

**ВИКОРИСТАННЯ СКЛАДОВИХ МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ  
ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ ТЕСТУВАННІ ШИХТОВАНИХ ОСЕРДЬ СТАТОРІВ  
СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ІНДУКЦІЙНИМ МЕТОДОМ**

У роботі вдосконалено метод використання складових миттєвої потужності у якості діагностичних параметрів при локальному індукційному тестуванні осердь статорів синхронних двигунів. Обумовлено шляхи покращення їх інформативності, стійкості та вірогідності при зміні ступеня насичення магнітної системи, частоти та відстані між індуктором та зубцями осердь, що обумовлюють реальні режими їх діагностики.

**Ключові слова:** синхронний двигун, шихтоване осердя, локальне тестування, індукційний метод, види намагнічування, миттєва потужність, спектральні складові, діагностичні параметри.

*V.V. Prus, O.O. Dehtiarenko, R.A. Vakulenko, V.S. Dziuban. The use of instantaneous power components in local testing of laminated cores of synchronous motor stators by induction method. The problem of long-term operation of synchronous motors consists in the deterioration of the properties of the main indispensable structural units, among which stator laminated cores should be noted first of all. Their main damage, such as short circuiting of individual sheets of electrical steel of the core and weakening of compression, cause a redistribution of its electrical and magnetic properties. As a result, it causes anomalies in the growth of steel losses in local areas of the core, which entails local overheating of the stator winding, and, in the case of high-power synchronous motors, can lead to mechanical and thermomechanical destruction of the core as a whole. Various methods are used to determine the location of such anomalies, among which local induction is the most promising one. Their use is limited by the low probability of such diagnostics, primarily due to the lack of a sufficient number of independent diagnostic parameters to distinguish the main types of damage to the laminated cores depending on their location. The results of previous research determine the prospects for the use of instantaneous power components as diagnostic parameters. However, there is no research on the application of such parameters in real modes of local diagnosis when the conditions of its implementation change. With solving this problem, the paper contains the description of the improved method of the use of power components as diagnostic parameters at local induction testing of the cores of synchronous motor stators. The ways to improve their informativeness, stability and reliability with the change of the degree of saturation of the magnetic system, frequency and distance between the inductor and the teeth of the cores, which determine the real modes of their diagnosis, are specified.*

**Keywords:** synchronous motor, laminated core, local testing, induction method, types of magnetization, instantaneous power, spectral components, diagnostic parameters.

**Постановка проблеми.** Досвід експлуатації та статистика відмов синхронних двигунів (СД) із тривалим напрацюванням свідчать про погіршення їх експлуатаційних параметрів, ене-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-2203-6878, [viacheslav.prus@gmail.com](mailto:viacheslav.prus@gmail.com)

<sup>2</sup> провідний інженер конверторного цеху з реконструкції обладнання, ПрАТ «МК «Азовсталь», м. Маріуполь, [degtyarenko1977@gmail.com](mailto:degtyarenko1977@gmail.com)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, [rom.vak311@gmail.com](mailto:rom.vak311@gmail.com)

<sup>4</sup> д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, [ke@kdu.edu.ua](mailto:ke@kdu.edu.ua)

ретичної ефективності та надійності. Причиною цього у переважній більшості випадків є зміна властивостей основних конструктивних вузлів, серед яких слід окремо виділити шихтовану електротехнічну сталь (ЕТС), яка є основним конструкційним матеріалом, незамінюваним у ході ремонтів. Зазначене обумовлює актуальність завдання визначення дійсних властивостей шихтованих осердь з ЕТС у ході тривалої експлуатації та ремонтів СД з метою оцінювання ефективності, можливостей їх подальшого використання за призначенням та проведення необхідних ремонтних операцій з відновлення [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Результати попередніх досліджень доводять ефективність застосування для визначення стану шихтованих осердь локальних методів тестування [2]. Однією з основних функцій, що визначають ефективність використання таких методів та систем контролю і діагностики на їх основі, є забезпечення достатнього рівня вірогідності, що, у свою чергу, обґрунтовує вимоги до кількісного та якісного складу незалежних діагностичних параметрів, на яких базується визначення критеріїв діагностики [3]. У роботі [4] доведено можливість застосування у якості діагностичних параметрів складових миттєвої потужності. Однак недостатньо дослідженими залишаються питання забезпечення їх належної інформативності та вірогідності у різних умовах тестування.

У цьому плані особливістю СД є порівняно більша одинична потужність, що обумовлює як зростання габаритних розмірів усієї конструкції електричної машини та її основних конструктивних частин, так і дещо інше їх технічне виконання внаслідок більших механічних та електричних навантажень. У застосуванні до статорів СД це, починаючи з певної потужності, означає їх виготовлення з окремих пакетів та прямокутну відкриту або напіввідкриту форму пазів при достатньо великій їх глибині [5], що потребує окремого дослідження ефективності застосування безконтактного тестування. Також недостатньо вивченим є питання впливу ступеня насичення магнітного матеріалу у ході тестування та частоти напруги живлення індуктора на стійкість та вірогідність застосування складових миттєвої потужності у якості незалежних діагностичних параметрів.

**Мета роботи** – дослідження питань особливостей застосування складових миттєвої потужності у якості діагностичних параметрів при локальному діагностуванні шихтованих осердь СД.

**Виклад основного матеріалу.** Базовий контактний метод локального тестування шихтованих осердь статорів пояснюється рис. 1 [2]. Відповідно до нього, визначаються магнітні та електричні властивості шихтованого осердя на досліджуваній індуктором 3 ділянці статора з одночасним оцінюванням наявності пошкоджень верхньої частини одного із зубців індуктором 2.

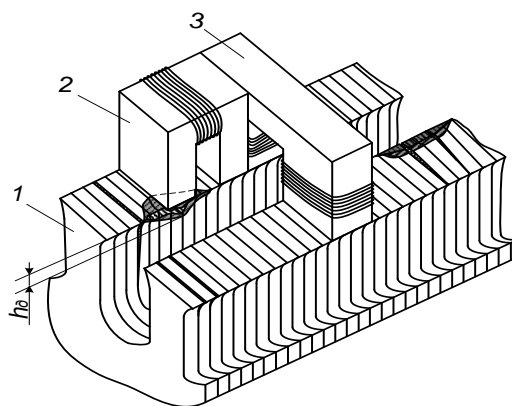


Рис. 1 – Базовий контактний метод діагностики: 1 – осердя статора; 2 – індуктор для тестування за одним зубцем; 3 – індуктор для тестування за двома зубцями;  $h_0$  – висота повітряного проміжку між індуктором та поверхнею зубцевої зони у місцях дефектів

На вірогідність діагностики, яку обумовлює стійкість зміни діагностичних параметрів та сформованих критеріїв, впливають ступінь насичення утворюваної магнітної системи, що визначає межу кількість незалежних параметрів, та частота напруги живлення, зміна якої обу-

мовлює іншу їх чутливість через зв'язок з індуктивними опорами еквівалентного електричного кола. Повітряні проміжки, що неминуче виникають при цьому між індуктором та зубцем внаслідок припустимої нерівномірності поверхні зубцевої зони, обумовлюють змінну величину магнітного опору отриманого кола, що також позначається на вірогідності результатів діагностики.

При цьому можливим шляхом компенсації останньої проблеми є застосування безконтактного способу діагностики (рис. 2) за певної, обмеженої на рівні 0,2-0,7 мм, величини додаткового  $h_n$  повітряного проміжку [6].

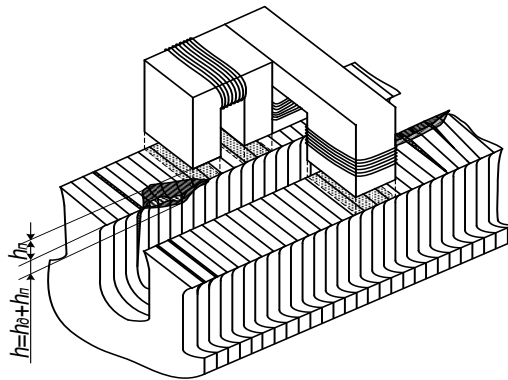


Рис. 2 – Безконтактний метод діагностики:  $h_n$  – величина повітряного проміжку між індуктором та зубцем, яка виставляється на початку діагностики;  $h$  – загальна величина повітряного проміжку між індуктором і зубцем з урахуванням  $h_n$  і  $h_o$

Наявність стійких діагностичних параметрів та критеріїв діагностики дозволяє додатково до вимірювання втрат  $P_\mu$  у сталі і величини магнітної індукції  $B_m$  на досліджуваній ділянці зубців у робочому режимі, визначати точне місце розташування і характер пошкоджень шихтованих осердь (ослаблення пресування та закорочування).

Розглянемо основні причини виникнення додаткових похибок при визначенні складових миттєвої потужності  $p_\mu(t)$  втрат у сталі, відповідно до [7], та можливі шляхи їх компенсації.

1. Так як зазначені складові потужності обчислюються у непрямий спосіб з миттєвих значень струму  $i_1(t)$  у намагнічувальній обмотці та напруги  $u_2(t)$  на вимірювальній обмотці індуктора, впливовими збурюючими факторами є будь-які зміни стану складеної системи «індуктор-ділянка осердя», що обумовлюють величину та форму вихідних сигналів, викликані пошкодженнями. При цьому під основними оцінюваними параметрами, відповідно до [7], розуміються певні комбінації квадратурних синусних та косинусних складових окремих гармонік  $i_1(t)$  та  $u_2(t)$ , що формують відповідні знакозмінні складові миттєвої потужності згідно із співвідношенням

$$p_\mu(t) = P_\mu + \sum_v P_{vc} \cos(v\omega t) + \sum_v Q_{vs} \sin(v\omega t), \quad (1)$$

де  $\nu$  – номер гармоніки;  $\omega$  – кутова частота першої гармоніки;  $p_\mu(t), P_\mu, Q_{vs}, P_{vc}$  – відповідно миттєва потужність втрат у сталі, постійна та знакозмінні синусна й косинусна її складові. Основою їх визначення, згідно [7], є відповідні квадратурні складові напруги та струму  $a_{i1\nu}, b_{i1\nu}, a_{u2\nu}, b_{u2\nu}$ , що обумовлює безпосереднє використання співвідношень, які не враховують величину кута зсуву між  $i_1(t)$  та  $u_2(t)$ , використання якого при реальних кутах навантаження, наближених до  $90^\circ$ , що відповідають умовам локального тестування, є причиною внесення суттєвих похибок.

Достатньо ефективним шляхом компенсації такої похибки є використання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). До того ж, даний алгоритм забезпечує мінімальний обсяг обчислювань та реалізований у вигляді готової функції у більшості математичних програмованих середовищ.

Найчастіше застосовувана для цього функція  $\text{fft}(x)$  системи Mathcad виконує ШПФ для даних, представлених дійсними числами – значеннями вихідного вектора  $x$ . Однак при цьому вектор  $x$  повинен мати  $2^m$  складових, де  $m$  – ціле число, так як другий випадок відповідає невірному розміру вектору [8].

Елементи вектору, який повертається функцією  $\text{fft}(x)$ , описуються співвідношенням

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{2\pi i(v/n)k}.$$

Тут  $n$  – число елементів вектору  $x$ ,  $i$  – уявна одиниця,  $k$  – індекс додавання (від 0 до  $n - 1$ ) і  $v$  – номер гармоніки (від 0 до  $n/2$ ).

Зазначені елементи вектору відповідають частотам

$$f_i = \frac{v}{n} f_s,$$

де  $f_s$  – частота квантування сигналу, що підлягає ШПФ.

2. Так як дефекти осердь, відповідно до [2], викликають неоднозначні зміни параметрів кола «індуктор-ділянка осердя», що впливають на складові його повного електричного опору, оцінювати знакозмінні складові миттєвої потужності необхідно залежно від діючого значення  $I_1$  струму  $i_1(t)$ , забезпечуючи його сталість у процесі тестування і тим самим задаючи фіксований основний магнітний потік  $\Phi_0$  через стабілізацію магніторушійної сили (МРС)  $I_1 W_n$  за умови фактичної сталості магнітного опору кола «індуктор-ділянка осердя»  $Z_M$  за наявності додаткового повітряного проміжку.

Так, відповідно до [9], потік  $\Phi_0$  у магнітній системі «індуктор-ділянка осердя» відстає по фазі на деякий кут  $\alpha$  від струму  $i_1$  у намагнічуючій обмотці  $W_n$  котушки і, отже, від МРС  $i_1 W_n$ , що можна врахувати, вводячи до закону Ома для магнітного кола

$$\dot{\Phi}_{0m} = \frac{\dot{I}_{1m} W_n}{Z_M}$$

комплексний магнітний опір осердя

$$Z_M = |Z_M| e^{j\alpha} = R_M + jX_M.$$

Зазначений параметр напряму пов'язаний з конструктивними параметрами індуктора та властивостями магнітного матеріалу через співвідношення

$$Z_M = \frac{\dot{I}_{1m} W_n}{\dot{\Phi}_{0m}} = \frac{\dot{H}_m l_{cep}}{\dot{B}_m S_i} = \frac{l_{cep}}{\dot{\mu} S_i},$$

де  $\dot{\mu} = \frac{\dot{B}_m}{\dot{H}_m}$  – комплексна магнітна проникність,  $l_{cep}$  – довжина середньої лінії магнітного потоку,  $S_i$  – перетин зубця індуктора.

З другого боку, комплексний магнітний опір  $Z_M$  осердя пов'язаний з комплексним електричним опором  $Z_\mu$  контуру намагнічування, що визначається напругою  $\dot{U}_{0m}$  на його виводах, через співвідношення

$$\frac{1}{Z_\mu} = \frac{Z_M}{j\omega W_n^2} = \frac{R_M + jX_M}{j\omega W_n^2},$$

звідки

$$Z_\mu = R_\mu + jX_\mu = \frac{j\omega W_n^2}{R_M + jX_M} = \frac{\omega X_M W_n^2}{R_M^2 + X_M^2} + \frac{j\omega R_M W_n^2}{R_M^2 + X_M^2}.$$

3. Так як зміна частоти напруги живлення переважно впливає на пропорційну їй зміну величини індуктивності  $X_{s1}$  розсіювання обмотки заступної схеми кола «індуктор-ділянка осердя» при порівняно меншій зміні індуктивності  $X_\mu$  контуру намагнічування через особливості зміни магнітної проникності [10], варіювання частоти дозволяє перерозподіляти чутливість до виявлення пошкоджень між параметрами, що відносяться до обмотки та контуру намагнічування.

4. Особливості зміни складових миттєвої потужності втрат у сталі як діагностичних параметрів додатково обумовлені рівнем електромагнітних навантажень, що визначається ступенем насичення шихтованих осердь. Зазначене пов'язане з нелінійним характером зміни цих параметрів в умовах нелінійності кривої намагнічування. При цьому лише на незначній початковій ділянці основної кривої намагнічування ЕТС і магнітна індукція  $B$ , обумовлена характером  $u_2(t)$ , і напруженість  $H$  магнітного поля, що визначається через  $i_1(t)$ , є синусоїдальними. Як правило, ця ділянка кривої намагнічування не є робочою для умов локального тестування старторів. Далі одна з величин стає несинусоїдальною, що продовжується до точки насичення, після чого несинусоїдальними є обидві величини.

З метою обґрунтування умов розділення різних видів перемагнічування ЕТС був випробуваний ряд магнітних кіл індукторів з нанесеними намагнічуючою  $W_n$  та вимірювальною  $W_g$  обмотками із різними співвідношеннями опорів намагнічуючого кола та намагнічуючого контуру, для яких на підставі індукційного методу вимірювання магнітної індукції знімалися за допомогою вимірювально-діагностичного комплексу миттєві значення напруги на обмотці, що намагнічує,  $u_1(t)$ , струму в обмотці, що намагнічує,  $i_1(t)$  і напруги на вимірювальній обмотці  $u_2(t)$  для різних точок основної кривої намагнічування. У якості матеріалу для магнітних кіл використовувалась ЕТС типу 2013 з товщиною листа 0,5 мм.

У результаті аналізу результатів досліджень було з'ясовано, що умова їх поділу – певні співвідношення між активними опорами намагнічуючої обмотки  $R_1$  і намагнічуючого контуру  $R_\mu$ :

– у випадку, коли  $R_\mu \ll R_1$ , маємо на нелінійній ненасиченій ділянці основної кривої намагнічування несинусоїдальну зміну магнітної індукції  $B$  і синусоїдальну напруженість  $H$  магнітного поля  $H$ ;

– у випадку, коли  $R_\mu$  і  $R_1$  – величини одного порядку, на нелінійній ненасиченій ділянці основної кривої намагнічування маємо випадок із синусоїдальною магнітною індукцією  $B$  і несинусоїдальною напруженістю магнітного поля  $H$ .

Тобто, види намагнічування залежать від співвідношення споживання активної потужності намагнічуючим колом та намагнічуючим контуром. Зміну форм кривих  $B(t) \equiv e_2(t) \equiv u_2(t)$  і  $H(t) \equiv i_1(t)$  при різних видах намагнічування представлено на рис. 3 і 4.

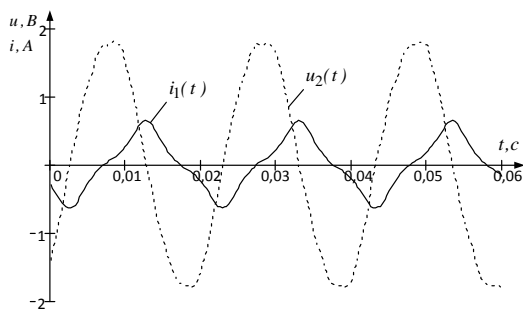


Рис. 3 – Особливості перемагнічування індуктора за умови  $R_\mu \ll R_1$

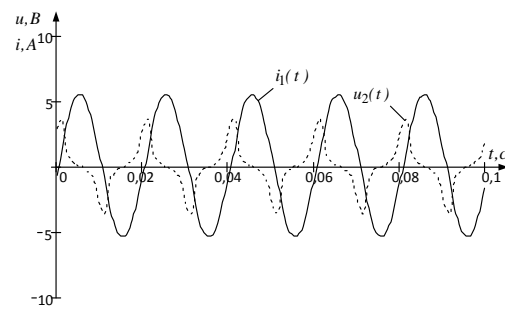


Рис. 4 – Особливості перемагнічування індуктора за умови  $R_\mu \approx R_1$

Це обумовлює ефективність впливу повітряного проміжку на зміну форми сигналу миттєвої потужності шляхом зменшення нелінійних викривлень однієї з кривих  $i_1(t)$  або  $u_2(t)$ , тим самим забезпечуючи більшу стійкість оцінюваних складових в умовах різних видів пошкоджень. Зазначений ефект підсилюється на ослаблених ділянках внаслідок впливу додаткових еквівалентних повітряних проміжків і найбільше проявляється у найпоширеніших умовах  $R_\mu \ll R_1$ .

При поточкових розрахунках на першій гармоніці еквівалентного електричного кола, що відповідає умовам тестування, спостерігається зростання значень активного  $R$  і реактивного  $X$  опорів для повного кола та відповідних їм опорів для контуру намагнічування на ненасиченій

ділянці, яке змінюється їх зниженням у зоні насичення, що особливо суттєво при високих ступенях насичення (рис. 5-6) і обумовлює ефективність проведення діагностування саме за таких умов.

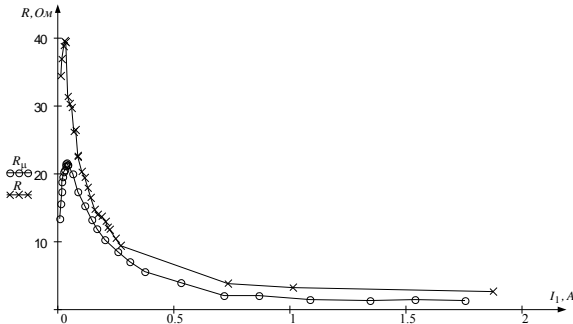


Рис. 5 – Зміна активних опорів еквівалентного електричного кола при зміні ступеня насичення

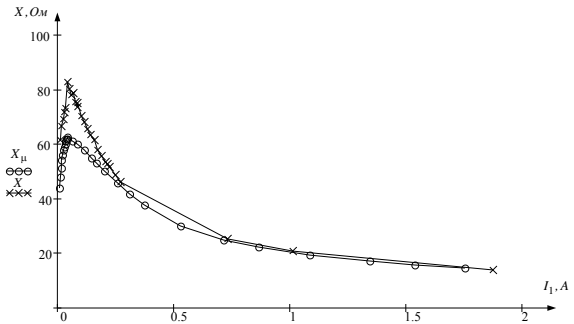


Рис. 6 – Зміна реактивних опорів еквівалентного електричного кола при зміні ступеня насичення

Спільне застосування зазначених принципів та обмежень обумовлює підвищення ефективності використання знакозмінних складових миттєвої потужності у якості незалежних діагностичних параметрів при стабілізації середньоквадратичного значення споживаного струму в умовах високого ступеня насичення системи «індуктор-ділянка осердя» та наявності додаткового повітряного проміжку між індуктором та тестованою поверхнею на рівні 0,5 мм згідно [7], що доводять результати, представлені на рис. 7. При цьому найвищою є інформативність складових, що формують знакозмінні ортогоналі миттєвої потужності згідно з (1), отримувані суто з одночастотних складових вищих гармонік напруги  $u_2(t)$  та струму  $i_1(t)$  (рис. 7, в, г) згідно з [6], а інформативність цих складових зростає із збільшенням частоти напруги живлення.

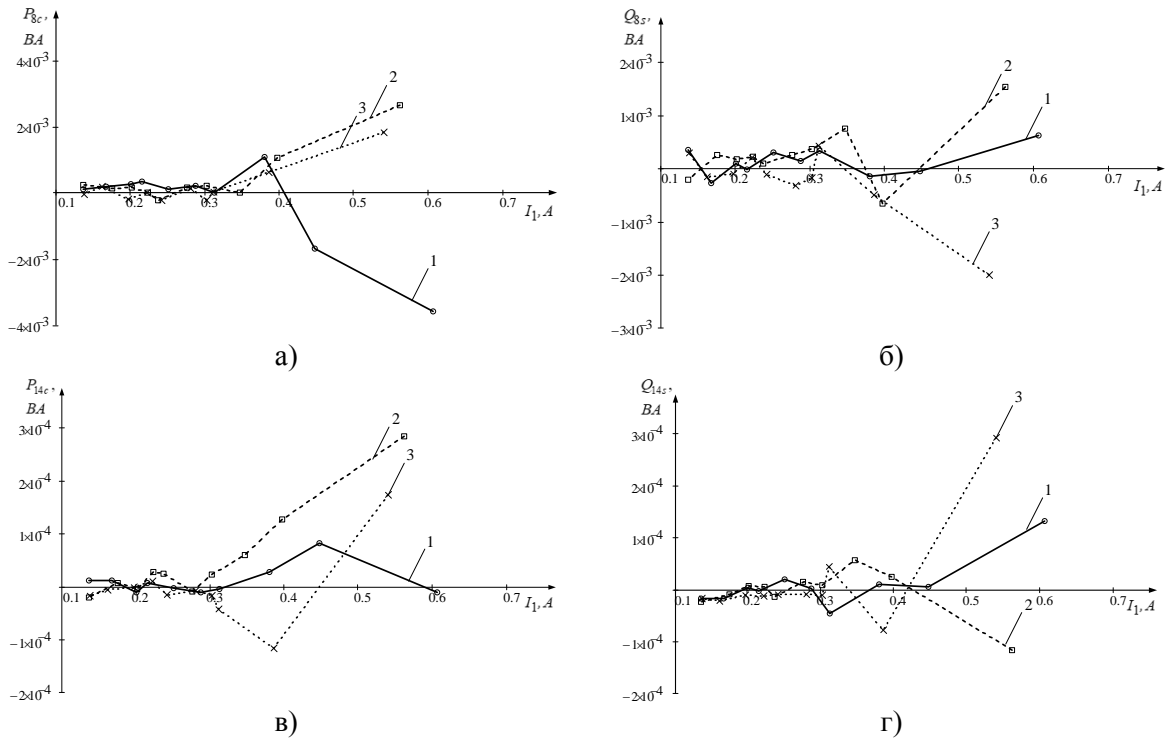


Рис. 7 – Результати визначення чутливості знакозмінних складових миттєвої потужності при безконтактному тестуванні: а, б – на частоті 50 Гц; в, г – на частоті 150 Гц для нормальної (1), закороченої (2) та розпушеної (3) ділянок осердя статора

**Висновки**

1. Визначено причини низької інформативності застосування складових миттєвої потужності у якості незалежних діагностичних параметрів при діагностуванні шихтованих осердь статорів синхронних двигунів.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено ефективність застосування алгоритмів визначення складових миттєвої потужності, що виключають проміжне знаходження фазових зсувів між відповідними залежностями для струмів та напруг, які безпосередньо формують миттєву потужність втрат у сталі.

3. Обумовлено вплив ступеня насичення магнітного кола, частоти напруги живлення, виду перемагнічування та наявності додаткового повітряного проміжку на інформативність визначення основних видів дефектів шихтованих осердь статорів синхронних двигунів за складовими миттєвої потужності.

4. Для покращення ефективності та вірогідності діагностування шихтованих осердь доведено більш високу інформативність застосування складових, що формують знакозмінні ортогоналі миттєвої потужності, отримуваних суто з одночастотних складових вищих гармонік вихідних напруги та струму.

**Перелік використаних джерел:**

1. Prus V. The determination of the current state and the reliability indices of synchronous motors with long time between failures / V. Prus, O. Dehtiaranko // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2019. – R. 95, № 5. – Pp. 67-70. – Mode of access: <https://doi.org/10.15199/48.2019.05.17>.
2. Пат. 62491А, Україна, МКИ G 01 R 31/34, G 01 R 33/14, H 02 K 15/00. Спосіб діагностики зубцевої зони пакетів електротехнічної сталі електричних машин / В.В. Прус, Д.Й. Родькін, О.А. Войтех, Р.М. Петров. – № 2003042863; заявл. 02.04.2003; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12. – 6 с.
3. Zagirnyak M. Ways of efficiency improvement of local diagnostic of the cores of induction motor stators / M. Zagirnyak, V. Prus, A. Miroshnykova // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2015. – R. 91, № 1. – Pp. 217-220. – Mode of access: <https://doi.org/10.15199/48.2015.01.50>.
4. Прус В.В. Формування достатнього набору діагностичних параметрів при локальному тестуванні пакетів сталі статорів АД / В.В. Прус, А.О. Суторміна, Д.А. Холодов // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – Випуск 3/2005 (32). – С. 164-168.
5. Постников И.М. Проектирование электрических машин / И.М. Постников. – К. : ГИТЛ УССР, 1952. – 736 с.
6. Прус В.В. Способи підвищення інформативності та вірогідності діагностики шихтованих осердь статорів синхронних двигунів / В.В. Прус, О.О. Дегтяренко, В.Ю. Дятловська // *Наука та виробництво: міжвузівський тематичний збірник наукових праць*. – Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2021. – Вип. 24. – С. 80-88
7. Прус В.В. Алгоритм визначення складових миттєвої потужності при полігармонічних напрузі і струмі, їх аналіз та інтерпретація / В.В. Прус, А.В. Нікітіна // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – Кременчук : КДПУ, 2004. – Вип. 4/2004 (27). – С. 45-50.
8. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11 / В.П. Дьяконов. – М. : Солон-Пресс, 2004. – 832 с.
9. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники: в 3 т. Учебник для вузов / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 2 т. – 416 с.
10. Zagirnyak M. Improved method for calculation of parameters of electromagnetic and power processes in electric circuits with steel in saturation mode / M. Zagirnyak, V. Prus, D. Miljavec // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – № 4. – С. 12-18.

**References:**

1. Prus V., Dehtiaranko O. The determination of the current state and the reliability indices of synchronous motors with long time between failures. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2019, R. 95, no. 5, pp. 67-70. doi: 10.15199/48.2019.05.17.

2. Prus V.V., Rodkin D.Y., Voitek O.A., Petrov R.M. *Sposib diahnostryky zubtsevoi zony paketiv elektrotekhnichnoi stali elektrychnykh mashyn* [Method for diagnosing the toothed zone of electrical steel packages of electric machines]. Patent UA, no. 62491A, 2003. (Ukr.)
3. Zagirnyak M., Prus V., Miroshnykova A. Ways of efficiency improvement of local diagnostic of the cores of induction motor stators. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2015, R. 91, no. 1, pp. 217-220. **doi: 10.15199/48.2015.01.50.**
4. Prus V.V., Sutormina A.O., Kholodov D.A. Formuvannia dostatnoho naboru diahnostrychnykh parametriv pry lokalnomu testuvanni paketiv stali statoriv AD [Formation of a sufficient set of diagnostic parameters at local testing of IM stator steel packages]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University*, 2005, vol. 3/2005 (32), pp. 164-168. (Ukr.)
5. Postnikov I.M. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electric machine design]. Kiev, GITL USSR Publ., 1952. 736 p. (Rus.)
6. Prus V.V., Dehtiarenko O.O., Diatlovska V.Iu. Sposoby pidvyshchennia informatyvnosti ta virohidnosti diahnostryky shykhtovanykh oserd statoriv synkronnykh dvyhuniv [Ways to increase the informativeness and reliability of diagnostics of laminated cores of synchronous motor stators]. *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, 2021, vol. 24, pp. 80-88. (Ukr.)
7. Prus V.V., Nikitina A.V. Alhorytm vyznachennia skladovykh myttievoi potuzhnosti pry poli-harmonichnykh napruzi i strumi, yikh analiz ta interpretatsiia [Algorithm for determining the components of instantaneous power at polyharmonic voltage and current, their analysis and interpretation]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University*, 2004, vol. 4/2004 (27), pp. 45-50. (Ukr.)
8. D'yakonov V.P. *Encyklopediya Mathcad 2001i i Mathcad 11* [Encyclopedia Mathcad 2001i and Mathcad 11]. Moscow, Solon-Press Publ., 2004. 832 p. (Rus.)
9. Nejman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Tom 2. Uchebnik dlya vuzov* [Theoretical foundations of electrical engineering. Volume 2. Textbook for universities]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 416 p. (Rus.)
10. Zagirnyak M., Prus V., Miljavec D. Improved method for calculation of parameters of electromagnetic and power processes in electric circuits with steel in saturation mode. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2015, no. 4, pp. 12-18.

Рецензент: С.К. Поднебенна  
д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 01.04.2021