



DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-24

УДК 621.313.33

І. О. Попова, к.т.н., доц.,

ORCID: 0000-0001-5429-8269

С. В. Чаусов, к.т.н., доц.,

ORCID: 0000-0003-3811-9077

О. Ю. Вовк, доц.

ORCID: 0000-0003-0154-6972

*Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного**e-mail: iryna.popova@tsatu.edu.ua, тел.: +380983765519*

ОБГРУНТУВАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОГО РЕЖИМУ ТРИФАЗНОГО СИМЕТРИЧНОГО ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ОБРИВІ ОДНІЄЇ ФАЗИ

Анотація. Розроблено метод і алгоритм розрахунку усталеного несиметричного режиму роботи при глибокій несиметрії напруг трифазного симетричного динамічного навантаження, як електромеханічного перетворювача, яким є трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Наведено методику визначення фазних струмів та фазних напруг та швидкості зносу фазної ізоляції трифазного симетричного динамічного навантаження, який використано як об'єктивний параметр, що характеризує роботу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметрії напруги (обриві однієї фази) в усталеному режимі, оскільки експлуатаційну надійність СДН в значній мірі визначає стан фазної ізоляції СДН, яка в процесі експлуатації СДН зазнає експлуатаційних впливів режимного та кліматичного характеру, тому що аварійність СДН, що пов'язана з роботою при обриві фази, досягає 45 % від загальної кількості тих, що виходять з ладу. Для аналізу явищ в асинхронному двигуні при несиметричних режимах використано метод симетричних складових, символічний метод аналізу електричних кіл і методи дослідження лінійних електричних кіл. При визначенні залежності фазних струмів досліджуваної СДН при обриві фази і з'єднанні нейтралей джерела живлення і обмоток статора проаналізовано електричне коло, яке складається з несиметричного джерела трифазної електрорушійної сили, несиметричної лінії електропередачі (ЛЕП), нейтральним проводом Z_N та симетричними опорами фаз трифазного СДН. Обґрунтовано можливість полегшення режиму роботи аварійного двигуна технологічної лінії при з'єднанні нейтралей джерела живлення і обмоток статора двигуна на час завершення технологічного процесу.

Ключові слова: трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, глибока несиметрія напруг, фазний струм, симетричні складові.

Постановка проблеми. Трифазне симетричне динамічне навантаження (СДН) – це електромеханічний перетворювач, в якому спостерігається утворення обертового магнітного поля за допомогою трифазної системи напруг (струмів) в фазах статора та створення обертового моменту на валу ротора, яким є трифазний асинхронний



двигун з короткозамкненим ротором (АД). Строк служби АД з короткозамкненим ротором 15-20 років без капітального ремонту за умови їхньої належної експлуатації [1-3].

Експлуатаційна надійність СДН в значній мірі визначається надійністю його обмоток, яка, в свою чергу, залежить від стану ізоляції. Не зважаючи на те, що при проектуванні розрахунок виконується для роботи в симетричному режимі, на практиці їхньої експлуатації доволі часто виникають несиметричні режими. Відмітимо, що трифазна система вважається симетричною, коли напруги і струми кожної з фаз мають однакову амплітуду, а зсув амплітуд по фазі дорівнює 120° . Якщо не виконується хоча б одна з умов, то система вважається несиметричною. Електростанції звичайно не є джерелом дисбалансу, а напруги синхронних генераторів, за звичай, симетричні, однак у мережах низької напруги, в наслідок присутності різних однофазних споживачів, забезпечити симетричність та синусоїдність складно [4-7].

В процесі експлуатації СДН зазнають експлуатаційні впливи режимного та кліматичного характеру. До експлуатаційних впливів режимного характеру слід віднести: перевантаження збоку робочої машини (РМ); зниження, підвищення та несиметрії напруги мережі; неповнофазний режим (обрив однієї фази статора або глибока несиметрія); пуски і «перекидання» АД під напругою тощо. Аварійність СДН, яка пов'язана з роботою при обриві фази, досягає 45 % від загальної кількості тих, що виходять з ладу. Причиною аварійності асинхронних двигунів при цьому режимі є значне збільшення швидкості теплового зносу їх ізоляції, що обумовлено підвищенням фазних струмів [2, 6]. Під втратою фази розуміють однофазний режим роботи СДН в результаті відключення живлення по одному з проводів трифазної системи. Причинами втрати фази СДН є обрив одного з проводів лінії електропередачі, перегорання одного з запобіжників, порушення контакту в одній з фаз. Залежно від обставин, при яких сталася втрата фази, можуть бути різні режими роботи АД та наслідки, супутні цим режимам. При цьому важливо взяти до уваги: схему з'єднання обмоток статора АД (зірка чи трикутник), робочий стан трифазного динамічного навантаження в момент втрати фази (втрата фази до або після включення АД, під час роботи під навантаженням) ступінь його завантаження і механічну характеристику робочої машини, кількість електродвигунів, працюючих при втраті фази та їхній взаємний вплив [8-11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У трифазному режимі по кожній з фаз СДН тече фазний струм, які зсунуті в часі на одну третину періоду (120°). При втраті фази (напруги) на затискачах, дві обмотки динамічного навантаження мають однаковий струм, у третій

фазі струм відсутній. Незважаючи на те, що кінці обмоток приєднані до двох лінійних проводів трифазної системи (включені на лінійну напругу), струми в обох обмотках співпадають в часі (однофазний режим). Магнітне поле, створене однофазним струмом, на відміну від обертового поля, є пульсуюче. Пульсуюче поле можна представити як поле, що складається з двох обертових назустріч один одному рівних за величиною полів. Кожне поле взаємодіє з обмоткою ротора і утворює обертальний момент. Їх сумарна дія створює обертальний момент на валу двигуна [11].

Основою більшості методів дослідження процесів в СДН є класичними і адаптованими до розв'язання конкретних задач [2, 6, 9] Особливий інтерес при експлуатації асинхронних двигунів викликає робота їх при обриві однієї фази обмотки статора, в яких в математичній моделі двигуна враховується насичення магнітопроводу і витіснення струму в стрижнях коротко замкнутого ротору, а для врахування насичення використовують враховані на основі геометричних даних АД характеристики намагнічування основним магнітним потоком та шляхи потоків розсіювання обмоток статора та ротора. Недоліком методу є необхідність враховувати конфігурацію шляхів потоків розсіювання обмоток конкретного АД, індуктивних параметрів в наслідок насичення та зміни активних опорів роторних контурів [2, 6]. В інших роботах розглядаються математичні моделі несиметричних режимів СДН, розроблених з позиції використання теорії електромагнітного поля, рівнянь Максвелла електромагнітного поля, однак ці методи доволі складні, є доволі специфічними у використанні, тому їх використовують для перевірки спрощених методик [13, 14].

Відомо багато чисельні методи адаптації схем заміщення АД до розрахунку різних режимів, але вони потребують експериментальної перевірки на достовірність отриманих результатів в кожному конкретному випадку. Інші математичні моделі потребують значних розрахункових ресурсів і, крім того, час розрахунку з їх використанням значний [9, 13, 15].

Існуючі методи та пристрої діагностування режимів роботи АД дозволяють контролювати, діагностувати, сигналізувати та відключати СДН при глибокій несиметрії напруг мережі відключають їх під час виконання технологічного процесу при досягненні граничного значення контрольованого параметру, не передбачаючи покращення умов їхньої роботи, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат на ліквідацію наслідків аварійного відключення [16-19]. Але за даними [19] економічні збитки внаслідок аварійних відключень трифазних навантажень через обрив проводу

живлення в залежності від їх потужностей коливаються у середньому від 3 000 до 30 000 доларів на один обрив.

Методи дослідження режимів роботи асинхронних двигунів, як правило, не враховують залежності їх від несиметрії напруги, завантаження робочих машин та особливостей їх механічних характеристик. За критерії оцінки режимів роботи асинхронних двигунів беруться, як правило, сила струму та температура обмотки, не використовується такий показник, як швидкість витрати ресурсу ізоляції обмоток двигунів [20-23].

Формулювання мети статті (постанова завдання). дослідити режим роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при обриві однієї фази статора і з'єднанні нейтралей джерела живлення і обмоток статора і обґрунтувати полегшення режиму роботи та ресурсозбереження аварійних двигунів технологічних ліній, на час завершення технологічного процесу.

Основна частина. Для аналізу явищ в асинхронному двигуні при несиметричних режимах використано метод симетричних складових, символічний метод аналізу електричних кіл і методи дослідження лінійних електричних кіл [24, 25]. При визначенні залежності фазних струмів досліджуваного асинхронного двигуна при обриві фази і з'єднанні нейтралей джерела живлення і обмоток статора проаналізовано електричне коло (рис.1), яке складається з джерела трифазної електрорушійної сили, лінії електропередачі (ЛЕП) з повними опорами $Z_{лA}$, $Z_{лB}$, $Z_{лC}$, комплексом повного опору нейтрального проводу Z_N та комплексами повних опорів фаз трифазного СДН Z_a , Z_b , Z_c .

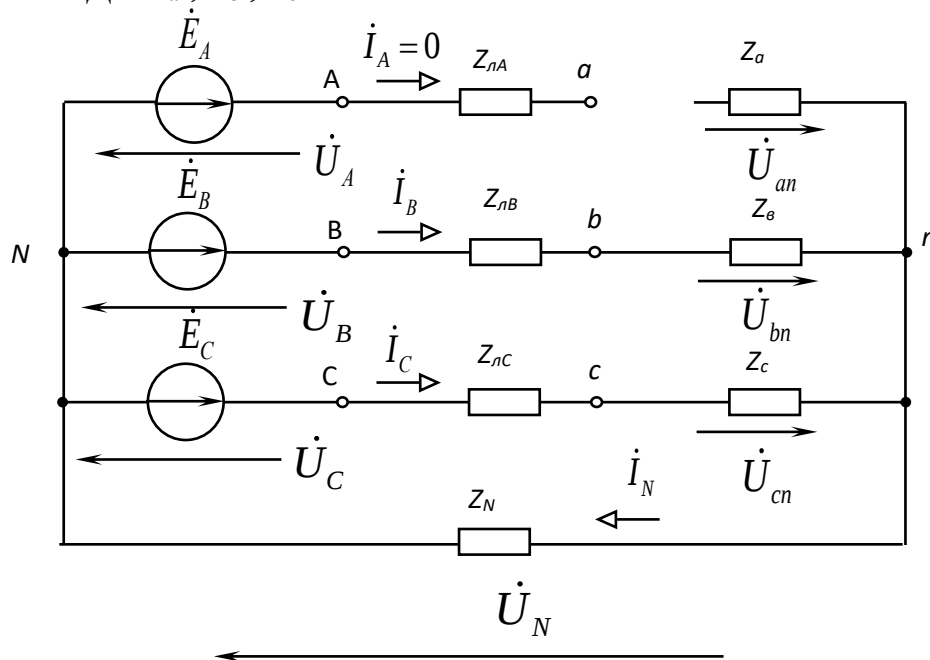


Рис. 1. Розрахункова схема чотирипровідної мережі при глибокій несиметрії фази А.

При обриві фази А двигуна і з'єднанні нульових точок джерела живлення і обмотки статора в обмотках СДН (рис. 2), одночасно із симетричними складовими струмів прямої і зворотної послідовностей є складова струму нульової послідовності.

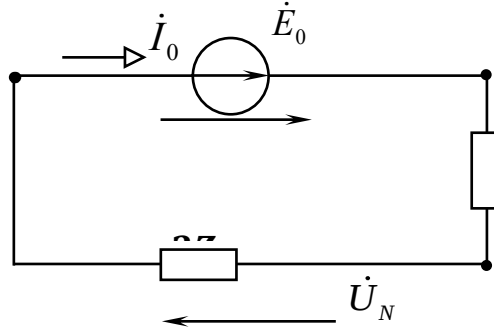


Рис. 2. Розрахункова схема кола нульової послідовності при з'єднанні нейтралей джерела живлення та СДН

Це викликає появу пульсуючого магнітного поля. Враховуючи взаємну індуктивність обмоток статора комплекс повного опору нульової послідовності СДН визначено за таким рівнянням

$$Z_0 = r_1' + k(jx_1' + jx_2''), \quad (1)$$

де k – коефіцієнт, що враховує взаємний індуктивний зв'язок обмоток статора СДН.

r_1' , jx_1' , jx_2'' – параметри Г-образної схеми заміщення СДН: r_1' – приведений активний опір обмотки статора СДН, Ом; jx_1' , jx_2'' – приведені реактивні індуктивні опори обмотки статора та ротора СДН, Ом [25].

Ковзання при даному режимі роботи, використавши метод ітерацій, знайдено за рівнянням

$$s = \frac{s_k}{1,6 \left[\frac{m_k}{1,6(m_0 + (\kappa_z - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x} + \sqrt{\left(\frac{m_k}{1,6(m_0 + (\kappa_z - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x} \right)^2 - 1} \right]}. \quad (2)$$

$$\text{де } m_0 = \frac{M_0}{M_n}; \quad m_k = \frac{M_k}{M_n}; \quad \kappa_z = \frac{M_c}{M_{c,n}};$$

M_0 – момент опору тертя частин робочої машини, Н·м;

$M_{c,n}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;

M_c – момент опору робочої машини для ковзання s , Н·м;



s_H – номінальне ковзання;

k_3 – коефіцієнт завантаження РМ;

x – коефіцієнт, що характеризує механічну характеристику РМ.

Для визначення симетричних складових фазних струмів складено систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_0 &= Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_1; \\ 0 &= Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 &= 0; \\ a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{\text{лВ}} (a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0); \\ a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{\text{лС}} (a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0); \\ 0 &= (Z_0 + 3Z_N) \dot{I}_0 + \dot{U}_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Вирішив систему рівнянь (3) відносно $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_0$ маємо

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2} - \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_1}{Z_1}; \quad (4)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_1}{Z_1}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{U}_2}{Z_2}. \quad (6)$$

Комплекси фазних струмів $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ і $\dot{I}_C$ за допомогою рівнянь (7):

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0; \\ \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \\ \dot{I}_C &= a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Струм у нейтральному проводі:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3\dot{I}_0. \quad (8)$$

Швидкість зносу ізоляції залежить від технічних даних СДН: класу ізоляції обмоток, номінального перевищення температури обмоток статора τ_H , абсолютної номінальної температури ізоляції Θ_H , абсолютної сталої температури Θ_C , обумовленої режимом роботи СДН. Швидкість теплового зносу ізоляції СДН визначається [26].

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B\left(\frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{\Theta_y}\right)}, \quad (9)$$

де ε_n – номінальна швидкість теплового зносу ізоляції СДН, бгод/год.;

B – параметр, що характеризує клас ізоляції СДН для різних ізоляційних матеріалів. Для класу ізоляції В СДН параметр $B=10200$.

Θ_n – абсолютна температура фазної обмотки СДН при симетричній напрузі, номінальному навантаженні на валу для даного класу ізоляції та номінальній температурі оточуючого середовища, К.

$\Theta_n = 403$ К.

Θ_y – усталена абсолютна температура ізоляції обмотки СДН, К.

На швидкість теплового зносу ізоляції обмотки СДН впливає температура оточуючого середовища $\vartheta_{\text{сеп}}$. Абсолютна усталена температура ізоляції обмотки СДН та усталене перевищення температури обмотки СДН

$$\Theta_y = \tau_y + \vartheta_{\text{сеп}} + 273. \quad (10)$$

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + k_i^2}{a + 1 - \alpha \tau_n (k_i^2 - 1)}, \quad (11)$$

Усталене перевищення температури обмотки СДН залежить від технічних даних СДН (АД): опорів обмоток r_1' , r_1'' , x_1' , x_2'' , x_μ ; коефіцієнту втрат a ; матеріалу провідника, якому відповідає температурний коефіцієнт α , номінальне ковзання S_n ; критичне ковзання S_k ; режим завантаження двигуна:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + k_i^2}{a + 1 - \alpha \tau_n (k_i^2 - 1)}, \quad (12)$$

де k_i – кратність струму в фазі СДН по відношенню до номінального значення, в.о.;

τ_n – номінальне перевищення температури обмотки СДН, що визначається класом ізоляції СДН, °С;

a – коефіцієнт втрат СДН, в.о.

Кратність струму в обмотці СДН дорівнює:

$$k_i = \frac{I}{I_n}, \quad (13)$$

де I – сила струму в фазі СДН, А;

I_n – сила номінального струму СДН, А.

Коефіцієнт втрат a СДН визначимо:

$$a = \frac{\Delta P_{\text{const.н.}}}{\Delta P_{\text{var.н.}}}. \quad (14)$$

Змінні втрати при номінальному режимі роботи СДН, згідно параметрів Г-образної схеми заміщення СДН:

$$\Delta P_{\text{var.н}} = 3(r_1' + r_2'')(I_n')^2; \quad (15)$$

$$(I_n')^2 = \frac{U_n^2}{(r_1' + \frac{r_2''}{s_n})^2 + (x_1' + x_2'')^2}. \quad (16)$$

Постійні втрати у магнітопроводі СДН при номінальному режимі роботи визначаємо за рівнянням

$$\Delta P_{\text{const.н}} = \Delta P_n - \Delta P_{\text{var.н}}, \quad (17)$$

де ΔP_n – номінальні втрати активної потужності у СДН, Вт.

$$\Delta P_n = P_{2н} \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}, \quad (18)$$

де $P_{2н}$ – номінальна потужність на валу СДН, Вт;

η_n – номінальний коефіцієнт корисної дії СДН, в.о.

Результати аналітичних досліджень у вигляді графічних залежностей $I_\phi = f(k_U, k_3)$ і $\varepsilon = f(k_U, k_3)$ СДН (АД) 4А90L4УЗ серії 4А90L4УЗ при обриві однієї фази і з ізольованою нульовою точкою і при з'єднанні нейтралей обмотки статора і джерела живлення (де k_U – відношення лінійної напруги відносно номінального значення) приведені на рис.3.

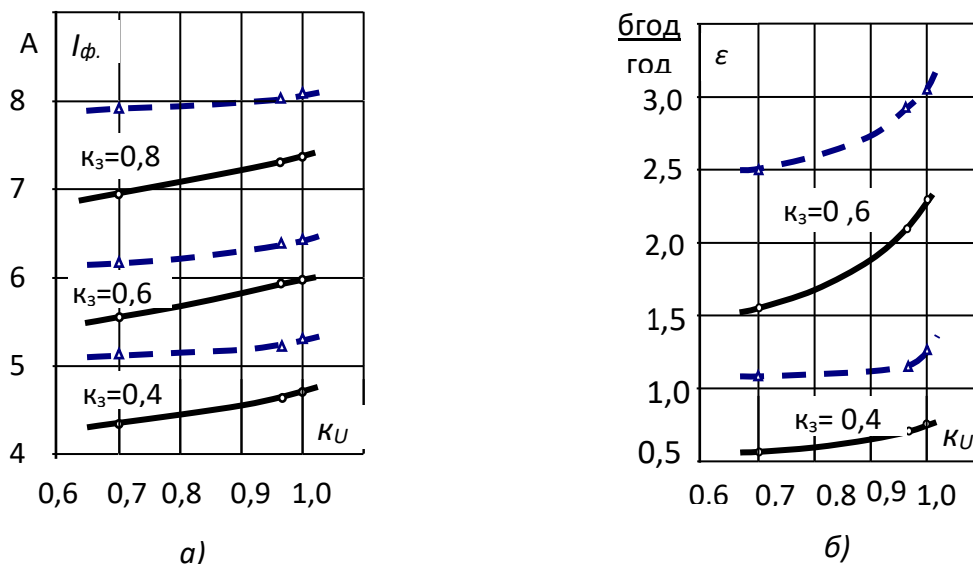


Рис. 3. Результати теоретичних досліджень режимів роботи СДН 4А90L4УЗ при глибокій несиметрії фазних струмів $I_\phi = f(k_U, k_3)$ (а) та швидкості зносу ізоляції $\varepsilon = f(k_U, k_3)$ (б) з ізольованою нульовою точкою (----) та з'єднаними нульовими точками обмотки статора і джерела живлення (—) при $x = 1$, $\vartheta_{cp} = 40^\circ \text{C}$.

Встановлено, що сила фазних струмів при глибокій несиметрії і з'єднанні нейтралей джерела живлення і обмотки статора СДН при коефіцієнтах завантаження $\kappa_z = 0,4 - 0,6$ зменшується в порівнянні зі струмами в аналогічному режимі роботи СДН з ізольованою нульовою точкою на 12 – 18 %. Відповідно, при глибокій несиметрії і з'єднанні нейтралей джерела живлення і обмотки статора СДН при коефіцієнтах завантаження $\kappa_z = 0,4 - 0,6$ знижується швидкість теплового зносу ізоляції обмотки статора на 40 – 60 %.

Висновки. Таким чином:

1. Режим роботи СДН при обриві однієї фази і об'єднанні нейтралей обмоток статора та джерела живлення в порівнянні з аналогічним режимом роботи з ізольованою нейтраллю є енергозберігаючим і більш сприятливим для СНД з точки зору витрати ресурсу ізоляції.

2. Об'єднання нейтралей обмотки статора СДН та джерела живлення може бути застосовано для полегшення режиму роботи групи СНД технологічної лінії, на час завершення технологічного процесу.

3. В режимі роботи СДН при обриві однієї фази і об'єднанні нейтралей обмоток статора СДН та джерела живлення при коефіцієнті завантаження робочої машини $\kappa_z = 0,8$ і більше швидкість зносу ізоляції обмоток СДН перевищує 8 бгод/год, тому об'єднання нульових точок СДН і джерела живлення при $\kappa_z = 0,8$ і більше не полегшує режиму роботи СДН при обриві однієї фази.

Список використаних джерел

1. Arad S., Pana L., Popescu F., Improving the energetic efficiency at electric drives compressors of EM Lonea. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*. 2013. P. 153–160

2. Malyar V. S., Hamola O. Ye., Maday V. S., Vasylchyshyn I. I. Mathematical Simulation of Modes and Characteristics of Asynchronous Motors under Asymmetrical Power Supply. *Problemele energeticii regionale: Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine 1-1* (40) 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3239128>.

3. Arad S., Pana L., Popescu F., Improving the energetic efficiency at electric drives compressors of EM Lonea. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*. 2013. P. 153–160.

4. K. Ma, L. Fang and W. Kong. Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions. *Journal of Power and Energy Systems*. 2020. Vol. 6(3). P. 479–488. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.03280>.



5. Kang Ma., Lurui Fang, Wangwei Kong . Review of Distribution Network Phase Unbalance: Scale, Causes, Consequences, Solutions, and Future Research Direction. TechRxiv. February 10, 2020. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.11401056.v2>.
6. Romanova V., Khromov S. Effect of asymmetry of supply voltages on asynchronous motor operation modes. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 58. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803013>.
7. Peter A. A., Okakwu I. K., Oluwasogo E. S., Alayande A. S., Aioboman A. E. Influence of Power Quality Problem on the Performance of an Induction Motor. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2015. Vol.4, no. 4. P. 39–44.
8. Sandhu K. S., Chaudhary V. Steady State Modelling of Induction Motor Operating with Unbalanced Supply System. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*. 2009. Vol.8, no. 2. P. 197–206.
9. Quisque E. C., Lopez-Fernandez X. M., Mendes A. M. S., Marques A. J., Palacios J. A. Experimental study of the effect of positive sequence voltage on the derating of induction motors under voltage unbalance. *Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference: IEEE Xplore Press*, Niagara Falls, Canada, May 2011, 15–18, 2011. P. 908–912.
10. Temiz I., Akuner C., Calik H. Analysis of Balanced Three-Phase Induction Motor Performance under Unbalanced Supply using Simulation and Experimental Results. *Electronics and Electrical Engineering*. 2011. No. 3(109). P. 31–45.
11. Milykh I. I., Polyakova N. V. Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field. *Electrical engineering & electromechanics*. 2006. No. 2. P. 40–46. <https://doi.org/10.2098/2074-272X.2016.05>.
12. Faiz J., Ebrahimpour H, Pillay P. Influence of unbalanced voltage on efficiency of three phase squirrel cage induction motor and economic analysis. *IEEE Trans EC*. 2006. Vol.47. P. 289–302.
13. Sandhu K. S., Chaudhary V. Simulations of Three-Phase Induction Motor Operating with Voltage Unbalance. *Proc. of the 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '08)*. Venice, Italy, November 21–23. 2008. P. 273-279.
14. Benamiral N., Rachedi M.F., Bouras S., Kerfali S., Bouraiou A. Numerical simulation of three phase asynchronous motor to diagnose precisely the stator unbalanced voltage anomaly. *Rev. Sci. Technol*. 2017. No. 34. P.134–150.
15. Gaydenko Yu. A., Tsivinskiy S. S. Opredelenie integralnyih karakteristik elektricheskikh mashin metodami teorii elektromagnitnogo polya Determination of integrated characteristics of electric machines by



methods of electromagnetic field theory. *Elektrotehnika i elektromehanika*. 2006. No. 1. P. 28–32 (in Russian).

15. G. Garg and A. Sinha. An improved method for protection of three phase induction motor using microcontroller. *International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*, Allahabad, India. 2014. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICPCES.2014.7062804>.

17. A. Dianov. A Novel Phase Loss Detection Method for Low-Cost Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022. Vol. 37(6). P. 6660–6668. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3143822>.

18. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Дідур В. А. Вплив відхилення живлячої напруги на ресурс ізоляції асинхронних електродвигунів поточкових технологічних ліній. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 9, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-25>.

19. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Стребков О. А., Волошина А. А. Енергозберігаючі режими роботи асинхронних електродвигунів при змінному завантаженні. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2019. Вип. 19, т. 3. С. 142–150. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-142-150>.

20. Chaouf S., Sabo A., Popova I., Budko V. The Energy-Saving Control Criterion for Impact Crushing Machines. *Problems of the Regional Energetics*. 2023. Vol. 4(60). <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.12>.

21. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Попова І. О., Діордієв В. Т. Збереження роботоздатності трифазного статичного навантаження за неповнофазного живлення. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 24, т. 1. С. 136–150. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-10>.

22. A. Jalilian and R. Roshanfekar. Analysis of Three-phase Induction Motor Performance under Different Voltage Unbalance Conditions Using Simulation and Experimental Results. *Electric Power Components and Systems*. 2009. Vol. 37, no. 3. P. 300–319.

23. Navarro-Espinosa A., Mancarella P. Probabilistic modeling and assessment of the impact of electric heat pumps on low voltage distribution networks. *Applied Energy*. 2014. Vol. 127. P. 249–266.

24. Попова І. О., Квітка С. О., Вовк О. Ю. Дослідження несиметричного режиму на роботу динамічного індуктивного навантаження. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 23, т. 1. С. 179–187. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187>.

25. Попова І. О., Попридухін В. С. Параметри контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів для розробки ефективного захисту. *Науковий вісник Таврійського державного*



агротехнологічного університету. 2019. Вип. 9, т. 1(41). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-41>.

26. Попова І. О., Ковальов О. В. Визначення напруги зміщення нейтралі як діагностичного параметра режиму роботи асинхронного двигуна. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Вип. 11, т. 2(39). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-39>.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2024 р.

I. Popova, S. Chausov, O. Vovk
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

JUSTIFICATION OF THE RESOURCE-SAVING MODE OF A THREE-PHASE SYMMETRIC DYNAMIC LOAD WITH A SINGLE PHASE BREAK

Summary

A method and algorithm for calculating a steady-state asymmetric mode of operation with deep voltage asymmetry of a three-phase symmetric dynamic load, as an electromechanical converter, which is a three-phase asynchronous motor with a short-circuited rotor, are developed. The method of determining the phase currents and phase voltages and the wear rate of the phase insulation of a three-phase symmetric dynamic load is presented, which is used as an objective parameter that characterizes the operation of an asynchronous motor with a short-circuited rotor under voltage Asymmetry (one phase break) in a steady state, since the operational reliability of the SDN largely determines the state of the phase insulation of the SDN, which during the operation of the SDN is subjected to operational influences of a regime and climatic nature, because the accident rate of the SDN, which is associated with the operation of the Phase break, reaches 45% of the total number of those that fail. The symmetric component method, the symbolic method of analyzing electrical circuits, and methods for studying linear electrical circuits are used to analyze phenomena in SDN under unbalanced modes. When determining the dependence of the phase currents of the studied SDN in case of phase break and connection of neutrals of the power source and stator windings, an electrical circuit consisting of an asymmetric source of three-phase electromotive force, an asymmetric power line, a neutral wire and symmetrical phase resistances of the three-phase SDN is analyzed and it is taken into account that when the Phase A of the motor is broken and the connection of the zero points of the power source and the stator winding in the SDN windings, simultaneously with the symmetrical components of the forward and reverse sequences are a component of the zero-sequence current that causes a pulsating magnetic field to appear. When determining the wear rate of the SDN insulation, it is taken into account that the wear rate of the insulation depends on the technical data of the SDN: the insulation class of the windings, the nominal excess temperature of the stator windings, the absolute nominal temperature of the insulation, the absolute constant temperature due to the operating mode of the SDN. The rate of thermal wear of the winding insulation is affected by the ambient temperature, the absolute steady-state insulation temperature of the SDN winding, and the steady-state excess of the SDN winding temperature. The



possibility of facilitating the operation mode of the emergency motor of the process line when connecting the neutrals of the power supply and the stator windings of the motor at the time of completion of the technological process is justified.

Key words: three-phase asynchronous motor with short-circuited rotor, deep voltage asymmetry, phase current, symmetrical components.