

СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЕКРАНОВАНИМИ ПОЛЮСАМИ ПРИ РІЗНІЙ ГЕОМЕТРІЇ МАГНІТНОГО ШУНТА

© Глухівський Л.Й., Маляр В.С., Гавдьо І.Р., 2009

Розглядається питання впливу геометрії магнітного шунта на статичні характеристики асинхронного двигуна з екранованими полюсами. Електромагнітні параметри обчислюються на основі представлення магнітної системи двигуна розгалуженою заступною схемою. Для розрахунку статичних характеристик застосовується диференціальний гармонічний метод.

The influence of magnetic shunt geometry of shaded-pole induction motor on steady-states has been considered. The electromagnetic parameters are calculated on the base of ramified equivalent circuit of motor magnetic circuit. The differential harmonic method to calculation steady-states in shaded-pole induction motor have been considered.

Вступ. Однофазні асинхронні двигуни з екранованими полюсами (АДЕП), які застосовують у приводах механізмів малої потужності, відзначаються простотою конструкції, надійністю і низькою собівартістю виготовлення. Їх застосовують у приводах приладів мікроклімату, особистої гігієни та інших приводах потужністю до 200 Вт, для яких основними є вимоги низької собівартості і надійності. Складність теоретичного дослідження та розрахунку процесів в АДЕП зумовлена необхідністю врахування електричної і магнітної несиметрії та реального насичення ділянок магнітної системи, яке змінюється в широких межах залежно від режиму роботи.

Під час проектування двигуна необхідно здійснювати оптимізацію його статичних характеристик, які залежать від низки чинників, одним з яких є геометрія магнітного шунта. Отримати достовірні результати розрахунку, які дають змогу відмовитись від натурних експериментів, можна лише на підставі використання математичних моделей високого рівня адекватності.

Суть проблеми. Наявність магнітних шунтів в АДЕП призводить до покращання кривої просторового розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку [1], і таким чином позитивно впливає на його характеристики. При виборі геометрії магнітного шунта необхідно забезпечити оптимальне шунтування магнітного потоку обмотки збудження, яке визначається відношенням наскрізного потоку через шунт $\Phi_{\text{ш}}$ до робочого магнітного потоку Φ_{δ} . Складовою частиною потоку Φ_{δ} є магнітний потік шунта $\Phi_{\text{ш}\delta}$, який відгалужується через повітряний проміжок у ротор (рис. 1).

Вставні магнітні шунти АДЕП виготовляються в двох конструктивних варіантах: з окремих феромагнітних пластин постійного перерізу, або з так званим “містком” насичення, який виконується у вигляді щілини, паралельної до осі обертання ротора. У магнітному шунті змінного перетину призначення щілини полягає у тому, щоб при достатній з погляду технології виготовлення товщині шунта обмежити наскрізний магнітний потік $\Phi_{\text{ш}}$ через нього. Ширину щілини у шунті $b_{\text{щ}}$ вибирають значно більшою за величину повітряного проміжку δ , а ступінь шунтування магнітного потоку обмотки збудження визначається товщиною шунта $\Delta_{\text{ш}}$, довжиною щілини у шунті $l_{\text{щ}}$, довжинами шунта $l_{\text{ш}}$ та пакета сталі статора l_c (рис. 2).

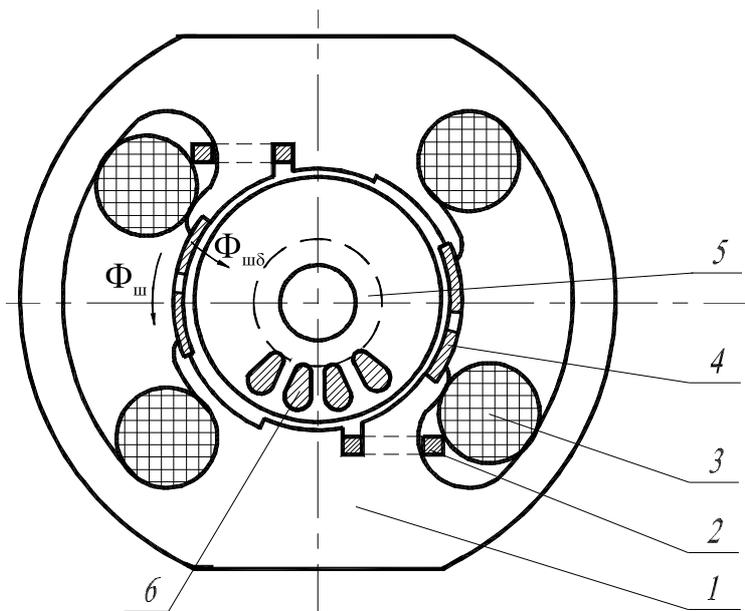


Рис. 1. Ескіз магнітної системи АДЕП:
 1 – пакет статора; 2 – КЗ виток; 3 – обмотка збудження;
 4 – магнітний шунт; 5 – пакет ротора; 6 – КЗ обмотка ротора

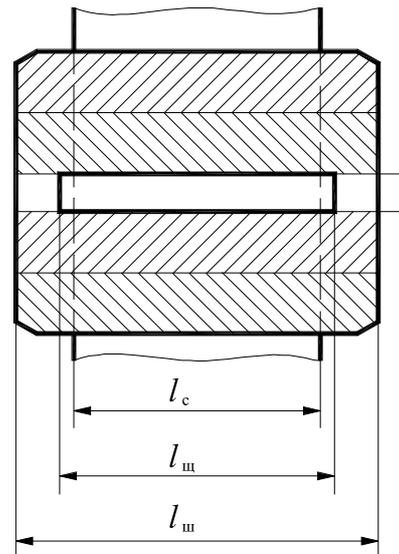


Рис. 2. Фрагмент магнітопроводу АДЕП з магнітним шунтом зі щілиною

Отже, розміри магнітного шунта АДЕП є одним із важливих чинників, які визначають його статичні характеристики.

Відомі аналітичні методи розрахунку [1, 2], які використовують принцип накладання, вимагають прийняття істотних допущень та дозволяють лише якісно оцінити вплив магнітних шунтів на статичні характеристики АДЕП.

Аналіз останніх досягнень. У [3] використаний метод скінченних елементів для оптимізації пускового моменту АДЕП за рахунок зміни розмірів стрижня ротора та повітряного проміжку. Для АДЕП зі складеною конструкцією статора в [4] за допомогою рівнянь Максвелла розраховане поле при різних розмірах “містка” насичення, створеного виїмками у перемичках між полюсами та проаналізовано вплив геометрії магнітного шунта на пускові властивості АДЕП.

Зауважимо, що розрахунок магнітного поля АДЕП з використанням рівнянь Максвелла є доволі трудомістким. Тому, на наш погляд, найдоцільніше аналізувати АДЕП з достатньою для практики точністю на основі теорії електричних та магнітних кіл.

Розроблена в [5] математична модель АДЕП має у своїй основі представлення магнітного кола машини розгалуженою заступною схемою з високим рівнем деталізації магнітопроводу. Ця модель дає змогу досліджувати вплив геометрії магнітного шунта на розподіл магнітної індукції у проміжку АДЕП та розраховувати процеси з урахуванням нерівномірного насичення різних ділянок магнітопроводу, довільної зміни у часі струмів обмоток, реального негармонічного розподілу намагнічуючих сил контурів статора.

Метою статті є дослідження впливу геометрії магнітного шунта на статичні характеристики АДЕП на основі використання розробленої в [5] математичної моделі двигуна високого рівня адекватності

Виклад основного матеріалу. Запропонована в [5] розгалужена заступна схема магнітопроводу дає змогу з високою точністю враховувати насичення різних ділянок магнітопроводу АДЕП і на її основі для заданих миттєвих значень струмів обмоток розраховуються значення

магнітних потоків (індукцій) в усіх ділянках магнітного кола, потокозчеплення та диференційні індуктивності обмоток. Процеси в АДЕП доцільно розглядати у взаємно ортогональних осях d, q, які жорстко зв'язані зі статором. Обмотка короткозамкнутого ротора при цьому еквівалентується двома синусно розподіленими обмотками, а обмотки статора не перетворюються.

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 [6] диференціальний гармонічний метод.

Застосування вказаного методу дає змогу розраховувати статичні характеристики АДЕП з різною геометрією магнітного шунта. Математична модель двигуна складається з диференціальних рівнянь електричної рівноваги і рівнянь магнітного стану, які описують заступну схему магнітопроводу двигуна. Врахування геометрії магнітного шунта з "містком" насичення вимагає внесення коректив до заступної схеми магнітопроводу в зоні магнітного шунта (змінюється спосіб розбиття цього шунта на однорідні ділянки), що призводить до відповідних змін у рівняннях магнітного стану.

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

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

де $\vec{\Psi} = (\psi_f, \psi_k, \psi_d, \psi_q)^T$, $\vec{I} = (i_f, i_k, i_d, i_q)^T$ – вектори потокозчеплень та струмів обмотки збудження, короткозамкнутого витка розщепленого полюса та еквівалентних контурів d і q ротора (тут і надалі верхній індекс "T" означає транспонування); $R = \text{diag}(r_f, r_k, r_d, r_q)$ – діагональна матриця активних опорів контурів АДЕП; $\vec{U} = (U_{fm} \sin \omega_1 t, 0, 0, 0)^T$ – 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.

В усталеному режимі вектори $\vec{\Psi}, \vec{I}$, які входять до ДР (1), є періодичними функціями часу, а враховуючи, що $\vec{\Psi} = \vec{\Psi}(\vec{I})$, розв'язком ДР (1) буде T-періодична залежність $\vec{I}(t) = \vec{I}(t+T)$. Для її знаходження відповідно до [6] кожен компоненту векторів $\vec{\Psi}, \vec{I}$ 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 [6] його гармонічне відображення

$$D_r \vec{\Psi}_r + R_r \vec{I}_r = \vec{U}_r, \quad (2)$$

де $D_r = \text{diag}(D_1, \dots, D_v, \dots, D_m)$ – блочно-діагональна матриця [6].

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

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

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

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

$R_r = \text{diag}(R, \dots, R)$ – блочно-діагональна матриця, яка складається з m однакових блоків $R = \text{diag}(r_b, r_f, r_k, r_k, r_d, r_d, r_q, r_q)$; $\vec{U}_r = (0, U_{fm}, 0, \dots, 0)^T$ – $(4 \times v)$ -мірний вектор косинусних і синусних складових амплітуд прикладених напруг.

До системи (2) алгебричних рівнянь входять два невідомі вектори – $\vec{\Psi}_r$ та \vec{I}_r , які внаслідок насичення магнітопроводу АДЕП зв'язані нелінійною залежністю $\vec{\Psi}_r = \vec{\Psi}_r(\vec{I}_r)$. 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}_r , яке б забезпечувало збіжність ітераційного процесу, домножимо вектор \vec{U}_r збурюючої дії на ε та продиференціюємо отриману параметризовану систему по цьому аргументу. У результаті отримаємо

$$(D_r S_{\Psi_r} + R_r) \frac{d\vec{I}_r}{d\varepsilon} = \vec{U}_r, \quad (3)$$

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

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

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

$$(D_r S_{\Psi_r(l)} + R_r) \Delta \vec{I}_{r(l)} = \vec{H}_{(l)}, \quad (4b)$$

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

Значення матриці S_{Ψ_r} 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}_r амплітуд до вектора \vec{I}_v вузлових значень струмів контурів. Використовуючи останній, відповідно 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 [6].

Виконавши розрахунки для сукупності значень ковзання від $s=1$ до $s=0$, отримаємо статичні характеристики АДЕП.

На основі розробленої математичної моделі проведені розрахунки кривої поля та статичних характеристик АДЕП з шунтом постійного перерізу та з шунтом у вигляді “містка” насичення. Для коректного порівняння двох конструктивних варіантів шунтів, їх розміри повинні задаватися такими, щоб забезпечувалася умова незмінності наскрізного магнітного потоку $\Phi_{ш}$. Для цього товщина шунта постійного перерізу визначена з умови незмінності площ у середньому перерізі шунта зі щільною $S_{ш} = \Delta_{ш} \cdot (I_{ш} - I_{щ})$ та шунта постійного перерізу $S_{п} = \Delta_{п} \cdot I_c$ за формулою

$$\Delta_{п} = \Delta_{ш} \cdot (I_{ш} - I_{щ}) / I_c \quad (5)$$

На рис. 3, 4 наведені криві поля при пуску та номінальному навантаженні відповідно, а на рис. 5–8 – статичні характеристики для шунтів постійного перерізу і з “містком” насичення.

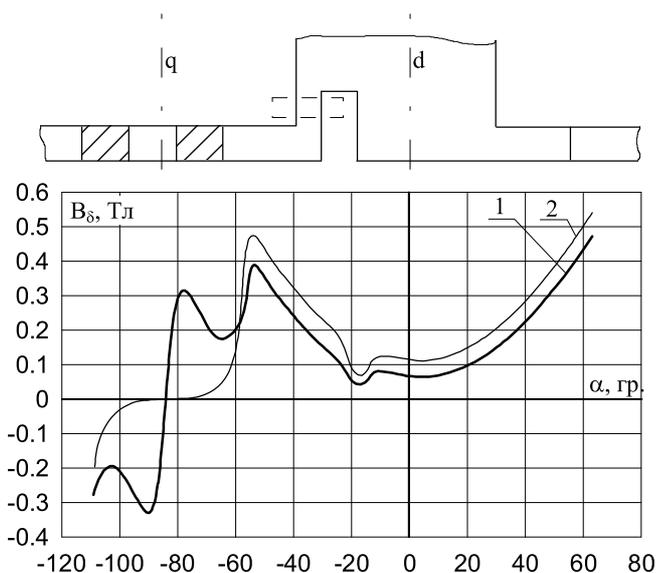


Рис. 3. Криві поля АДЕП при пуску

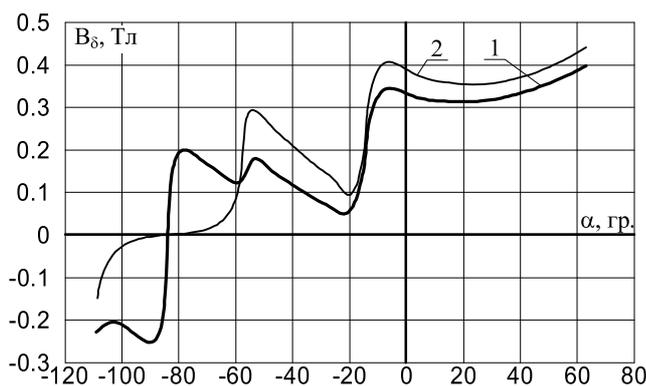


Рис. 4. Криві поля АДЕП при номінальному навантаженні

На всіх рисунках криві 1 відповідають шунту з “містком” насичення, а криві 2 – шунту постійного перерізу. Наведені на рис. 3, 4 залежності показують, що наявність магнітного шунта з “містком” насичення порівняно з шунтом постійного перерізу призводить до перерозподілу магнітної індукції так, що у зоні шунта вона збільшується, а під полюсом – зменшується.

Порівняння механічних характеристик (рис. 7) шунтів різних конструктивних виконань показує, що АДЕП з шунтом постійного перерізу має більший максимальний момент і, отже, переважувальну здатність, але у зоні номінальних ковзань характеристики практично ідентичні. Струм збудження у АДЕП з шунтом у вигляді “містка” насичення є меншим порівняно з двигуном, який містить шунт постійного перерізу у всьому діапазоні ковзань, що можна пояснити зменшенням загального магнітного опору для потоку обмотки збудження. Струм короткозамкнутого витка при пуску є більшим у АДЕП з шунтом у вигляді “містка” насичення, але у зоні номінальних ковзань характеристики збігаються. Найважливішою для порівняння АДЕП з шунтами різних конструктивних виконань є залежності ККД від частоти обертання (рис. 8), які показують, що у зоні номінальних ковзань АДЕП з шунтом у вигляді “містка” насичення має ККД приблизно на 2,5 % вищий, ніж двигун з шунтом постійного перерізу.

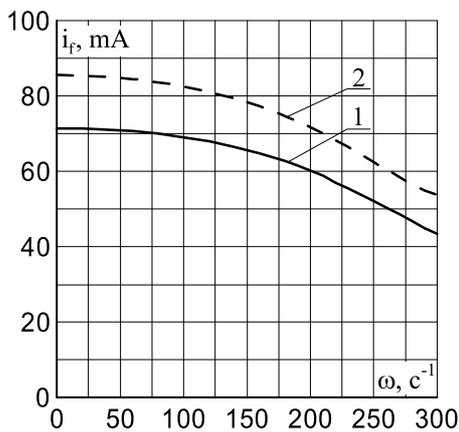


Рис. 5. Залежності струму в обмотці збудження від частоти обертання

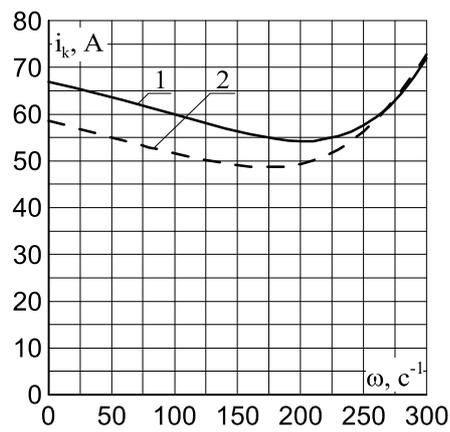


Рис. 6. Залежності струму в КЗ витку від частоти обертання

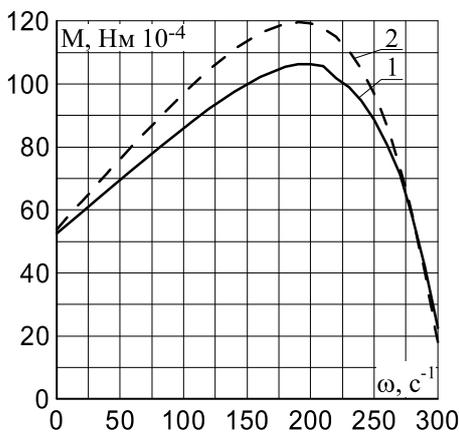


Рис. 7. Статична механічна характеристика

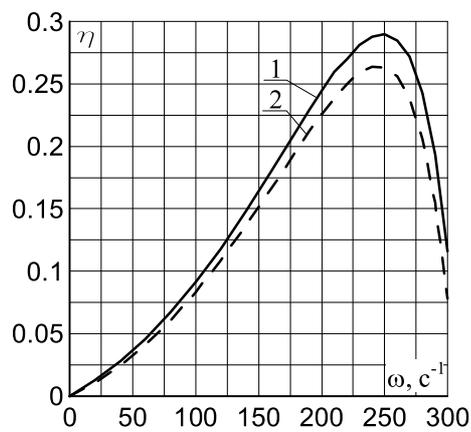


Рис. 8. Залежності ККД від частоти обертання

Висновки. Математична модель АДЕП, розроблена на підставі представлення магнітопроводу розгалуженою заступною схемою з використанням диференціального гармонічного методу, дає змогу досліджувати вплив геометрії магнітного шунта на стаціонарні режими АДЕП. Проведені дослідження показали, що АДЕП з шунтом у вигляді “містка” насичення має дещо кращі статичні характеристики, ніж двигун, який містить шунт постійного перерізу.

1. Иванов В.В. Магнитные шунты в двухполюсных двигателях с экранированными полюсами // *Электротехника*. – 1980. – № 5. – С. 19–22. 2. Ефименко Е.И., Владимиров Э.В. Расчет магнитной цепи и полей двигателя с экранированными полюсами // *Электрические машины*. – Чебоксары, 1976. – Вып. 1. – С. 49–58. 3. 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. 4. Anuszczyk J., Blaszczyk P. Obliczenia bocznika magnetycznego silnika indukcyjnego z faza zwarta // *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*. – Katowice, 2004. – № 69. – S. 41–44. 5. Гавдьо І.Р. Електромагнітні процеси в асинхронних двигунах з екранованими полюсами: Авторефер. дис. ...канд. техн. наук: 05.09.01. – Львів, 2005. – 17 с. 6. Глухивский Л.И. Расчет периодических процессов электротехнических устройств. – Львов, 1984. – 162 с.