

I. В. ХОМЕНКО, О. А. ПЛАХТІЙ, Д. А. ШЕЛЕСТ

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗУБЦЕВИХ ГАРМОНІК

Проведено гармонійний аналіз магнітного поля асинхронного двигуна з обліком двосторонньої зубчастості й магнітної асиметрії повітряного зазору. Отримано спектр у вигляді нескінченних рядів просторово-часових гармонічних складових. Магнітна асиметрія асинхронного двигуна враховує статичний і динамічний ексцентриситети, магнітну асиметрію сталі. Отримано 27 різних просторових гармонік поля в повітряному зазорі асинхронного двигуна. Розглянутий спектр гармонік магнітного поля буде наводити в обмотках статора електрорушійну силу із відповідними частотами. Поля з $\gamma \pm \kappa$ парами полюсів обертаються асинхронно з ротором і демпфуються полями, створеними струмами білячої клітки ротора. Таким чином, магнітна асиметрія впливає на просторові гармоніки магнітного поля, змінюючи кутові швидкості їхнього обертання у повітряному зазорі. Поява магнітної асиметрії викликає перерозподіл просторово-часового розподілу гармонік магнітного поля зубцевої частоти, що приводить до зміни амплітудних і фазових співвідношень між величинами. Це обумовлює появу несиметричної системи електрорушійної сили зубцевої частоти в статорних обмотках, а, отже, і різний вплив асиметрії повітряного зазору на рівні симетричних складових. Приведено формули для визначення симетричних складових. У загальному випадку на рівні симетричних складових електрорушійної сили зубцевої частоти впливають дві групи факторів, що визначають несиметричні або відмінні від номінальних режими роботи асинхронного двигуна одного типорозміру. Збільшення магнітної асиметрії повітряного зазору викликає нелінійний, близький до параболічного характер зростання існуючих симетричних складових. Симетричні складові електрорушійної сили зубцевої частоти викликають протікання струмів відповідних складових по замкнутих контурах обмоток статора асинхронного двигуна та всієї системи електропостачання. Приведена розрахункова схема заміщення трифазної мережі для зубцевої гармоніки електрорушійної сили. Фазні опори обмоток обертових електричних машин для несиметричних трифазних мереж неоднакові для різних послідовностей. Основним методом розрахунку розглянутої мережі є метод симетричних складових. Розрахунок зроблено для однієї основної фази за схемами заміщення, що відповідає симетричним складовим електрорушійної сили зубцевої частоти. У результаті теоретичних досліджень отримані функціональні залежності впливу магнітної асиметрії на рівні й розподіл фазних струмів зубцевої частоти. Характер впливу на рівні симетричних складових близький до параболічного, причому найбільш чутливою до зміни магнітної асиметрії є неосновна симетрична складова нульової послідовності. Розроблена методика розрахунку струмів та напруг зубцевих частот асинхронного двигуна в умовах електроспоживання. Теоретичні положення підтверджуються експериментальними дослідженнями. Встановлено, що рівні зубцевих гармонік в системах електропостачання, як правило, не перевищують 10–15 % від рівня основної частоти. Це призводить до зниження надійності функціонування електричних мереж та скорочення строку служби основного енергетичного обладнання на підприємстві. Однак, найбільшу загрозу для електрогосподарств промислових підприємств викликає частотно-амплітудний резонанс на зубцевих частотах. Це обумовлено специфічною природою зубцевих гармонік асинхронного двигуна (парність, залежність від навантаження та різноманітних технологічних факторів). Найбільша загроза виникає у разі використання однотипних асинхронних двигунів зі схожими режимами їх експлуатації. Приведено осцилограми експериментальних досліджень.

Ключові слова: зубцева гармоніка, асинхронний двигун, магнітна асиметрія, електрорушійна сила, індуктивність обмотки, метод симетричних складових, електрична мережа.

I. V. KHOMENKO, O. A. PLAKHTI, D. A. SHELEST,

ANALYSIS OF POWER GRID OPERATION MODES CONSIDERING THE INFLUENCE OF TOOTH HARMONICS

A harmonic analysis of the magnetic field of an asynchronous motor was carried out, taking into account bilateral gearing and magnetic asymmetry of the air gap. The spectrum is obtained in the form of infinite series of spatio-temporal harmonic components. Magnetic asymmetry of an asynchronous motor takes into account static and dynamic eccentricity, magnetic asymmetry of steel. 27 different spatial harmonics of the field in the air gap of the induction motor were obtained. The considered spectrum of harmonics of the magnetic field will be induced in the stator windings by the electromotive force with the corresponding frequencies. The fields with $\gamma \pm \kappa$ pairs of poles rotate asynchronously with the rotor and are damped by the fields created by the currents of the rotor cage. Thus, the magnetic asymmetry affects the spatial harmonics of the magnetic field, changing the angular velocities of their rotation in the air gap. The appearance of magnetic asymmetry causes a redistribution of the spatio-temporal distribution of the harmonics of the magnetic field of the tooth frequency, which leads to a change in the amplitude and phase relationships between the quantities. This leads to the appearance of an asymmetric system of electromotive force of tooth frequency in the stator windings, and, therefore, to a different effect of the asymmetry of the air gap at the level of symmetrical components. In the general case, at the level of symmetric components, the electromotive force of the gear frequency is influenced by two groups of factors that determine asymmetric or different from the nominal operating modes of an asynchronous motor of the same size. An increase in the magnetic asymmetry of the air gap causes a nonlinear, close to parabolic character of the growth of the existing symmetrical components. Symmetric components of the electromotive force of the toothed frequency cause currents of the corresponding components to flow through the closed circuits of the stator windings of the asynchronous motor and the entire power supply system. The calculation scheme for replacing a three-phase network for toothed harmonics of electromotive force is given. The phase resistances of the windings of rotating electric machines for asymmetric three-phase networks are not the same for different sequences. The main method of calculating the considered network is the method of symmetrical components. The calculation is made for one main phase according to the substitution schemes, which corresponds to the symmetrical components of the electromotive force of the tooth frequency. As a result of theoretical studies, functional dependences of the influence of magnetic asymmetry on the level and distribution of phase currents of the toothed frequency were obtained. The nature of the influence at the level of symmetric components is close to parabolic, and the most sensitive to changes in magnetic asymmetry is the minor symmetric component of the zero sequence. The method of calculating the currents and voltages of the toothed frequencies of asynchronous motors in the conditions of power consumption has been developed. Theoretical propositions are confirmed by experimental studies. It has been established that the levels of toothed harmonics in power supply systems, as a rule, do not exceed 10–15 % of the level of the fundamental frequency. This leads to a decrease in the reliability of the operation of electrical networks and a shortening of the service life of the main energy equipment at the enterprise. However, frequency-amplitude resonance at tooth frequencies causes the greatest threat to the power plants of industrial enterprises. This is due to the specific nature of gear harmonics of asynchronous motors (parity, dependence on load and various technological factors).

© I. В. Хоменко, О. А. Плахтій, Д. А. Шелест, 2023

The biggest threat arises when using the same type of asynchronous motors with similar operating modes. Oscillograms of experimental studies are given.

Keywords: toothed harmonica, asynchronous motor, magnetic asymmetry, electromotive force, winding inductance, method of symmetrical components, electrical network.

Вступ. Стратегія розвитку електроенергетики України базується на впровадженні SMART GRID технологій, що забезпечує підвищення надійності, якості і ефективності електропостачання. Якість електроенергії (ЕЕ) є однією з найважливіших її характеристик. Від параметрів якості безпосередньо залежать термін служби електричного обладнання, їх працездатність і ефективність [1, 2].

Споживачі ЕЕ суттєво впливають на параметри якості. В зв'язку з різноманітними факторами в електричних мережах систем електропостачання з'являються вищі гармоніки, що обумовлюють несинусоїдальні режими їх роботи. Це негативно впливає на надійність і ефективність роботи, як електричної мережі в цілому, так і окремо електроустаткування. Експериментально встановлено, що причиною декількох серйозних аварій на крупних підприємствах стала поява окремих вищих гармонік, частоти яких збігаються з зубцевими частотами [3]. Основним джерелом зубцевих гармонік є асинхронні двигуни, найбільш поширені споживачі ЕЕ.

Огляд літературних джерел. Актуальність питання вищих гармонік потребує серйозних теоретичних і практичних досліджень. Результати класичних досліджень наведено в працях, як зарубіжних [4], так і вітчизняних провідних спеціалістів [5]. Значні збитки на виробництві від несинусоїдальності струмів і напруг потребують детальних досліджень вищих гармонік в електричних мережах крупних підприємств, а також їх вплив на роботу окремого обладнання [6]. Дуже корисними є дослідження природи вищих гармонік в різноманітних інверторах [7] та засоби боротьби з ними [8]. Результати багаторічних досліджень систематизовано в спеціальних нормативних документах [5], а на близьку перспективу з урахуванням вимог енергетик Євросоюзу до якості ЕЕ в електричних мережах України [9]. Актуальність цих питань ще більше загострюється при впровадженні SMART GRID технологій в розподільчих електричних мережах та системах електропостачання [10], що потребує постійного моніторингу параметрів якості ЕЕ і зокрема рівнів вищих гармонік в режимі реального часу [11]. Всі наведені літературні джерела містять, як правило, інтегральні характеристики вищих гармонік тобто їх спектральний аналіз. Дослідженню природи окремих гармонік приділяється недостатньо уваги. Виняток складають треті гармоніки, що з'являються в результаті нелінійних властивостей трансформатора [12].

Мета роботи полягає в розробці методів розрахунку струмів та напруг на зубцевій частоті в електричних мережах систем електропостачання. Ці методи засновані на дослідженнях електромагнітних перетворень в асинхронному двигуні на зубцевій частоті і характеризують вплив різноманітних

факторів на рівні гармонійних складових. Теоретичні дослідження підкріплюються експериментальними результатами.

Магнітне поле асинхронного двигуна з урахуванням двосторонньої зубчастості і магнітної асиметрії. Підставляючи в загальну формулу для індукції магнітного поля значення магніторушійної сили (МРС) і питомої провідності повітряного зазору з обліком двосторонньої зубчастості й магнітної асиметрії одержимо спектр магнітного поля у повітряному зазорі асинхронного електродвигуна у вигляді нескінченних рядів просторово-часових гармонічних складових:

$$B(\varphi, t) = F(\varphi, t) \lambda_c(\varphi) \lambda_p(\varphi, t) \lambda_a(\varphi, t) \quad (1)$$

Магнітна асиметрія асинхронного двигуна (АД) враховує статичний і динамічний ексцентриситети, магнітну асиметрію сталі тощо.

У результаті відповідних перетворень отримано 27 різних просторових гармонік поля в повітряному зазорі. Із усього різноманіття гармонік виділяють чотири групи. До першої групи належать гармоніки, що виникають у трифазному двигуні при гладкому рівномірному повітряному зазорі. Їхні порядки й амплітуди визначаються порядком і амплітудою гармонік МРС. Друга група гармонік обумовлена зубчастістю статора, третя – зубчастістю ротора. Четверту групу становлять гармоніки взаємного впливу пазів статора й ротора на поле у повітряному зазорі.

Амплітуди гармонік першої групи обумовлені амплітудами гармонік МРС і гармонік питомої провідності. Серед гармонік другої групи з'являються просторові гармоніки з порядком

$$\begin{aligned} iZ_c \pm \kappa + \gamma p, \\ iZ_c \pm \kappa - \gamma p. \end{aligned}$$

Перший ряд гармонік обертається асинхронно з ротором з кутовою швидкістю

$$\frac{\omega_{cy}}{iZ_c \pm \kappa + \gamma p},$$

а другий – з кутовою швидкістю

$$\frac{\omega_{cy}}{iZ_c \pm \kappa - \gamma p}.$$

Їх амплітуди визначаються амплітудами гармонік МРС, а також гармоніками провідності з урахуванням зубчастості статора і магнітної асиметрії.

У спектрі гармонік третьої групи виділяються гармоніки з порядком

$$jZ_p \pm \kappa - \gamma p,$$

$$jZ_p \pm \kappa + \gamma p,$$

і відповідними кутовими швидкостями.

Для четвертої групи характерна поява гармонік з порядком

$$jZ_p + iZ_c \pm \kappa - \gamma p,$$

$$jZ_p - iZ_c \pm \kappa - \gamma p,$$

$$jZ_p + iZ_c \pm \kappa + \gamma p,$$

$$jZ_p - iZ_c \pm \kappa + \gamma p.$$

У повітряному зазорі вони обертаються відповідно з кутовими швидкостями:

$$\frac{jZ_p \omega_p - \omega_{cy}}{jZ_p + iZ_c \pm \kappa - \gamma p};$$

$$-\frac{jZ_p \omega_p - \omega_{cy}}{jZ_p - iZ_c \pm \kappa - \gamma p};$$

$$-\frac{jZ_p \omega_p + \omega_{cy}}{jZ_p + iZ_c \pm \kappa + \gamma p};$$

$$-\frac{jZ_p \omega_p + \omega_{cy}}{jZ_p - iZ_c \pm \kappa + \gamma p}.$$

Амплітуди зазначених гармонік визначаються амплітудами гармонік МРС, гармонік питомої провідності з обліком двосторонньої зубчастості й магнітної асиметрії.

Розглянутий спектр гармонік магнітного поля буде наводити в обмотках статора електрорушійної сили (ЕРС) із відповідними частотами. Поля з $\gamma p \pm \kappa$ парами полюсів обертаються асинхронно з ротором і демпфуються полями, створеними струмами білячої клітки ротора.

Таким чином, магнітна асиметрія впливає на просторові гармоніки магнітного поля всіх чотирьох груп, змінюючи кутові швидкості їхнього обертання у повітряному зазорі.

Вплив магнітної асиметрії на рівні й розподіл ЕРС зубцевої частоти. Поля, обумовлені взаємодією обертових, а також пульсуючих гармонік МРС статора порядку p і гармонік провідності повітряного зазору з урахуванням двосторонньої зубчастості наводять у фазних обмотках статора ЕРС із частотами ω_{cv} та

$$-(j \frac{Z_p}{p} \omega_p \pm \omega_{cv}).$$

Статична магнітна асиметрія не змінює частотний спектр ЕРС, а впливає тільки на їхні амплітудні значення. Це обумовлено, по-перше, впливом магнітної асиметрії на порядок просторових гармонік магнітного поля, по-друге, збільшенням амплітудних значень гармонік магнітного поля з ростом величини магнітної асиметрії. На відміну від

статичної динамічна (динамічний ексцентриситет) викликає появу нових частот у фазних обмотках статора:

$$\omega_{vc} \pm \kappa \omega_\varepsilon,$$

$$-(j \frac{Z_p}{p} \omega_p \pm \omega_{cv} - \kappa \omega_\varepsilon),$$

$$-(j \frac{Z_p}{p} \omega_p \pm \omega_{cv} + \kappa \omega_\varepsilon).$$

Зазначені частоти ЕРС наводяться в обмотках просторовими гармоніками магнітного поля, пов'язаними з появою динамічно-го ексцентриситету. Аналогічно випадку статичної ексцентриситетності повітряного проміжку величина динамічного ексцентриситету впливає на порядок і амплітудні значення гармонік магнітного поля й, отже, на рівні ЕРС, що наводяться у статорних обмотках.

Як було показано у деяких роботах [6], найбільш чутливими до зростання магнітної асиметрії повітряного зазору є гармоніки зубцевого порядку з електричними частотами

$$\omega_{zb} = \omega_1 [\frac{Z_2}{p} (1 - S) \pm 1]. \quad (2)$$

ЕРС зубцевої частоти, що наводиться у кожній фазі обмотки статора, подається у вигляді гармонічних коливань:

$$\dot{E}_{ZA} = E_T \sqrt{A_A^2 + B_A^2} e^{j\theta_A},$$

$$\dot{E}_{ZB} = E_T \sqrt{A_B^2 + B_B^2} e^{j\theta_B},$$

$$\dot{E}_{ZC} = E_T \sqrt{A_C^2 + B_C^2} e^{j\theta_C}. \quad (3)$$

де

$$A_A = \sum_{N=1}^{\varphi_n NA} \int_{\varphi_k NA}^{\varphi_n NA} \sigma(\varphi) \sin(Z_p + p)\varphi d\varphi,$$

$$B_A = \sum_{N=1}^{\varphi_n NA} \int_{\varphi_k NA}^{\varphi_n NA} \sigma(\varphi) \cos(Z_p + p)\varphi d\varphi, \quad (4)$$

$$\theta_A = \arccos \frac{-B_A}{\sqrt{A_A^2 + B_A^2}} \quad (5)$$

для фази А.

Величину $\sigma(\varphi)$, що входить у вираз (4), знаходять:

$$\sigma(\varphi) = (1 + \lambda_i \cos Z_c p) [\lambda_{\omega} + \lambda_{\omega} \cos(\varphi - \psi_\varepsilon)].$$

Вона визначається залежністю величин $\dot{E}_{ZA}, \dot{E}_{ZB}, \dot{E}_{ZC}$ від величини і напрямку площини магнітної асиметрії.

Наведений склад просторових гармонік магнітного поля має місце як у випадку роботи АД у

три-чотири- та п'ятипровідній трифазній мережі. Це обумовлено тим, що гармоніки магнітного поля, утворені пульсуючими MPC, не утворюються в обмотках статора ЕРС із верхніми і нижніми зубцевими частотами.

Залежно від співвідношення $\frac{Z_p}{p} \pm 1$ розглянемо

два випадки, при яких $\frac{Z_p}{p} \pm 1 =$ дорівнює цілому

числу, та $\frac{Z_p}{p} \pm 1 \neq$ цілому числу.

У першому випадку при відсутності магнітної асиметрії несинусоїдальне обертове магнітне поле наводить у фазних обмотках статора симетричну систему ЕРС зубцевої частоти прямої, зворотної або нульової послідовності. Послідовність симетричної системи ЕРС визначається порядком просторових гармонік магнітного поля.

Відзначимо, що у випадку $\gamma = 2R + 1$ ($R = 3, 4, 5, \dots, n$) основний внесок у рівні фазних ЕРС вносить просторова гармоніка порядку $jZ_p \pm \kappa - \gamma p$, $jZ_p \pm \kappa + \gamma p$. Отже, і симетрична складова зазначеної гармоніки магнітного поля буде переважною у порівнянні із симетричною складовою, обумовленою просторовими гармоніками зубцевого порядку.

Поява магнітної асиметрії викликає перерозподіл просторово-часового розподілу гармонік магнітного поля зубцевої частоти, що приводить до зміни амплітудних і фазових співвідношень між величинами. Це обумовлює появу несиметричної системи ЕРС зубцевої частоти в статорних обмотках, а, отже, і різний вплив асиметрії повітряного зазору на рівні симетричних складових.

У другому випадку, при відсутності асиметрії обертові гармоніки магнітного поля наводять у фазних обмотках статора несиметричну систему ЕРС зубцевої частоти. У загальному випадку несиметрична система ЕРС може бути розкладена на симетричні складові прямої, зворотної й нульової послідовності. Ступінь несиметрії трифазної системи ЕРС зубцевої частоти визначається, по-перше, фазовими співвідношеннями просторових гармонік магнітного поля стосовно статорної обмотки, по-друге, амплітудними співвідношеннями складових ЕРС, що наводяться відповідними просторовими гармоніками магнітного поля.

Магнітна асиметрія АД підсилює нерівномірність просторово-часового розподілу гармонік магнітного поля зубцевої частоти, що збільшує несиметрію трифазної системи ЕРС. Позначаючи систему прямої послідовності індексом – 1, зворотної – 2, нульової – 0, одержуємо наступне.

Формули для визначення симетричних складових мають вигляд:

$$E_{ZA} = \frac{1}{3}(\dot{E}_{ZA} + aE_{ZB} + a^2E_{ZC}),$$

$$E_{ZA_2} = \frac{1}{3}(\dot{E}_{ZA} + a^2E_{ZB} + aE_{ZC}),$$

$$E_{ZA_0} = \frac{1}{3}(\dot{E}_{ZA} + E_{ZB} + E_{ZC}). \quad (6)$$

У загальному випадку на рівні симетричних складових ЕРС зубцевої частоти впливають дві групи факторів, що визначають несиметричні або відмінні від номінальних режими роботи АД одного типорозміру.

Першу групу становлять фактори, пов'язані з кількісною оцінкою якості електроенергії й характеризують напругу й частоту споживаного електричного струму:

- відхилення й розмах зміни напруги;
- несиметрія фазних напруг і зсуву нейтралі;
- несинусоїдальність кривої напруги;
- відхилення й коливання частоти.

Другу групу становлять фактори, обумовлені технологічними відхиленнями й різними видами асиметрій АД:

- припустиме відхилення величини середнього зазору (10 %),
- величина й напрямок площини ексцентриситету;
- несиметрія опорів фазних обмоток статора й ротора;
- анізотропії магнітопроводу АД.

З урахуванням вимог Держстандарту України 13109-97 «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання для споживачів, що приєднуються до електричних мереж загального призначення» пропонується обмежитися обліком таких факторів:

- відхиленням і розмахом зміни напруги;
- припустимим розкидом величини середнього зазору для АД малої потужності;
- величиною й напрямком площини магнітної асиметрії;
- анізотропією магнітопроводу.

Таким чином, функціональні залежності симетричних складових ЕРС зубцевої частоти подамо у вигляді:

$$E_{ZA_1} = f(\dot{U}_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a),$$

$$E_{ZA_2} = f(\dot{U}_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a),$$

$$E_{ZA_0} = f(\dot{U}_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a). \quad (7)$$

Збільшення магнітної асиметрії повітряного зазору викликає нелінійний, близький до параболічного зростання існуючих симетричних складових. Якщо їхні амплітудні значення визначаються відповідними амплітудами просторових гармонік магнітного поля, обмотувальними коефіцієнтами АД, то залежність величин E_{ZA1} , E_{ZA2} , E_{ZA3} від магнітної асиметрії визначається впливом

величин λ_{ao} , λ_{ak} на амплітудні значення гармонік магнітного поля.

Комплексний опір фазної обмотки статора на зубцевої частоті у відповідно до схеми заміщення подається у вигляді [12]:

$$\underline{Z} = r + j\omega_z(L_p + L_z + L_\sigma). \quad (8)$$

Для струмів зворотної послідовності схема заміщення й формули для визначення її параметрів мають вигляд, аналогічний наведеному для струмів прямої послідовності.

Значення L_z , L_σ і r визначаються за формулами з урахуванням зміни кількості полюсів для третьої гармоніки.

Відповідно до схеми заміщення комплексний опір статорної обмотки на зубцевої частоті для струмів нульової послідовності виражається таким чином:

$$\underline{Z} = r + j\omega_z(L_{3p} + L_z + L_\sigma). \quad (9)$$

Вплив магнітної асиметрії на симетричні складові струмів зубцевої частоти. Магнітні поля зубцевого порядку, що обертаються у нерівномірному повітряному зазорі, індукують в обмотках статора несиметричну систему ЕРС. Симетричні складові ЕРС зубцевої частоти викликають протікання струмів відповідних складових по замкнутих контурах три фаз обмотки статора АД та всієї системи електропостачання.

Схема заміщення цехової мережі низької напруги (380/220 В) наведена на рис. 1 (загальна точка електричної машини, що діагностується, з'єднана з нульовим провідником джерела трифазної напруги) [6]. Розглянута система розподілу електроенергії забезпечує спільне живлення електродвигунів потужністю до кількох сотень кіловат і освітлювальних приймачів.

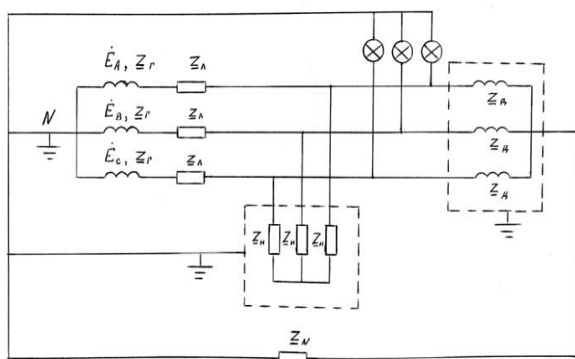


Рисунок 1 – Схема цехової мережі низької напруги

Розрахункова схема заміщення трифазної мережі для зубцевої гармоніки ЕРС наведена на рис. 2.

Фазні опори обмоток обертових електричних машин для несиметричних трифазних мереж неоднакові для різних послідовностей. Основним методом розрахунку розглянутої мережі є метод

симетричних складових, що дозволяє визначити фазні струми симетричної складової при несиметричній системі ЕРС. Розрахунок зроблено для однієї основної фази, наприклад фази А, за схемами заміщення, що відповідає симетричним складовим ЕРС зубцевої частоти (рис. 3).

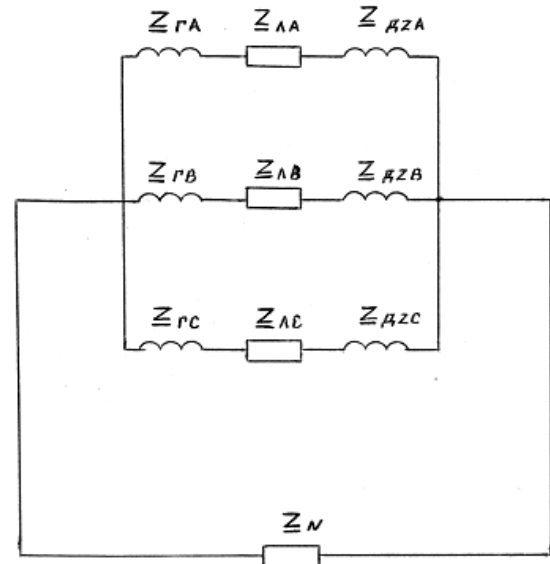


Рисунок 2 – Схема заміщення трифазної мережі: Z_r – комплексний опір фазної обмотки генератора, Z_Λ – комплексний опір лінії, $Z_{\#z}$ – комплексний опір фазної обмотки АД, Z_N – комплексний опір нульового провідника

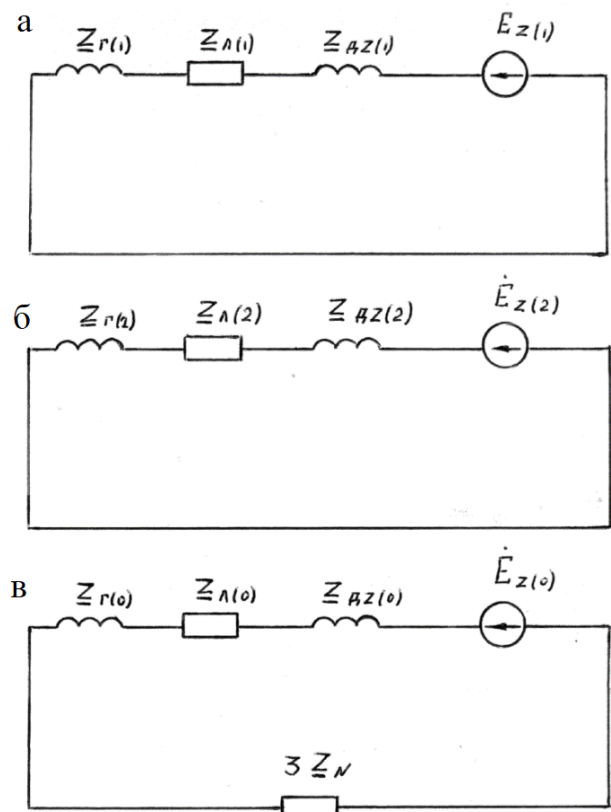


Рисунок 3 – Схеми розрахунку прямої, оберненої і нульової послідовності

Припускаючи, що симетричні складові ЕРС зубцевої частоти відомі, визначаємо симетричні складові струмів

$$\begin{aligned} \dot{I}_{z(1)} &= \frac{\dot{E}_{z(1)}}{\underline{Z}_{r(1)} + \underline{Z}_{\lambda(1)} + \underline{Z}_{\sigma z(1)}}, \\ \dot{I}_{z(2)} &= \frac{\dot{E}_{z(2)}}{\underline{Z}_{r(2)} + \underline{Z}_{\lambda(1)} + \underline{Z}_{\sigma z(2)}}, \\ \dot{I}_{z(0)} &= \frac{\dot{E}_{z(1)}}{\underline{Z}_{r(0)} + \underline{Z}_{\lambda(0)} + \underline{Z}_{\sigma z(0)} + 3\underline{Z}_H}. \end{aligned} \quad (10)$$

Переходячи до фазних величин струмів зубцевої частоти, одержуємо

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AZ} &= \dot{I}_{z(1)} + \dot{I}_{z(2)} + \dot{I}_{z(0)}, \\ \dot{I}_{BZ} &= a^2 \dot{I}_{z(1)} + a \dot{I}_{z(2)} + \dot{I}_{z(0)}, \\ \dot{I}_{CZ} &= a \dot{I}_{z(1)} + a^2 \dot{I}_{z(2)} + \dot{I}_{z(0)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Останні рівняння показують, що струм зубцевої частоти в нульовому проводі визначається таким способом:

$$\dot{I}_{HZ} = 3\dot{I}_{z(0)} = \dot{I}_{AZ} + \dot{I}_{BZ} + \dot{I}_{CZ}. \quad (12)$$

Таким чином, у результаті теоретичних досліджень отримані функціональні залежності впливу магнітної асиметрії на рівні й розподіл фазних струмів зубцевої частоти

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AZ} &= f(e, \psi_\varepsilon), \\ \dot{I}_{BZ} &= f(e, \psi_\varepsilon), \\ \dot{I}_{CZ} &= f(e, \psi_\varepsilon). \end{aligned} \quad (13)$$

характер яких визначається впливом магнітної асиметрії на симетричні складові:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{z(1)} &= \frac{\dot{E}_{z(1)}(e, \psi_\varepsilon)}{\underline{Z}_{r(1)} + \underline{Z}_{\lambda(1)} + \underline{Z}_{\sigma z(1)}} = f(e, \psi_\varepsilon), \\ \dot{I}_{z(2)} &= \frac{\dot{E}_{z(2)}(e, \psi_\varepsilon)}{\underline{Z}_{r(2)} + \underline{Z}_{\lambda(1)} + \underline{Z}_{\sigma z(2)}} = f(e, \psi_\varepsilon), \\ \dot{I}_{z(0)} &= \frac{\dot{E}_{z(1)}(e, \psi_\varepsilon)}{\underline{Z}_{r(0)} + \underline{Z}_{\lambda(0)} + \underline{Z}_{\sigma z(0)} + 3\underline{Z}_H} = f(e, \psi_\varepsilon). \end{aligned} \quad (14)$$

Вплив величини й напрямку площини магнітної асиметрії на рівні симетричних складових розглянемо для двох випадків:

$$\begin{aligned} \frac{Z_p}{\rho} \pm 1 &= C.U., \\ \frac{Z_p}{\rho} \pm 1 &\neq C.U. \end{aligned} \quad (15)$$

У першому випадку, при живленні АД симетрично напругою, трифазна система струмів зубцевої частоти являє собою одну із симетричних

складових прямої, зворотної або нульової послідовності. Цю симетричну складову беремо за основну й позначаємо. Так, наприклад, для електродвигуна АИР90L2 зубцевої частоти 950 Гц буде відповідати основна симетрична складова прямої послідовності, а частоти 1050 Гц – основна симетрична складова нульової послідовності.

Поява магнітної асиметрії приводить у загальному випадку до виникнення інших симетричних складових, які будуть неосновними і які визначають несиметрію фазних струмів зубцевої частоти. Неосновні симетричні складові прямих, зворотних і нульових послідовностей відповідно позначимо. Для електродвигуна АИР90L2 зубцевої частоти 950 Гц відповідають неосновні симетричні складових зворотної і нульової послідовностей, зубцевої частоти 1050 Гц – неосновні симетричні складові прямої й зворотної послідовностей.

У другому випадку, навіть при відсутності магнітної асиметрії трифазна система струмів зубцевої частоти є несиметричною й у загальному випадку розкладається на симетричні складові прямих, зворотних і нульових послідовностей. Магнітна асиметрія підсилює асиметрію фазних струмів зубцевої частоти.

Основною симетричною складовою у цьому випадку є найбільша за величиною симетрична складова.

Таким чином, для основних симетричних складових на зубцевих частотах характерно, по-перше, існування при будь-яких значеннях магнітної асиметрії, по-друге, перевага амплітудних значень у порівнянні з неосновними симетричними складовими.

У результаті теоретичних досліджень встановлено різне (у відсотковому відношенні) зростання між магнітною асиметрією та основною й неосновними симетричними складовими фазних струмів зубцевої частоти. Характер впливу на рівні симетричних складових близький до параболічного, причому найбільш чутливою до зміни магнітної асиметрії є неосновна симетрична складова нульової послідовності.

Таким чином, залежності фазних струмів зубцевої частоти й симетричних складових можна подати у вигляді функцій п'яти змінних

$$\begin{aligned} I_{AZ} &= f(U_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a), \\ I_{BZ} &= f(U_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a), \\ I_{CZ} &= f(U_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a), \\ I_Z' &= f(U_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a), \\ I_Z'' &= f(U_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a), \\ I_Z''' &= f(U_1, \delta_0, e, \psi_\varepsilon, \mu_a). \end{aligned} \quad (16)$$

Таким чином, розроблена методика розрахунку струмів та напруг зубцевих частот АД в умовах електроспоживання. Проведенні дослідження особливо актуальні для підприємств де виробляються АД, тому що, на цих підприємствах цілком вірогідні

випадки резонансу вищих гармонік з непередбаченими наслідками.

Умови виробництва й експлуатації АД дозволяють здійснювати постійний контроль рівнів вищих гармонік, зокрема зубцевих, в цехових підрозділах підприємства або в різноманітних системах електроспоживання та електропостачання [6].

Розрахунок симетричних складових струмів зубцевої частоти з урахуванням магнітної асиметрії повітряного зазору досить складний і його доцільно виконувати на ЕОМ.

Експериментальні дослідження. Теоретичні положення знайшли підтвердження при проведенні експериментальних досліджень на промислових підприємствах і учбових закладах м. Харкова, підприємствах «Укрзалізниця». Дослідження проводились за допомогою індикатора параметрів енергоспоживання, розробленого на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Експериментальні дослідження показують, що рівні зубцевих гармонік в системах електропостачання, як правило, не перевищують 10-15% від рівня основної частоти. Це призводить до зниження надійності функціонування електричних мереж та скорочення строку служби основного енергетичного обладнання на підприємстві. Однак, на наш погляд, найбільшу загрозу для електрогосподарств промислових підприємств викликає частотно-амплітудний резонанс на зубцевих частотах. Це обумовлено специфічною природою зубцевих гармонік АД (парність, залежність від навантаження та різноманітних технологічних факторів). Найбільша загроза виникає у разі використанні однотипних АД зі схожими режимами їх експлуатації. Результати досліджень приведені на рис. 4.

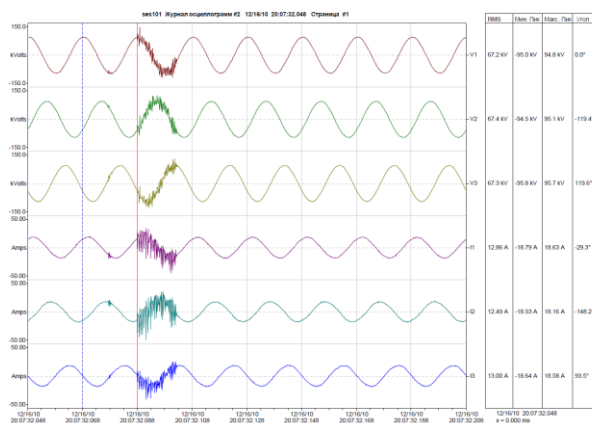


Рисунок 4 – Осцилограми експериментальних досліджень

Висновки. Розроблена методика розрахунку струмів і напруг зубцевої частоти АД для систем електроспоживання. Розрахунки базуються на аналізі електромагнітного поля АД та методах розрахунку несиметричних та несинусоїдальних режимів розподільних електричних мереж. Встановлено, що рівні зубцевих гармонік визначаються структурою та

режимами електричної мережі, геометриєю зубцевих зон повітряного зазору АД та його магнітними властивостями. Теоретичні положення підтверджено експериментальними дослідженнями.

Список літератури

1. Базюк Т. М., Блінов І. В., Буткевич О. Ф. та ін. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: монографія. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
2. Лежнюк П. Д., Шулле Ю. А. Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з використанням їх фрактальних властивостей: монографія. Вінниця: Вінницький Національний Технічний Університет, 2015. 104 с.
3. Буткевич О. Ф., Левконюк А. В., Стасюк О. І. Підвищення надійності моніторингу допустимості завантаження контрольованих перетинів енергосистем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 2. С. 56–66.
4. Arrillaga J., Bradley D., Bodger P. Power system harmonics. New York: John Wiley & Sons, 1985. 336 p.
5. Качество электрической энергии. Том 1. Экономика-правовая база качества электрической энергии в Украине и Евросоюзе: монографія / ред. О. Г. Гриб. Харків: Монографія ПП «Граф-Ікс», 2014. 300 с.
6. Скрыпин И. З., Тихонравов С. Н. Контроль неравномерности воздушного зазора асинхронных электродвигателей в производстве и эксплуатации. *Электротехническое производство. Передовой опыт и научно-технические достижения для внедрения. Отраслевой информационный сборник*. 1987. № 7. С. 8–10.
7. Fiorina J. N. Inverters and harmonics (case studies of non-linear loads). *Cahier Technique Merlin Gerin*. 1993. No. 159.
8. Braun J.-P., Mester C. Reference grade calibrator for the testing of the dynamic behavior of phasor measurement units. *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2012)*, Washington, DC, USA, 1–6 July 2012. P. 410–411. DOI: <https://doi.org/10.1109/cpem.2012.6250977>.
9. Жаркін А. Ф., Палачов С. О., Новський В. О. Нормативно правове регулювання якості напруги в електричних мережах з джерелами розосередженої генерації: монографія. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2018. 162 с.
10. Moreno-Munoz A., Pallares-Lopez V., Gonzalez de la Rosa J. J., Real-Calvo R., Gonzalez-Redondo M., Moreno-Garcia M. I. Embedding Synchronized Measurement Technology for Smart Grid Development. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, no. 1. P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2012.2209659>.
11. Zhang M., Li K. A power quality monitoring system over the internet. *2009 First International Conference on Information Science and Engineering*, Nanjing, China, 26–28 December 2009. P. 1577–1580. DOI: <https://doi.org/10.1109/icise.2009.136>.
12. Кириленко О. В., Сегада М. С., Буткевич О. Ф., Мазур Т. А. Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. 608 с.

References

1. T. M. Baziuk et al., *Intelektualni Elektrychni Merezhi: Elementy Ta Rezhymy [Smart Grids: Elements and Modes]*. Kyiv: Inst. Electrodyn. Nat. Acad. Sci. Ukraine, 2016. (in Ukrainian)
2. P. D. Lezhniuk and J. A. Shulle, *On-Line Forecasting of Electric Energy Consumption Systems Electric Loads, Using Their Fractal Properties*. Vinnytsya: Vinnytsia Nat. Tech. Univ., 2015. (in Ukrainian)
3. O. F. Butkevych, A. V. Levkonyuk, and O. I. Stasiuk, "Increasing reliability of monitoring of acceptability of loading of power system's controlled cutsets", *Technical Electrodynamics*, no. 2, pp. 56–66, 2014. (in Ukrainian).
4. J. Arrillaga, D. Bradley, and P. Bodger, *Power System Quality Assessment*. New York: Wiley, 1985.
5. O. G. Gryb, Ed., *Kachestvo Elektricheskoi Energii. Tom 1. Ekonomiko-Pravovaya Baza Kachestva Elektricheskoi Energii v Ukraine I Evrosioiuzie [Electricity Quality. Volume 1: Economic and*

- Legal Framework for Electricity Quality in Ukraine and the EU*. Kharkiv: Monohrafiya PP «Hraf-Iks», 2014. (in Russian)
6. I. Z. Skrypin and S. N. Tihonravov, "Kontrol neravnomernosti vozdušnogo zazora asinkhronnykh elektrodvigatelei v proizvodstve i ekspluatatsii [Control of air gap non-uniformity of asynchronous electric motors in production and operation]", *Jelektrotehnicheskoe proizvodstvo. Peredovoj opyt i nauchno-tehnicheskie dostizhenija dlja vnedrenija. Otrasevoj informacionnyj sbornik*, no. 7, pp. 8–10, 1987. (in Russian)
 7. J. N. Fiorina, "Inverters and harmonics (case studies of non-linear loads)", *Cahier Technique Merlin Gerin*, no. 159, 1993.
 8. J.-P. Braun and C. Mester, "Reference grade calibrator for the testing of the dynamic behavior of phasor measurement units", in *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2012)*, Washington, DC, USA, Jul. 1–6, 2012. pp. 410–411, doi: <https://doi.org/10.1109/cpem.2012.6250977>.
 9. A. F. Zharkin, S. O. Palachov, and V. O. Novskyi, *Normatyvno Pravove Rehulivannia Yakosti Napruhy v Elektrychnykh Merezakh Z Dzherelamy Rozoseredzhenoi Heneratsii [Regulatory and Legal Regulation of Voltage Quality in Power Grids with Distributed Generation Sources]*. Kyiv: Inst. Electrodyn. Nat. Acad. Sci. Ukraine, 2018. (in Ukrainian)
 10. A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, J. J. Gonzalez de la Rosa, R. Real-Calvo, M. Gonzalez-Redondo, and I. M. Moreno-Garcia, "Embedding synchronized measurement technology for smart grid development", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 52–61, Feb. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/tii.2012.2209659>.
 11. M. Zhang and K. Li, "A power quality monitoring system over the internet", in *2009 First International Conference on Information Science and Engineering*, Nanjing, China, Dec. 26–28, 2009. pp. 1577–1580, doi: <https://doi.org/10.1109/icise.2009.136>.
 12. O. V. Kyrylenko, M. S. Sehedra, O. F. Butkevych, and T. A. Mazur, *Matematychni Modelivannia v Elektroenerhetytsi [Mathematical Modelling in the Electric Power Industry]*. Lviv: Lviv Polytech. Nat. Univ. Press, 2010. (in Ukrainian)

Надійшла (received) 18.10.2023

Відомості про автора (-іє) / About the Author (-s)

Хоменко Ігор Васильович (Igor Khomenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5141-5391>; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Плахтій Олександр Андрійович (Oleksandr Plakhtii) – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>; e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Шелест Дмитро Андрійович (Dmytro Shelest) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6095-658X>; e-mail: dmytro.shelest@iee.khpi.edu.ua.