

## ВПЛИВ ОПОРУ КОРОТКОЗАМКНЕНОГО ВИТКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЕКРАНОВАНИМИ ПОЛЮСАМИ

© Маляр В.С., Глухівський Л.Й., Гавдьо І.Р., Гречин Д.П., 2007

**Розглядається питання впливу активного опору короткозамкненого витка на статичні характеристики асинхронних двигунів з екранованими полюсами. Для розрахунку електромагнітних параметрів обмоток двигуна використовується розгалужена заступна схема магнітопроводу.**

**The influence of resistance of short-circuited shading coil on the performance of shaded-pole induction motors has been investigated. The electromagnetic parameters are calculated on the base of ramified equivalent circuit of motor magnetic circuit.**

**Вступ.** Одним із типів асинхронних мікромашин є однофазні асинхронні двигуни з екранованими полюсами (АДЕП), які завдяки простоті у виготовленні та надійності в експлуатації застосовують у різних електроприводах малої потужності. Магнітна система цих двигунів здебільшого двополюсна. Статор виготовляється явнополюсним із зосередженою обмоткою, а ротор – циліндричний з шихтованим магнітопроводом і короткозамкненою обмоткою типу “біляче колесо”. Обмотка статора живиться синусоїдною напругою, а частина кожного полюса охоплена короткозамкненим витком. Отже, АДЕП має електричну та магнітну несиметрію, у результаті чого розподіл магнітної індукції у повітряному проміжку значно відрізняється від синусоїдного, а електромагнітний момент має постійну та змінну складові. Для наближення магнітного поля в повітряному проміжку до синусоїдного між полюсними наконечниками розміщують магнітні шунти. На електромагнітні процеси в двигуні значно впливає насичення магнітопроводу, яке в різних ділянках істотно відрізняється. Отже, незважаючи на простоту конструкції, він належить до найскладніших для математичного моделювання електричних машин.

Під час проектування двигуна за наближеними методиками здійснюється вибір конструкції магнітопроводу та обмоткових даних, а потім перевірка його робочих властивостей в різних режимах роботи. Невисока точність відомих методик проектування зумовлена складністю електромагнітних процесів, які проходять в АДЕП. Отже, для отримання достовірної інформації про поведінку двигуна в різних режимах роботи виникає потреба в натурних дослідженнях, а це надто сповільнює проектування і підвищує його вартість. Досягти високої точності розрахунків електромагнітних процесів в АДЕП можна на підставі використання математичної моделі високого рівня адекватності.

**Аналіз останніх досліджень.** Як свідчать літературні джерела, для аналізу процесів в АДЕП використовують ті самі методи, що і для аналізу несиметричних режимів великих машин загальнопромислового призначення [1, 2]. Теорія робочого процесу в АДЕП, яка ґрунтується на методах обертових магнітних полів та симетричних складових, дає лише якісну картину явищ і не може задовольняти потреби практики проектування АДЕП із заданими властивостями. Одним із основних недоліків цих методів є застосування принципу накладання, що не дає змоги враховувати насичення магнітопроводу. Іншою проблемою є несиметрія магнітопроводу двигуна. Отже, як стверджується в [2], досягти необхідної точності можна лише на підставі аналізу магнітного поля у

повітряному проміжку з урахуванням впливу несиметрії магнітопроводу та несинусоїдності намагнічувальних сил контурів. Відомі методи аналізу, в яких враховується насичення магнітопроводу, однак вони потребують використання різних спрощувальних допущень, а тому не можуть враховувати неоднакове насичення різних ділянок магнітопроводу, що позначається на точності розрахунків режимів роботи АДЕП, особливо динамічних. Водночас розрахунок магнітного поля двигуна з використанням рівнянь Максвелла доволі трудомісткий. Тому, на наш погляд, найприйнятнішим способом розв'язування задачі є підхід, який дає змогу з достатньою для практики точністю розрахувати магнітне поле у повітряному проміжку машини з урахуванням реального негармонічного розподілу намагнічувальних сил її контурів, а також нерівномірного насичення різних ділянок магнітопроводу на основі теорії електричних та магнітних кіл.

**Задачі досліджень.** Метою статті є розроблення алгоритму розрахунку, який дає змогу досліджувати вплив параметрів короткозамкненого витка на статичні характеристики на етапі проектування АДЕП на основі використання розробленої в [3] математичної моделі двигуна високого рівня адекватності.

**Виклад основного матеріалу.** В основу досліджень покладена розроблена в [3] математична модель АДЕП, яка має у своїй основі подання магнітного кола машини розгалуженою заступною схемою з високим рівнем деталізації магнітопроводу. Процеси в АДЕП описуються системою диференціальних рівнянь (ДР) електричної рівноваги контурів статора і ротора та скінченних рівнянь, що описують заступну схему магнітопроводу. Для описання електромагнітних зв'язків в АДЕП використовується система ортогональних осей  $d, q$ , яка жорстко зв'язана зі статором. Оскільки короткозамкнена обмотка ротора симетрична, то її без шкоди для точності можна замінити двома взаємно перпендикулярними синусоїдно розподіленими обмотками, розташованими по осях  $d$  і  $q$ . У цьому разі контури статора фізичні, а короткозамкнена обмотка ротора еквівалентується відповідно до загальноприйнятої методики [2].

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

Намагнічувальні сили обмотки збудження та короткозамкненого витка визначаються як зосереджені за формулами:

$$T_f = w_f i_f; \quad T_k = i_k \quad (1)$$

де  $w_f, i_f$  – кількість витків і струм обмотки збудження;  $i_k$  – струм розташованого на частині полюса короткозамкненого витка. Своєю чергою, намагнічувальні сили, створювані обмоткою ротора, для кожного  $j$ -го сектора визначаються через струми поздовжнього ( $i_d$ ) та поперечного ( $i_q$ ) контурів ротора за формулою

$$T_j = (2w / \pi p) \cdot (i_d \cos \gamma_j + i_q \sin \gamma_j), \quad (j = \overline{1, 2s}), \quad (2)$$

де  $w$  – кількість витків еквівалентної обмотки ротора,  $p$  – кількість пар полюсів, а  $\gamma$  – кут, який визначає розташування  $j$ -го сектора відносно осі  $d$ .

Потокозчеплення контурів АДЕП за прийнятих допущень визначаються за формулами

$$\begin{aligned} \psi_f &= 2 w_f \Phi_{\pi 1}; & \psi_e &= 2 \Phi_{\pi 2}. \\ \psi_d &= \frac{4}{\pi} w \sum_{j=1}^s \Phi_{\delta j} \cos \gamma_j; & \psi_q &= \frac{4}{\pi} w \sum_{j=1}^s \Phi_{\delta j} \sin \gamma_j. \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\Phi_{п1}$ ;  $\Phi_{п2}$  – магнітні потоки охопленої та охопленої короткозамкненим витком частини полюса двигуна;  $\Phi_{\delta j}$  – значення магнітного потоку на ділянці магнітопроводу в точці з координатою  $j$ .

Рівняння електричної рівноваги контурів АДЕП мають вигляд

$$\frac{d\vec{\psi}}{dt} = \Omega \vec{\psi} - r \vec{i} + \vec{u}(t), \quad (4)$$

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 (f), короткозамкненого витка (k) та поздовжнього (d) і поперечного (q) еквівалентних контурів ротора,  $\vec{u}(t) = (U_m \sin \omega_o t, 0, 0, 0)^T$  – вектор прикладених напруг, в якому  $U_m, \omega_o$  – амплітуда та циклічна частота напруги живлення, а верхній індекс “т” означає транспонування;

$$r = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_q \end{bmatrix}; \quad \Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 & 0 \\ \omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

– матриці, в яких:  $r_f, r_k, r_d, r_q$  – активні опори контурів,  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора.

Система рівнянь магнітної рівноваги має вигляд

$$T \vec{i} - \Gamma \vec{F}(\vec{\Phi}) = 0 \quad (5)$$

де  $T$  – матриця, добуток якої на вектор  $\vec{i}$  струмів визначає контурні намагнічувальні сили;  $\Gamma$  – матриця інцидентій графа магнітного кола машини,  $\vec{F}, \vec{\Phi}$  – вектори спадів магнітних напруг та магнітних потоків відповідно.

До заступної схеми магнітопроводу АДЕП входять  $(2s + k + m + 8)$  магнітних потоків віток. Оскільки картина магнітного поля під різними полюсами повторюється, то можна обмежитись контурами, які належать до однієї полюсної поділки, тобто використати умови симетрії. Крім того, рівняння доцільно скласти за методом контурних потоків, кількість яких дорівнює  $4+s$ .

Елементами матриці Якобі системи (5) є лінійні магнітні опори елементів магнітопроводу з немагнітних матеріалів та диференціальні магнітні опори елементів магнітопроводу з феромагнітних матеріалів. Останні визначаються числовим диференціювання характеристик намагнічування відповідних ділянок магнітопровода:

Вплив параметрів короткозамкненого витка на статичні характеристики можна дослідити багаторазовим розрахунком усталених режимів при різних значеннях  $r_k$ . Своєю чергою, усталений режим роботи АДЕП можна отримати, розрахувавши перехідний процес за деяких, як правило нульових початкових умов, згідно з викладеним в [4]. Оскільки система рівнянь нелінійна, то для цього необхідно числовим методом інтегрувати систему ДР на необхідному часовому інтервалі до усталення процесу. Під час інтегрування потрібно розраховувати магнітний стан двигуна, для чого на кожному крокові для заданих струмів визначають координати магнітного стану, розв’язуючи нелінійну систему рівнянь магнітної рівноваги ітераційним методом, на підставі яких визначають диференціальні індуктивності, які є коефіцієнтами ДР. Отже, дослідження впливу опору  $r_k$  на робочі характеристики АДЕП потребує багаторазових розрахунків усталених режимів роботи. Здійснювати їх у часовій області (розраховуючи перехідні процеси до їхнього усталення) неефективно, а тому недоцільно. Для виконання оптимізаційних розрахунків необхідно вилучити часову координату, що можливо під час розгляду усталених режимів АДЕП, які є періодичними. Іншими словами, необхідно звести задачу до крайової на підставі застосування одного із проєкційних методів, вибравши тип базових функцій. В статті задача розв’язується в класі сплайн-функцій [5].

В усталеному режимі в осях  $d$  і  $q$  компоненти векторів  $\vec{\psi}, \vec{i}, \vec{u}$  є періодичними функціями часу

$$\vec{\psi}(t) = \vec{\psi}(t + T); \quad \vec{i}(t) = \vec{i}(t + T); \quad \vec{u}(t) = \vec{u}(t + T) \quad (6)$$

де  $T$  – період, який визначається періодом напруги живлення.

Апроксимуючи компоненти векторів (4) на сітці  $N+1$  вузлів відповідно до викладеного в [5] з урахуванням періодичних крайових умов (6), систему ДР (4) неперервного аргументу  $t$  замінимо її дискретним аналогом. В результаті отримаємо систему скінченних рівнянь

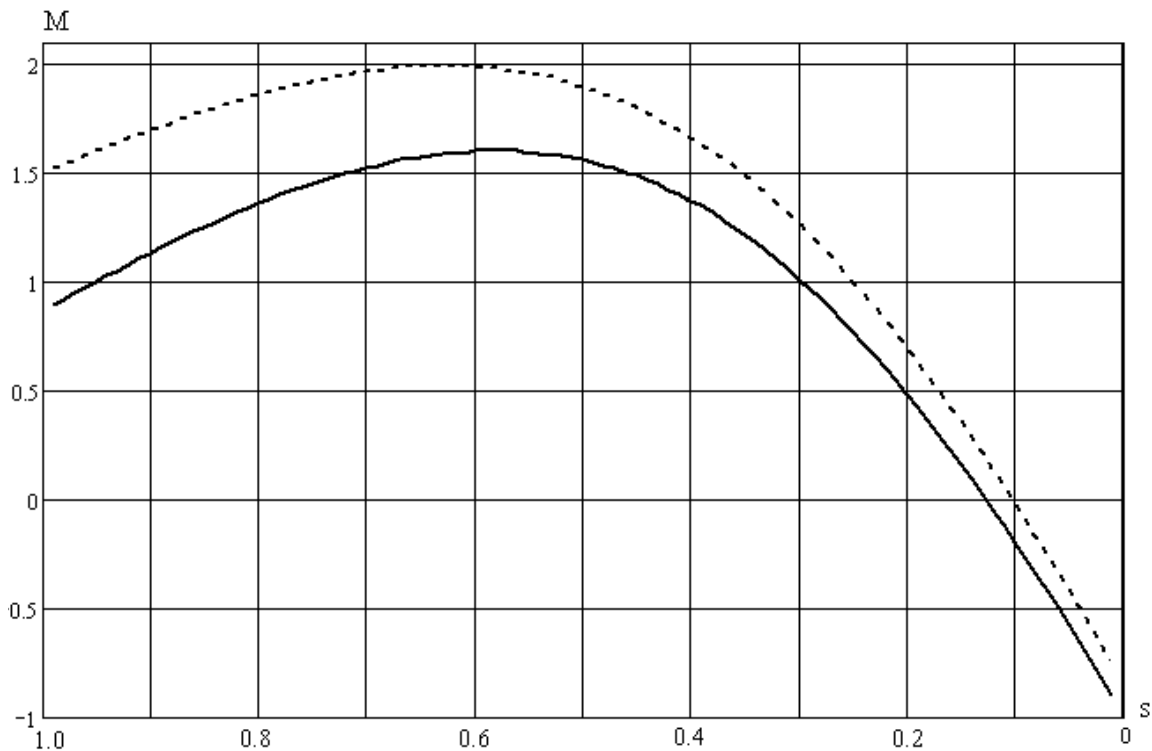
$$-H\vec{\Psi} + \vec{F} = \vec{U}, \quad (7)$$

де  $H$  – квадратна матриця розміру  $4N$ , елементи якої визначаються виключно сіткою вузлів [5];  $\vec{\Psi} = (\vec{\psi}_1, \dots, \vec{\psi}_N)^T$ ;  $\vec{F} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_N)^T$ ;  $\vec{U} = (\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_N)^T$  – вектори, складені зі значень векторів  $\vec{\psi}, \vec{f}, \vec{u}$  в  $N$  вузлах періоду. Оскільки внаслідок нелінійної залежності потокотчеплень контурів від струмів вихідна система (4) ДР нелінійна, то і отримана система (7) скінченних рівнянь – нелінійна. Вона описує стаціонарний періодичний режим на сітці вузлів періоду і дає змогу досліджувати вплив на характеристики АДЕП зміни будь-якої координати, зокрема й активного опору короткозамкненого витка. Для цього необхідно цю систему продиференціювати по  $r_k$ .

$$W \frac{d\vec{I}_c}{dr_k} = \vec{U}, \quad (8)$$

де  $W = \left( -H + \frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{\Psi}} \right) \frac{\partial \vec{\Psi}}{\partial \vec{I}} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{I}}$  – матриця Якобі системи (7).

Потокотчеплення кожного контура в  $j$ -му вузлі визначається сукупністю значень усіх струмів у цьому самому вузлі і не залежить від значень струмів в інших вузлах. Тому похідні  $\partial \vec{F} / \partial \vec{\Psi}$ ,  $\partial \vec{\Psi} / \partial \vec{I}$ ,  $\partial \vec{F} / \partial \vec{I}$ , які входять до матриці Якобі, – це блочно-діагональні матриці.



Статичні механічні характеристики АДЕП привода аксіального вентилятора

Інтегруючи систему ДР (8) в межах необхідної зміни аргументу  $\gamma_k$ , отримуємо залежність усіх координат режиму від значення опору короткозамкненого витка за заданого значення ковзання  $s$ . На кожному крокові інтегрування уточнення вектора  $\vec{I} = (\vec{i}_1, \dots, \vec{i}_N)^T$  здійснюється за формулами

$$\vec{I}^{(\xi+1)} = \vec{I}^{(\xi)} + \Delta \vec{I}^{(\xi)}; \quad W \Delta \vec{I}^{(\xi)} = -\vec{Q}(\Psi^{(\xi)}, \vec{I}^{(\xi)}), \quad (9)$$

де  $\vec{Q}(\Psi^{(\xi)}, \vec{I}^{(\xi)})$  – значення вектора нев'язок на  $\xi$ -й ітерації.

Як приклад, на рисунку наведено статичні механічні характеристики АДЕП привода аксіального вентилятора ( $U=220\text{В}$ ;  $2p=2$ ;  $P_2 \approx 2\text{Вт}$ ) за двох різних значень опору короткозамкненого витка.

**Висновки.** Одним із основних елементів АДЕП, параметри якого значною мірою впливають на характеристики двигуна, є короткозамкнений виток. Запропонований в статті алгоритм дає змогу досліджувати вплив активного опору короткозамкненого витка на статичні характеристики. На підставі розробленого алгоритму можна досліджувати вплив його геометричних розмірів на криву магнітного поля в повітряному проміжку машини, а отже, здійснювати оптимальне проектування. Статичні характеристики розраховуються методом розв'язування крайової задачі у позачасовій області із застосуванням диференціального сплайн-методу.

Запропонований у статті алгоритм дослідження впливу на характеристики АДЕП активного опору короткозамкнутого витка дає змогу проектувати двигуни з необхідними властивостями. В основу методу покладено математичну модель АДЕП високого рівня адекватності, в якій електромагнітні параметри визначаються на основі розрахунку його магнітного поля поданням магнітопроводу АДЕП розгалуженою заступною схемою, що дає змогу враховувати насичення магнітопроводу та реальний розподіл намагнічувальних сил обмоток статора. Процеси в АДЕП описуються системою ДР електромеханічної рівноваги і скінченних рівнянь, які описують заступну схему магнітопроводу.

1. Юферов Ф.М. *Электрические машины автоматических устройств: Учеб. для вузов.* – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с. 2. Хрущев В.В. *Электрические машины систем автоматики: Учеб. для вузов.* – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 368 с. 3. Маляр В.С., Маляр А.В., Глухівський Л.Й., Гавдьо І.Р. *Математичне моделювання стаціонарних режимів асинхронних двигунів з екранованими полюсами // Технічна електродинаміка.* – 2002. – № 5. – С. 47–50. 4. Гавдьо І.Р. *Розрахунок перехідних процесів в асинхронних двигунах з екранованими полюсами // Вісн. Держ. ну-ту “Львівська політехніка”.* – 2001. – № 418. – С. 34–38. 5. Маляр В.С. *Основные положения сплайн-метода расчета периодических режимов работы электрических цепей // Электроника и связь.* – 1998. – Вып. 5. – С. 11–14.