УДК 621.313.333.2

Т. М. СЕРДЮК – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru,
ORCID: 0000-0002-2609-4071

ДІАГНОСТУВАННЯ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Вступ

На даний час двигуни змінного струму є найпоширенішими споживачами електричної енергії. Згідно статистичних даних, вони споживають понад 80 % усієї виробленої в країні електроенергії. Роль асинхронних двигунів в промисловості значно зросла з появою частотно-регульованих приводів. Вони є витривалими, відносно простими за конструкцією і в експлуатації дешевшими за двигуни постійного струму. У виробничому процесі різка поломка двигуна може призвести до серйозних затримок і недовідпусканню продукції. Тому перспективним є визначення дефектів на ранніх стадіях (передбачення виходу двигуна з ладу), виключаючи виникнення його серйозних поламок. Приблизно 30…40 % всіх несправностей в двигунах з короткозамкненим ротором відносяться до дефектів статора, поламки елементів ротора – 10%, вихід з ладу підшипників – 40% та інші – 12% [1 – 5].

Випробування та вимірювання параметрів електродвигунів змінного струму виконується за допомогою приладів: мегаомметри М4100/4, Ф4102/2; вимірювальний міст Р333; струмовимірювальні кліщі Ц4505; випробувальна установка АИД – 70; набір щупів. Всі дії виконуються бригадою, яка складається щонайменше з двох осіб з групою з електробезпеки не нижче IV. При цьому перевіряють стан і цілісність ізоляції , відсутність вм'ятин на корпусі, затяжку контактних з'єднань , а також комплектність машини (наявність всіх деталей , паспортного і клемного щитків і необхідних вказівок на них ; заповнення підшипників до заданого рівня і відсутність течі масла; стан колектора , струмознімальних кілець ,наявність заземлюючої). Несправності і пошкодження електричних машин, що викликають відмови, не завжди вдається виявити шляхом зовнішнього огляду, оскільки деякі з них (в основному електричні) носять прихований характер і можуть бути встановлені тільки після відповідних випробувань і розбирання машини. Таким чином, робота по передремонтному виявленню несправностей і пошкоджень трифазних асинхронних двигунів є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої полягає в розробці автоматизованих методу періодичної діагностики стану обладнання.

Огляд літературних джерел [1 – 14] дозволив зробити висновок, що найбільш перспективним є метод діагностики двигунів на основі спектрального аналізу струму статору, оскільки він не порушує технологічний процес і не потребує розбору двигуна для виявлення несправностей.

Мета роботи – покращити методику технічного обслуговування потужних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

Предмет дослідження – метод та засоби автоматизованого контролю та моніторингу потужних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором без вилучення двигуна із експлуатації.

Моніторинг технічного стану електродвигунів реалізовано за допомогою спектрального аналізу на основі дискретизації робочого струму двигуна і алгоритму швидкого перетворення Фур'є, основних законів електротехніки (рівняння Кірхгофа, закон Ома).

Наукова новизна одержаних результатів: удосконалено методику автоматизованого діагностування потужних асинхронних еле-

© Т. М. Сердюк, 2018

ктродвигунів без вилучення їх з експлуатації за допомогою спектрального аналізу робочого струму двигуна; удосконалено математичну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, яка стала науковим обґрунтуванням методу автоматизованого діагностування.

Практичне значення отриманих результатів визначається наступним: отримано нове рішення задачі щодо підвищення ефективності процесів експлуатації за технічним станом асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором Миколаївського глиноземного заводу; запропонована методика і розроблена технологія дають можливість ви значити технічний стан електродвигунів без їх вилучення з приводу й спрогнозувати вихід його з ладу; отримані результати можуть бути використані для вдосконалення технологій експлуатації електродвигунів глиноземного виробництва й перейти від планово-попереджувальної технології до обслуговування «за станом».

Математична модель трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Стан і досягнення науки й виробництва на сучасному етапі дозволяють застосовувати нові конструктивні рішення, матеріали, «безлюдні» (або малообслуговуємі) технології, які сприятимуть значному підвищенню надійності, безпеці й забезпеченню їхньої роботи з мінімальними витратами в експлуатації.

Удосконалення технічного обслуговування електродвигунів за рахунок реалізації автоматизованого контролю їх стану під час процесу виробництва є актуальною науковою задачею, що сприятиме покращанню умов роботи всього виробництва в цілому, дозволить зменшити кількість відмов і у подальшому перейти від планово-попереджувального виду обслуговування до обслуговування «за станом об’єкту».

Для наукового обґрунтування автоматизованого методу виміру параметрів трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором необхідно удосконалити його математичну модель, яка дозволить імітувати фізичні процеси, встановити первинні параметри схеми заміщені трифазного асинхронного двигуна, які не об’явлені в паспортних даних, й допоможе у визначенні несправностей в ньому за спектральним аналізом струму статору.

Припущення, які приймаються для моделювання фізичних процесів у трифазному асинхронному двигуні: нескінченна проникненість заліза; гладкий повітряний зазор; ідеальна «біляча клітка»; синусоїдальний розподіл потоку для двох кіл статору.

Визначимо первинні параметри трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором за його геометричними розмірами.

Індуктивність з урахуванням силових ліній магнітного поля, які перетинають повітряний зазор:

$$M_s = \frac{3}{\pi}\mu_0 K_w{}^2 N_s L \frac{D}{\delta p^2}, \qquad (1)$$

де μ_0 – магнітна постійна, N_s – число вітків у кожній фазі, L – довжина машини, D – діаметр повітряного зазору, p – число пар полюсів, δ – повітряний зазор, K_w – коефіцієнт охолодження.

$$K_w = \frac{\sin\frac{q\gamma}{2}\cos\frac{\psi}{2}}{q\sin\frac{q}{2}}, \qquad (2)$$

де q – число пазів на полюс і фазу; γ – кут між двома сусідніми пазами, $\gamma = \frac{2\pi p}{N_s}$; $\psi = \frac{2\pi p}{24}$ – кут однієї котушечної групи при кількості котушечних груп N_1=24.

Коефіцієнт взаємної індукції між обмотками статора и петлею ротора:

$$M_{rs} = \frac{M_s \sin\frac{\alpha}{2}}{K_w N_s}, \qquad (3)$$

© Т. М. Сердюк, 2018

де α – кут між сусідніми пазами в роторі, $\alpha = \frac{2\pi p}{N_r}$; N_r – число пазів в роторі; θ – кут, який дорівнює $\theta = 2\alpha$.

Коефіцієнт взаємної індукції між обмотками статора и петлею ротора за віссю *ds* визначається за формулою:

$$M_{rsds} = \frac{M_s \sin\frac{\alpha}{2}\cos\theta}{K_w N_s}. \qquad (4)$$

Коефіцієнт взаємної індукції між обмотками статора и петлею ротора за віссю *qs* визначається за формулою:

$$M_{rsqs} = M_{rs}\sin\theta. \qquad (5)$$

Власна індуктивність петлі ротора

$$M_r = \frac{\mu_0 \pi D L}{{N_r}^2 \delta}, \qquad (6)$$

де N_r – число пазів в роторі.

Взаємна індуктивність між витками ротору

$$M_{rr} = M_r\left(N_r - 1\right). \qquad (7)$$

Індуктивність розсіювання обмоток асинхронного двигуна визначається провідністю шляхів потоків пазового розсіювання, потоків розсіювання любих частин обмоток та еквівалентний провідністю для магнітних потоків вищих гармонік магнітного поля чи диференційним розсіюванням.

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора:

$$X_1 = 15{,}8\left(\frac{f}{100}\right)\cdot\left(\frac{W_1}{100}\right)^2\cdot\left(\frac{l_\delta}{p\cdot q_1}\right)\times$$
$$\times\left(\lambda_{n1}+\lambda_{л1}+\lambda_{\partial 1}\right), \qquad (8)$$

де λ_{n1} – коефіцієнт питомої магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора; $\lambda_{л1}$ – коефіцієнт питомої магнітної провідності лобового розсіювання обмотки статора; $\lambda_{\partial 1}$ – коефіцієнт питомої магнітної провідності диференційного розсіювання обмотки статора, W_1 – кількість вітків в фазі первинної обмотки, $l_\delta = L$.– довжина обмотки статору, q_1 – площа поперечного перерізу витка статору.

Знаючи індуктивний опір обмотки статора, ми можемо визначити і його індуктивність $L_{ds} = \frac{X_1}{2\pi f}$.

Повна індуктивність обмотки статора з урахуванням взаємоіндукції M_s дорівнює

$$L_s = L_{ds} + M_s. \qquad (9)$$

Знаючи індуктивність секції ротора $L_{db} = \frac{\mu\mu_0 L {N_r}^2}{\pi D^2 / 4}$ і з'єднувального кільця $L_{de} \approx L_{db}$, можна визначити повну індуктивність ротору L_r:

$$L_r = 2L_{db} + (N_r - 1)M_r + \frac{2L_{de}}{N_r}. \qquad (10)$$

Активний опір обмотки статору розраховується за паспортними даними двигуна (номінальною корисною потужністю P_{2nom}, номінальним струмом статору I_{1nom}, ККД η)

$$R_s = \frac{P_{2nom}}{\eta {I_{1nom}}^2}. \qquad (11)$$

Активний опір обмотки ротору типу «біляча клітина» складається з опорів стрижнів R_r та алюмінієвого кільця R_{kl}

$$R_r = \frac{P_{2nom}}{{I_{2nom}}^2},\ R_{kl} = \frac{\pi D_{kl}\sigma_{kl}}{Z_2 q_{kl}}, \qquad (12)$$

де D_{kl} – діаметр кільця ротору, σ_{kl} – питомий опір алюмінієвого кільця обмотки ротору, q_{kl} – площа перерізу замикаючих кілець, Z_2 – число пазів в роторі, I_{2nom} – номінальний струм ротору.

Таким чином, опір фази ротору дорівнює

$$R_2 = R_r + \frac{2R_{kl}}{\Delta^2}, \qquad (13)$$

© Т. М. Сердюк, 2018

де Δ – коефіцієнт, який використається для визначення струму в короткозамкненому кільці $I_{kl} = \frac{I_2}{\Delta}$, $\Delta = 2\sin\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right)$.

Струм ротору I_2 виміряти прямим методом не є можливим, оскільки обмотки статору і ротору не мають гальванічного зв'язку і ротор обертається. Він визначається через коефіцієнт приведення струмів $v_i = \frac{2m_1 W_1 K_{об1}}{Z_2}$, де m_1 – число фаз, $K_{об1}$ – обмоточний коефіцієнт, W_1 – кількість вітків в фазі первинної обмотки (наприклад при 24 котушках в фазі і 4ьох витках в кожній котушці $W_1 = 4 \cdot 24 = 96$) і коефіцієнт $k_i = 0.92$, який враховує вплив струму намагнічування і опір обмоток на відношення струмів I_1 / I_2 [14].

$$I_2 = k_i v_i I_1 . \qquad (14)$$

Індукція в статорі B_1 і роторі B_2 відповідно:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I (N_r - 1)}{N_r \delta}, \; B_2 = \frac{\mu_0 I}{N_r \delta}, \qquad (15)$$

де I – струм двигуна статора.

Струм в статорі при розподілі вздовж поперечної та повздовжньої вісей

$$i_{sd}(t) = I_1 \cos \omega t \, , \; i_{sq}(t) = I_1 \sin \omega t \, . \qquad (16)$$

Струм в роторі

$$\begin{pmatrix} i_{rd}(t) \\ i_{rq}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}. \qquad (17)$$

Напруга в роторі

$$u_r(t) = \begin{pmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sM_{rs} & -\omega M_{rs} \\ \omega M_{rs} & sM_{rs} \\ R_r + sL_r & 0 \\ 0 & R_r + sL_r \end{pmatrix}. \qquad (18)$$

Отже, за допомогою розробленої математичної моделі стало можливим визначати первинні параметри схеми заміщення потужного трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, знання яких є необхідним для моделювання різних режимів його роботи, зокрема моделювання залежностей зміни струму і напруги статору і ротору в часі.

Удосконалена математична модель стала науковим обґрунтуванням для розробки методики виміру гармонійних складових робочого струму статору й аналізу його справності. За рахунок порівняння розрахованих за результатами експериментальних досліджень первинних параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна і струмів (напруг) статору і ротору з номінальними стало можливим встановити вид і причину несправності об'єкту, що досліджується.

Результати моделювання

Приклад розрахунків дано для гармоніки основної частоти 50 Гц в номінальному режимі роботи під навантаженням для двигуна типу MEUL 355 L4 (аналог АИР355L4), який використається в якості насосу на глиноземному підприємстві.

Креслення асинхронного трифазного двигуна, що використається на виробництві в якості насосу для накачування глинозему дано на рис. 1.

Первинні параметри потужного асинхронного двигуна були розраховані за формулами (1)–(13) і приведеними нижче вихідними даними. Висота осі двигуна H=355 мм, довжина статора L = 775 мм, Міжосьова відстань між отворами фланців D20=740 мм,зовнішній діаметр статору Da=590 мм, внутрішній діаметр статору D=380 мм, повітряний зазор $\delta = 1$ мм. Пази ротору трапецеїдальні. Сталь ротору і статору марки 2312, клас ізоляції F. ККД $\eta = 0,952$, коефіцієнт потужності $cos\phi = 0.9$. Число вітків у кожній фазі статору N_s=4·24=96.

© Т. М. Сердюк, 2018

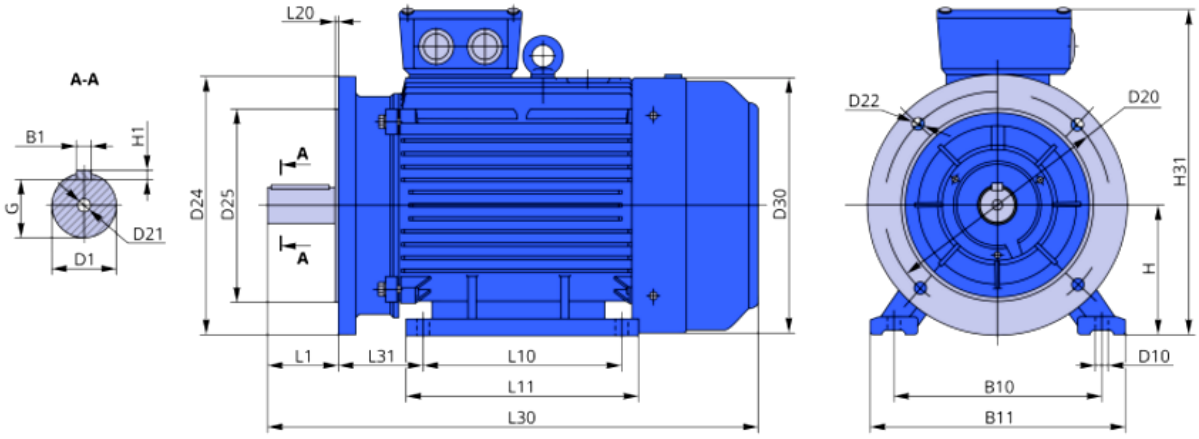

Рис. 1. Креслення асинхронного двигуна з основними типорозмірами

Число пазів в роторі Z_2=22, число пар полюсів p=4, повітряний зазор δ=1 мм. Магнітна постійна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ Гн/м$, I_{1nom} = 500 А, P_{2nom}=315 кВт, $U_{1nom} = 380$ В, швидкість обертання ротору n=1500 об/хв., плин $S = 0.1$.

Визначено: коефіцієнт охолодження K_w=0,829, взаємоіндукція статору M_s=0,136 Гн, взаємоіндукція між обмотками статора и петлею ротора $M_{rs} = 9,238 \cdot 10^{-4}\ Гн$, власна індуктивність петлі ротора $M_r = 2,334 \cdot 10^{-6}\ Гн$, взаємна індуктивність між витками ротору $M_{rr} = 4,902 \cdot 10^{-5}\ Гн$, повна індуктивність обмотки статора $L_s = L_{ds} + M_s = 1,767 + 0,136 = 1,903\ Гн$, індуктивність ротору $L_r = 4,988 \cdot 10^{-5}\ Гн$, активний опір обмотки статору R_s=1,059 Ом, активний опір обмотки ротору R_r=0,188 Ом, активний опір секції ротору $R_e = 0.09$ Ом, активний опір алюмінієвого кільця ротору $R_{kl} = 6,988 \cdot 10^{-4}\ Ом$.

Результати розрахунку струму $i_r(t)$ і напруги в роторі $u_r(t)$ за формулою (18) дано на рис. 2, 3.

Всі математичні операції в цьому підрозділі були виконані за допомогою Mathcad. Як видно з діаграм, кут зсуву фаз між повздовжньою і поперечною складовими струму (напруги) статору (ротору) складає 90°.

Методика діагностування потужних трифазних асинхронних двигунів

Автором пропонується система діагностування двигуна, заснована на спектральному аналізі струму статора [15 – 18]. Аналогово-цифровий перетворювач вмикається через трансформатори струму, які встановлені для виміру струмів в фази a, b, c (рис. 4).

Певний спектральний склад робочого струму статору є характерним для різних видів несправностей трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Навіть для мотора в справному стані, завжди є частотні компоненти, правда з низькою амплітудою. Це пов'язане із природною асиметрією двигуна, і з іншого боку, з напругою живильної мережі, яка є несинусоїдальною.

Несправність виду «биття підшипників». При виникненні несправності виду «биття підшипників» в спектрі робочого струму з'являються частоти 10…150 Гц кратні 10 Гц.

© Т. М. Сердюк, 2018

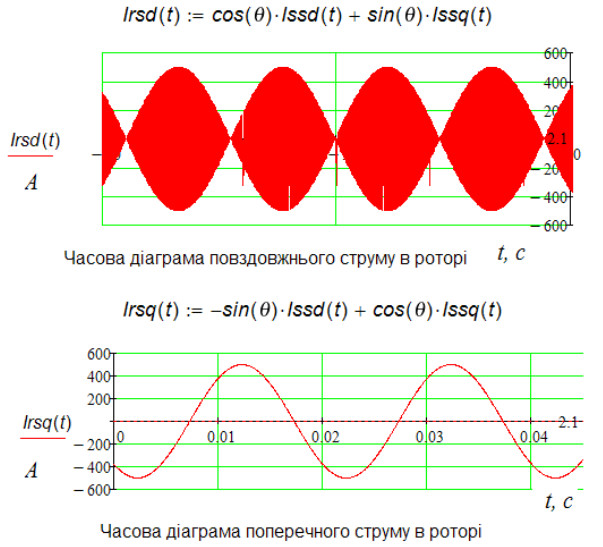

Рис. 2. Часові діаграми складових усталеного струму в роторі

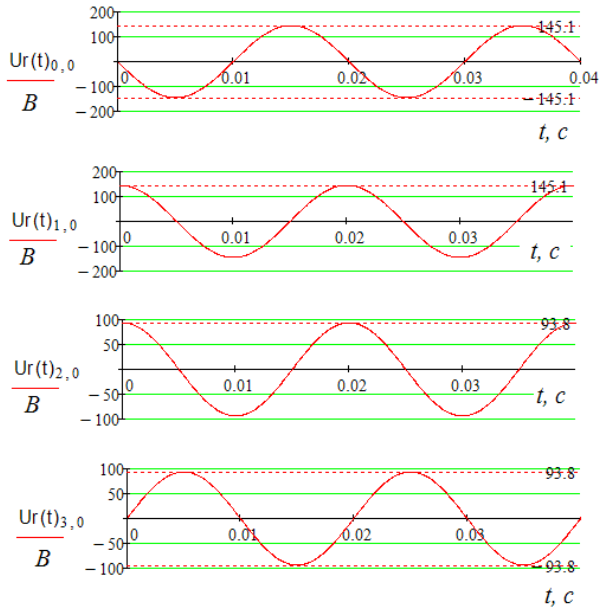

Рис.3. Часові діаграми складових усталеної напруги в роторі

При виникненні **несправності виду коротке замикання (кз) або пробій ізоляції** в роторі в спектрі струму з'являються гармоніки кратні по частоті 50 Гц.

При короткому замиканні величина струму буде більше в кілька разів. Несправність виду кз супроводжується з одного боку більш повільним набиранням оборотів валу електричного двигуна при включенні, а з іншого – скачками струму.

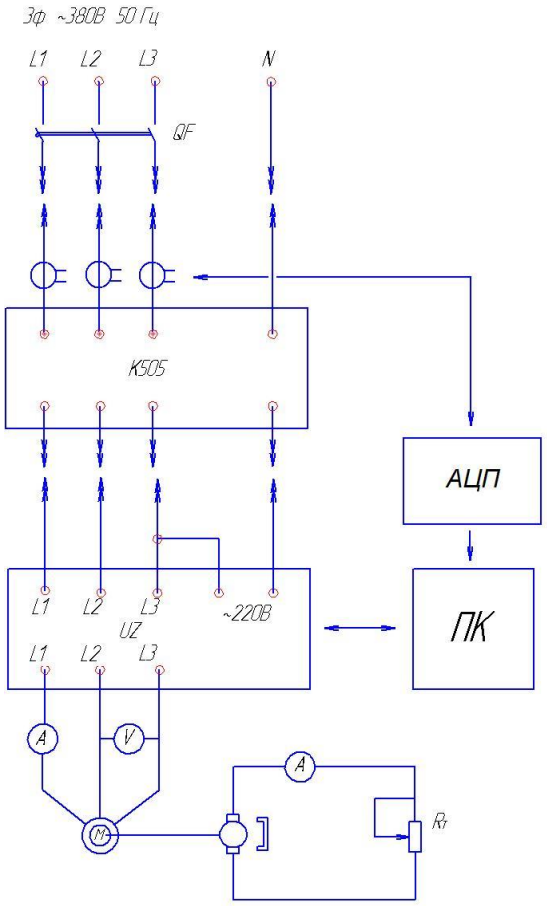

Рис.4. Схема установки для виміру струму статору

Так, для асинхронного трифазного двигуна при одному кз в обмотці ротору, явище «скачок струму» буде проявлятися при проході над кожним полюсом, тобто його частоту можна визначити за формулою

$$f_{кз} = \frac{pnN_{кз}}{60}, \qquad (19)$$

де n – швидкість обертання ротору, об/хв.; p - число пар полюсів, $N_{кз}$ - кількість відмов типу кз.

Так, частота струму короткого замикання, що має місце в роторі для двигуна типу MEUL 355L4, ABBM3BP355SMA – 250 кВт, RH500M4 –1210 кВт й кількості полюсів $p = 4$ й живлені обмоток статору напругою частотою 50 Гц , n = 1500 об/хв. (фактично 1490 об/хв) будуть кратними

© Т. М. Сердюк, 2018

$f_{кз} = \frac{4 \cdot 1500 \cdot 1}{60} = 100\,Гц$, тобто 100; 200; 300… Гц.

Оскільки за паспортними даними фактична швидкість обертання нижча, то частота струму також буде коливатися в межах й дорівнюватиме 100 ± 1 % = 99…101 Гц.

Аналогічний спектр частот виникає й при пробої ізоляції в осередді ротору. Несправності виду кз й пробій ізоляції листів можна буде розрізнити за амплітудою гармонік. При короткому замиканні амплітуда струму буде більшою в декілька разів.

Обрив в обмотках статору (ротору) є одним з найбільш часто виникаючих видів ушкоджень короткозамкнених електродвигунів. Тому розробка способів контролю стану обмоток таких машин є актуальною. Згідно з теорії для двигуна несиметрія струмів при обриві одного стрижня короткозамкненого ротору складає 5 %, а при обриві однієї паралельної гілки обмотки статора – 25 %. Обрив в обмотці статору супроводжується розширенням спектрального складу кривої струму.

Спектральний склад струму статора визначається за формулою

$$f_{кзс} = f(1 \pm 2kS), \qquad (20)$$

де S – частота напруги живлення, S – плин (російською «скольжение»), k – число обривів в обмотці статору, $k = 1, 2, 3…$.

Формула (20) описує асиметрію, що виникає у разі поломки стрижнів обмотки ротору асинхронного короткозамкненого двигуна, викликає струми у обмотці статору на частотах.

У випадку, якщо стрижні зламані, ротор є електрично асиметричним. В результаті створюється обертаюче магнітне поле, що гальмує двигун. Поточний спектр покаже, очікувані бічні лінії біля частоти живильної мережі.

Для того, щоб мати краще розуміння зламаного стрижня ротора, необхідним є й вивчення вищих частотних складових спектра робочого струму двигуна. Додаткові частоти з'являються на частотах

$$f_{кзс} = f\left(\frac{k}{p}(1-S) \pm S\right), \qquad (21)$$

де відношення $\frac{k}{p} = 1,3,5,7…$

Очевидно, що в спектрі струму статору крім частотної складової напруги живлення 50 Гц присутні компоненти з більш високими частотами, які зосереджені навколо головної гармоніки. Деякі частотні складові (250 Гц, 350 Гц і т.д.) виникають в результаті насичення магнітного матеріалу. Завдяки конфігурації трьох фазових обмоток, порядки існуючих гармонік, що випливають $\frac{k}{p} = 1, 5, 7, 11, ...$

Встановлено, що в результаті магнітного насичення осереддя асинхронної машини в спектрі струму виникають гармоніки кратні 3. Вони з'являються з ненульовими значеннями в спектрах фазних струмів. Частота струму статора описувана формулою (20) і (21) може бути виявлена при розгляді спектру в діапазоні від 0 Гц до 1000 Гц.

Отже, застосування запропонованої системи моніторингу [15 – 18] дозволить своєчасно визначити несправності на ранній стадії їх виникнення, мінімізувати витрати на ліквідацію пошкоджень, а також в подальшому здійснити перехід від планово-попереджувального ремонту до ремонту за станом об'єкта.

Електромагнітна сумісність асинхронних трифазних двигунів з перетворювачем частоти

Асинхронний двигун, який працює від перетворювача частоти з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) як це впроваджено на виробництві, підпадає під вплив гармонік напруги з частотою вище основної частоти живлення. Залежно від типу використовуваного ШІМ, частоти перемикання та інших особливостей управління, ефекти-

© Т. М. Сердюк, 2018

вність електродвигуна може знижуватися, а втрати, температура, шум і рівень вібрації підвищуються. Крім перерахованих вище, можуть проявлятися й інші ефекти при живленні асинхронного електродвигуна від перетворювача частоти . Оцінимо залежність ефективності роботи електродвигуна MEUL355L4, який живиться від перетворювача частоти Altivar.

Не існує міжнародної стандартизації визначення максимально допустимих значень гармонійних спотворень напруги і струму. Проте міжнародні стандарти враховують збільшення втрат електродвигуна через несинусоїдальне живлення. Стандарт IEC 60034-17 являє собою приклад збільшення втрат електродвигуна за рахунок живлення ШІМ напругою [14].

Отже, трифазний асинхронний електродвигун, який живиться ШІМ напругою, має більш низьку ефективність, чим при живленні чисто синусоїдальним напругою, в зв'язку зі збільшенням втрат, викликаних гармоніками.

При роботі асинхронних електродвигунів від частотних перетворювачів, необхідно оцінювати ефективність системи в цілому, а не тільки електродвигуна. Характеристика додаткових втрат в електродвигуні через наявність гармонійних складових в напрузі живлення через роботу ШІМ показана на рис. 5.

Збільшення частоти комутації збільшує ККД двигуна і знижує ККД інвертора (через збільшення втрат на переходах силових ключів). Ефект впливу зміни швидкості на ефективність двигуна можна пояснити через аналіз зміни вихідної потужності електродвигуна питомого від перетворювача частоти в залежності від його швидкості.

При частоті живлення мережі 50 Гц $P_{50\text{Гц}} = P_u$, $P_{25\text{Гц}} = \dfrac{P_u}{50/25} = 0,5P_u$.

Втрати в двигуні складаються з теплових втрат $P_J = P_{тепл}$ і втрат в залізі $P_{\text{ст}} = P_I$. Припустимо, що теплові втрати переважають, отже ККД двигуна зменшується на низьких швидкостях, де вихідна потужність двигуна знижується і, незважаючи на незначне зниження втрат в залізі (залежить від частоти), теплові втрати (пропорційні квадрату струму) зберігаються майже незмінними при постійному навантаженні. Так що значна зміна загальних втрат не спостерігається.

Визначимо ефективність через аналіз його ККД

$$\eta\,(\%) = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{P_{вих}}{P_{вих} + \sum P_{вт}},$$

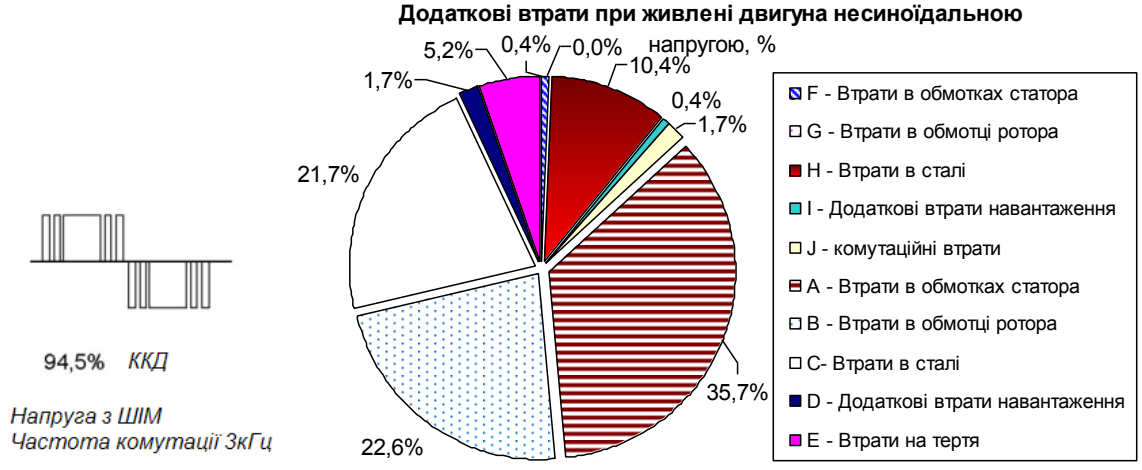

Рис. 5. Характеристика додаткових втрат в електродвигуні через наявність гармонійних складових у напрузі живлення через роботу ШІМ

© Т. М. Сердюк, 2018

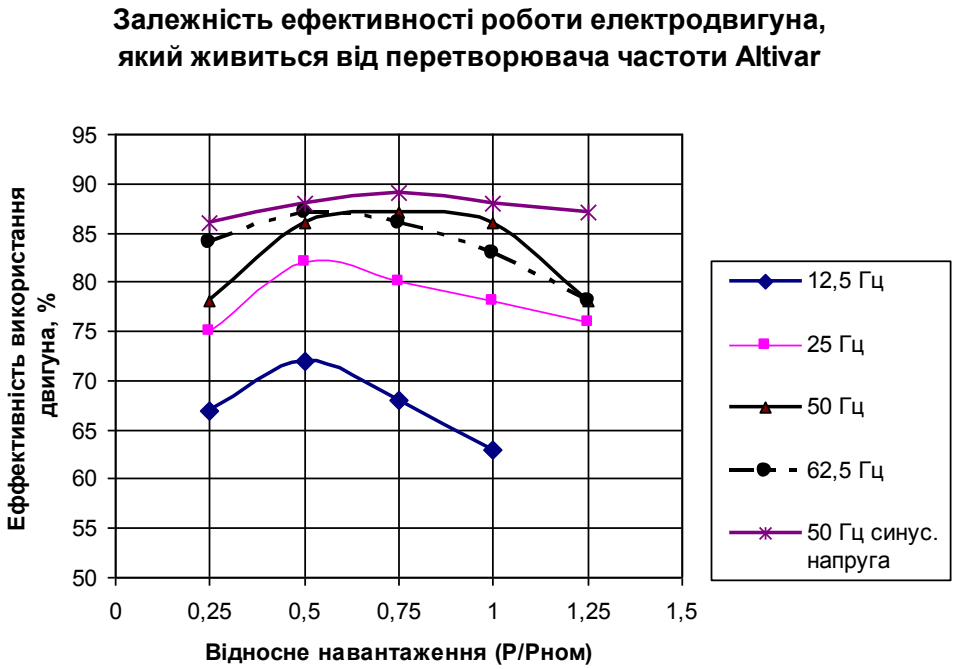

Рис. 6. Залежність ефективності роботи електродвигуна MEUL355L4, який живиться від перетворювача частоти Altivar

$\sum P_{вт} = P_{ст} + P_{тепл} = P_J + P_I$.

І якщо $P_J > P_I$, то при зниженні швидкості отримаємо зниження ККД $\eta = \eta_{дв}\eta_{пч}$ за рахунок зниження корисної потужності на виході двигуна.

Деякі практичні значення, отримані для стандартних двигунів методом вимірювання вхідних / вихідних параметрів, показані нижче (рис. 6).

Таким чином, встановлена залежність ефективності роботи електродвигуна MEUL355L4, який живиться від перетворювача частоти Altivar, при наявності різних низькочастотних складових в кривій живлячої напруги. Із зменшенням частоти ККД двигуна знижується близько на 10…15 %.

Асинхронні двигуни можуть більше нагріватися при живленні їх від перетворювача частоти, ніж при живленні від джерела синусоїдальної напруги (від мережі). Більший нагрів є результатом збільшення втрат в електродвигуні через вплив високочастотних складових ШІМ напруги. При цьому часто зменшується тепловіддача як результат зміни швидкості (чим менше швидкість обертання двигуна, тим менше охолоджуючий повітряний потік).

Гармонійні спотворення напруги сприяють збільшенню втрат в двигуні, як тільки виникають незначні зміни в гістерезисній петлі в сталі статора, збільшується ефективне магнітне насичення сердечника, і підвищуються високочастотні гармонійні струми, які викликають додаткові теплові втрати. Однак, ці високочастотні складові не беруть участь у створенні крутного моменту в двигуні, оскільки вони не збільшують магнітний потік в повітряному зазорі, який обертається із синхронною швидкістю. Надмірне використання двигуна на низьких швидкостях призводить до зниження самовентиляції корпусу двигуна, отже, погіршується охолодження двигуна і, таким чином, підвищується його температура.

Висновки

Проаналізовано різні види несправностей і пошкоджень асинхронних електричних машин, що викликають відмову, та методи їх контролю. Як найбільш перспекти-

© Т. М. Сердюк, 2018

вний був обраний метод спектрального аналізу струму статору, оскільки він не порушує технологічний процес і не потребує розбору двигуна для виявлення несправностей.

Удосконалено математичну модель трифазного асинхронного двигуна, яка дозволяє за обмеженими паспортними даними визначити всі первинні параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, розрахувати напруги і струми в статорі і роторі, їх повздовжню і поперечну складові. Адекватність математичної моделі була перевірена за допомогою критерію Фішера. Відносна похибка між виміряними і розрахованими даними не перевищувала 5 %. Приклад розрахунків дано для основної гармоніки частотою 50 Гц в номінальному режимі роботи електродвигуна MEUL355L4 (під навантаженням).

Запропонована математична модель стала науковим обґрунтуванням для розробки методики виміру гармонійних складових робочого струму статору й аналізу його справності. За рахунок порівняння розрахованих за результатами експериментальних досліджень первинних параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна і струмів (напруг) статору і ротору з номінальними стало можливим встановити вид і причину несправності об’єкту, що досліджується.

Розроблено методику технічного діагностування потужних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, яка передбачає аналіз роботи потужних електродвигунів за кривою робочого струму статору із подальшим спектральним аналізом.

Проаналізовано спектр і амплітуди гармонік, які є характерними різним видам несправностей асинхронного двигуна. Застосування запропонованої системи моніторингу дозволить своєчасно визначити несправності на ранній стадії їх виникнення, мінімізувати витрати на ліквідацію пошкоджень, а також в подальшому здійснити перехід від планово-попереджувального ремонту до ремонту за станом об'єкта.

Встановлена залежність ефективності роботи електродвигуна MEUL355L4, який живиться від перетворювача частоти Altivar, при наявності різних низькочастотних складових в кривій живлячої напруги. Із зменшенням частоти ККД двигуна знижується близько на 10…15%.

Збільшення частоти комутації збільшує ККД двигуна і знижує ККД інвертора (через збільшення втрат на переходах силових ключів). При живленні від перетворювача частоти енергоефективні електродвигуни зберігають свій ККД. Він навіть є вищим, в порівнянні з ККД стандартних двигунів.

Библиографический список

1. Вайнреб, К. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора [Текст] / К. Вайнреб // Электричество. − 2012. − № 7. − С. 51−57.
2. Гашимов, М. А. Диагностическое исследование электрических неисправностей электро-энергетических машин для задач экспресс-оценки технического состояния в процессе их работы / М. А. Гашимов, Н. К. Рамазанов // Электротехника. − 2006. – № 3. – С. 14−22. 6.
3. Крупенин, Н. В. Новые возможности в диагностике электрических машин [Текст] / Н. В. Крупенин, А. В. Голубев, В. И. Завидей // Электричество. − 2011. − № 9. − С. 45−48.
4. Титко, А. И. Новые методы диагностики асинхронных двигателей [Текст] / А. И. Титко, В. М. Андриенко, А. В. Худяков, М. С. Гуторова // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - 2014. – Вип. 37. – С. 58–61.
5. Сафин, Н. Р. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора [Текст] / Н. Р. Сафин, В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, А. А. Дмитриеский, В. М. Казакбаев// Диагностика и надежность энергооборудования. – 2014. – № 3(57) – С. 34-39.
6. Гольдберг, О. Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг, И. М. Абду-

© Т. М. Сердюк, 2018

лаев, А. Н. Абиев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
7. Никиян, Н. Г. Способ и установка для диагностики короткозамкнутых клеток электрических машин / Н. Г. Никиян, М. П. Саликов // Электрические станции. – 1999. – № 3. – С. 60-62.
8. Tavner, P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines [Text] / P. Tavner, J. Penman, H. Sedding // The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom. – 2008. – 306 p.
9. Thomson, W. T. Current signature analysis for condition monitoring of cage induction motors [Text] / W. T. Thomson, I. Culbert // IEEE. – 2017. – 427 p.
10. Toliyat, H. A. Electric machines. Modeling, Condition Monitoring and Fault Diagnosis [Text] / H. A. Toliyat, S. Handi, S. Choi, H. Meshgin-Kelk // CRC Press: Taylor & Francis Group, LLC. – 2013. – 266 p.
11. Imeryuz, M. A Method to Analyze Asynchronous Machines With Broken Rotor Bars [Text] / M. Imeryuz, A. F. Mergen, O. Ustun // Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2010. – IEEE.– 2010. – P. 269 – 272.
12. Tsypkin, M. Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – a Practical Implementation [Text] / M. Tsypkin // Proc. of International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). –IEEE. – 2011. P. 406–411.
13. Samaga, R. L. Effect of unbalance in voltage supply on the detection of mixed air gap eccentricity in an induction motor by Motor Current Signature Analysis [Text] / R. L. Samaga, K. P. Vittal, Vikas J // Proc. of Innovative Smart Grid Technologies, India.– IEEE PES. – 2011. – 6 p.
14. Асинхронные электродвигатели управляемые от преобразователя частоты. Техническое руководство WEG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.weg.kiev.ua/pdf/WEG_elektrodv_upravl_ot_preobr_chastoty.pdf . – 39 с.
15. Лагута, В. В. Моделирование эффективной системы диагностирования тягового электродвигателя с учетом выбора вариантов комплектации его элементов [Текст] / В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк // Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень». – 2017. – Вип. 13. – С. 52–58.
16. Сердюк, Т. М. Діагностування стрілочних двигунів змінного струму. Всеукраинская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов «Енергетика, енергозбереження на початку XXI століття»: Сб. тезисов докладов. Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2014. – 107 с.
17. Сердюк, Т. Н. Усовершенствование метода диагностирования неисправностей стрелочных электроприводов с двигателями переменного тока [Текст] / Т. Н. Сердюк, Д. Я. Покотилов, В. И. Профатилов // Тези XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» – Д.:ДИИТ, 2017.–С. 50.
18. Сердюк, Т. Н. Диагностирование мощных двигателей переменного тока [Текст] / Т. Н. Сердюк, М. С. Подберёзкин, К. Н. Сердюк // Тези XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» – Д.: ДИИТ, 2017.–С. 49.

Ключові слова: трифазний асинхронний двигун, діагностика, спектральній аналіз, несправності, електромагнітна сумісність.

Ключевые слова: трехфазный асинхронный двигатель, диагностика, спектральный анализ, неисправности, электромагнитная совместимость.

Keywords: three-phase asynchronous motor, diagnostics, spectral analysis, failures, electromagnetic compatibility.

Рецензенти:
проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Поступила в редколегію 15.11.2018.
Прийнята до друку 27.11.2018.

© Т. М. Сердюк, 2018