

УДК 621.311

І. Зіа, Т.Ю. Курач

## АНАЛІЗ САМОЗАПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

### Вступ

Характерною особливістю розвитку електроенергетики є нарощування потужностей, зумовлене ростом економіки країни. У цих об'єктивно існуючих умовах першочерговою задачею є підтримання на необхідному рівні показників безвідмовності і довговічності обладнання.

За умов інтенсивного споживання електроенергії виникає необхідність у підвищенні експлуатаційної надійності компонентів електричної станції. Одним із найбільш важливих та відповідальних елементів електричної установки є асинхронний двигун.

Проблема підвищення експлуатаційної надійності асинхронних двигунів має першочергове значення, адже вони прямо впливають на основне обладнання технологічного процесу виробництва. Експлуатаційна надійність асинхронного двигуна залежить не тільки від старіння з часом його елементів, але й від режиму енергосистеми, зокрема від ступеня несиметрії напруги, яка підводиться до асинхронного двигуна, а також від можливості забезпечення самозапуску двигунів при короткочасному зникненні або зниженні напруги.

В енергосистемі можлива поява несиметричних режимів, зумовлених нерівномірним розподілом енергоспоживачів по фазах, а також виникнення режимів поздовжньої несиметрії [1]. Струми оберненої послідовності, що появляються за цих режимів, в режимі самозапуску призводять до виникнення від'ємного обертового моменту, який впливає на умови самозапуску двигуна. Тому задача оцінки впливу несиметрії напруги в енергосистемі на самозапуск асинхронного двигуна є актуальною.

Аналізу самозапуску асинхронних двигунів присвячено велику кількість праць [1–3] та ін. Однак в усіх цих публікаціях дослідження самозапуску двигунів проводилося за умови збереження симетрії напруги в енергосистемі.

### Постановка задачі

Метою статті є розробка математичної моделі і алгоритму розрахунку самозапуску асинхронного двигуна (АД) при несиметричному режимі, програмна реалізація запропонованого методу та алгоритму (в програмному середовищі MatLab), що дає можливість оперативному персоналу приймати більш ефективні та обгрунтовані рішення щодо експлуатації двигунів.

### Модель асинхронного двигуна

Для аналізу електромеханічних перехідних процесів асинхронного двигуна значного поширення дістала модель у формі ЕРС, яка враховує перехідні процеси в обмотці ротора [2]:

$$U_d = e'_d - x'_s i_q,$$

$$U_q = e'_q - x'_s i_d,$$

$$\frac{de'_d}{dt} = -\frac{1}{T_{d1}} e'_d - S e'_q \frac{N}{T_{d1}} i_q,$$

$$\frac{de'_q}{dt} = -\frac{1}{T_{d1}} e'_q - S e'_d \frac{N}{T_{d1}} i_q,$$

$$T_j \frac{ds}{dt} = m_e - m_c,$$

де  $U_d, U_q$  – складові напруги по поздовжній і поперечній осях;  $i_d, i_q$  – складові струмів статора по поздовжній і поперечній осях;  $e'_d, e'_q$  – перехідні ЕРС по поздовжній та поперечній осях;  $T_{d1}$  – стала часу обмотки ротора;  $m_e$  – електромагнітний момент двигуна;  $m_c$  – момент опору механізму;  $N = x_s - x'_s$ ;  $x'_s$  – перехідний опір двигуна;  $x_s$  – синхронний опір двигуна;  $T_j$  – стала інерції двигуна;  $S$  – ковзання двигуна.

### Алгоритм розрахунку самозапуску асинхронних двигунів при несиметрії напруги в системі

Самозапуск групи АД розглянемо за схемою, наведеною на рис. 1. На рисунку:  $E_1, E_2$  – ЕРС відповідно прямої і оберненої послідовності енергосистеми;  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  – еквівалентні напру-

ги прямої і оберненої послідовностей;  $x_{вн}$  – внутрішній опір двигуна; АД<sub>1</sub>, ..., АД<sub>n</sub> – асинхронні двигуни.

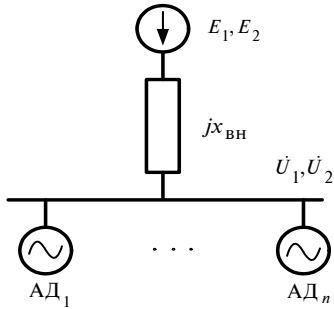


Рис. 1. Схема електропостачання асинхронних двигунів

Відповідно до схеми електропостачання АД введемо спрощену схему заміщення прямої послідовності АД [3] (рис. 2).

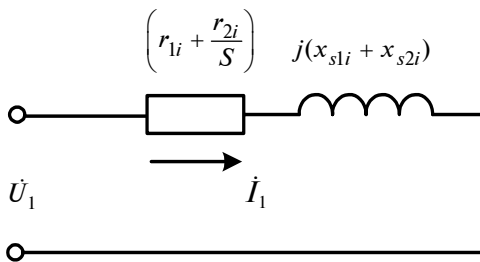


Рис. 2. Схема заміщення прямої послідовності асинхронного двигуна

Еквівалентний опір прямої послідовності *i*-го двигуна становить

$$\dot{Z}_{двi1} = \left( r_{1i} + \frac{r_{2i}}{S} \right) + j(x_{s1i} + x_{s2i}),$$

де  $r_{1i}, r_{2i}$  – активний опір прямої і оберненої послідовностей;  $x_{s1i}, x_{s2i}$  – синхронний опір прямої і оберненої послідовностей. Тут і далі індексами “1” і “2” позначаються відповідно пряма і обернена послідовності.

Для двигунів, приєднаних до шин, еквівалентний опір прямої послідовності визначається з виразу

$$\dot{Z}_{eдв1} = \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_{дв11}} + \dots + \frac{1}{\dot{Z}_{двn1}}} = r_{eдв1} + jx_{eдв1},$$

а еквівалентний опір всієї схеми прямої послідовності – з формули

$$\dot{Z}_{e1} = r_{eдв1} + j(x_{вн} + x_{eдв1}).$$

Тоді напруга прямої послідовності на шинах приєднання двигунів становитиме

$$\dot{U}_1 = E_1 \frac{Z_{eдв1}}{Z_{e1}} = U'_1 + jU''_1,$$

де модуль напруги прямої послідовності матиме вигляд

$$U_1 = \sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2}.$$

Розглянемо тепер схему заміщення оберненої послідовності двигуна (рис. 3).

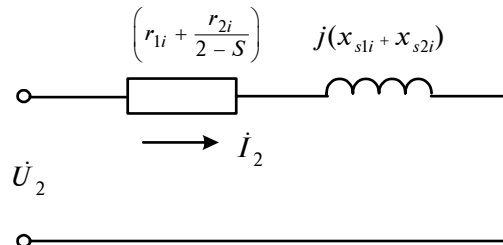


Рис. 3. Схема заміщення оберненої послідовності асинхронного двигуна

Опір оберненої послідовності *i*-го двигуна обчислюється з виразу

$$\dot{Z}_{двi2} = \left( r_{1i} + \frac{r_{2i}}{2-S} \right) + j(x_{s1i} + x_{s2i}),$$

а еквівалентний опір – за формулою

$$\dot{Z}_{eдв2} = \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_{дв12}} + \dots + \frac{1}{\dot{Z}_{двn2}}} = r_{eдв2} + jx_{eдв2}.$$

Тоді еквівалентний опір оберненої послідовності всієї схеми становить

$$\dot{Z}_{e2} = r_{eдв2} + j(x_{вн} + x_{eдв2}).$$

Напруга оберненої послідовності на шинах приєднання двигунів знаходиться за формулою

$$\dot{U}_2 = E_2 \frac{Z_{eдв2}}{Z_{e2}} = U'_2 + jU''_2,$$

а модуль напруги оберненої послідовності – у вигляді

$$U_2 = \sqrt{(U'_2)^2 + (U''_2)^2}.$$

Знаючи напруги прямої і оберненої послідовності на шинах двигуна, можна визначити електромагнітні моменти прямої і оберненої послідовності [3, 4]:

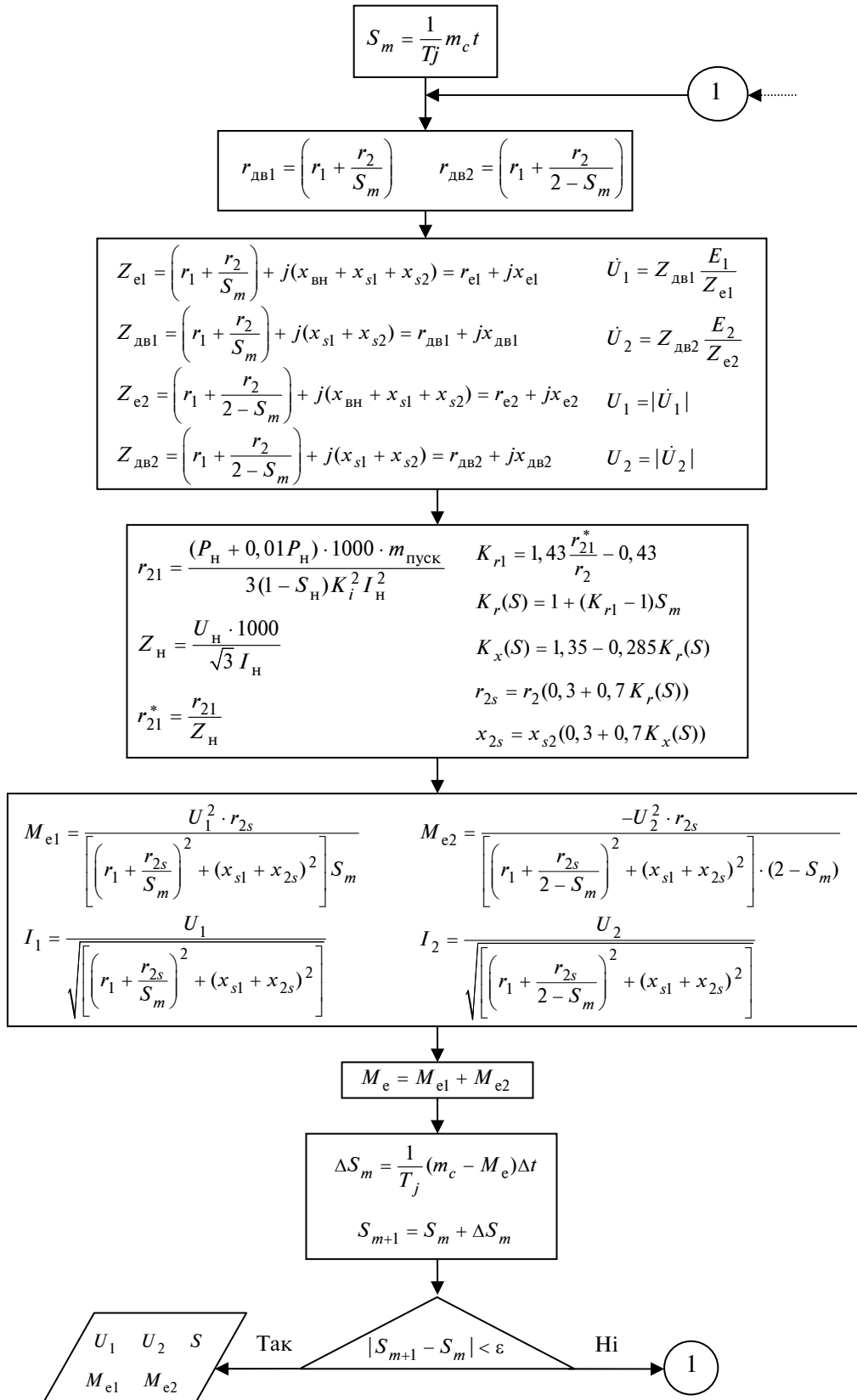


Рис. 4. Алгоритм розрахунку самозапуску АД при несиметрії напруги в енергосистемі

$$m_{e1} = \frac{U_1^2 \cdot r_2}{\left[ \left( r_1 + \frac{r_2}{S} \right)^2 + (x_{s1} + x_{s2})^2 \right] S},$$

$$m_{e2} = - \frac{U_2^2 \cdot r_2}{\left[ \left( r_1 + \frac{r_2}{2-S} \right)^2 + (x_{s1} + x_{s2})^2 \right] (2-S)}.$$

Для розв'язання диференціального рівняння двигуна

$$T_j \frac{ds}{dt} = m_c - m_e,$$

де  $m_e = m_{e1} + m_{e2}$ , використовується метод послідовних інтервалів.

Відповідно до розглянутого методу розроблений алгоритм розрахунку самозапуску асинхронного двигуна при несиметрії напруги в енергосистемі наведено на рис. 4.

Даний алгоритм покладено в основу програми розрахунку самозапуску асинхронного двигуна, що має такі можливості:

- розрахунок самозапуску асинхронного двигуна проводиться в умовах несиметрії напруги в енергосистемі;
- у програмі враховується ефект витиснення струму в обмотці ротора, тобто проводиться корекція активного і реактивного опору обмотки ротора залежно від ковзання;
- момент опору механізму вважається незмінним.

### Приклади

**Кількісна оцінка впливу несиметрії напруги в енергосистемі на самозапуск АД.** Як приклад розглянемо двигун А-114-6, що має такі параметри:  $D = 0,59$  м,  $l = 0,3$  м,  $\alpha = 409$  Вт/см<sup>2</sup>·град,  $P_H = 200$  кВт,  $U_H = 6$  кВ,  $I_H = 23,5$  А,  $\cos \phi = 0,87$ ,  $n_H = 985$  об/хв,  $\eta_H = 0,905$ ,  $K_i = 6,3$ ,  $m_{\text{пуск}} = 1,5$ ,  $m_{\text{max}} = 2,6$ ,  $S_H = 0,015$ ,  $x_{s1} = 0,079$ ,  $r_1 = 0,015$ ,  $x_{s2} = 0,1239$ ,  $r_2 = 0,015$ .

Вплив несиметрії напруги в енергосистемі на режим самозапуску асинхронного двигуна А-114-6 розглянемо на основі серії розрахунків, виконаних за розробленою програмою розрахунку самозапуску двигунів. Час перерви живлення становить  $t_{\text{пер}} = 1,2$  с, стала інерції двигуна  $T_j = 4$  с,  $m_c = \text{const}$ . Крок інтегрування прийемо таким:  $\Delta t = 0,05$  с.

**Розрахунок 1.** Розглядається режим самозапуску за умови симетрії напруги в енергосистемі. ЕРС системи становить  $E_a = 1,05$ , внутрішній опір  $x_{\text{вн}} = 0,05$ .

Графіки зміни характеристик двигуна зображено на рис. 5.

Аналіз режиму показує, що самозапуск проходить успішно, час самозапуску становить  $t_{c.3} = 2,5$  с.

**Розрахунок 2.** Режим самозапуску двигуна при несиметрії напруги в енергосистемі має такі параметри:  $E_a = 1,05$ ,  $E_b = 0,9$ ,  $E_c = 0,85$ ,  $x_{\text{вн}} = 0,05$ . Графіки зміни характеристик режиму зображено на рис. 6.

Самозапуск відбувається успішно, час самозапуску:  $t_{c.3} = 3,8$  с.

**Розрахунок 3.** Режим самозапуску двигуна за умови симетрії напруги в енергосистемі при таких параметрах:  $E_a = 1,05$ ,  $x_{\text{вн}} = 0,1$ . Графіки зміни характеристик двигуна наведено на рис. 7.

Самозапуск відбувається успішно, час самозапуску становить  $t_{c.3} = 12,5$  с.

**Розрахунок 4.** Режим самозапуску двигуна при великій несиметрії напруги в енергосистемі:  $E_a = 1,05$ ,  $E_b = 0,9$ ,  $E_c = 0$ ,  $x_{\text{вн}} = 0,1$ . Графіки зміни характеристик двигуна зображено на рис. 8.

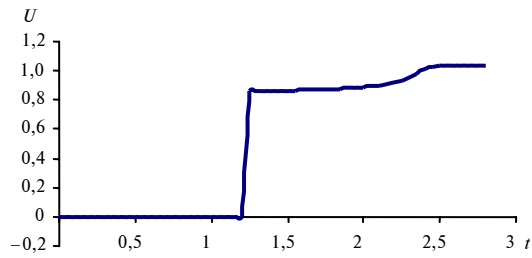
За цих умов самозапуск неуспішний.

Результати дослідно-промислових розрахунків самозапуску:

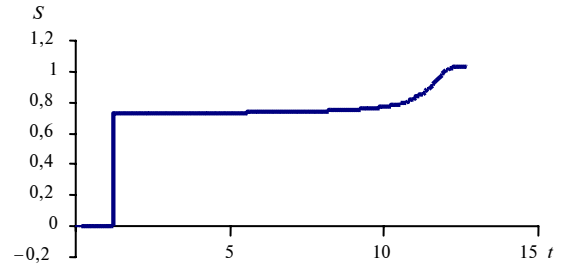
- при  $x_{\text{вн}} = 0,05$  несиметрія напруги в енергосистемі призвела до збільшення тривалості самозапуску з 2,5 до 3,8 с;
- при  $x_{\text{вн}} = 0,1$  і глибокій несиметрії напруги в енергосистемі самозапуск не відбувається.

**Розрахунок 5.** Проведемо аналіз впливу несиметрії напруги в енергосистемі на час самозапуску двигуна. Введемо коефіцієнт несиметрії напруги в енергосистемі як відношення напруги оберненої послідовності до напруги прямої послідовності:  $K = \frac{E_2}{E_1}$ .

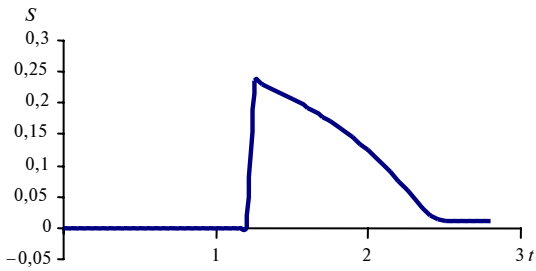
При різному коефіцієнті несиметрії напруги в енергосистемі проведено серію розрахунків самозапуску двигуна. На рис. 9 показано залежність часу самозапуску двигуна від коефіцієнта несиметрії напруги в енергосистемі, з якої випливає, що при збільшенні коефіцієнта до 0,3 самозапуск досить мало залежить від  $K$ , а при  $K > 0,3$  час самозапуску різко збільшується.



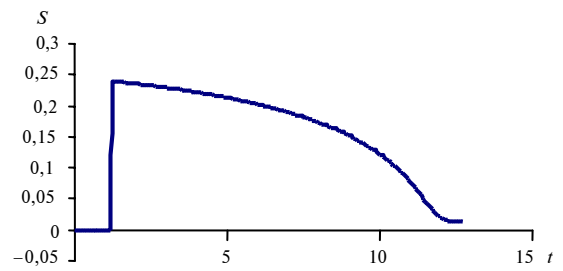
*a*



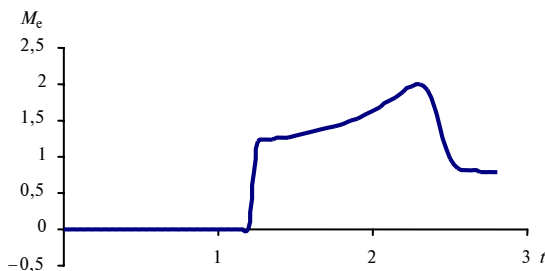
*a*



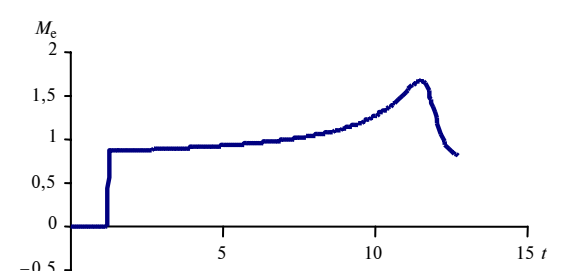
*б*



*б*



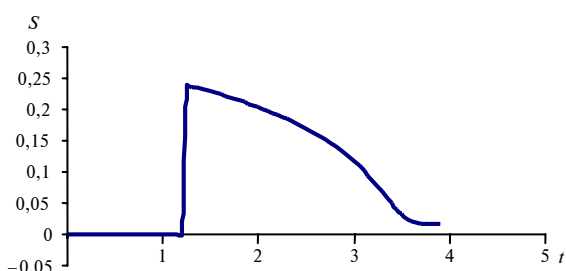
*в*



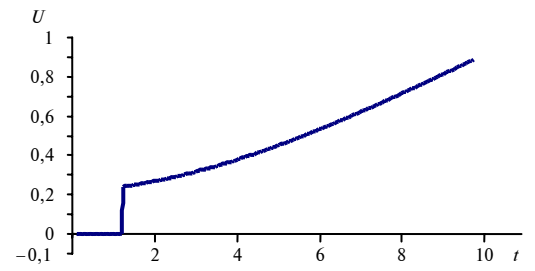
*в*

Рис. 5. Графік залежності напруги (*a*), ковзання (*б*) і електромагнітного моменту (*в*) від часу для розрахунку режиму самозапуску при симетричному режимі,  $E_a = 1,05$ ,  $x_{BH} = 0,05$

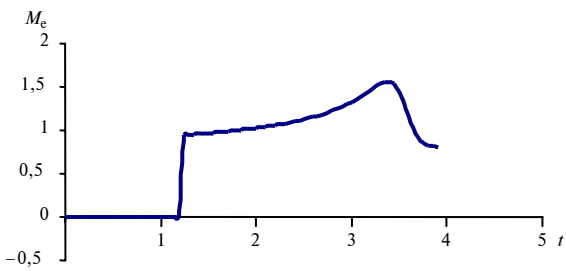
Рис. 7. Графік залежності напруги (*a*), ковзання (*б*) і електромагнітного моменту (*в*) від часу для розрахунку режиму самозапуску при симетричному режимі,  $E_a = 1,05$ ,  $x_{BH} = 0,1$



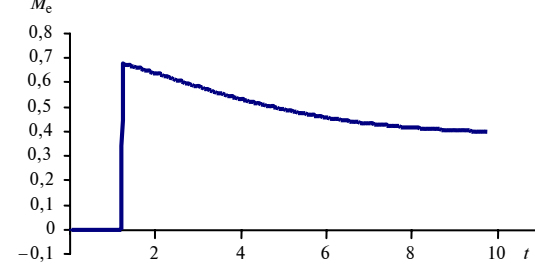
*a*



*a*



*б*



*б*

Рис. 6. Графік залежності ковзання (*a*) і електромагнітного моменту (*б*) від часу для розрахунку режиму самозапуску при несиметричному режимі,  $x_{BH} = 0,05$

Рис. 8. Графік залежності ковзання (*a*) і електромагнітного моменту (*б*) від часу для розрахунку режиму самозапуску при несиметричному режимі,  $x_{BH} = 0,1$

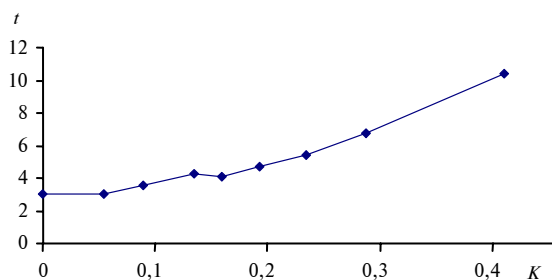


Рис. 9. Графік залежності часу самозапуску двигуна від коефіцієнта несиметрії напруги в енергосистемі

### Висновки

Аналіз результатів розрахунку засвідчив про істотний вплив ступеня несиметрії напруги в енергосистемі на самозапуск двигуна.

Результати дослідно-промислових розрахунків самозапуску показали: при  $x_{\text{вн}} = 0,05$  несиметрія напруги в енергосистемі призвела до збільшення тривалості самозапуску з 2,5 до 3,8 с; при  $x_{\text{вн}} = 0,1$  і глибокій несиметрії напруги в енергосистемі самозапуск не відбува-

ється. При збільшенні коефіцієнта несиметрії напруги в енергосистемі до 0,3 самозапуск досить мало залежить від  $K$ , а при  $K > 0,3$  час самозапуску різко збільшується.

Результати дослідження можуть бути використані оперативним персоналом електростанцій і крупних промислових підприємств при вирішенні питання щодо застосування самозапуску двигуна в умовах несиметрії напруги в енергосистемі.

Дослідження має зв'язок з науковим напрямком дослідження кафедри "Електричні станції" "Оцінка технічного стану електрообладнання енергосистем" та держбюджетною роботою "Розробка нечітких моделей електрообладнання АЕС для експертної системи прийняття рішень по управлінню ресурсом електрообладнання".

Проблема підвищення експлуатаційної надійності асинхронних двигунів є дуже великою. У статті розглянуто лише один з її аспектів, тому вона потребує більш глибокого дослідження.

И. Зиа, Т.Ю. Курач

#### АНАЛИЗ САМОЗАПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Разработаны математическая модель и алгоритм определения условий самозапуска при несимметрии напряжения в энергосистеме. Выполнены опытно-промышленные расчеты самозапуска двигателя, составлены программы в среде MatLab для расчета самозапуска асинхронного двигателя.

I. Zia, T.Yu. Kurach

#### THE ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS ENGINE SELF-START AT ASYMMETRY IN THE SYSTEM

In this paper, we elaborate the mathematical model and algorithm for determination of the self-start conditions at voltage asymmetry in the power system. Moreover, we make the trial calculations of the engine self-start and develop the programmes in the MatLab environment for the calculation of the asynchronous engine self-start.

1. Сивокобыленко В.Д., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций. – Донецк: РВА Дон НТУ, 2002. – 136 с.
2. Костерев Н.В. Моделирование и динамика атомных электростанций при возмущениях в энергосистеме. – К.: Вища шк., 1986. – 168 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
4. Важнов А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, Ленинград. отд., 1969. – 768 с.

Рекомендована Радою факультету електроенерготехніки та автоматики НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
15 червня 2008 року