



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187

УДК 621. 316. 929

І. О. Попова¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5429-8269

С. О. Квітка¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9234-9274

О. Ю. Вовк¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0154-6972

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*e-mail: iryana.popova@tsatu.edu.ua, тел: +380983765519

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО РЕЖИМУ НА РОБОТУ ДИНАМІЧНОГО ІНДУКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. В роботі проаналізовано причини виникнення несиметрії напруг у електричній мережі напругою до 1000 В. Запропоновано методику розрахунку фазних струмів при несиметрії напруг мережі при одночасному включенні однофазних і симетричних трифазних споживачів динамічного індукційного характеру (асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором). Дослідження передбачає еквівалентне перетворення, при якому несиметричне трифазне навантаження замінено на еквівалентне симетричне навантаження; симетрична лінія електропередачі з однаковими опорами замінена несиметричною лінією електропередачі з різними опорами. Режим мережі описано системою рівнянь згідно методу симетричних складових, законів Кірхгофа і комплексних чисел. Наведені рівняння розрахунку фазних струмів динамічного індуктивного навантаження в залежності від напруг і опорів прямої і зворотної послідовностей і математичні рівняння розрахунку опорів прямої і зворотної послідовностей динамічного індуктивного навантаження в залежності від частоти обертання (ковзання). Приведені рівняння ковзання динамічного навантаження в залежності від коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності, моментів прямої і зворотної послідовності та моменту опору робочої машини для різних коефіцієнтів, що характеризують механічну характеристику робочої машини. Приведена методика аналізу дозволяє розрахувати фазні струми динамічного індуктивного навантаження в несиметричному режимі.

Ключові слова: симетричні складові, фазний струм, динамічне індуктивне навантаження, опір, коефіцієнт завантаження, коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності.

Постановка проблеми. Останнім часом з'явилася значна кількість навантажень (електроприймачів), що досить відчутно впливають на режим роботи інших споживачів (плавильні печі, асинхронні двигуни великої потужності тощо), які, в більшості випадків, погіршують якість електроенергії, оскільки ці приймачі характеризуються великими одиночними потужностями, викликають несиметрію низьковольтної мережі до 1000 В [1]. В побуті застосування великої



кількості різних однофазних побутових електроприймачів (електроплит, комп'ютерної техніки, однофазних індуктивних асинхронних двигунів тощо), їх випадковий характер роботи, порушують симетрію трифазної системи, що призводить до додаткових втрат як в системі електропостачання, так в системі електроспоживання, викликають значну несиметрію напруг та струмів навантажень фаз електричних мереж. Це призводить до зниження техніко-економічних показників мереж і електроприймачів, до зміни у їхніх режимах роботи [2].

Така ситуація характерна для розподільних мереж промислових підприємств зі значною частиною однофазних навантажень, головними навантаженнями яких є трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненими роторами, які є динамічними індуктивними навантаженнями [3-4].

Ще гірше стан справ у сільських електромережах, які характеризуються значною довжиною ліній електропередач, нерівномірним розподілом навантажень, тому в них несиметричний режим напруг є правилом, ніж виключенням.

Аналіз останніх досліджень. Сучасна промисловість випускає двигуни серії 4А, 4АМ, АІР, які задовольняють всім вимогам міжнародних стандартів. Однак, не зважаючи на все те позитивне, що було закладено в конструкцію асинхронних двигунів, аварійність їх у важких умовах роботи доволі висока. Фактичний ресурс асинхронних двигунів в агропромисловому комплексі в 2–3 рази менше необхідного: в тваринництві становить 3,5 року, рослинництві – 4 роки, а на підсобних підприємствах – 5 років. Відмови електроприводів через низьку якість асинхронних двигунів не перевищують 2–5 %. Основна причина виведення їх з ладу – аварійні режими. Однією з головних причин, що викликає їхню велику аварійність є низька якість напруги в мережі, зокрема її несиметрія [5].

Несиметрія напруги проявляється в різкому погіршенні техніко-економічних характеристик асинхронних двигунів (збільшення втрат електричної енергії, підвищення нагріву їх складових частин), зниженні експлуатаційної надійності і скорочення їхнього терміну служби. Причиною великої аварійності асинхронних двигунів при несиметричному режимі роботи є підвищення фазних струмів за рахунок залежності опорів фаз статора та ротора від завантаження робочої машини, що призводить до значного збільшення швидкості теплового зносу їх ізоляції. [6-7].

Існуючі методи дослідження режимів роботи асинхронних двигунів як динамічного індуктивного навантаження, як правило, не враховують залежності їх від несиметрії напруги електромережі, завантаження робочих машин та особливостей їх механічних

характеристик. Це обумовлено складнощами у визначенні параметрів обмоток асинхронного двигуна.

Формулювання цілей статті. Дослідити несиметричні режими в розподільчій мережі з динамічним індуктивним навантаженням, визначити вплив несиметрії на фазні струми і напруги при різному ступені завантаження робочих машин та особливостей їх механічних характеристик.

Основна частина. При дослідженні використано метод симетричних складових трифазної системи величин, символічний метод аналізу електричних кіл і методи дослідження лінійних електричних кіл. Для визначення залежності фазних струмів АД від несиметрії напруг мережі проаналізовано електричне коло, яке складається з джерела симетричної трифазної електрорушійної сили, симетричної лінії електропередачі (ЛЕП) з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ та несиметричного навантаження з фазними опорами Z_a , Z_b , Z_c : статичного навантаження (несиметричного побутового) і симетричного динамічного навантаження (досліджуваний і інші АД) [8]. Несиметрія напруг у споживача залежить від ступеню несиметрії напруг у конкретного динамічного індуктивного навантаження (тобто АД), несиметрії струмів ЛЕП, яка з'єднує даний споживач із джерелом живлення. Розглянемо випадок, коли до мережі підключено несиметричне статичне навантаження і симетричне динамічне навантаження – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (рисунок 1).

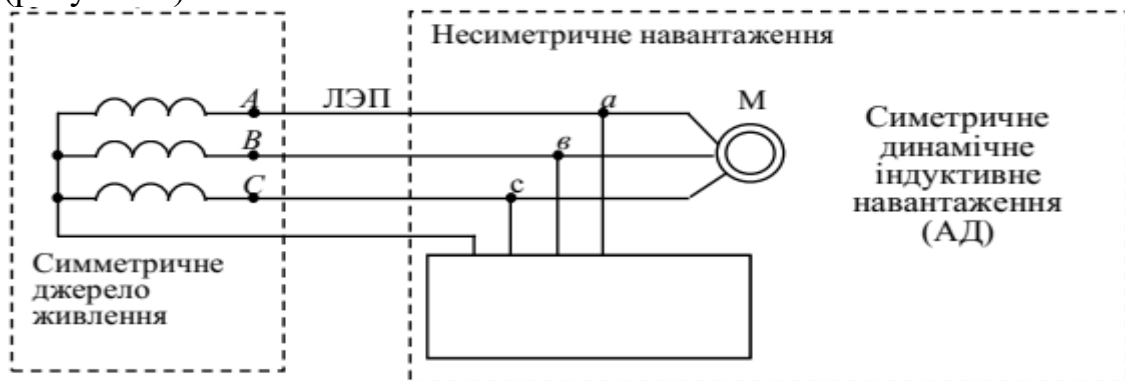


Рис. 1. Принципова схема трифазного кола з несиметричним навантаженням

Складемо розрахункову схему (рис. 2) досліджуваного трифазного кола з несиметричним навантаженням, в якому проведемо еквівалентне перетворення:

- несиметричне навантаження з фазними опорами Z_a , Z_b , Z_c замінено на еквівалентне симетричне навантаження з фазними опорами Z_{ea} , Z_{eb} , Z_{ec} ;
- симетричну ЛЕП з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ замінено

несиметричною ЛЕП з опорами $Z_{елA}$, $Z_{елB}$, $Z_{елC}$.

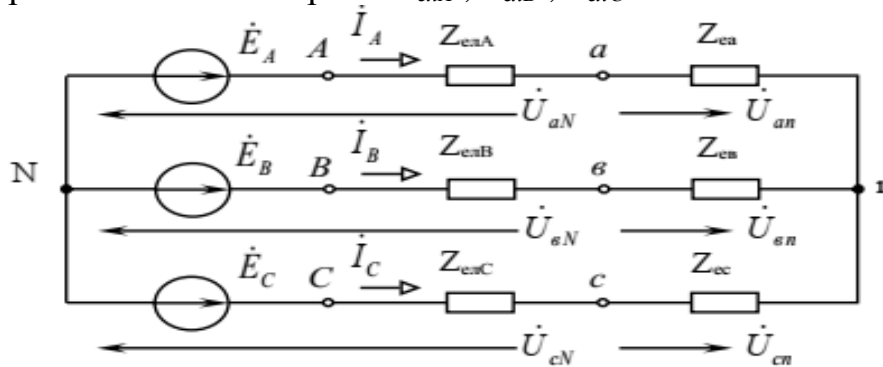


Рис. 2. Розрахункова еквівалентна схема трифазного кола

Введемо наступні позначення співвідношень

$$\frac{\dot{U}_{aN}}{\dot{E}_A} = m; \quad \frac{\dot{U}_{бN}}{\dot{E}_B} = n; \quad \frac{\dot{U}_{сN}}{\dot{E}_C} = p; \quad (1)$$

$$\frac{Z_{ад}}{Z_{еа}} = \alpha; \quad \frac{Z_{бд}}{Z_{еб}} = \beta; \quad \frac{Z_{сд}}{Z_{еc}} = \gamma, \quad (2)$$

де $Z_{ад}$, $Z_{бд}$, $Z_{сд}$ – комплекси повних фазних опорів АД, Ом.

Опори несиметричної еквівалентної ЛЕП у залежності від несиметрії напруг мережі визначаються наступним чином [9]

$$Z_{елA} = \frac{Z_a(1-m)}{\alpha m}; \quad Z_{елB} = \frac{Z_b(1-n)}{\beta n}; \quad Z_{елC} = \frac{Z_c(1-p)}{\gamma p}. \quad (3)$$

Використовуючи метод симетричних складових і розклавши напруги \dot{U}_{Aa} , \dot{U}_{Bb} , \dot{U}_{Cc} на симетричні складові \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_0 , прийняв фазу А за основну, для розрахункових схем прямої, зворотної і нульової послідовностей кола складено систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_1; \\ 0 &= Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \\ a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2); \\ a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де \dot{E}_1 – комплекс ЕРС фази джерела живлення, яка прийнята за модулем рівною номінальній фазній напрузі АД, В;

Z_1 , Z_2 – повні опори обмоток прямої й зворотної послідовностей АД, Ом;

a – фазний множник.

Визначимо із системи рівнянь (4) струми прямої \dot{I}_1 і зворотної \dot{I}_2 послідовностей, а також напруги прямої \dot{U}_1 , зворотної \dot{U}_2 і нульової



\dot{U}_0 послідовностей, знайдено сили фазних струмів $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ АД

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2; \quad \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2. \quad (5)$$

Оскільки фазні струми АД різні за величиною та із збільшенням несиметрії напруги мережі різниця між ними лише збільшиться, то використаємо середньоквадратичне значення струму

$$I_{c.ф.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}, \quad (6)$$

Аналізуючи системи рівнянь (4) виявлено, що фазні струми динамічного індуктивного навантаження залежать від несиметрії напруг мережі (симетричних складових напруг прямої U_1 і зворотної U_2 послідовностей) і повних опорів прямої і зворотної послідовностей динамічного навантаження, тобто

$$I = f(U_1, U_2, Z_1, Z_2). \quad (7)$$

Слід відмітити, що із збільшенням несиметрії фазних напруг розбіжності між фазними струмами зростають.

У загальному випадку для динамічного навантаження (оберткових машин) $Z_1 > Z_2$. Використаємо параметри спрощеної Г-подібної схеми заміщення, тоді комплекси повних опорів струмам прямої й зворотної послідовностей навантаження визначимо так [10]

$$Z_1 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r1})}{Z_m + Z_s + Z_{r1}}; \quad Z_2 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r2})}{Z_m + Z_s + Z_{r2}}, \quad (8)$$

де повний опір намагнічуючого контуру Z_m , повний опір обмотки статора Z_s , опори обмотки ротору для прямої Z_{r1} і зворотної послідовності Z_{r2} визначаються за математичними виразами

$$Z_m = r_1 + j(x_1 + x_{\mu}); \quad Z_s = r_1' + jx_1'; \quad Z_{r1} = r_2''/s + jx_2''; \\ Z_{r2} = r_2''/(2-s) + jx_2''. \quad (9)$$

Повні опори фаз індуктивного динамічного навантаження є функцією ковзання s . Для визначення залежності ковзання від несиметрії напруг мережі приймемо

$$M = M_1 - M_2; \quad (10)$$

$$M = M_c, \quad (11)$$

де M_1, M_2 – моменти, що залежать від напруг прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей, які прикладені до фаз динамічного індуктивного навантаження, Н·м;

M_c – момент опору робочої машини, Н·м.

Лінійні напруги прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей мережі, а також коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності визначаємо за виразами



$$\dot{U}'_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_{ab} + a\dot{U}_{bc} + a^2\dot{U}_{ca}); \quad (12)$$

$$\dot{U}'_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_{ab} + a^2\dot{U}_{bc} + a\dot{U}_{ca}); \quad (13)$$

$$\kappa_{U2\%} = (U_2' / U_{нл}) \cdot 100, \quad (14)$$

де \dot{U}_{ab} , \dot{U}_{bc} , \dot{U}_{ca} – комплекси лінійних напруг мережі, В;
 $U_{нл}$ – номінальна лінійна напруга мережі, В.

Рівняння системи «робоча машина–АД» наступне

$$M_0 + (k_3 M_{с.н.} - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x = M_1 - M_2, \quad (15)$$

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

$M_{с.н.}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;

s_H – номінальне ковзання;

k_3 – коефіцієнт завантаження;

x – коефіцієнт, який характеризує механічну характеристику робочої машини.

Тобто ковзання динамічного індуктивного навантаження

$$s = f(U_1, U_2, M_0, M_{с.н.}, s_H, x). \quad (16)$$

Одержимо математичні рівняння ковзання у функції несиметрії напруг мережі та коефіцієнта завантаження робочої машини в залежності від коефіцієнта, що характеризує механічну характеристик робочої машини

$$\text{при } x = 0 \quad s = \frac{\kappa_3}{\frac{u_1}{s_H} - u_2^2 m_{II}}; \quad (17)$$

$$x = 1 \quad s = \frac{m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{1 - s_H}}{\frac{\kappa_3 - m_0}{1 - s_H} + \frac{1}{s_H} u_1^2 - m_{II} u_2^2}; \quad (18)$$

$$x = 2 \quad s_{1,2} = \frac{-\vartheta \pm \sqrt{\vartheta^2 - 4dc}}{2d}, \quad (19)$$

де $d = \frac{\kappa_3 - m_0}{(1 - s_H)^2}$; $\vartheta = m_{II} u_2^2 - \frac{1}{s_H} u_1^2 - 2 \frac{(\kappa_3 - m_0)}{(1 - s_H)^2}$; $c = m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{(1 - s_H)^2}$;

$$m_0 = \frac{M_0}{M_H}; \quad \kappa_3 = \frac{M_c}{M_{с.н.}}; \quad m_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}; \quad u_1 = \frac{U'_1}{U_{нл}}; \quad u_2 = \frac{U'_2}{U_{нл}} \quad (20)$$

З системи рівнянь (4) комплекси фазних напруг динамічного індуктивного навантаження (АД) визначаються за формулами [11]

$$\dot{U}_{an} = Z_1 \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 ; \tag{21}$$

$$\dot{U}_{bn} = a^2 Z_1 \dot{I}_1 + a Z_2 \dot{I}_2 ; \tag{22}$$

$$\dot{U}_{cn} = a Z_1 \dot{I}_1 + a^2 Z_2 \dot{I}_2 . \tag{23}$$

Проведено розрахунок фазних струмів динамічного навантаження 4A90L4УЗ з $I_n = 5 \text{ A}$ (рис. 3) для різних типів робочих машин $x = (0, 1, 2)$, при різних коефіцієнтах завантаження $K_3 = (0,2...1,0)$, в залежності від коефіцієнта напруги зворотної послідовності мережі $K_{U2\%} = (0...10 \%)$ (рис. 3).

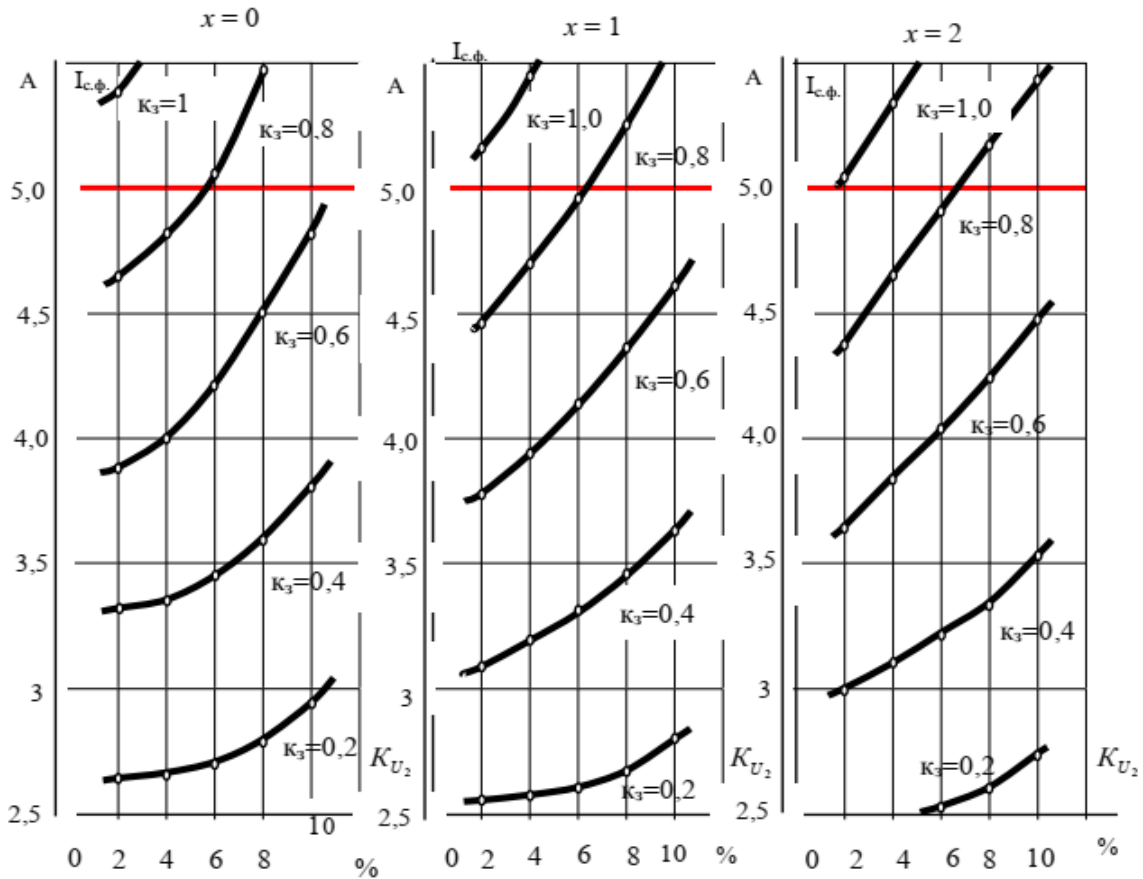


Рис. 3. Графічні залежності $I_{c.ф.} = f(K_{U2}, K_3)$ при $x = (0, 1, 2)$ динамічного навантаження 4A90L4УЗ

Виявлено, що із збільшенням коефіцієнта завантаження K_3 і несиметрії напруги мережі середньквадратичне фазне значення струму збільшується, оскільки ковзання динамічного навантаження збільшується, в наслідок чого змінюються повні опори прямої та зворотної послідовностей, при чому: опір прямої послідовності зменшується, а опір зворотної послідовності збільшується. Причому при рівних умовах коефіцієнту несиметрії напруги зворотної послідовності $K_{U2\%}$, та коефіцієнту завантаження робочої машини K_3 середньквадратичне значення струму досягає більших значень при $x=0$ і менших при $x=2$. При збільшенні коефіцієнту завантаження робочої машини і коефіцієнта несиметрії напруг зворотної послідовності



збільшується ще і напруга зміщення нейтралі, яка і є причиною зміни фазних струмів.

Висновки. Несиметрія напруг мережі, коефіцієнт завантаження робочої машини та коефіцієнт, що характеризує механічну характеристику робочої машини впливають на фазні струми динамічного навантаження. Наведена методика дозволить провести розрахунок фазних струмів і фазних напруг динамічного індуктивного навантаження не тільки для визначених коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній послідовності мережі, а і враховуючи коефіцієнт механічної характеристики робочої машини, приводним двигуном якої він є, та коефіцієнт завантаження робочої машини.

Список використаних джерел

1. Pivnyak G. G., Zhezhenko I. V., Papaika Yu. A., Lysenko O. H. Interharmonics in power supply system. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017. № 6. P. 109–114.

2. Yang, X., Li, X., Ning, B., Tang, T. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016. Vol. 17(1). P. 2–13.

3. Sunderland K., Coppo M., Turri R. Correction current injection method for power flow analysis of unbalanced multiple-grounded 4-wire distribution networks. *Electric Power Systems Research*. 2017. Vol. 132. P. 30–38.

4. Охріменко В. М., Збітнєва М. В., Перепечений В. О. Дослідження несиметричних режимів чотири провідних розподільних мереж. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2018. Вип. 53, № 03. С. 76–80. <https://doi.org/10.33042/2079-424X-2018-3-53-76-81>.

5. Токарев О. В., Борягин Д. О., Шермет О. І. Аналіз причин пошкодження асинхронних двигунів та засоби діагностування їх режимів роботи. *Науковий вісник ДГМА*. 2018. № 1(25Е). С. 39–45.

6. Bahrevar P., Esmaili M. Optimal Charging Strategy of Electric Vehicles in Unbalanced Three-Phase Distribution Network. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9(S1). P. 1–7.

7. Смолянінов В. Г., Сухопара О. М. Методика розрахунку струму споживачів при змінному активно-індуктивному навантаженні в радіоелектронних засобах. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2010. № 40. С. 61-25.

8. Pakkawe S, Nayamin V., Chaiyapon D. Effects of Induction Motor Using Unbalance Voltage. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*. 2018. Vol. 26(3). P. 98–103.

9. Попова І. О. Попядухін В. С. Параметри контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів для розробки ефективного захисту. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2019. Вип. 9, т. 1.



<https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-41>.

10. Kurashkin S. F., Popova I., Popryaduhin V. S., Kovalov O. V. Mathematical model of asynchronous motor diagnosis /Science progress in European countries: new concepts and modern solutions. *Proceedings of the 6th International conference. ORT Publishing. Stuttgart, Germany, 2019. P. 361-366.*

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

Стаття надійшла до редакції 12.09.2023 р.

I. Popova, S. Kvitka, O. Vovk
Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

INVESTIGATION OF AN UNBALANCED MODE IN A DISTRIBUTION NETWORK WITH A DYNAMIC INDUCTIVE LOAD

Summary

The paper analyzes the causes of voltage asymmetry in the distribution network with a voltage of up to 1000 V. a method for assessing the state of asymmetry of a four-wire distribution network with simultaneous inclusion of single-phase and symmetrical three-phase consumers of a dynamic induction nature (asynchronous motors with a short-circuited rotor) is proposed. The study involves an equivalent transformation in which an unbalanced three-phase load is replaced by an equivalent symmetrical load; a symmetrical power line with the same resistances is replaced by an unbalanced power line with different resistances. The calculation of the coefficients of the ratios of Phase voltages between the neutral of the power supply to the terminals of a dynamic inductive load is provided for calculating the resistances of an unbalanced equivalent power line depending on the voltage asymmetry in the distribution network. The network mode is described by a system of equations according to the symmetric component method, Kirchhoff's laws, and complex numbers. Equations for calculating the phase currents of dynamic inductive load depending on the voltages and resistances of the forward and reverse sequences and mathematical equations for calculating the resistances of the forward and reverse sequences of dynamic inductive load depending on the speed of rotation (sliding) based on the parameters of a simplified asynchronous motor replacement scheme are given. Mathematical equations of the dependence of the sliding of a dynamic load (asynchronous motor) on the coefficient of asymmetry of the reverse sequence voltage, moments of the forward and reverse sequence depending on the asymmetry of the mains voltages and the moment of resistance of the working machine for various coefficients that characterize the mechanical characteristic of the working machine are given. The inverse sequence coefficient is calculated for linear network voltage complexes. The presented method makes it possible to calculate the phase currents and voltages of a dynamic inductive load, taking into account the voltage asymmetry coefficient of the reverse sequence, the load coefficient of the working machine.

Keywords: symmetric components, phase current, dynamic inductive load, resistance, load factor, reverse sequence voltage asymmetry coefficient. The presented analysis method makes it possible to calculate the phase currents of a dynamic inductive load in an unbalanced mode.