

УДК 621.313.333.042.143.3

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ ДІАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНИКІВ СТАТОРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

*Суторміна А.О., асп.*

*Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського  
39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20*

*E-mail: [sutor@polytech.poltava.ua](mailto:sutor@polytech.poltava.ua)*

В статті представлені результати і напрямлення дальніших теоретических і експериментальних досліджень, направлених на підвищення достовірності локального способу діагностики зони зубців статорів асинхронних двигателів.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, статор, повреждение, диагностический параметр.

In the article the results and directions of further theoretical and experimental studies on increasing of validity of the local way of the diagnostics of the zone tine of cores of the asynchronous engines are presented.

**Key words:** induction engine, stator, damage, diagnostic parameter.

**Вступ.** Стан сердечників статорів є важливим фактором, який впливає на надійність роботи асинхронних двигунів (АД). Місцеві uszkodження міжлистової ізоляції сердечника є причиною виникнення локальних перегрівів, що прискорюють процес теплового старіння обмоток статора і приводять до посилення електромагнітної складової вібрації. Це в деякій мірі корелюється з даними статистики відмов, згідно з якою 18 % АД виходять з ладу внаслідок дефектів підшипників, 80 % - через відмову обмоток, з них 63 % - через пробій обмотки статора [1].

Незалежно від якості використовуваних матеріалів та рівня проведення ремонтних робіт, з кожним наступним ремонтом час наробітку на відмову АД скорочується [2], що у тому числі свідчить про незворотній і накопичувальний характер змін у сердечнику статора.

**Аналіз попередніх досліджень.** Основними uszkodженнями сердечників статорів є ослаблення пресування й закорочення окремих листів. При цьому останній вид uszkodжень має місце не тільки на поверхні, але й усередині зубця сердечника, що ускладнює процес виявлення таких дефектів.

Існуючі технології випробувань направлені на визначення усереднених для всього сердечника значень втрат, що не дає можливості виявити ділянки з максимальним значенням перегрівів [3]. Відомий також спосіб локального тестування поверхні зубців сердечника, що полягає у контролі магнітного потоку на ділянках, uszkodження яких засвідчили результати візуального огляду. Однак контроль, відповідно до способу, проводиться на обмеженій кількості точок і тип uszkodження не визначається.

З метою вирішення зазначених питань був розроблений спосіб [4] та пристрій [5] локальної діагностики сердечників статорів АД, що дозволяє ви-

значати місце, розмір та вид пошкоджень зубців.

**Мета роботи** – аналіз вірогідності способу локальної діагностики сердечників статорів АД та обґрунтування напрямків експериментальних та теоретичних досліджень для забезпечення максимальної продуктивності діагностичного комплексу при достатньому рівні вірогідності.

**Матеріал і результати досліджень.** Запропонований спосіб базується на локальному перемагнічуванні поверхні зубців статора. Перемагнічування здійснюється за допомогою двох П-подібних індукторів: перший виставляється вздовж одного з зубців і призначений для виявлення місця і виду пошкодження, другий – на два сусідні зубці для вимірювання величини втрат у сталі. У процесі діагностики контролюються напруга  $u_1(t)$  і струм  $i_1(t)$  намагнічувальної і напруга  $u_2(t)$  вимірювальної обмотки індукторів. По значенням вказаних величин розраховуються втрати у сталі та набір діагностичних параметрів (напруженість  $H$  магнітного поля, магнітна індукція  $B_m$ , коефіцієнти гармонік кривих струму намагнічування  $k_{r\Pi}$  та напруги вимірювальної обмотки  $k_{rU2}$ , повний магнітний опір кола  $Z_m$ , активний та індуктивний опори контуру намагнічування по першій гармоніці  $R_{\mu 1}$ ,  $X_{\mu 1}$ , кут зсуву фаз  $\Phi_{\Pi U2}$  між кривими струму обмотки намагнічування  $i_1(t)$  і напруги з вимірювальної обмотки  $u_2(t)$  та між їх першими гармоніками  $\Phi_{\Pi U21}$ , складові миттєвої потужності кривої втрат у сталі  $P_{квр}$ ,  $Q_{квр}$ , магнітна проникність ділянки пакету  $\mu$ ), які характеризують електричні та магнітні параметри отримуваних кіл і є чутливими до вказаних видів пошкоджень [5, 6].

При визначенні ряду діагностичних параметрів в якості незалежних слід обирати ті з них, що відповідають наступним вимогам:

- вони не можуть бути отримані лінійною комбінацією інших;
- є чутливими до пошкоджень при заданих режимах випробувань;
- мають стійкі зони чутливості, які не перекриваються похибкою вимірювань.

Нелінійність об'єкта діагностики та штучно введена несинусоїдальність напруги живлення [6] дозволяють розглядати як діагностичні не лише магнітні параметри кола ( $H$ ,  $B_m$ ,  $\mu$ ,  $Z_m$ ), а й гармонічні характеристики і складові вимірюваних величин ( $k_{гп}$ ,  $k_{гU2}$ ,  $R_{\mu 1}$ ,  $X_{\mu 1}$ ,  $\Phi_{пIU21}$ ,  $R_{квр}$ ,  $Q_{квр}$ ).

Чутливість діагностичних параметрів до пошкоджень визначалась експериментальним шляхом. Вимірювання інформаційних сигналів і розрахунків діагностичних параметрів проводились при різних ступенях насичення сталі, що відповідають діапазону зміни магнітної індукції 1,1 – 2,6 Т. Результати досліджень показали існування чутливості параметрів до пошкоджень при різних ступенях насичення сталі, що обумовило необхідність здійснювати вимірювання у ході діагностики при зміні амплітуди напруги живлення.

Доцільність зміни частоти напруги живлення обумовлюється наступними чинниками:

- змінюючи частоту напруги живлення індуктора, можна змінювати глибину проникнення магнітного потоку в зубець, що, у свою чергу, надає можливість виявляти пошкодження як на поверхні, так і всередині зубця;

- пошкодження пакету приводять до зміни його магнітного та електричного опору, значення нелінійних складових яких є залежним від частоти. Відповідно, зі зміною частоти змінюється чутливість

тих діагностичних параметрів, що пов'язані з величиною відповідних опорів кола.

Для комплексного аналізу впливу амплітуди і частоти напруги живлення на інформативність діагностичних параметрів були проведені експериментальні дослідження, по результатам яких для кожного з діагностичних параметрів були визначені діапазони амплітуд і частот, при яких їх чутливість до пошкоджень максимальна (табл. 1).

Отримані дані є основою для формування оптимальних законів зміни напруги живлення у процесі діагностики.

Нерівності зубцевої поверхні у місці контакту з індуктором, які обумовлені початковими дефектами або набутими пошкодженнями сердечника, приводять до виникнення нерівномірних повітряних проміжків у магнітному колі, що приводить до ослаблення магнітного потоку. Так як інформативність більшості з перерахованих діагностичних параметрів залежить від величини та характеру зміни магнітного потоку, вони є чутливими до змін у магнітному колі.

Для аналізу впливу повітряних проміжків на ослаблення магнітного потоку було проведено розрахунок повного магнітного опору кола, що створює індуктор з зубцем, при контактній і безконтактній діагностиці рівної та деформованої поверхонь за умов, що:

- коло, створюване індуктором з зубцем, є колом із зосередженими параметрами;
- магнітний потік однаковий у всіх перерізах кола, потоки розсіювання не враховуються;
- середня довжина магнітної лінії визначається з урахуванням глибини проникнення магнітного потоку в зубець;
- середня величина нерівностей поверхні зубця складає  $h_d = \pm 0,25$  мм, відповідно до цього вели-

**Таблиця 1 – Рекомендовані для визначення значень діагностичних параметрів діапазони амплітуди й частоти напруги живлення при тестуванні по одному зубцю**

Діагностичний параметр	Позначення	Значення діапазону напруги для відповідної частоти вимірювань, В				
		$f_1=36$ Гц	$f_1=62$ Гц	$f_1=81$ Гц	$f_1=103$ Гц	$f_1=130$ Гц
Коефіцієнт гармонік напруги вимірювальної обмотки	$k_{гU2}$	-	-	1÷1,5	-	-
Кут зсуву фаз по першим гармонікам	$\Phi_{пIU21}$	-	1÷2	-	-	-
Індуктивний опір контуру намагнічування по першій гармоніці	$X_{\mu 1}$	-	-	-	0,5÷1	-
Активний опір контуру намагнічування по першій гармоніці	$R_{\mu 1}$	-	-	-	0,5÷1	-
Повний магнітний опір контуру	$Z_m$	-	1,5÷2	-	0,5÷1,4	-
Магнітна проникність ділянки пакету	$\mu$	2÷3	1÷3	1,5÷4	-	2÷5
Потужність втрат у сталі	$P_c$	0,5÷1,5	-	-	-	-

чина повітряного проміжку між індуктором та зубцем при безконтактному способі діагностики була прийнята рівною  $h_0 = 0,5$  мм.

Для розрахунку магнітного опору ділянки кола використовувалось наступне співвідношення:

$$R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S}, \quad (1)$$

де  $S$  - площа поперечного перетину ділянки, крізь яку проходить магнітний потік,  $l$  - середня довжина магнітної лінії.

**Таблиця 2 – Значення повних магнітних опорів при різних ступенях насичення сталі 2013**

B, Тл	H, А/м	$R_{m_k}$ , А/Вб	$R_{m_б}$ , А/Вб	$R_{m_{кд}}$ , А/Вб	$R_{m_{бд}}$ , А/Вб
1,53	1000	$1,469 \times 10^7$	$5,933 \times 10^8$	$4,775 \times 10^8$	$1,056 \times 10^9$
1,64	2500	$3,566 \times 10^7$	$6,142 \times 10^8$	$4,985 \times 10^8$	$1,077 \times 10^9$
1,74	5000	$7,007 \times 10^7$	$6,486 \times 10^8$	$5,329 \times 10^8$	$1,112 \times 10^9$
1,85	10000	$1,392 \times 10^8$	$7,177 \times 10^8$	$6,02 \times 10^8$	$1,181 \times 10^9$
2,05	30000	$4,241 \times 10^8$	$1,003 \times 10^9$	$8,87 \times 10^8$	$1,466 \times 10^9$

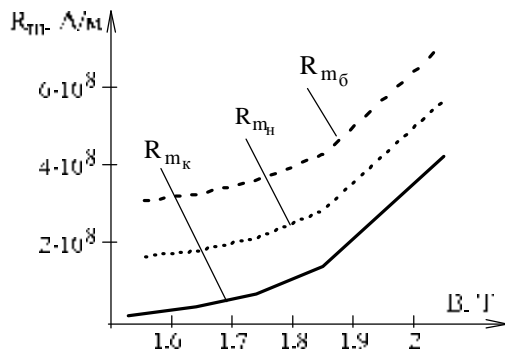


Рисунок 1 – Залежність магнітного опору при різних ступенях насичення сталі

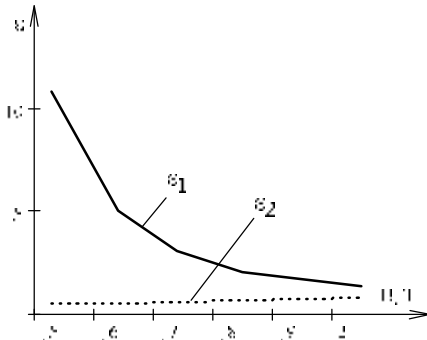


Рисунок 2 – Відносні значення магнітних опорів

Глибина проникнення магнітного потоку в зубець сердечника:

$$h = \frac{2\sqrt{\pi}}{\sqrt{f\mu\mu_0\gamma}}, \quad (2)$$

де  $f$  – частота перемагнічування,  $\gamma$  – електрична провідність матеріалу.

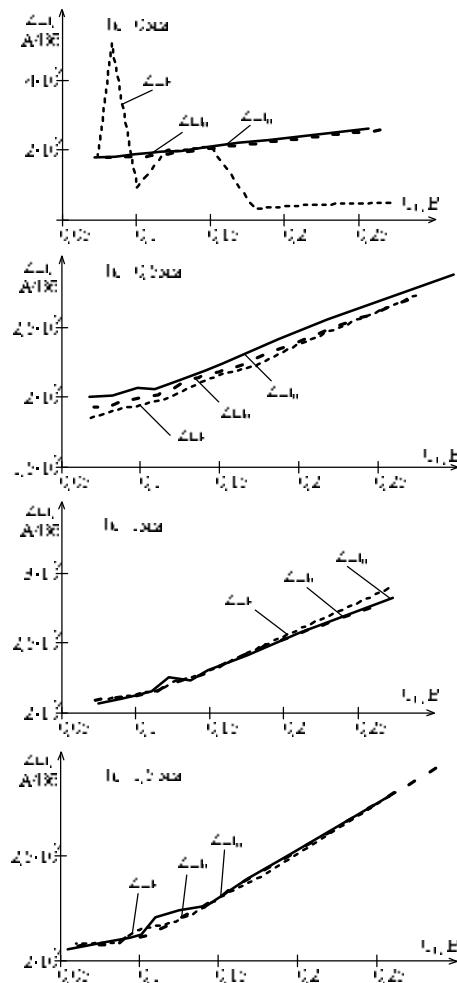


Рисунок 3 – Криві повного магнітного опору  $Z_m$  при контактній ( $h_0 = 0$  мм) та безконтактній ( $h_0 = 0,5, 1, 1,5$  мм) діагностиці, де  $Z_{m_н}$ ,  $Z_{m_з}$ ,  $Z_{m_0}$  – значення повного магнітного опору відповідно на нормальній, закороченій ділянках зубця і на ділянці з ослабленим пресуванням;  $U_1$  – діюче значення напруги на намагнічувальній обмотці

У табл. 2 і на рис. 1 представлені результати розрахунку значень повного магнітного опору кола, що відповідають різному ступеню насичення для сталі 2013, де  $B$  – магнітна індукція;  $H$  – напруженість магнітного поля;  $R_{m_k} = R_{m_1} + R_{m_3}$  – повний магнітний опір при контактному способі діагностики недеформованої поверхні ( $R_{m_1}$  – магнітний опір індуктора,  $R_{m_3}$  – магнітний опір зубця);  $R_{m_б} = R_{m_1} + 2R_{m_{h_0}} + R_{m_3}$  – магнітний опір кола при безконтактній діагностиці недеформованої поверхні ( $R_{m_{h_0}}$  – опір повітряного проміжку, розмір якого відповідає відстані  $h_0$ , на яку виставляється індуктор відносно поверхні зубця);

$R_{m_{кд}} = R_{m_i} + 2R_{m_{h_d}} + R_{m_3}$  – повний магнітний опір кола при контактному способі діагностики на деформованій поверхні зубця ( $R_{m_{h_d}}$  – магнітний опір повітряного проміжку, що виникає між індуктором і деформованою поверхнею зубця);  $R_{m_{бд}} = R_{m_i} + 2R_{m_{h_0+h_d}} + R_{m_3}$  – магнітний опір кола при безконтактному способі діагностики на деформованій поверхні зубця ( $R_{m_{h_0+h_d}}$  – магнітний опір сумарного повітряного проміжку, розмір якого відповідає відстані  $h_0 + h_d$ ).

На рис. 2 представлені відносні значення магнітних опорів  $\epsilon_1 = \frac{R_{m_k}}{R_{m_{кд}}}$  і  $\epsilon_2 = \frac{R_{m_6}}{R_{m_{бд}}}$ .

Аналізуючи співвідношення магнітних опорів кіл, отримуваних при діагностиці деформованої і недеформованої ділянок зубця, можна зробити наступні висновки:

- при контактному способі діагностики відносне значення опору більше, ніж при безконтактному, відповідно суттєвішим є вплив на вірогідність результатів діагностики;

- з ростом насичення сталі відносне значення опору при контактній діагностиці спадає, що ускладнює процес урахування впливу повітряних проміжків на повний магнітний опір при різних значеннях магнітної індукції і напруженості магнітного поля;

- при безконтактному способі діагностики значення співвідношення майже не змінюється і близьке до 1.

На рис. 3 представлені результати експериментальних вимірювань повного магнітного опору на промисловій частоті, отримані при контактній і безконтактній діагностиці при різному ступені насичення сталі. Як видно з графіків, при контактній діагностиці ( $h_0 = 0$  мм), криві, які відповідають нормальній, закороченій ділянкам та ділянці з ослабленим пресуванням, перетинаються між собою, що свідчить про відсутність зон чутливості даного діагностичного параметру до пошкоджень. При безконтактній діагностиці ( $h_0 = 0,5$  мм) зони чутливості діагностичного параметру до пошкоджень простежуються при різних ступенях насичення сталі, однак при збільшенні величини повітряного проміжку ( $h_0 = 1; 1,5$  мм) знову зникають.

Таким чином, експериментальні дослідження підтвердили доцільність введення у коло вимірювального індуктор-зубець повітряного проміжку і обґрунтували можливість знаходження його оптимального розміру, при якому без втрат вірогідності результатів вимірювань можна компенсувати вплив нерівномірності контакту індуктора з зубцем.

**Висновки.** Представлені результати експериментальних та теоретичних досліджень обумовлюють наступні шляхи підвищення вірогідності результатів діагностики сердечників статорів АД:

- локальне перемагнічування зубця має проводитись зі зміною амплітуди та частоти напруги живлення індуктора у відповідності до рекомендованих діапазонів;

- при діагностиці по одному зубцю доцільно застосовувати безконтактний спосіб вимірювань.

Для того, щоб пояснити фізичну природу явища, що обумовлює чутливість діагностичних параметрів до різних видів пошкоджень, оцінити вплив зміни амплітуди і частоти напруги живлення вимірювального індуктора на зони чутливості діагностичних параметрів і визначити оптимальну величину повітряного проміжку між індуктором та зубцем, необхідно розробити математичну модель магнітної системи індуктор-зубець, яка б враховувала:

- нелінійні властивості досліджуваної ділянки сердечника та її пошкоджень;

- потоки випучування на ділянках з ослабленим пресуванням;

- посилення дії вихрових струмів на закорочених ділянках;

- розсіювання магнітного потоку на повітряному проміжку між індуктором та зубцем.

Зіставлення теоретичної моделі з результатами експериментальних досліджень дозволить виділити необхідну кількість діагностичних параметрів, сформулювати вимоги щодо позиціонування (величини повітряного проміжку між індуктором та зубцем) вимірювального індуктора і законів зміни створеного ним в процесі вимірювань магнітного потоку за умов дотримання достатнього рівня вірогідності діагностики при зменшенні затрат часу на її проведення.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытание и надежность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
2. Луговой А.В., Максимов М.Н., Родькин Д.И. и др. Эксплуатационная надежность электрических двигателей переменного тока и пути ее повышения. – Мат. сем. “Проблемы промышленного энергосбережения”, Кременчуг, КГПИ, 1998. – 15 с.
3. Петриков Л.В., Корначенко Г.Н. Асинхронные двигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация / Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 2000, – 496 с.
4. Декларацийний патент № 62491А, Україна, МКИ G01R 31/34, G01R 33/14, H02K 15/00 Спосіб діагностики зубцевої зони пакетів електротехнічної сталі електричних машин / Прус В.В., Родькін Д.Й., Войтех О.А., Петров Р.М. - №2003042863; Заявл. 02.04.2003; Опубл. 15.12.2003; Бюл. №12.
5. Суторміна А.О., Прус В.В. Діагностика шихтованих пакетів сталі та сердечників електричних машин локальним індукційним методом при зміні амплітуди та частоти напруги живлення // Вісник КДПУ. Зб. наукових праць КДПУ. Випуск 4/2006 (39). – Кременчук: КДПУ, 2006. С. 130 -138.
6. Прус В.В., Суторміна А.О., Холодов Д.А. Формування достатнього набору діагностичних параметрів при локальному тестуванні пакетів сталі статорів // Вісник КДПУ. Зб. наукових праць КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005. - Вип. - 3/2005 (32). – С. 164-168.

Стаття надійшла 21.04.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.