



УДК 621.316.929

І. О. Попова, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-5429-8269

О. В. Ковальов, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-5822-5494

Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного,

e-mail: iryana.popova@tsatu.edu.ua, тел.: 0983765519

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ ЗМІЩЕННЯ НЕЙТРАЛІ ЯК ДІАГНОСТИЧНОГО ПАРАМЕТРА РЕЖИМУ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Анотація. В статті на основі аналізу несиметрії напруги мережі у розподільчих колах 0,38/0,22 кВ, що викликана великою довжиною ліній електропередачі, змішаним підключенням споживачів, визначено, що несиметричний режим є звичайним режимом мереж. Несиметрія напруг мережі проявляється у різкому погіршенню техніко-економічних характеристик АД (збільшення втрат електроенергії, підвищення нагріву їх складових частин), зниженню їх експлуатаційної надійності і скороченню терміну служби. В роботі аналітично досліджено можливість використання напруги зміщення нейтралі як діагностичного параметра роботи АД при несиметрії напруг мережі при різному ступені завантаження робочих машин. При дослідженні використаний метод симетричних складових трифазної системи величин, символічний метод аналізу електричних кіл і методи дослідження лінійних електричних кіл для розрахунку напруг АД, при несиметрії напруг в мережі через їх симетричні складові струмів і напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей. Використані параметри спрощеної Г-подібної схеми заміщення для визначення комплексів повних опорів струмам прямої й зворотної послідовностей. Наведене аналітичне дослідження дозволяє провести розрахунок напруги зміщення нейтралі АД при несиметрії напруг мережі, фазних напруг і струмів, враховуючи механічну характеристику робочої машини, коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності та коефіцієнт завантаження робочої машини.

Ключові слова: несиметрія напруг, напруга зміщення нейтралі, діагностичний параметр, ковзання, момент навантаження.

Постановка проблеми. Велика аварійність асинхронних двигунів (АД) обумовлена особливостями експлуатації їх в агропромисловому



комплексі, до специфічних умов якої слід віднести низьку якість напруги в мережі, зокрема, її несиметрію. Кожного року виходять з ладу 20-25 % працюючих в АПК АД [1]. Несиметрія напруг мережі у сільських розподільчих колах 0,38/0,22 кВ викликана великою довжиною ліній електропередачі та змішаним підключенням однофазних і трифазних споживачів. Тому несиметричний режим є звичайним режимом зазначених сільських мереж.

Несиметрія напруг мережі проявляється у різкому погіршенню техніко-економічних характеристик АД (збільшення втрат електроенергії, підвищення нагріву їх складових частин), зниженню їх експлуатаційної надійності і скороченню терміну служби. У переважній більшості випадків вихід з ладу асинхронних двигунів відбувається через пошкодження обмотки статора з причини підвищення фазних струмів, що призводить до значного збільшення швидкості теплового зносу їх ізоляції [2].

Аналіз останніх досліджень. В роботі [3] проаналізовано причини виходу з ладу асинхронних двигунів, працюючих при несиметричній напрузі мережі, при якій створюється оберতальне еліптичне магнітне поле, вказано на виникнення вібрацій АД, додаткових втратах енергії в обмотках статора і ротора.

Експериментальне дослідження впливу напруги прямої послідовності на зниження номінальних характеристик АД при несиметричній напрузі приведені в [4], де вказується, що відхилення напруги від номінального значення веде до збільшення фазних струмів статора, збільшення втрат потужності АД, зменшення коефіцієнтів потужності, коефіцієнту корисної дії, збільшення перевищення температури ізоляції обмоток, зменшення строку служби АД.

В роботі [5] при проведенні дослідження АД при анормальних умовах роботи використаний метод симетричних складових для розрахунку напруг і струмів споживачів, підключених до трифазної чотирипровідної колах при несиметрії напруг в мережі через їх симетричні складові струмів і напруг прямої, зворотної і нульової послідовностей. Ця методика може бути використана для розрахунку струмів у трифазних чотирипровідних колах з включеними однофазними статичними споживачами. Методика [5] не враховує, що при зміні величини несиметрії напруги, можливі зміни параметрів електроспоживачів. Це має місце в АД і, відповідно, викликає зміни фазних струмів і напруг двигуна і мережі. В роботі представлена методика визначення параметрів АД при неповно фазному режимі. Але при визначенні параметрів фаз АД не враховується його коефіцієнт завантаження, хоча в залежності від коефіцієнта навантаження змінюється величина ковзання і, відповідно, параметри обмоток АД.



Аналізу впливу несиметрії напруги на роботу АД з відкритими і закритими пазами присвячена робота [6]. В ній проаналізовані впливи несиметричних режимів роботи АД при обриві фаз і ізольованій нейтралі обмоток статора АД, а також при обриві фаз і об'єднанні нульових точок джерела живлення і обмоток статора двигуна.

Про необхідність раннього діагностування несиметричних режимів трифазних АД для уникнення пошкодження обмоток статора йдеться мова в [7]. Але для діагностування аварійних ситуацій і пошкоджень треба мати обґрунтовані граничні значення несиметрії напруги, за межами яких виникає аварійний режим роботи АД.

Для цього треба вдосконалювати методики для визначення параметрів схем заміщення, визначення ковзання АД при обриві фази з урахуванням моменту опору робочої машини, приводом якої є АД. Слід відмітити, що при розрахунку величини ковзання, як правило, не враховується вид робочої машини (її механічна характеристика, а також коефіцієнт, що характеризує зміну моменту опору робочої машини при зміні швидкості) та технічні данні (момент опору при номінальній швидкості і момент опору робочої машини, не залежний від швидкості). Це впливає на точність розрахунку величини ковзання, параметрів двигуна, напруги зміщення нейтралі. Для того, щоб мати у своєму розпорядженні більш точні дані про режими роботи АД при несиметрії напруг мережі необхідно удосконалювати методи розрахунку параметрів обмоток і напруг. Таким чином, існуючі методики дослідження режимів роботи АД, дослідження фазних струмів і напруг, як правило, не враховують залежності їх від несиметрії напруги сільської мережі, завантаження робочих машин та особливостей їх механічних характеристик, зміни параметрів АД. Це обумовлено складнощами у визначенні параметрів обмоток асинхронного двигуна [8].

Формулювання цілей статті (постановка завдання). В роботі поставлена задача аналітично дослідити можливість використання напруги зміщення нейтралі як діагностичного параметра роботи АД із короткозамкненим ротором при несиметрії напруг сільської мережі при різному ступені завантаження робочих машин.

Основна частина. При дослідженні нами використаний метод симетричних складових трифазної системи величин, символічний метод аналізу електричних кіл і методи дослідження лінійних електричних кіл для розрахунку напруг АД, при несиметрії напруг в мережі через їх симетричні складові струмів і напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей. Досліджуване електричне коло складається з симетричного трифазного джерела ЕРС, 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 трифазного навантаження (досліджуваний і інші асинхронні двигуни) [8, 9] (рис. 1). Несиметрія напруг у споживача залежить від ступеню несиметрії напруг у конкретного двигуна, несиметрії струмів ЛЕП, яка з'єднує даний споживач із джерелом живлення. Слід відмітити, що найбільших значень несиметрія напруг досягає в місті підключення несиметричного навантаження.



Рисунок 1. Принципова схема трифазного кола з несиметричним навантаженням

Розглянемо випадок, коли до мережі підключено несиметричне навантаження, яке складається з несиметричного статичного навантаження і АД з короткозамкненим ротором (симетричного трифазного навантаження). Цій принциповій схемі електричного кола відповідає розрахункова електрична схема (рис. 2)

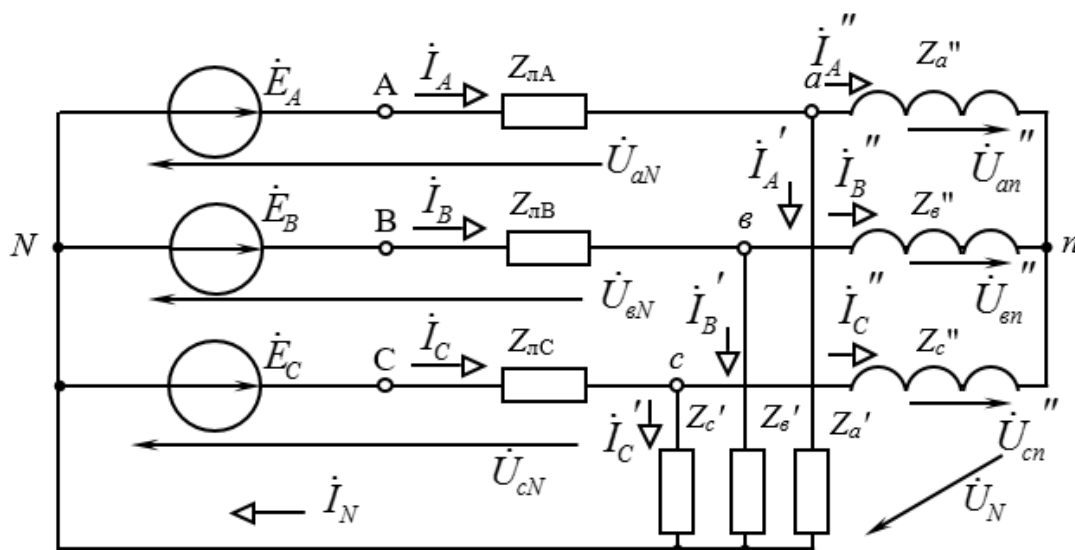


Рисунок 2. Розрахункова схема несиметричного кола

У досліджуваному колі проведено еквівалентне перетворення:

– несиметричне навантаження з фазними опорами Z_a' , Z_b' , Z_c' і Z_a'' , Z_b'' , Z_c'' замінено на еквівалентне симетричне навантаження з фазними опорами Z_{ea} , Z_{eb} , Z_{ec} ;

– симетрична ЛЕП з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ замінена несиметричною ЛЕП з опорами $Z_{елА}$, $Z_{елВ}$, $Z_{елС}$.

Розрахункова схема після еквівалентного перетворення електричного кола показана на рис. 3.

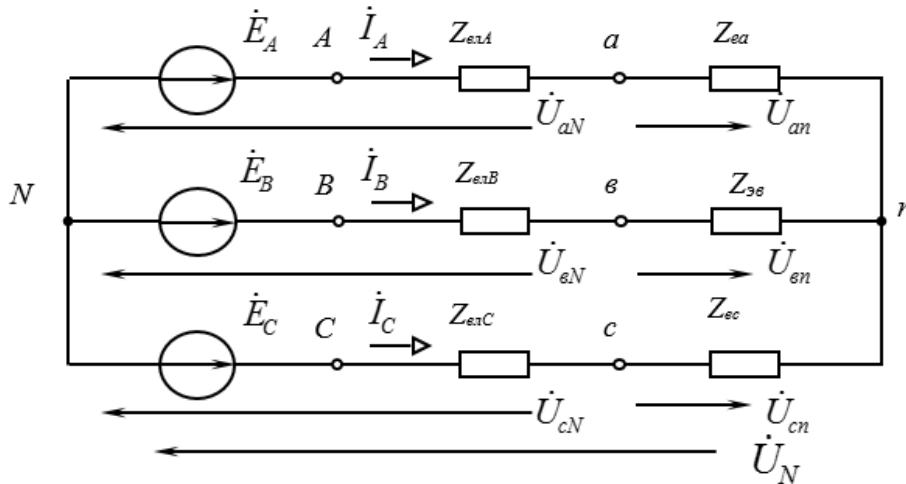


Рисунок 3. Розрахункова еквівалентна схема трифазного електричного кола

Прийmemo ЕРС фази А симетричного джерела рівною номінальній фазній напрузі U_n АД, обмотки статора якого з'єднані зіркою ($E_A = U_n$). Введено наступні позначення

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

$$\frac{Z_{ад}}{Z_{ea}} = \alpha; \quad \frac{Z_{бд}}{Z_{eb}} = \beta; \quad \frac{Z_{сд}}{Z_{ec}} = \gamma, \quad (2)$$

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

m , n , p – коефіцієнти, рівні відношенню U_{aN} , $U_{бN}$, $U_{сN}$ до фазних ЕРС E_A , E_B , E_C , які більше нуля, але менше одиниці.

Опори несиметричної еквівалентної ЛЕП у залежності від несиметрії напруг мережі визначаються наступним чином [8]

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

Напруга зміщення нейтралі, струми і напруги у фазах АД залежать від несиметрії напруг мережі і повних опорів обмоток (прямої і зворотної послідовностей). Використав параметри спрощеної Г-



подібної схеми заміщення, комплекси повних опорів струмам прямої й зворотної послідовностей визначено таким чином [10]

$$Z_1 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r1})}{Z_m + Z_s + Z_{r1}}; \quad Z_2 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r2})}{Z_m + Z_s + Z_{r2}}, \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} Z_m &= r_l + j(x_l + x_\mu); \quad Z_s = r_1' + jx_1'; \\ Z_{r1} &= r_2''/s + jx_2''; \quad Z_{r2} = r_2''/(2-s) + jx_2''. \end{aligned} \quad (5)$$

Повні опори фаз асинхронного двигуна є функцією ковзання s . Для визначення залежності ковзання від несиметрії напруг мережі прийнято

$$M = M_1 - M_2; \quad M = M_c, \quad (6)$$

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

M_c – момент опору робочої машини, Н·м.

Напруги прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей мережі, а також коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності визначено так

$$\dot{U}'_1 = 1/3(\dot{U}_{ab} + a\dot{U}_{bc} + a^2\dot{U}_{ca}); \quad (7)$$

$$\dot{U}'_2 = 1/3(\dot{U}_{ab} + a^2\dot{U}_{bc} + a\dot{U}_{ca}); \quad (8)$$

$$k_{U2\%} = (U'_2/U_{нл}) \cdot 100, \quad (9)$$

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» має вигляд

$$M_0 + (k_3 M_{c.н.} - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x = M_1 - M_2, \quad (10)$$

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

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

s_H – номінальне ковзання;

k_3 – коефіцієнт завантаження;

x – коефіцієнт, що характеризує механічну характеристику РМ.

Ковзання АД у функції несиметрії напруг мережі і коефіцієнта завантаження робочої машини при

$x = 0$:

$$s = \frac{k_3}{\frac{u_1}{s_H} - u_2^2 m_{II}}; \quad (11)$$

$x = 1$:

$$s = \frac{m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{1 - s_H}}{\frac{\kappa_3 - m_0}{1 - s_H} + \frac{1}{s_H} u_1^2 - m_{II} u_2^2}; \quad (12)$$

$x = 2$:

$$s_{1,2} = \frac{-v \pm \sqrt{v^2 - 4dc}}{2d}, \quad (13)$$

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

$$m_0 = \frac{M_0}{M_H}; \quad \kappa_3 = \frac{M_c}{M_{c.H}}; \quad m_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}; \quad u_1 = \frac{U'_1}{U_{нл}}; \quad u_2 = \frac{U'_2}{U_{нл}}. \quad (14)$$

Використовуючи метод симетричних складових і розклад напруги \dot{U}_{Aa} , \dot{U}_{Bb} , \dot{U}_{Cc} на симетричні складові \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_0 , при цьому прийняв фазу А за основну, складено систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_1; \\ 0 &= Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елA} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \\ a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елB} (a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2); \\ a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елC} (a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2), \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

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

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

a – фазний множник, $a = e^{j120^\circ}$.

Визначив із системи рівнянь (15) 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 і напругу зміщення нейтралі

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2; \quad \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2; \quad \dot{U}_N = -\dot{U}_0. \quad (16)$$

Аналіз системи рівнянь (4) показав, що Комплекси фазних напруг асинхронного двигуна визначаються за формулами

$$\dot{U}_{an} = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_2; \quad (17)$$

$$\dot{U}_{bn} = a^2 \dot{I}_1 Z_1 + a \dot{I}_2 Z_2; \quad (18)$$

$$\dot{U}_{cn} = a\dot{I}_1 Z_1 + a^2 \dot{I}_2 Z_2. \quad (19)$$

Проаналізуємо змінення \dot{U}_N в залежності від ковзання за допомогою рівняння кругової діаграми, використав графічний метод побудови кругової діаграми (рис. 1).

Запишемо рівняння кругової діаграми наступним чином [8]

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_1}{1 + \frac{z_1}{z_2} e^{j\psi}}, \quad (20)$$

де ψ – кут, що дорівнює різниці кутів зсуву фаз прямої ϕ_1 і зворотної ϕ_2 послідовностей, градуси.

\dot{E}_1 – комплекс електрорушійної сили джерела, В.

При побудові кругової діаграми (рис. 4) приймемо, що відрізок ОК відповідає, у масштабі, модулю напруги зміщення нейтралі при короткому замиканні фазної обмотки асинхронного двигателя. Відрізок ОА дорівнює, у масштабі модулю повного опору зворотної послідовності z_2 . По лінії змінного параметра (л.з.п.) АN відкладаємо модуль повного опору, що визначений з урахуванням коефіцієнта завантаження і ковзання $z_1 = f(\kappa_s, S)$. Аналіз кругової діаграми показує, що в разі, коли опір прямої послідовності z_1 дорівнює нулю, що є режимом короткого замикання фазної обмотки, вектор напруги зміщення нейтралі співпадає з відрізком ОК, а напруга зміщення нейтралі дорівнює фазній напрузі мережі.

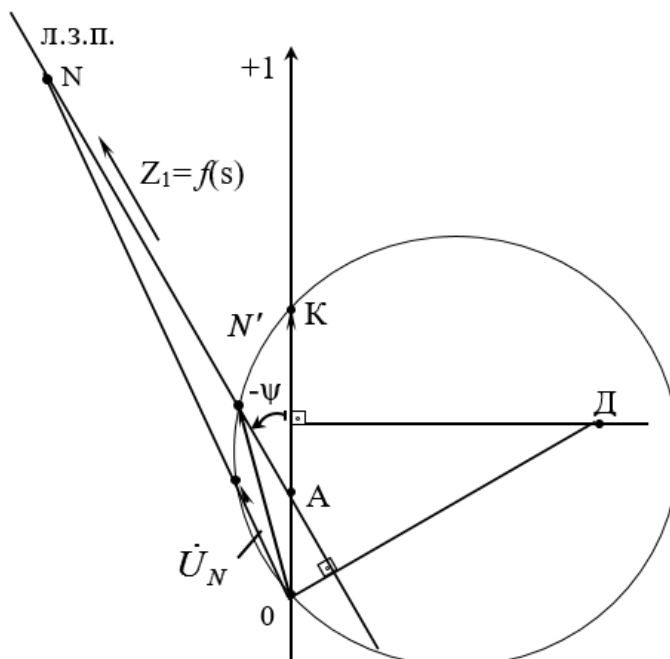


Рисунок 4. Кругова діаграма для дослідження напруги зміщення нейтралі асинхронного двигуна

При роботі АД в симетричному режимі напруг, коли напруги зворотної послідовності і струми зворотної послідовності відсутні (тобто опір зворотної послідовності z_2 дорівнює нулю), напруга зміщення нейтралі теж дорівнює нулю. В несиметричному режимі при глибокій несиметрії напруга зміщення нейтралі при зміні z_1 від нуля до нескінченності змінюється від E_1 , рівної фазній напрузі джерела у симетричному режимі, до нуля.

При збільшенні ковзання опір прямої послідовності z_1 зменшується, що призводить до зростання напруги зміщення нейтралі. Напруга зміщення нейтралі асинхронного двигуна буде дорівнювати чисельно, згідно властивостей симетричних складових у трифазному колі, напрузі нульової послідовності.

Висновки. Наведене аналітичне дослідження дозволяє визначити напругу зміщення нейтралі АД, як діагностичного параметра при несиметрії напруг мережі, враховуючи механічну характеристику робочої машини, коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності та коефіцієнт завантаження робочої машини.

Список використаних джерел

1. Крупенин Н. В., Голубев А. В., Завидей В. И. Новые возможности в диагностике электрических машин. *Электричество*. 2011. № 9. С. 45-48.
2. Токарев О. В., Борягин Д. О., Шеремет О. И. Анализ причин повреждения асинхронных двигателей та засобів діагностування їх режимів роботи. *Научный вестник ДГМА*. 2018. № 1 (25Е). С. 39-45.
3. Pillay P., Manyage M. J. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies. *IEEE Trans. Energy Conversion*. 2006. Vol. 21, № 4. P. 813-822. DOI: 10.1109/TEC.2005.853724.
4. Experimental study of the effect of positive sequence voltage on the derating of induction motors under voltage unbalance / E. C. Quisque et al. *Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. 2011. P. 908-912. DOI: 10.1109/IEMDC.2011.5994936.
5. Nadir B., Faouzi R. M., Ahmed B. The investigation of induction motors under abnormal condition. *TOJSAT: Online journal of science and technology*. 2013. Vol. 3, № 4. P. 150-158.
6. Donolo P., Bossio G., Angelo C. D. Analysis of voltage unbalance effects on induction motors with open and closed slots. *Energy Conversion & Management*. 2011. Vol. 52, № 5. P. 2024-2030. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.10.045.
7. Samsi R., Ray A., Mayer J. Early detection of stator voltage imbalance in three-phase induction motors. *Electric Power Systems Research*. 2009. Vol. 79, № 1. P. 239-245.



8. Попова І. О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.16 / ТДАТА. Мелітополь, 2003. 20 с.

9. Нестерчук Д. М., Попрядухін В. С. Аналіз впливу несиметричних навантажень на режими роботи трифазного асинхронного електродвигуна. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. Харків, 2017. Вип. 186: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 85-87.

10. Попова І. О., Попрядухін В. С. Параметри контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів для розробки ефективного захисту. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 9, т. 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-41.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2021 р.

I. Popova, O. Kovalov
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

DETERMINATION OF NEUTRAL DISPLACEMENT VOLTAGE AS A DIAGNOSTIC PARAMETER OF ASYNCHRONOUS MOTOR OPERATION

Summary

The asymmetry of network voltages in rural distribution circuits 0.38 / 0.22 kV is caused by the long length of power lines and mixed connection of single-phase and three-phase consumers, so the asymmetric mode is the usual mode of these rural networks. The asymmetry of mains voltages is manifested in a sharp deterioration of the technical and economic characteristics of the BP (increased electricity losses, increased heating of their components), reduced operational reliability and reduced service life. In the vast majority of cases, the failure of induction motors occurs due to damage to the stator winding due to increased phase currents, which leads to a significant increase in the rate of thermal wear of their insulation. The possibility of using the neutral bias voltage as a diagnostic parameter of BP operation with a short-circuited rotor with asymmetry of rural network voltages at different degrees of loading of working machines is analytically investigated. The method of symmetric components of three-phase system of quantities, symbolic method of analysis of electric circuits and methods of research of linear electric circuits for calculation of BP voltages, at asymmetry of voltages in a network through their symmetrical components of currents and voltages of direct, return and zero sequences are used. The above analytical study allows to calculate the bias voltage of the neutral BP in the asymmetry of mains voltages, phase voltages and currents, taking into account the mechanical characteristics of the working machine, the coefficient of voltage asymmetry in reverse order and the load factor of the working machine.

Key words: voltage asymmetry, neutral bias voltage, diagnostic parameter, slip, load moment.



И. А. Попова, А. В. Ковалев
Таврический государственный агротехнологический университет
имени Дмитрия Моторного

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ НЕЙТРАЛИ КАК
ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА РАБОТЫ АСИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ**

Аннотация

В статье на основе анализа несимметрии напряжений в распределительных сетях 0,38 / 0,22 кВ, вызванной большой длиной линий электропередачи, смешанным подключением потребителей, установлено, что несимметричный режим является обычным режимом указанных сетей. Несимметрия напряжений сети проявляется в резком ухудшении технико-экономических характеристик АД, снижении их эксплуатационной надежности и сокращении срока службы. В большинстве случаев выход из строя АД происходит из-за повреждения обмотки статора из-за повышения фазных токов, что приводит к увеличению скорости теплового износа их изоляции. В работе аналитически исследована возможность использования напряжения смещения нейтрали в качестве диагностического параметра работы АД при несимметрии напряжений сельской сети при различной степени загрузки рабочих машин. Используются параметры упрощенной Г-образной схемы замещения для определения комплексов полных сопротивлений токам прямой и обратной последовательностей. Приведенное аналитическое исследование позволяет провести расчет напряжения смещения нейтрали АД при несимметрии напряжений сети, фазных напряжений и токов, учитывая механическую характеристику рабочей машины, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности и коэффициент загрузки рабочей машины.

Ключевые слова: несимметрия напряжений, напряжение смещения нейтрали, диагностический параметр, скольжение, момент нагрузки.