

Г. М. Лисяк¹
 І. І. Островка¹
 І. О. Сабадаш¹

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Наведені результати досліджень струмів трифазних коротких замикань та пуску асинхронних двигунів в електричній мережі 10 кВ. Досліджено традиційні способи захисту ліній електропередач мереж 6–35 кВ. Для розпізнавання перехідних режимів трифазних коротких замикань та пусків асинхронних двигунів запропоновано різницево-інтегральний метод, який базується на неперервному формуванні різницево-інтегральних характеристик фаз, як функції $\Delta H_S(t)$, шляхом обчислення для кожного моменту часу t різниці інтегралів $H_S(t)$, $H_S(t - T)$ квадратичних функцій миттєвих значень фазних струмів $i_s(t)$, $i_s(t - T)$, зсунутих в часі, зазвичай, на період T коливань змінного струму основної частоти. Обчислено міжфазний коефіцієнт різницево-інтегральних характеристик фаз та здійснено приведення його до еталонних міжфазних коефіцієнтів. Встановлено, що впродовж 3,3 мс з моменту виникнення збурення характерні коефіцієнти розпізнавання є подібними та меншими за 1 як для трифазного короткого замикання, так і для пуску асинхронних двигунів, що не дозволяє розпізнати режим. Впродовж наступних 11...12 мс характерні коефіцієнти розпізнавання змінюються та відрізняються для згаданих режимів між собою. При цьому коефіцієнти розпізнавання за трифазних коротких замикань монотонно зростають і практично стають рівними одиниці впродовж 5...6 мс. А характер зростання коефіцієнтів розпізнавання за пуску асинхронних двигунів залежить від моменту пуску і в усіх випадках їх значення в декілька разів перевищують одиницю через 11...12 мс. Аналіз результатів дослідження показав, що для розглянутої мережі значення запропонованих критеріїв розпізнавання режиму трифазного короткого замикання не залежать від місця замикання, оскільки значення коефіцієнта розпізнавання $k_p(t)$ стає близьким до 1 через час розпізнавання T_p , 14...15 мс від моменту виникнення збурення. Застосування різницево-інтегрального методу дозволяє чітко відрізнити режим трифазного короткого замикання від режиму пуску асинхронних двигунів через 15 мс з моменту виникнення замикання.

Ключові слова: розпізнавання, ідентифікація, трифазне коротке замикання, накид навантаження, пуск асинхронних двигунів.

І. Вступ

Значна частка пристроїв релейного захисту (РЗ), які функціонують в електричних мережах, виконані на електромеханічній елементній базі. В останні роки інтенсивніше застосовують пристрої РЗ, виконані на мікропроцесорній елементній базі, однак абсолютна більшість з них використовує алгоритми функціонування, розроблені на основі принципів роботи електромеханічних пристроїв. Зазвичай вони встановлюють і реагують на факт перевищення координатами режиму певних допустимих значень, що задаються «уставками». Поряд з цим, можливості мікропроцесорних пристроїв (МП) створюють передумови для реалізації нових і ефективніших алгоритмів. Найсуттєвішою перевагою МП, на думку авторів, є простота реалізації запам'ятовування інформації про миттєві значення координат режиму та практично необмежені можливості її подальшого аналізу й прийняття рішень в темпі процесу.

Традиційними способами захисту ЛЕП мереж 6–35 кВ є струмові відсічки, струмові захисти з залежною або незалежною витримкою часу та максимальний струмовий захист [1]. В роботу струмової відсічки вводять затримку часу близько 0,06...0,1 с, що необхідно для узгодження роботи захисту з дією розрядників, які спрацьовують під час атмосферних розрядів [1]. До захистів з дещо іншим підходом визначання аварійних ситуацій можна віднести спосіб швидкодійного струмового захисту [2]. Разом з цим, в практиці експлуатації електричних мереж відомі ситуації, коли важко відрізнити перехідний режим трифазного короткого замикання (КЗ) від перехідних

експлуатаційних режимів через те, що значення їх координат режиму можуть бути співмірними, зокрема, під час накидів навантаження чи пуску асинхронних двигунів (АД).

Метою досліджень є розроблення принципово нового підходу до реалізації захисту елементів електричних мереж, що базується на формуванні в темпі процесу певних критеріїв, які дозволяють розпізнавати ту чи іншу режимну ситуацію (аварійну чи експлуатаційну).

II. Аналіз аварійних ситуацій ліній електропередач

Для розпізнавання перехідних режимів трифазних коротких замикання та пусків АД запропоновано різницево-інтегральний метод, який базується на неперервному формуванні різницево-інтегральних характеристик (РІХ) фаз, як функції $\Delta H_S(t)$, шляхом обчислення для кожного моменту часу t різниці інтегралів $H_S(t)$, $H_S(t - T)$ квадратичних функцій миттєвих значень фазних струмів $i_s(t)$, $i_s(t - T)$, зсунутих в часі, зазвичай, на період T коливань змінного струму основної частоти

$$\Delta H_S(t) = H_S(t) - H_S(t - T) = \int i_S^2(t) dt - \int i_S^2(t - T) dt, \quad (1)$$

де $s = \{A, B, C\}$ — фаза лінії електропередачі.

Далі розраховуємо множини відповідних міжфазних коефіцієнтів РІХ реальної лінії електропередачі за такими формулами:

$$k_{AC}(t) = \frac{\Delta H_A(t)}{\Delta H_C(t - T_\alpha)}; \quad k_{BA}(t) = \frac{\Delta H_B(t)}{\Delta H_A(t - T_\alpha)}; \quad k_{CB}(t) = \frac{\Delta H_C(t)}{\Delta H_B(t - T_\alpha)}, \quad (2)$$

де $T_\alpha = \frac{\alpha}{2 \cdot \pi} T$ — розрахунковий часовий зсув, с; α — розрахунковий кут.

Уведення розрахункового часового зсуву T_α зумовлено тим, що, як відомо, в усталеному режимі інтеграл квадратів миттєвих значень синусоїдного струму змінюється з подвійною частотою 2ω

$$H(t) = \int I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t + \alpha) dt = I_m^2 \left(\frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2(\omega t + \alpha) \right). \quad (3)$$

Це означає, що в усталених режимах за $\alpha = 60^\circ$ значення міжфазних коефіцієнтів РІХ (2) дорівнюватимуть (прямуватимуть до) одиниці, а під час перехідних режимів на їх характер і значення впливатимуть аперіодичні складові струмів фаз, що дозволить, як буде показано нижче, розпізнавати режим трифазного КЗ.

Тут зазначимо, що за наведеними формулами (1) і (2) обчислюємо множини міжфазних коефіцієнтів РІХ ліній електропередач як реальних електричних мереж ($k_{ijp}(t)$) так і еталонної схеми ($k_{ije}(t)$). Дослідження показали, що для розпізнавання режимних ситуацій доцільно користуватися значеннями міжфазних коефіцієнтів РІХ реальних ліній електропередач, зведеними до відповідних значень міжфазних коефіцієнтів РІХ еталонної лінії в схемі, взятій за еталонну, а саме:

$$k_{AC^*}(t) = \frac{k_{ACp}(t)}{k_{ACe}(t)}; \quad k_{BA^*}(t) = \frac{k_{BAp}(t)}{k_{BAe}(t)}; \quad k_{CB^*}(t) = \frac{k_{CBp}(t)}{k_{CBe}(t)}. \quad (4)$$

Для розпізнавання режимних ситуацій авторами запропоновано користуватися коефіцієнтом розпізнавання $k_p(t)$ режимної ситуації, множину значень якого формуємо як усереднену суму зведених за (4) міжфазних коефіцієнтів РІХ $k_{ij^*}(t)$ реальної лінії електропередачі

$$k_p(t) = (k_{AC^*}(t) + k_{BA^*}(t) + k_{CB^*}(t))/3. \quad (5)$$

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.

Покажемо, що критеріями розпізнавання перехідних режимів трифазного КЗ є характерні значення коефіцієнтів розпізнавання для характерних проміжків часу, що дозволяє швидко і однозначно розпізнавати саме такі перехідні режими.

На рис. 1 показано узагальнену принципову (рис. 1а) та заступну (рис. 1б) схеми електромережі 10 кВ, яка прийнята за реальну для комп'ютерних досліджень режимів трифазного КЗ та пуску асинхронних двигунів (АД). Складовими елементами схеми є: джерело живлення С ($U_c = 115$ кВ,

$z_c = (1,6 + j3,2)$ Ом); силовий трансформатор Т типу ТМН–6300/110/10; лінія Л1 довжиною 5 км, яка виконана кабелем АПВП — 3×50/10 кВ; навантаження $\dot{S}_{нав} = (3,632 + j2,724)$ МВА, яке задається або активно-індуктивними опорами (1), або групою АД (2), як показано на рис. 1б. Цифрове моделювання процесів здійснювалось в програмному комплексі RE [3].

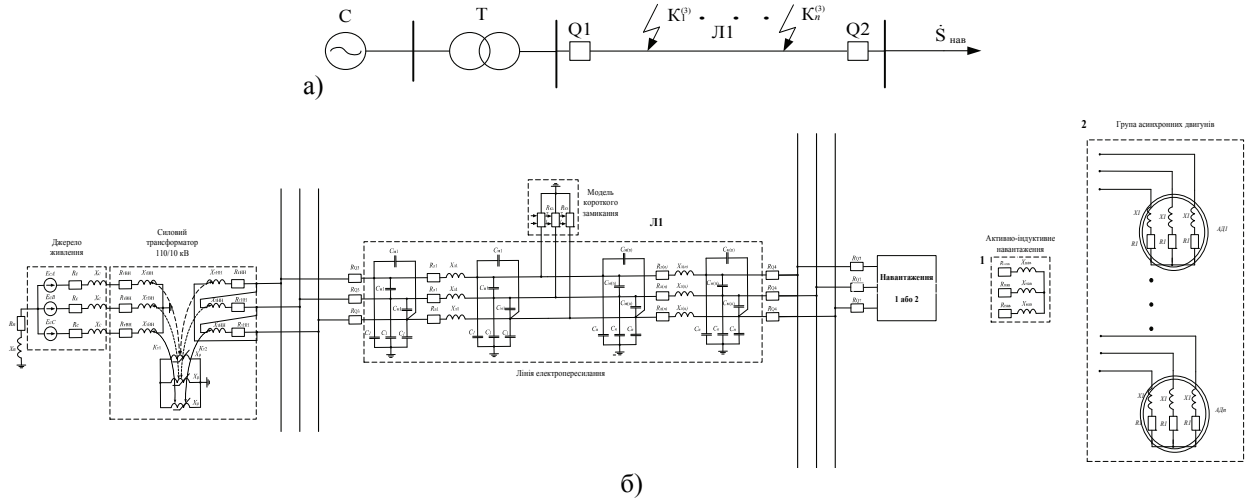


Рис. 1. Схеми електричної мережі для дослідження перехідних режимів: а — принципова; б — заступна

Для формування критеріїв розпізнавання режимних ситуацій використовуватимемо значення струмів фаз на початку лінії Л1 (рис. 1). Розрахунки перехідних режимів трифазних КЗ в різних точках лінії Л1 з кроком 0,1/ від початку лінії до її кінця здійснювались для множини моментів виникнення КЗ, починаючи з моменту переходу струму фази А через нуль з кроком $\Delta t = T/12$. На рис. 2 показано результати моделювання перехідного режиму трифазних КЗ на відстані 0,1/ від початку лінії та для моменту часу проходження струму фази А через нуль.

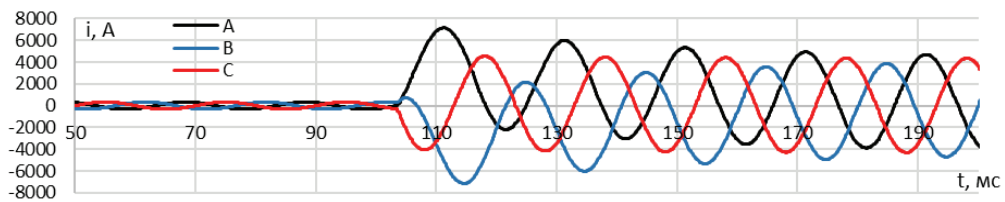


Рис. 2. Струми фаз на початку лінії Л1 під час трифазного КЗ на відстані 0,1/ від її початку та для моменту часу проходження струму фази А через нуль

Моделювання режимів пуску АД здійснювалось також для різних моментів часу, подібно до моделювання режимів трифазних КЗ. На рис. 3 показано результати моделювання одного з множини розрахованих режимів пуску АД для моменту часу проходження струму фази А через нуль.

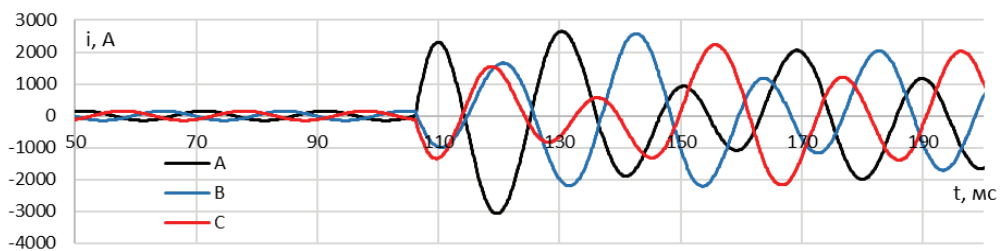


Рис. 3. Струми фаз на початку лінії Л1 під час пуску АД та для моменту часу проходження струму фази А через нуль

За результатами комп'ютерного моделювання обчислені за формулами (1), (2) міжфазні коефіцієнти РІХ реальної лінії Л1 для множини вищевказаних початкових умов виникнення режимів трифазних КЗ та пуску АД.

Принципова та заступна схеми взятої за еталонну електричної мережі зображені на рис. 4а, б, відповідно. Складовими елементами цієї схеми є: джерело живлення С напругою 10 кВ; лінія електропередачі Л довжиною 1 км; навантаження $\dot{S}_{нав}$, параметри якого відповідають значенню допустимого струму лінії; модель короткого замикання в кінці лінії.

Моделювання перехідних режимів трифазних КЗ в кінці еталонної лінії здійснювалося для умов їх виникнення, аналогічних вищевикладеним для реальної лінії.

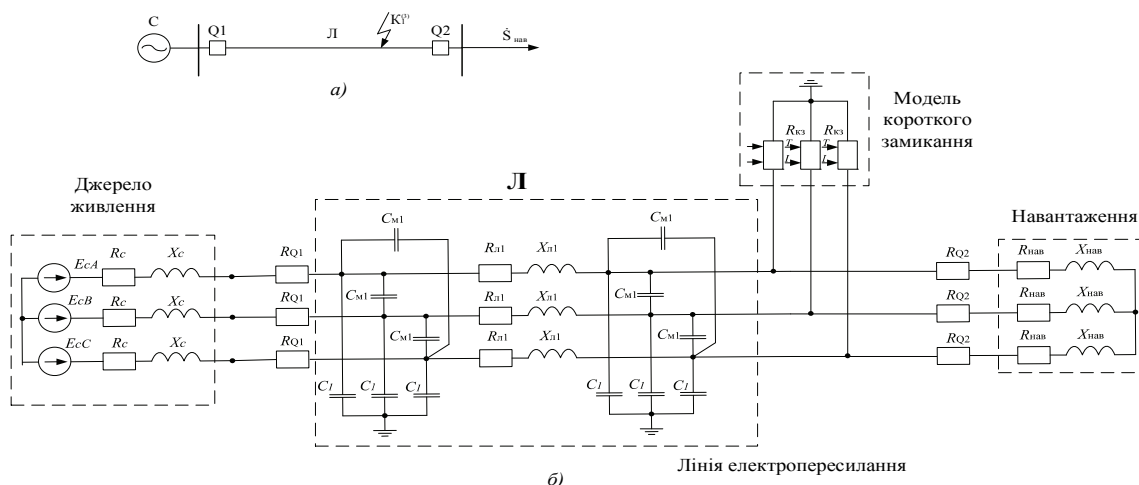


Рис. 4. Схеми еталонної електричної мережі для дослідження перехідних режимів: а — принципова; б — заступна

За результатами комп'ютерного моделювання обчислені за формулами (1), (2) і зображені на рис. 5 міжфазні коефіцієнти РІХ, сформовані за значеннями струмів фаз на початку лінії Л еталонної схеми під час трифазного КЗ в її кінці (надалі еталонні міжфазні коефіцієнти).

Аналіз залежностей (рис. 5) показав, що для перехідного режиму трифазного КЗ в еталонній схемі характерними є два інтервали: від 0 до 3,3 мс ($k_{ije}(t)$ зростає) та від 3,3 мс і більше ($k_{ije}(t)$ спадає). Характер міжфазних коефіцієнтів РІХ пояснюється тим, що на першому інтервалі використовується значення РІХ як перехідного режиму трифазного КЗ, так і доаварійного режиму, а на другому — тільки РІХ перехідного режиму трифазного КЗ. З моменту часу 3,3 мс відбувається зменшення міжфазних коефіцієнтів РІХ до значення рівного одиниці практично за 11...12 мс.

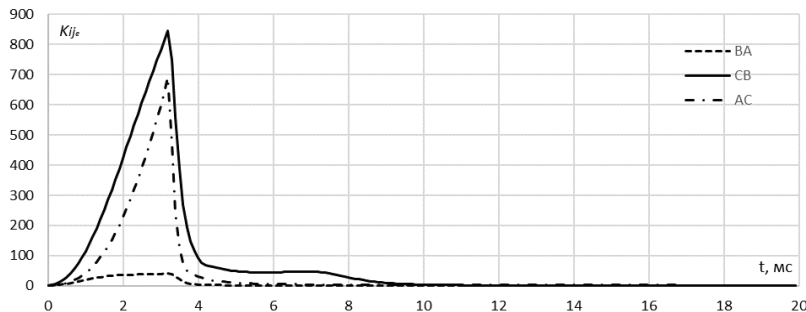


Рис. 5. Міжфазні коефіцієнти РІХ $k_{ije}(t)$ за трифазного КЗ в еталонній схемі

За формулами (3), (4) розраховані множини значень коефіцієнтів розпізнавання $k_p(t)$ перехідних режимів під час трифазних коротких замикання та пусків АД.

На рис. 6 показано характеристики коефіцієнтів розпізнавання за зміни місця виникнення трифазного КЗ та пусків АД. За еталонні взяті міжфазні коефіцієнти РІХ трифазних КЗ в еталонній схемі рис. 5.

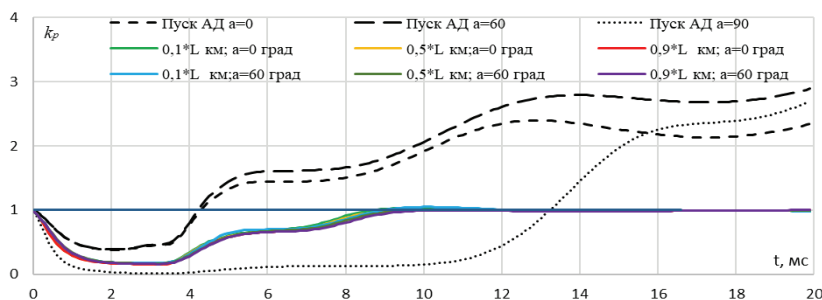


Рис. 6. Коефіцієнти розпізнавання перехідних режимів трифазних КЗ та пуску АД

Як видно з рис. 6, впродовж 3,3 мс з моменту виникнення збурення характеристики k_p є подібними та меншими 1 як для трифазного КЗ, так і для пуску АД, що не дозволяє розпізнати режим. Впродовж подальших 11...12 мс характеристики коефіцієнтів розпізнавання змінюються та відрізняються для згаданих режимів між собою. При цьому k_p трифазного КЗ монотонно зростають і практично стають рівними одиниці впродовж 5...6 мс. А характер зростання k_p пуску АД залежить від моменту пуску АД і в усіх випадках їх значення в декілька разів перевищують одиницю через 11...12 мс.

Тому остаточним критерієм розпізнавання режиму трифазного КЗ від пуску АД є те, що значення $k_p(t)$ стає близьким до 1 через $T_p = 14...15$ мс від моменту виникнення збурення.

Висновки

1. Застосування інтегрально-різницевого методу дозволило запропонувати критерії розпізнавання режимної ситуації, а саме коефіцієнт розпізнавання та інтервал часу розпізнавання.

2. Аналіз результатів дослідження показав, що для розглянутої мережі значення запропонованих критеріїв розпізнавання режиму трифазного КЗ не залежать від місця КЗ, оскільки значення коефіцієнта розпізнавання $k_p(t)$ стає близьким 1 через час розпізнавання $T_p = 14...15$ мс від моменту виникнення збурення.

3. Застосування інтегрально-різницевого методу дозволяє чітко відрізнити режим трифазного КЗ від режиму пуску АД через 15 мс з моменту виникнення КЗ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] В. П. Кідиба, *Релейний захист електроенергетичних систем*. Львів, Україна: вид-во НУ «Львівська політехніка», 2015, с. 410-421, ISBN 978-617-607-827-2.

[2] О. С. Кобозев, та О. Г. Середа, «Спосіб швидкодіючого максимального струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань,» *Патент України № 101084*, 25.02.2013, [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://uapatents.com/16-101084-sposib-shvidkodiuychogo-maksimalnogo-strumovogo-zakhistu-z-visokoyu-chutlivistyu-do-strumiv-viddalenikh-korotkikh-zamikan.html>.

[3] О. М. Равлик, Т. М. Гречин, та В. Й. Іваноньків, «Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики,» *Вісник ДУ «Львівська політехніка», Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи*, № 340, с. 96-101, 1997.

Рекомендовано кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.01.2018

Лисяк Георгій Миколайович — канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики та систем управління;
Островка Іван Іванович — аспірант кафедри електроенергетики та систем управління, e-mail: ostrovka123@gmail.com ;

Сабадаш Ігор Олександрович — канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики та систем управління.
Національний університет «Львівська політехніка», Львів

G. M. Lysiak¹
I. I. Ostrovka¹
I. O. Sabadash¹

Features Identification of Emergency Situation of Line Transmission

¹Lviv Polytechnic National University

The results of research of the currents of three-phase short circuit and start-up of induction motors electric network 10 kV are presented in the article. The traditional ways of protecting the transmission lines of networks 6–35 kV are investigated. For the recognition of the transition modes of three-phase short circuits and the start-up of induction motors there has been proposed the difference-integral method, which is based on the continuous formation of the difference-integral characteristics of the phases as a function of $\Delta H_S(t)$ by calculating the difference between the integrals $H_S(t)$, $H_S(t - T)$ of the quadratic functions of the instantaneous values of the phase currents $i_s(t)$, $i_s(t - T)$, shifted in time, usually for the period T of the oscillations of the alternating current of the main frequency. The interphase coefficient of the difference-integral characteristics of the phases is calculated and its reduction to the reference interphase coefficients has been calculated. It is established that during 3,3 ms from the moment of perturbation the character of the recognition coefficient is similar and smaller than 1 for

both the three-phase short circuit and for the start-up of induction motors, which does not allow recognizing the mode. During the next 11...12 ms, the character of the recognition coefficients varies and differs for each of these modes. At the same time, the recognition coefficients for three-phase short circuits increase monotonically and practically become equal to the unit for 5...6 ms. And the character of the growth of the recognition coefficients at the start of the induction motors depends on the moment of start-up and in all cases their values are several times greater than the unit in 11...12 ms. The analysis of the results of the study showed that for the considered network the values of the proposed criteria for recognition of the three-phase short-circuit mode do not depend on the location of the circuit, since the value of the recognition factor $k_p(t)$ becomes close to 1 due to the recognition time T_p 14...15 ms from the moment of perturbation. The use of the difference-integral method allows clearly distinguishing the mode of three-phase short circuit from the mode of starting induction motors in 15 ms from the moment of the short circuit.

Keywords: recognize, identification, three-phase short circuit, engine start.

Lysiak Heorhii M. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electricity and Control Systems;

Ostrovka Ivan I. — Post-Graduate Student of the Chair of Electricity and Control Systems, e-mail: ostrovka123@gmail.com ;

Sabadash Ihor O. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electricity and Control Systems

Г. Н. Лысяк¹
И. И. Островка¹
И. О. Сабадаш¹

Особенности распознавания аварийных ситуаций линий электропередачи

¹Национальный университет «Львовская политехника»

Приведены результаты исследований токов трехфазных коротких замыканий и пуска асинхронных двигателей в электрической сети 10 кВ. Исследованы традиционные способы защиты линий электропередач сетей 6–35 кВ. Для распознавания переходных режимов трехфазных коротких замыкания и пусков асинхронных двигателей предложено дифференциально-интегральный метод, основанный на непрерывном формировании дифференциально-интегральных характеристик фаз, как функции $\Delta H_S(t)$, путем вычисления для каждого момента времени t разницы интегралов $H_S(t)$, $H_S(t - T)$ квадратичных функций мгновенных значений фазных токов $i_s(t)$, $i_s(t - T)$, сдвинутых во времени, как правило, на период T колебаний переменного тока основной частоты. Вычислены межфазные коэффициенты дифференциально-интегральных характеристик фаз и осуществлено приведение их к эталонным межфазным коэффициентам. Установлено, что в течение 3,3 мс с момента возникновения возмущения характеры коэффициентов распознавания подобны и меньше 1, как для трехфазного короткого замыкания так и для пуска асинхронных двигателей, что не позволяет распознать режим. В течение следующих 11...12 мс характер коэффициентов распознавания меняется и отличается для упомянутых режимов между собой. При этом коэффициенты распознавания при трехфазных коротких замыканиях, монотонно растут и практически становятся равными единице в течение 5...6 мс. А характер роста коэффициентов распознавания при пуске асинхронных двигателей зависит от момента пуска и во всех случаях их значения в несколько раз превышают единицу через 11...12 мс. Анализ результатов исследования показал, что для рассматриваемой сети значение предложенных критериев распознавания режима трехфазного короткого замыкания не зависит от места замыкания, поскольку значение коэффициента распознавания $k_p(t)$ становится близким 1 через время распознавания 14...15 мс с момента возникновения возмущения. Применение дифференциально-интегрального метода позволяет четко отличить режим трехфазного короткого замыкания от режима пуска асинхронных двигателей через 15 мс с момента возникновения замыкания.

Ключевые слова: распознавание, идентификация, трехфазное короткое замыкание, пуск двигателей.

Лысяк Георгий Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики и систем управления.

Островка Иван Иванович — аспирант кафедры электроэнергетики и систем управления, e-mail: ostrovka123@gmail.com ;

Сабадаш Игорь Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики и систем управления