УДК 621.313.3

І.Р. Гавдьо, В.М. Гладкий, В.С. Маляр* Національний університет "Львівська політехніка", кафедра ЕМА, * кафедра ТЗЕ

ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ МАГНІТНОГО ШУНТА НА МАГНІТНЕ ПОЛЕ У ПРОМІЖКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЕКРАНОВАНИМИ ПОЛЮСАМИ

© Гавдьо І.Р., Гладкий В.М., Маляр В.С., 2007

Розглядається питання впливу геометрії магнітного шунта асинхронного двигуна з екранованими полюсами на криву розподілу індукції в повітряному проміжку на підставі використання математичної моделі двигуна, в якій магнітопровід зображений розгалуженою заступною схемою.

The influence of magnetic shunt geometry of shaded-pole induction motor on air gap magnetic field distribution has been considered. The motor magnetic circuit is presented by the ramified equivalent circuit.

Вступ. Однофазні асинхронні двигуни з екранованими полюсами (АДЕП), які застосовують у приводах механізмів малої потужності, відзначаються простотою конструкції, надійністю і низькою собівартістю виготовлення. Однак АДЕП є складним об'єктом для теоретичного аналізу, тому що цьому двигуну властива електрична та магнітна несиметрії і значні локальні насичення окремих ділянок магнітопроводу. Форма кривої просторового розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку АДЕП значно відрізняється від синусоїди.

Суть проблеми. Адекватність розрахунку усталених та перехідних процесів в АДЕП значною мірою визначається точністю розрахунку розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку. Складність цього розрахунку зумовлена складною конфігурацією магнітопроводу статора, яка зумовлена, насамперед, конструкцією магнітного шунта. Наявність магнітних шунтів в АДЕП призводить до покращання кривої поля [1], що позитивно впливає на його характеристики.

Магнітні шунти можуть бути вставними або, у разі складеної конструкції статора, утвореними з пакета листів. В останньому варіанті статор складається з ярма статора та полюсів, з'єднаних перемичками, які виконують значення магнітних шунтів. Вставні магнітні шунти виготовляють з окремих феромагнітних пластин постійного або змінного перерізу. У шунтах змінного перерізу виконують так званий "місток" насичення у вигляді щілини, яка паралельна до осі обертання ротора АДЕП. Частина магнітного потоку шунта відгалужується через повітряний проміжок у ротор і разом з потоком у проміжку під полюсами утворює робочий магнітний потік Φ_{δ} , який створює електромагнітний момент. Інша частина потоку шунта $\Phi_{\rm II}$ обходить ротор і, за своєю суттю, є паразитним потоком. Щілина у магнітному шунті призначена для того, щоб при достатній з погляду технології виготовлення товщині шунта забезпечити необхідний ступінь шунтування магнітного потоку обмотки збудження, який оцінюється коефіцієнтом $\varepsilon_{\rm III} = \Phi_{\rm III}/\Phi_{\delta}$. Отже, геометричні розміри та характеристика намагнічування матеріалу магнітного шунта впливають на розподіл магнітної індукції у повітряному проміжку АДЕП.

Аналіз останніх досягнень. Запропоновані в [1, 2] аналітичні методи розрахунку вимагають прийняття істотних допущень і дають змогу виявити лише якісний вплив магнітних шунтів на криву поля АДЕП. У [3] проведені розрахунки, які підтверджують позитивний вплив встановлення магнітних шунтів в АДЕП, але приймаються допущення, які не дозволяють врахувати складний розподіл магнітного потоку під шунтом. 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. Задача розв'язується при заданих значеннях струмів контурів. Застосування теорії електромагнітного поля є досить трудомістким. Крім того, для розв'язання задач динаміки потрібно розв'язувати польову задачу для рухомих середовищ. Тому для інженерних розрахунків, на наш погляд, прийнятні простіші методи, які забезпечують високу точність розрахунків при меншому обсязі обчислень.

В [5] математична модель АДЕП створена на основі найпоширенішої конструкції статора з вставними магнітними шунтами (рис. 1), в яких виконаний "місток" насичення у вигляді аксіальної щілини. Однак, враховуючи різноманітність конструкцій АДЕП та з метою надання математичній моделі універсальності, магнітний шунт завтовшки $\Delta_{\rm III}$ замінений еквівалентним шунтом завтовшки $\Delta_{\rm III} < \Delta_{\rm III}$ постійного поперечного перерізу без щілини. Заміна проведена за умови незмінності магнітного потоку $\Phi_{\rm III}$, який проходить крізь шунт, минаючи ротор.



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

Метою статті є дослідження впливу геометрії магнітного шунта на розподіл магнітної індукції у проміжку АДЕП.

Магнітний стан АДЕП розглядається на основі зображення магнітного кола двигуна розгалуженою заступною схемою з зосередженими параметрами, яка відзначається високим рівнем деталізації магнітопроводу [5]. Магнітопровід АДЕП умовно розділений на окремі ділянки, в межах яких поле вважається однорідним. Ділянкам магнітопроводу з електротехнічної сталі та зубцевому шару ротора на заступній схемі відповідають нелінійні елементи, які задані характеристиками F[Φ] як залежностями спадів магнітних напруг від магнітних потоків. Ділянкам магнітного кола, що не містять електротехнічної сталі, на заступній схемі відповідають лінійні магнітні опори, які позначені: для повітряного проміжку між статором і ротором – R_δ; для повітряного проміжку стику шунт – полюсний наконечник – R_ш. Короткозамкнена (КЗ) обмотка ротора замінена двома еквівалентними ортогональними контурами, які розташовані по поздовжній (d) та поперечній (q) осях, що дає змогу максимально спростити систему рівнянь електричного стану без істотної втрати точності розрахунків.

Під час складання заступної схеми магнітного кола АДЕП ротор розбитий радіальними площинами на 2s секторів (по s секторів на полюсну поділку), з яких: k секторів знаходяться під магнітним шунтом; m секторів – під пазом, в якому розміщений короткозамкнений виток; l секторів – під екранованою частиною полюса; n секторів – під неекранованою частиною полюса. Отже, s = k + l + m + n.

Повітряний проміжок і зубцевий шар кожного j-го сектора на заступній схемі зображені віткою з послідовно з'єднаними магнітним опором $R_{\delta j}$, намагнічувальною силою ротора T_{p_j} , та нелінійним елементом, заданим характеристикою $F_{zj}[\Phi_{\delta j}]$, де F_{zj} та $\Phi_{\delta j}$ – спад магнітної напруги на j-й ділянці зубцевої зони та відповідний магнітний потік у повітряному проміжку. Зубцевий шар ротора замінений однорідним шаром, характеристика намагнічування якого в радіальному напрямі збігається з характеристикою реального зубцевого шару та розраховується на одну зубцеву поділку з врахуванням витіснення потоку в паз. Намагнічувальна сила j-го сектора ротора T_{p_j} визначається

через струми поздовжнього (i_d) та поперечного (i_q) контурів ротора за формулою

$$T_{pj} = (4 w_r k_w / \pi p) \cdot (i_d \cos \gamma_j + i_q \sin \gamma_j),$$

де w_r = Z₂ / 2p – кількість витків еквівалентної обмотки ротора; k_w – обмотковий коефіцієнт обмотки ротора; p – кількість пар полюсів; γ_j – кут, який визначає положення j-го сектора відносно осі d. Сектори ярма ротора зображені нелінійними елементами, які задані характеристиками F_{aj} $[\Phi_{aj}]$, де F_{aj} та Φ_{aj} – спад магнітної напруги і магнітний потік ярма ротора у цьому секторі.

Магнітний шунт розбивається цими ж площинами на сектори, яким на заступній схемі відповідають нелінійні елементи, задані характеристиками намагнічування F_{ші} $|\Phi_{\rm mi}|$ цих елементів.

Подібно, ділянки полюсів та ярма статора зображені нелінійними опорами. Намагнічувальні сили котушки обмотки збудження та КЗ витка визначаються як зосереджені $T_{f1} = w_f i_f$ і $T_{k1} = i_k$ відповідно, де i_f – струм обмотки збудження; w_f – кількість витків її котушки; i_k – струм КЗ витка. Повна заступна схема магнітопроводу АДЕП наведена у [5].

Для розрахунку магнітного кола використовується метод контурних потоків. Кількість рівнянь, складених за цим методом, становить 4 + *s* на одну полюсну поділку.

Нелінійна система рівнянь магнітного стану, яка описує магнітне коло, у векторній формі має вигляд

$$\vec{f} \left[\vec{\Phi}_1, \vec{\Phi}_2 \right] + B W \vec{i} = 0; \qquad \vec{\Phi}_2 = \vec{\Phi}_2 \left[\vec{\Phi}_1 \right], \qquad (1a, 6)$$

де

W = diag(w_r k_w, w_r k_w, w_f, 1);
$$\vec{i} = (i_d, i_q, i_f, i_\kappa)_*; \vec{\Phi}_1 = (\vec{\Phi}_p, \vec{\Phi}_c)_*;$$

$$\vec{\Phi}_2 = (\vec{\Phi}_\delta, \vec{\Phi}_a, \vec{\Phi}_{\mu\nu}, \vec{\Phi}_\beta, \vec{\Phi}_\mu, \vec{\Phi}_\beta, \vec{\Phi}_\sigma)_*.$$

– діагональна матриця витків і вектори-стовпці струмів обмоток, контурних потоків статора і ротора та потоків у вітках відповідно; В – матриця з'єднань магнітного кола АДЕП [5].

Для розв'язування нелінійної системи (1) використовується ітераційний метод Ньютона. Подані рівняння магнітного стану в сукупності з алгоритмами їх розрахунку утворюють математичну модель магнітного стану АДЕП і дають змогу з врахуванням насичення магнітопроводу для заданих миттєвих значень струмів обмоток розрахувати значення магнітних потоків (індукцій) в усіх ділянках магнітного кола, на основі яких розраховуються потокозчеплення та диференційні індуктивності.

Розглянемо, які зміни необхідно ввести у згадану модель для врахування геометрії магнітного шунта з щілиною насичення.

Довжина щілини у шунті l_{μ} є дещо більшою за довжину пакетів статора і ротора l_c , а її ширина b_{μ} значно перевищує величину повітряного проміжку δ . Враховуючи це, можна допустити відсутність магнітного потоку з шунта в ротор у зоні дуги α_{μ} під щілиною. Розіб'ємо ротор з повітряним проміжком та магнітним шунтом на к рівномірних секторів, по k/2 сектори з кожної сторони від щілини. Принцип розбиття ілюструється рис. 2. Розташуємо вузли контурів заступної схеми посередині кожного сектора.

Тоді заступна схема частини магнітопроводу в зоні магнітного шунта (рис. 3) міститиме k+1 контури. З них k-й та s-й контури знаходяться на межі шунт – полюсний наконечник, а k–1 контури містять вузли, розташовані в шунті. При цьому контури з першого по (k/2-1)-й та з (k/2+1)-го по k-й

мають однакові довжини магнітних силових ліній у шунті у_ш та ярмі ротора у_а та переріз шунта $S_{III} = \Delta_{III} \cdot l_{III}$. Контур (k/2)-й матиме збільшені довжини магнітних силових ліній у_{III}, y_{a1} та зменшений переріз шунта $S_{III} = \Delta_{III} \cdot (l_{III} - l_{III})$.



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



Рис. 3. Заступна схема магнітопроводу в зоні магнітного шунта

20

Товщина шунта постійного перерізу визначена з умови незмінності площ у середньому перерізі шунта зі щілиною S_{m1} та шунта постійного перерізу $S_{\pi} = \Delta_{\pi} \cdot l_{c}$ за формулою

$$\Delta_{\Pi} = \Delta_{III} \cdot \left(l_{III} - l_{III} \right) / l_{c}$$
⁽²⁾

На основі розробленої математичної моделі магнітного стану проведені розрахунки розподілу магнітної індукції $B_{\delta} = f(\alpha)$ в повітряному проміжку АДЕП для шунта постійного перерізу та шунта з щілиною насичення при миттєвому значенні струму в обмотці збудження $I_f = 100$ мA, а відповідні криві зображені на рис. 4.



Рис. 4. Розрахункові криві поля АДЕП: 1 – магнітний шунт зі щілиною насичення ; 2 – магнітний шунт постійного перерізу

Висновки. Математична модель АДЕП, розроблена на підставі зображення магнітопроводу розгалуженою заступною схемою, дає змогу досліджувати вплив геометрії магнітного шунта на розподіл магнітної індукції у повітряному проміжку. Проведені дослідження показали, що наявність магнітного шунта зі щілиною порівняно з шунтом постійного перерізу призводить до зростання магнітної індукції у зоні шунта та до її зменшення під полюсами.

1. Ефименко Е.И., Владимиров Э.В. Расчет магнитной цепи и полей двигателя с экранированными полюсами // Электрические машины. – Чебоксары, 1976. – Вып. 1. – С. 49–58. 2. Владимиров Э.В., Ефименко Е.И. Расчет магнитного поля в явнополюсных микродвигателях с шунтами переменного сечения // Электрические машины и аппараты. – Чебоксары, 1978. – Вып. 6. – С. 40–47. 3. Иванов В.В. Магнитные шунты в двухполюсных двигателях с экранированными полюсами // Электротехника. – 1980. – № 5. – С. 19–22. 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 I.P. Електромагнітні процеси в асинхронних двигунах з екранованими полюсами: Авторефер. дис. …канд. техн. наук. – Львів, 2005. – 17 с.