗ від режиму пуску асинхронних двигунів на довгих лініях, на відміну від особливостей квадратично-інтегральних характеристик.

2. Порівняння КІХ координат режиму з еталонними КІХ дозволяє швидкодібно розпізнати аварійну ситуацію на лініях значної довжини за час, що відповідає півперіоду промислової частоти.

3. Аналізуючи функцію порівняння ПКІХ фаз координат режиму пуску двигунів, можна відзначити, що: по-перше, одна з функцій порівняння ПКІХ фаз змінюється в околі 1 в.о., по-друге, інша функція порівняння ПКІХ фаз змінюється в околі нуля, по-третє, остання функція порівняння ПКІХ фаз прямує до певного значення, яке значно перевищує інші відношення.

4. Зміна характеру функції порівняння ПКІХ фаз координат режиму пуску двигунів спричинена зміною відстані від джерела живлення до встановлених двигунів. Оскільки ця відстань є завчасно відомою, то визначення відповідної ПКІХ не становить труднощів.

1. Синєглазов В. М. Автоматизоване проектування систем релейного захисту / В. М. Синєглазов, О. І. Варченко, О. П. Барановська // Наукові праці Національного авіаційного університету. Серія: Електроніка та системи управління. – Київ : Національний авіаційний університет, 2010. – Вип. № 2(24). – С. 158 – 164. 2. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем : навч. посіб. / В. П. Кідиба. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2015. – С. 410–421. 3. Спосіб швидкодіючого максимального струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань [Електронний ресурс]: Патент України № 101084 / Кобозев О. С., Серєда О. Г. – № 101084 ; заявл. 19.07.2011 ; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. – 6 с. – Режим доступу: / <http://uapatents.com/16-101084-sposib-shvidkodiuyuchogo-maksimalnogo-strumovogo-zakhistu-z-visokoju-chutlivistyu-do-strumiv-viddalenikh-korotkikh-zamikan.html>. 4. Лусяк Г. М. Розпізнавання аварійних ситуацій ліній електропередавання / Г. М. Лусяк, І. І. Островка, І. О. Сабадаш // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – Вип. 6(123). – с.79 – 83. 5. Равлик О. М. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики / О. М. Равлик, Т. М. Гречин, В. Й. Іваноньків// Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка": Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 997. – № 340. – С. 96–101. 6. Возна Н. Я. Ідентифікація структуризованих даних на основі нелінійного квадратично-імпульсного перетворення / Н. Я. Возна, Т. М. Заведюк, Я. М. Николайчук, І. І. Островка, І. І. Сабадаш // Праці VII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2014. – С. 60–61.