

ВПЛИВ СТУПЕНЯ ШУНТУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОТОКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЕКРАНОВАНИМИ ПОЛЮСАМИ

© Гавдьо І. Р., 2018

Розглядається вплив ступеня шунтування магнітного потоку на статичні характеристики асинхронного двигуна з екранованими полюсами. Використано математичну модель двигуна, в якій магнітопровід зображено розгалуженою заступною схемою. Статичні характеристики розраховано диференціальним гармонічним методом.

Ключові слова: асинхронний двигун, екрановано полюси, ступінь шунтування магнітного потоку, статичні характеристики.

The influence of shunting factor of magnetic flux of shaded-pole induction motor on steady-states has been considered. The motor magnetic circuit is presented by the ramified equivalent circuit. The differential harmonic method of calculation of steady-states is using.

Key words: induction motor, shaded-pole, shunting factor of magnetic flux, steady-states.

Постановка проблеми

Однофазні асинхронні двигуни з екранованими полюсами (АДЕП), які застосовують у приводах механізмів малої потужності, відзначаються простотою конструкції, надійністю і низькою собівартістю виготовлення. АДЕП властива електрична та магнітна несиметрія і значні локальні насичення окремих ділянок магнітопроводу, що зумовлює складність теоретичного аналізу та проектування. У процесі проектування двигуна необхідно оптимізувати його статичні характеристики, які залежать також від ступеня шунтування магнітного потоку.

В АДЕП з магнітними шунтами частина потоку обмотки збудження $\Phi_{\text{ш}}$ (рис. 1) проходить наскрізь через шунт і не бере участі у створенні електромагнітного моменту. Цей потік можна вважати потоком розсіювання. Інша частина потоку шунта $\Phi_{\text{ш}\delta}$ відгалужується через повітряний проміжок у ротор і разом з потоком під полюсом $\Phi_{\text{п}\delta}$ утворює робочий магнітний потік $\Phi_{\delta} = \Phi_{\text{п}\delta} + \Phi_{\text{ш}\delta}$. Отже, магнітні шунти перерозподіляють потік обмотки збудження так, що потік під полюсом $\Phi_{\text{п}\delta}$ зменшується, але розподіл індукції в повітряному проміжку наближається до синусоїдального.

Ступінь шунтування потоку обмотки збудження визначається відношенням

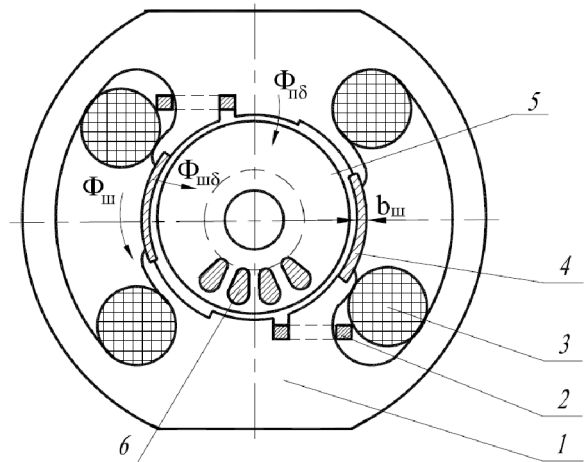
$$\epsilon_{\text{ш}} = \Phi_{\text{ш}} / \Phi_{\delta}.$$

Застосовують два варіанти конструкції магнітних шунтів. Перший – вставні шунти у вигляді зігнутої феромагнітної пластини, яку встановлюють між наконечниками полюсів. Другий – у складеній конструкції статора в шихтоване ядро статора запресовують полюси, з'єднані перемичками, які утворюють магнітні шунти з пакета листів. Застосовують вставні шунти постійного перерізу, а також шунти змінного перетину з щілиною, яка паралельна до осі обертання двигуна і виконує функцію “містка” насичення. У випадку складеної конструкції статора “місток” насичення утворюють виїмки, виконані у перемичках між полюсами.

Загалом, наявність магнітних шунтів призводить до покращання характеристик АДЕП, як показано в [1]. Однак, наскрізний потік $\Phi_{\text{ш}}$ доцільно збільшувати до певної межі; у разі його подальшого зростання переваги від покращання форми кривої поля в проміжку нівелюються зменшенням робочого магнітного потоку Φ_{δ} , і вихідні характеристики АДЕП погіршуються. Отже, існує оптимальна величина ступеня шунтування $\epsilon_{\text{ш}}$.

Аналітичні методи розрахунку ступеня шунтування в АДЕП, які наведені в [1], не враховують впливу струмів короткозамкнених витків та ротора на розподіл магнітних потоків. Прийнято допущення, що шунт знаходиться у стані сильного насичення; отже, максимальна індукція в шунті є постійною.

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



Аналіз останніх досліджень

У [2, 3] використано метод скінченних елементів для дослідження двополюсної складеної конструкції АДЕП із “містком” насичення. Розглядається вплив форми “містка” насичення, кількості стрижнів ротора та короткозамкнених витків на величину пускового моменту. Методом скінченних елементів у [4] проведено розрахунки АДЕП з метою оптимізації збільшеного повітряного проміжку під неекранованою частиною полюса та розмірів зубцевої зони ротора для підвищення пускового моменту двигуна. У [4] розглянуто АДЕП з $2p = 4$, в якому магнітні шунти відсутні, але наявний магнітний потік розсіювання між близько розташованими полюсними наконечниками. У [2-4] вплив ступеня шунтування магнітного потоку на статичні характеристики АДЕП не розглядається.

Використовувати теорію електромагнітного поля для розрахунку АДЕП [2-4] доволі складно. На наш погляд, для інженерних розрахунків доцільно застосовувати методи на основі теорії електричних та магнітних кіл, які забезпечують високу точність розрахунків за меншого обсягу обчислень.

Запропонована в [5] математична модель АДЕП стосується конструкції з вставними шунтами. На основі цієї моделі в [6–8] досліджено вплив форми шунтів на магнітне поле, перехідні процеси та статичні характеристики АДЕП. У наведених вище працях порівнюються шунти постійної товщини із шунтами, які мають “місток” насичення у вигляді щілини. Вплив ступеня шунтування магнітного потоку на статичні характеристики АДЕП не досліджено.

Метою статті є дослідження впливу ступеня шунтування магнітного потоку на статичні характеристики АДЕП.

Виклад основного матеріалу

На ступінь шунтування $\epsilon_{\text{ш}}$ потоку обмотки збудження безпосередньо впливає товщина магнітного шунта $b_{\text{ш}}$, від якої залежить магнітний стан АДЕП, тобто розподіл магнітних потоків $\Phi_{\text{п}\delta}$, $\Phi_{\text{ш}\delta}$, $\Phi_{\text{ш}}$. Зі зміною режиму роботи АДЕП змінюються струми обмоток (найбільш суттєво – ротора), що позначається на розподілі магнітних потоків і відповідно $\epsilon_{\text{ш}}$.

Запропонована в [9] розгалужена заступна схема магнітопроводу АДЕП дає змогу з високою точністю враховувати локальні насичення різних ділянок магнітопроводу. На основі її розрахунку для заданих миттєвих значень струмів обмоток визначають значення магнітних потоків (індукцій) в усіх ділянках магнітного кола, потокозчеплення та диференційні індуктивності обмоток. Процеси в АДЕП розглядаються у взаємно ортогональних осях d, q , які жорстко зв'язані зі статором. Застосування осей d, q дає змогу максимально спростити систему рівнянь електричної рівноваги. В цьому випадку обмотки статора не перетворюються, а обмотка короткозамкненого ротора еквівалентується двома синусно розподіленими обмотками.

Математична модель двигуна складається з диференціальних рівнянь електричної рівноваги і магнітного стану, які описують заступну схему магнітопроводу двигуна [5].

У зв'язку з електричною та магнітною несиметрією в усталеному режимі процеси в АДЕП є несинусоїдними періодичними. Вони описуються нелінійною системою диференціальних рівнянь електричної рівноваги, якій відповідає в усталеному режимі періодична несинусоїдальна зміна координат у часі. Система рівнянь електричної рівноваги містить потокозчеплення та диференційні індуктивності обмоток, які залежать від розподілу магнітних потоків в АДЕП, на який впливає товщина магнітного шунта $b_{ш}$. Ефективним шляхом визначення періодичного розв'язку є розгляд задачі його пошуку як крайової, а одним із методів її розв'язання є розроблений в [10] диференціальний гармонічний метод. Застосування цього методу для розрахунку статичних характеристик АДЕП викладено в [8].

Розроблена математична модель АДЕП дає змогу для заданих товщини шунта $b_{ш}$ та частоти обертання ω отримати значення магнітних потоків в окремих ділянках магнітопроводу, розрахувати $\Phi_{п\delta}$, $\Phi_{ш\delta}$, $\Phi_{ш}$ та $\epsilon_{ш} = \Phi_{ш} / \Phi_{\delta}$, а також струми обмоток, електромагнітний момент, потужність на валу, коефіцієнт корисної дії двигуна. Так, можна дослідити, наскільки істотно режим роботи впливає на ступінь шунтування магнітного потоку. Виконавши розрахунки за умови $b_{ш} = \text{const}$ для сукупності значень частот обертання від $\omega = 0$ до $\omega = \omega_1$, отримаємо статичні характеристики АДЕП.

Проведено розрахунки для двополосного АДЕП вихідною потужністю $P_{2н} \approx 2$ Вт. Наведені у табл. 1 результати показують, що зі збільшенням частоти обертання АДЕП від пуску до неробочого ходу ступінь шунтування зменшується. У режимі номінального навантаження порівняно з режимом пуску ступінь шунтування зменшується в 1,27–1,34 рази, а під час ідеального неробочого ходу – у 1,38–1,51 рази.

Таблиця 1

Ступінь шунтування магнітного потоку $\epsilon_{ш}$ для АДЕП з магнітними шунтами різної товщини $b_{ш}$ у режимах пуску, номінального навантаження, ідеального неробочого ходу

Режим роботи	Товщина шунта $b_{ш}$, мм				
	0,125	0,25	0,5	0,75	1,0
Пуск ($\omega = 0$)	0,0249	0,0524	0,115	0,189	0,278
Номінальне навантаження ($\omega = 270 \text{ с}^{-1}$)	0,0195	0,0405	0,0878	0,143	0,208
Ідеальний неробочий хід ($\omega = 314 \text{ с}^{-1}$)	0,0181	0,0372	0,079	0,128	0,184

У табл. 2, 3 наведено основні показники АДЕП у режимах пуску та номінального навантаження ($\omega = 270 \text{ с}^{-1}$), розраховані для різної товщини магнітного шунта.

Таблиця 2

Основні показники АДЕП із магнітними шунтами різної товщини $b_{ш}$ у режимі пуску

Показник	Товщина шунта $b_{ш}$, мм				
	0,125	0,25	0,5	0,75	1,0
1. Пусковий момент $M_{п}$, 10^{-4} Н м	51,01	52,62	53,9	52,1	47,72
2. Струм в обмотці збудження I_f , мА	95,4	92,06	85,59	78,7	71,8
3. Споживана потужність P_1 , Вт	13,73	13,06	11,81	10,54	9,33

**Основні показники АДЕП із магнітними шунтами різної товщини $b_{ш}$ у режимі
номінального навантаження ($\omega = 270 \text{ с}^{-1}$)**

Показник	Товщина шунта $b_{ш}$, мм				
	0,125	0,25	0,5	0,75	1,0
1. Електромагнітний момент M , 10^{-4} Н м	70,3	73,1	73,89	71,34	67,09
2. Струм в обмотці збудження, I_f , мА	67,3	64,1	58,5	53,5	49,08
3. Споживана потужність P_1 , Вт	9,74	9,28	8,42	7,66	6,996
4. Вихідна потужність P_2 , Вт	1,897	1,97	1,995	1,926	1,81
5. Коефіцієнт корисної дії	0,195	0,213	0,237	0,2515	0,259

Результати розрахунків, наведені у табл. 2, 3 та на рис. 2, показують, що для розглянутого АДЕП наявна оптимальна товщина магнітного шунта $b_{ш} = 0,5$ мм з погляду отримання максимальних моментів у режимі пуску та номінального навантаження, а також максимальної вихідної потужності. Збільшення товщини шунта призводить до зменшення струму в обмотці збудження та втрат у цій обмотці в пусковому та номінальному режимах, а також до зростання коефіцієнта корисної дії. Найбільшої перевантажувальної здатності АДЕП, яка визначається максимальним моментом $M_{\max}$, досягають для $b_{ш} = 0,25$ мм, однак у цьому разі зменшується коефіцієнт корисної дії. Для цієї конструкції АДЕП доцільно вибрати товщину шунта в діапазоні $b_{ш} = (0,5 - 0,75)$ мм – це дає змогу покращити коефіцієнт корисної дії за незначного зменшення вихідної потужності.

На рис. 2–5 наведено статичні характеристики АДЕП, розраховані для магнітних шунтів завтовшки $b_{ш} = 0,25; 0,5; 1,0$ мм.

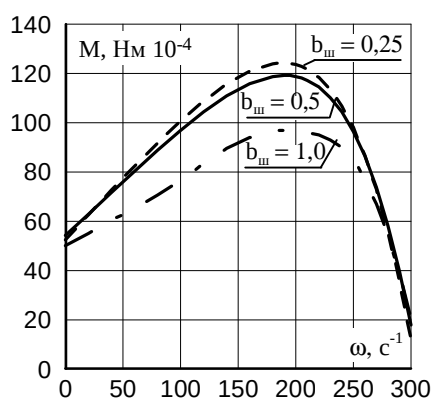


Рис. 2. Залежності електромагнітного моменту від частоти обертання

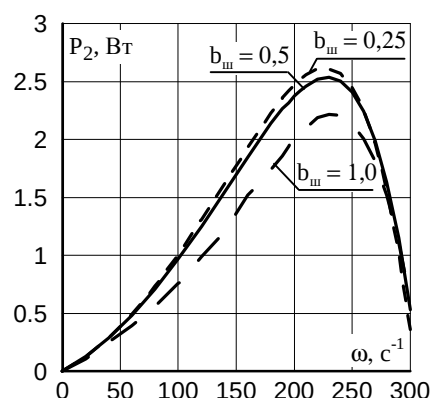


Рис. 3. Залежності вихідної потужності від частоти обертання

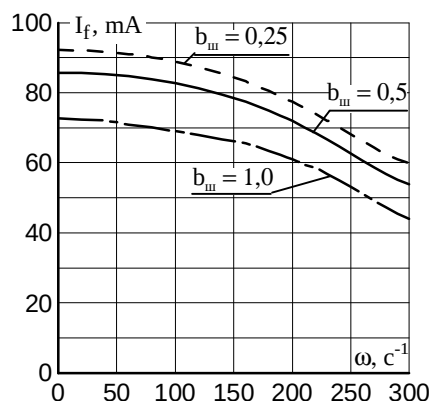


Рис. 4. Залежності струму в обмотці збудження від частоти обертання

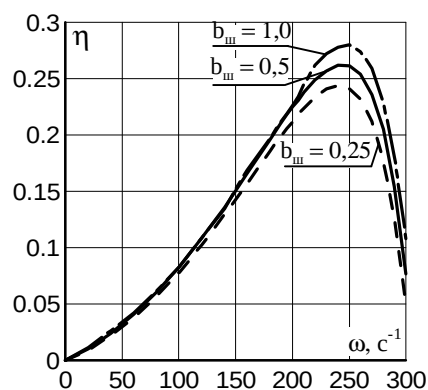


Рис. 5. Залежності коефіцієнту корисної дії від частоти обертання

Висновки

Математична модель АДЕП, розроблена на підставі представлення магнітопроводу розгалуженою заступною схемою з використанням диференціального гармонічного методу, дає змогу досліджувати вплив ступеня шунтування магнітного потоку обмотки збудження на статичні характеристики АДЕП. Дослідження показали, що ступінь шунтування магнітного потоку визначається переважно товщиною магнітного шунта, а також істотно залежить від режиму роботи АДЕП. Товщину шунта $b_{ш}$ доцільно вибирати як компроміс між оптимальними значеннями цієї величини для досягнення максимальних моментів та максимального коефіцієнта корисної дії.

1. Ефименко Е. И. Расчет магнитной цепи и полей двигателя с экранированными полюсами / Е. И. Ефименко, Э. В. Владимиров // *Электрические машины*. – Чебоксары, 1976. Вып. 1. – С. 49–58.
2. Anuszczyk J. Obliczenia bocznika magnetycznego silnika indukcyjnego z faza zwarta / J. Anuszczyk, P. Blaszczyk // *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* № 69. – BOBRME KOMEL – 2004. – S. 41–44.
3. Anuszczyk J. Modelowanie konstrukcji mikrosilnika ze zwojem zwartym na podstawie analizy polowej / J. Anuszczyk, P. Blaszczyk // *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* № 75. – BOBRME KOMEL – 2006. – S. 119–124.
4. Zhou D. Finite – element – aided design optimization of a shaded – pole induction motor for maximum starting torque / D. Zhou, C. B. Rajanathan, A. T. Sapeluk, Q. S. Ozveren // *IEEE Trans. Magn.* – 2000. – 36, № 5, p. 1, P. 3551–3554.
5. Гавдьо І. Р. Електромагнітні процеси в асинхронних двигунах з екранованими полюсами: авторефер. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.01. “Електричні машини і апарати” / І. Р. Гавдьо. – Львів, 2005. – 17 с.
6. Гавдьо І. Р. Вплив геометрії магнітного шунта на магнітне поле у проміжку асинхронного двигуна з екранованими полюсами / І. Р. Гавдьо, В. М. Гладкий, В. С. Маляр // *Вісник НУ “Львівська політехніка”*. – 2007. – № 587. – С. 17–22.
7. Гавдьо І. Р. Вплив геометрії магнітного шунта на перехідні процеси в асинхронному двигуні з екранованими полюсами / І. Р. Гавдьо, В. М. Гладкий, В. С. Маляр // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2008. – № 615. – С. 29–33.
8. Глухівський Л. Й. Статичні характеристики асинхронного двигуна з екранованими полюсами при різній геометрії магнітного шунта / Л. Й. Глухівський, В. С. Маляр, І. Р. Гавдьо // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2009. – № 654. – С. 48–54.
9. Маляр В. С. Расчет магнитной цепи однофазного асинхронного двигателя с расщепленными полюсами / В. С. Маляр, Л. И. Глуховский, А. В. Маляр, Д. П. Гречин, И. Р. Гавдьо // *Энергетика*. – Изв. высш учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2003. – № 3. – С. 17–25.
10. Глуховский Л. И. Расчет периодических процессов электротехнических устройств / Л. И. Глуховский. – Львов: Вища школа, 1984. – 162 с.