

моделивання роботи верстата-гойдалки штангової нафтовидобувної установки / А.В. Маляр // *Нафтова і газова промисловість*. – 2008. – № 3. – С. 34–35. 5. Маляр А.В. Системи автоматизованого керування і моніторингу процесом видобування нафти: Монографія /А.В. Маляр, Б.С. Калужний. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 272 с. 6. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей / Р.В. Фильц. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с.

УДК 621.313.3

В.С. Маляр, І.Р. Гавдьо

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕМА

ГАРМОНІЧНИЙ АНАЛІЗ КРИВОЇ ПОЛЯ В ПОВІТРЯНОМУ ПРОМІЖКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЕКРАНОВАНИМИ ПОЛЮСАМИ

© Маляр В.С., Гавдьо І.Р., 2013

Розглянуто гармонічний склад кривої поля в повітряному проміжку асинхронного двигуна з екранованими полюсами на основі використання математичної моделі двигуна, в якій магнітопровід представлений розгалуженою заступною схемою.

Ключові слова: асинхронний двигун, екрановані полюси, крива поля, гармонічний аналіз.

The harmonic field effects in shaded-pole induction motor has been considered. The motor magnetic circuit is presented by the ramified equivalent circuit.

Key words: induction motor, shaded-pole, harmonic field effects.

Вступ

Однофазні асинхронні двигуни з екранованими полюсами (АДЕП) – дуже поширені асинхронні двигуни малої потужності. Їх застосовують у приводах приладів мікроклімату, особистої гігієни та інших приводах потужністю до 200 Вт, для яких основними є вимоги низької собівартості і надійності. Магнітна система АДЕП виконується здебільшого дво- або чотириполюсною. Статор має явновиражені полюси з зосередженою обмоткою збудження, яка живиться синусоїдною напругою, а частина кожного полюса охоплена екрануючою обмоткою – короткозамкненим (КЗ) витком. Ротор – циліндричний, з шихтованим магнітопроводом та короткозамкненою обмоткою. Для покращання форми магнітного поля між полюсними наконечниками розташовані магнітні шунти з листової сталі.

Незважаючи на простоту конструкції, АДЕП є складним об'єктом для теоретичного аналізу, тому що цьому двигуну властива електрична та магнітна несиметрія і значні насичення окремих ділянок магнітопроводу. Електрична несиметрія АДЕП зумовлена різною кількістю витків і неоднаковим перерізом провідників обмоток збудження і екрануючої, зміщенням обмоток статора на просторовий кут, менший за 90 електричних градусів, магнітна – зумовлена явнополюсною конфігурацією магнітопроводу статора. Тому форма кривої просторового розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку значно відрізняється від синусоїди.

Суть проблеми

Розроблені на основі лінійної теорії електричних машин моделі АДЕП використовують фундаментальні методи (симетричних складових, обертових полів, двох реакцій), які передбачають принцип накладання магнітних полів окремих обмоток та гармонічну зміну в часі струмів обмоток

та магнітних потоків [1, 2, 3]. Індуктивні параметри обмоток визначаються на основі гармонічного аналізу розподілу магнітного поля в проміжку, створеного НС відповідної обмотки. Принцип накладання магнітних полів спричиняє необхідність оперувати сукупністю індуктивних параметрів (індуктивності або індуктивні опори) обмоток для кожної гармоніки, яка розглядається.

Аналіз процесів в АДЕП методами, які ґрунтуються на припущенні про лінійність електромагнітних зв'язків, має важливе методологічне значення з погляду пояснення впливу окремих просторових гармонік поля на вихідні характеристики машини. Однак ці моделі не враховують вищих часових гармонік струмів обмоток і магнітних потоків, локальні насичення окремих ділянок магнітопроводу і малопридатні для оптимального проектування.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

У [4] використаний метод скінчених елементів для оптимізації пускового моменту АДЕП за рахунок зміни геометрії стрижня ротора та величини повітряного проміжку. Вплив геометрії магнітного шунта на пускові властивості АДЕП зі складеною конструкцією статора проаналізовано в [5]; магнітне поле розраховане за допомогою рівнянь Максвелла. Отже, застосування методів теорії електромагнітного поля для дослідження АДЕП дає змогу виконати окремі оптимізаційні завдання.

Однак застосування методів теорії електромагнітного поля для розрахунку магнітного поля та характеристик АДЕП є доволі трудомістким. Більшість практичних задач аналізу процесів і характеристик в АДЕП з достатньою для практики точністю доцільно розв'язувати на основі теорії електричних та магнітних кіл.

Мета статті

Метою статті є дослідження гармонічного складу кривої поля в повітряному проміжку асинхронного двигуна з екранованими полюсами.

Виклад основного матеріалу

Запропонована в [6] математична модель АДЕП побудована на основі розгалуженої заступної схеми магнітопроводу і дозволяє розраховувати усталені режими та перехідні процеси у цьому двигуні при нелінійності характеристик намагнічування сталі та довільній зміні у часі струмів обмоток і магнітних потоків. В основу математичної моделі АДЕП покладені такі допущення:

- а) робоче магнітне поле машини – плоскопаралельне;
- б) робочий магнітний потік та потік розсіювання обмотки ротора взаємно незалежні;
- в) розрахунок характеристик намагнічування ділянок магнітного кола проводимо за основною кривою намагнічування, тобто не враховується явище гістерезису;
- г) зубцевий шар ротора замінюємо еквівалентним однорідним шаром, характеристика намагнічування якого в радіальному напрямі збігається з характеристикою намагнічування реального зубцевого шару.

Зважаючи на те, що ротор АДЕП є симетричним, а статор має явно виражені полюси, для опису електромагнітних зв'язків вибрана система координатних осей d, q , які жорстко зв'язані зі статором. При цьому короткозамкнена обмотка ротора замінюється двома еквівалентними синусоїдально розподіленими ортогональними контурами, які розташовані по поздовжній (d) та поперечній (q) осях, а обмотка збудження та КЗ виток залишаються реальними (рис. 1). Це дає змогу звести систему рівнянь електричної рівноваги до чотирьох.

Електромагнітні процеси в АДЕП, який працює з ковзанням s , описуються системою ДР, яка з урахуванням перетворення короткозамкненої обмотки ротора до осей d, q у векторній формі має вигляд

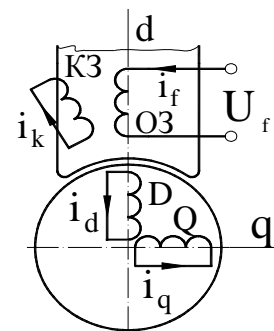


Рис. 1. Електричні контури АДЕП:
OZ – котушка обмотки збудження; *K3* – КЗ виток; *D, Q* – еквівалентні контури ротора по осях d, q

$$\frac{d\bar{\Psi}}{dt} + \Omega\bar{\Psi} + R\bar{I} = \bar{U}, \quad (1)$$

де $\bar{\Psi} = (\psi_f, \psi_k, \psi_d, \psi_q)^T$, $\bar{I} = (i_f, i_k, i_d, i_q)^T$ – вектори потокозчеплень та струмів обмотки збудження, короткозамкнутого витка розщепленого полюса та еквівалентних контурів d і q ротора (тут і надалі верхній індекс “Т” означає транспонування); $R = \text{diag}(r_f, r_k, r_d, r_q)$ – діагональна матриця активних опорів контурів АДЕП; $\bar{U} = (U_{fm} \sin \omega_1 t, 0, 0, 0)^T$ – вектор прикладених до контурів напруг, в якому U_{fm} – амплітуда, а ω_1 – циклічна частота напруги живлення обмотки збудження;

$$\Omega = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & & & \\ \hline & & & \\ \hline & & & -\omega_2 \\ \hline & & \omega_2 & \\ \hline \end{array}$$

$\omega_2 = (1-s)\omega_1$ – кутова швидкість обертання ротора, виражена в електричних радіанах за секунду.

Внаслідок електричної та магнітної несиметрії в стаціонарному режимі процеси в АДЕП є несинусоїдними періодичними. Вони описуються нелінійною системою диференціальних рівнянь (ДР), якій відповідає в стаціонарному режимі періодичний розв’язок. Ефективним шляхом визначення періодичного розв’язку є розгляд задачі його пошуку як крайової, а одним із методів її розв’язання є розроблений в [7] диференціальний гармонічний метод.

В усталеному режимі вектори $\bar{\Psi}, \bar{I}$, які входять до ДР (1), є періодичними функціями часу, а враховуючи, що $\bar{\Psi} = \bar{\Psi}(\bar{I})$, розв’язком ДР (1) буде Т-періодична залежність $\bar{I}(t) = \bar{I}(t+T)$. Для її знаходження у відповідності до [7] кожен компоненту векторів $\bar{\Psi}, \bar{I}$ апроксимуємо усіченим тригонометричним рядом вигляду

$$x(t) = \sum_{v=1,3,\dots}^m (x_c \cos v\omega_1 t + x_s \sin v\omega_1 t),$$

який з урахуванням симетрії кривих складається з непарних гармонік ($x = \psi, i$). У результаті замість нелінійного ДР (1) будемо розглядати так зване [7] його гармонічне відображення

$$D_\Gamma \bar{\Psi}_\Gamma + R_\Gamma \bar{I}_\Gamma = \bar{U}_\Gamma, \quad (2)$$

де $D_\Gamma = \text{diag}(D_1, \dots, D_v, \dots, D_m)$ – блочно-діагональна матриця [7]; $\bar{\Psi}_\Gamma = (\bar{\Psi}_1, \dots, \bar{\Psi}_v, \dots, \bar{\Psi}_m)^T$ – вектор, складений з векторів амплітуд косинусних і синусних складових гармонік вектора $\bar{\Psi}$, в якому

$$\bar{\Psi}_v = (\Psi_{fcv}, \Psi_{fsv}, \Psi_{kcv}, \Psi_{ksv}, \Psi_{dcv}, \Psi_{dsv}, \Psi_{qcv}, \Psi_{qsv})^T;$$

$\bar{I}_\Gamma = (\bar{I}_1, \dots, \bar{I}_v, \dots, \bar{I}_m)^T$ – вектор, складений з векторів амплітуд косинусних і синусних складових гармонік вектора \bar{I} , в якому

$$\bar{I}_v = (I_{fcv}, I_{fsv}, I_{kcv}, I_{ksv}, I_{dcv}, I_{dsv}, I_{qcv}, I_{qsv})^T;$$

$R_\Gamma = \text{diag}(R, \dots, R)$ – блочно-діагональна матриця, яка складається з m однакових блоків

$R = \text{diag}(r_f, r_k, r_d, r_q)$; $\bar{U}_\Gamma = (0, U_{fm}, 0, \dots, 0)^T$ — $(4 \times m/2)$ -мірний вектор косинусних і синусних складових амплітуд прикладених напруг.

До системи (2) алгебричних рівнянь входять два невідомі вектори – $\bar{\Psi}_\Gamma$ та \bar{I}_Γ , які внаслідок насичення магнітопроводу АДЕП зв’язані нелінійною залежністю $\bar{\Psi}_\Gamma = \bar{\Psi}_\Gamma(\bar{I}_\Gamma)$. Отже, система (2),

як і вихідна система (1) ДР, нелінійна. Ефективним методом розв'язання таких систем є ітераційний метод Ньютона. Для отримання початкового наближення кореня рівняння (2) – вектора \vec{I}_Γ , яке б забезпечувало збіжність ітераційного процесу, домножимо вектор \vec{U}_Γ збудуючої дії на ϵ та продиференціюємо отриману параметризовану систему по цьому аргументу. У результаті отримаємо

$$(D_\Gamma S_{\Psi_\Gamma} + R_\Gamma) \frac{d\vec{I}_\Gamma}{d\epsilon} = \vec{U}_\Gamma, \quad (3)$$

де $S_{\Psi_\Gamma} = d\vec{\Psi}_\Gamma / d\vec{I}_\Gamma$ – матриця диференціальних гармонічних параметрів [6].

Інтегруючи систему (3) ДР одним із чисельних методів в межах від $\epsilon=0$ до $\epsilon=1$ при нульових початкових умовах, отримаємо наближене значення вектора \vec{I}_Γ , яке уточнюємо ітераційним методом Ньютона, згідно з яким $(l+1)$ -е наближення визначаємо за формулами

$$\vec{I}_{\Gamma(l+1)}^* = \vec{I}_{\Gamma(l)}^* - \Delta \vec{I}_{\Gamma(l)}^*, \quad (4a)$$

$$(D_\Gamma S_{\Psi_{\Gamma(l)}} + R_\Gamma) \Delta \vec{I}_{\Gamma(l)}^* = \vec{H}_{(l)}, \quad (4b)$$

де $\vec{H}_{(l)}$ – вектор нев'язок системи (2).

Значення матриці S_{Ψ_Γ} необхідно обчислювати на кожному кроці чисельного інтегрування системи (3). ДР та ітераційного уточнення методом Ньютона. Для цього необхідно на часовому періоді T нанести сітку вузлів і здійснити перехід від вектора \vec{I}_Γ амплітуд до вектора \vec{I}_Γ вузлових значень струмів контурів. Використовуючи останній, у відповідності до математичної моделі АДЕП необхідно обчислити для кожного з вузлів значення поточкозчеплень контурів та матриць диференціальних індуктивностей, з яких формуємо повні матриці сіткових диференціальних параметрів. Останні є блочно-діагональні, оскільки зв'язок між вузловими векторами поточкозчеплень та струмів існує лише в одних і тих же вузлах. Постійні матриці та формули, які дають змогу перейти від матриць сіткових диференціальних параметрів до матриць гармонічних диференціальних параметрів, наведені в [7]. З використанням розробленої математичної моделі у [8] досліджено вплив геометрії магнітного шунта на статичні характеристики АДЕП.

Запропонована математична модель дозволяє отримати інтегральну картину магнітного поля у проміжку АДЕП для будь-якого значення ковзання від $s=0$ до $s=1$ та провести її гармонічний аналіз.

На рис. 2 наведені криві поля АДЕП для пуску ($s = 0$), критичного ковзання ($s_k = 0,36$), та при номінальному навантаженні ($s_n = 0,14$). Для цих режимів в таблиці наведені дані гармонічного аналізу кривих поля $B_\delta = f(\alpha)$ – абсолютні та відносні значення основної та вищих гармонік (3, 5, 7). При розрахунку відносних значень вищих гармонік за “одиницю” прийнята амплітуда першої гармоніки.

Дані гармонічного аналізу кривих поля $B_\delta = f(\alpha)$

Режим роботи	$v = 1$	$v = 3$	$v = 5$	$v = 7$
Пуск $\omega = 0$	$B_{\delta(1)} = 0,259$	$B_{\delta(3)} = 0,137$	$B_{\delta(5)} = -0,079$	$B_{\delta(7)} = -0,115$
	$B_{\delta(1)}^* = 1,0$	$B_{\delta(3)}^* = 0,53$	$B_{\delta(5)}^* = 0,31$	$B_{\delta(7)}^* = 0,44$
Критичне ковзання $\omega = 200c^{-1}$	$B_{\delta(1)} = 0,307$	$B_{\delta(3)} = 0,054$	$B_{\delta(5)} = -0,052$	$B_{\delta(7)} = -0,102$
	$B_{\delta(1)}^* = 1,0$	$B_{\delta(3)}^* = 0,18$	$B_{\delta(5)}^* = 0,17$	$B_{\delta(7)}^* = 0,33$
Номінальне навантаження $\omega = 270c^{-1}$	$B_{\delta(1)} = 0,357$	$B_{\delta(3)} = -0,003$	$B_{\delta(5)} = -0,024$	$B_{\delta(7)} = -0,096$
	$B_{\delta(1)}^* = 1,0$	$B_{\delta(3)}^* = 0,008$	$B_{\delta(5)}^* = 0,067$	$B_{\delta(7)}^* = 0,27$

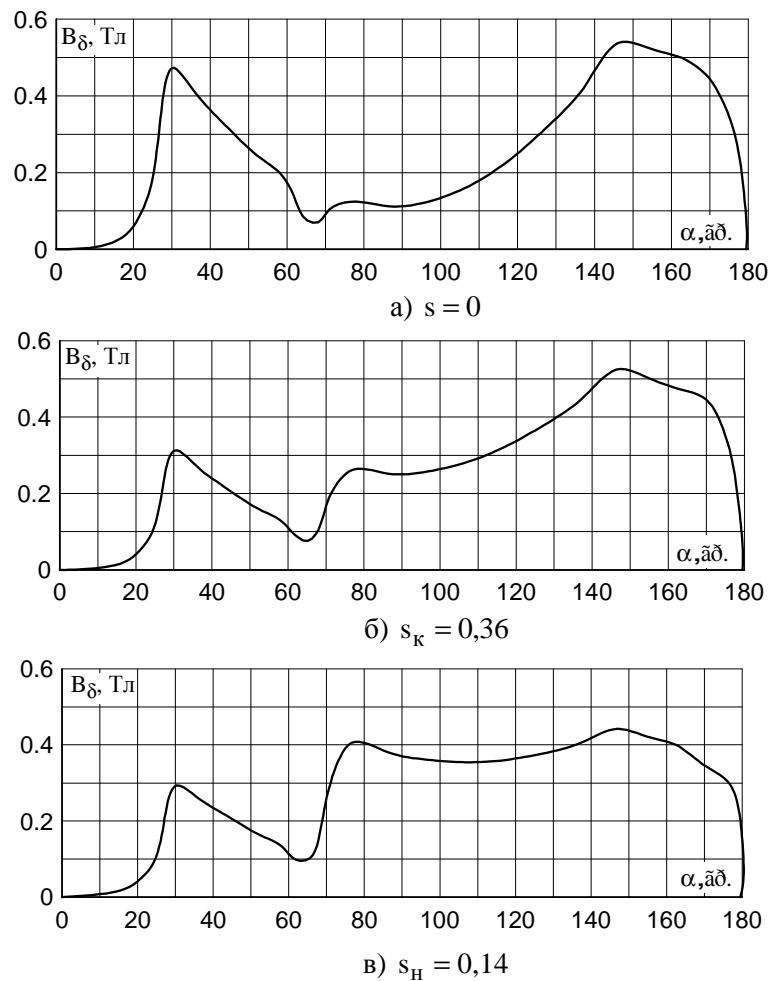


Рис. 2. Криві поля АДЕП за різних режимів роботи

Висновки

Математична модель АДЕП, розроблена на підставі представлення магнітопроводу розгалуженою заступною схемою з високим рівнем деталізації, дає змогу досліджувати гармонічний склад кривої поля в повітряному проміжку цього двигуна. Проведений гармонічний аналіз підтверджує покращання кривої поля АДЕП у номінальному режимі порівняно з режимом пуску та з роботою при критичному ковзанні.

1. Ефименко Е.И. Новые методы исследования машин переменного тока и их приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 288 с. 2. Хрущев В.В. Электрические микромашины автоматических устройств. – Л.: Энергия, 1985. – 383 с. 3. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. – М.: Высш. шк., 1976. – 416 с. 4. Lhou D., Rajanathan C. B., Sapeluk A. T., Ozveren Q. S. Finite – element – aided design optimization of a shaded – pole induction motor for maximum starting torque//IEEE Trans. Magn. – 2000. – 36, № 5, p. 1, P. 3551–3554. 5. Anuszczyk J., Blaszczyk P. Obliczenia bocznika magnetycznego silnika indukcyjnego z faza zwarta//Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne № 69. – Katowice. – 2004. – S. 41–44. 6. Гавдьо І.Р. Електромагнітні процеси в асинхронних двигунах з екранованими полюсами: Авторефер. дис...канд. техн. наук: 05.09.01. – Львів, 2005. – 17 с. 7. Глухівський Л.И. Расчет периодических процессов электротехнических устройств. – Львов, 1984. – 162 с. 8. Глухівський Л.Й., Маляр В.С., Гавдьо І.Р. Статичні характеристики асинхронного двигуна з екранованими полюсами при різній геометрії магнітного шунта // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2009. – № 654.– С. 48–54.