

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ ОБЕРНЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

© Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Малиш О.В., 2006

Запропонована методика проектування вентильних реактивних двигунів оберненої конструкції, яка дає змогу з достатньою для інженерної практики точністю здійснювати проектні розрахунки цих двигунів, які доцільно застосовувати для прямих приводів механізмів.

Methodic of switched reluctance motors design with unscrewed construction are given in this paper. It allows to do projects calculations with engineering precision, which are advisable to apply in direct-drive mechanism.

Постановка проблеми. Електромеханічний перетворювач (ЕМП) вентильних двигунів (ВД) з явнопольсним статором і пасивним ротором, характеризується простотою конструкції та технологією виготовлення і є дешевшим та економічнішим за найпростіші асинхронні електричні машини. Такий ЕМП за своїми регульовальними властивостями не поступається колекторним двигунам постійного струму.

Застосування буферів енергії [1] значно підвищує енергетичні показники ВД з пасивним ротором і одночасно переводить їх в новий підклас електричних машин. А це означає, що виникає необхідність розроблення методики проектування таких ЕМП.

Крім того поряд з використанням традиційних конструктивних схем з внутрішнім ротором для безредукторного приводу низки механізмів, зокрема, приводу барабана пральної машини, приводу мотор-коліс засобів пересування, виникає необхідність застосування конструкції із зовнішнім ротором.

Перевагами цієї конструкції вентильного реактивного двигуна є простота статора, технологічність виконання статорної обмотки, низька вартість виготовлення, низька вартість матеріалів, а також можливість створення великих рушійних моментів, що й дає змогу використовувати її для безпосереднього приводу.

Аналіз останніх досліджень. Як уже відзначалось вище, наявність буфера енергії у вентильних реактивних двигунах переводить їх у новий підклас електричних машин, а це означає, що розробленням методики проектування таких двигунів ніхто не займався, крім наукової групи кафедри ЕМА “Львівської політехніки”. На основі допущень, наведених в [2], отримані базові співвідношення, які характеризують перебіг основних електромеханічних процесів у ВРД з буферами енергії. У [3] подана методика проектування ВРД класичної і псевдо U-подібної конструктивних виконань. Застосування оберненої конструкції приводить до необхідності уточнення цієї методики.

Задачі досліджень. Відмінність конструктивної схеми з зовнішнім ротором (рис. 1) полягає в деякій зміні конфігурації магнітного кола. Окрім того, необхідність повнішого заповнення паза статора міддю призводить до зміни конфігурації котушок обмотки статора, що своєю чергою зумовлює уточнення методики в цій частині.

Виклад основного матеріалу. У [3] на основі допущень [2] отримано вираз для середнього значення електромагнітного моменту у вигляді

$$M_{\text{сеп}} = \frac{1}{4 \cdot \mu_0} \cdot m \cdot q \cdot B_8^2 \cdot K_\mu \cdot \alpha_r \cdot K_L \cdot D^2 \cdot \lambda \cdot \delta \cdot (1 - \cos \gamma), \quad (1)$$

де m – кількість секцій; q – кількість зубців статора на секцію; $B_\delta = \frac{I_c \cdot w_z}{K_\mu \cdot \delta} \cdot \mu_0$; K_μ – коефіцієнт насичення сталі магнітопроводу; α_r – коефіцієнт полюсного перекриття ротора; $\lambda = l/D$ – відносна аксіальна довжина активної частини; δ – величина повітряного проміжку; γ – інтервал комутації струму в секції, звідки

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{M_{сеп} \cdot \mu_0}{m \cdot q \cdot B_\delta^2 \cdot K_\mu \cdot \alpha_r \cdot K_L \cdot \lambda \cdot \delta \cdot (1 - \cos \gamma)}} \quad (2)$$

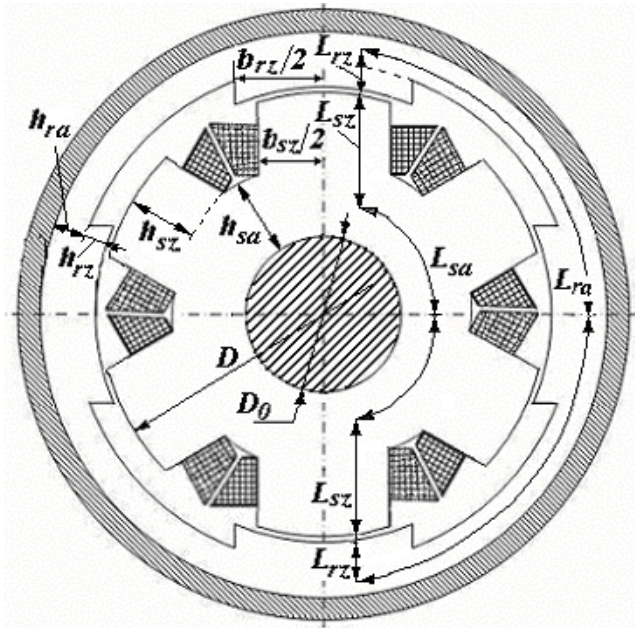


Рис. 1. ВРД із зовнішнім ротором

На проектування ВД можна видати різні варіанти технічного завдання (ТЗ). При цьому в усіх ТЗ вказують: номінальну потужність на валу P_2 , номінальну швидкість обертання n , напругу живлення U та умови експлуатації.

Задавшись величиною η , визначають струм від джерела живлення

$$I_{дж} = \frac{P_2}{\eta \cdot U} = \frac{M \cdot n \cdot 2 \cdot \pi}{60 \cdot U \cdot \eta} \quad (3)$$

і струм секції

$$I_c = I_{дж} / \gamma^* ; \quad I_c = I_{дж} ; \quad I_c = I_{дж} \cdot \gamma^*$$

для ВД з послідовним, паралельним ємнісним нагромаджувачем і паралельним нагромаджувачем зі спільним колом підживлення відповідно [1].

Відносну довжину статора λ можна прийняти в межах 0,15–0,4.

Індукцію в повітряному проміжку B_δ залежно від марки електротехнічної сталі можна вибрати в межах (1.55–2.0) Т, при цьому коефіцієнт насичення K_μ знаходиться в межах (1.45–2.5).

Варто зазначити, що ВД з пасивним ротором можна реалізувати лише з кількістю секцій $m \geq 3$, причому збільшення m зменшує пульсації електромагнітного моменту, але збільшує кількість силових елементів комутатора, чутливих елементів давача положення ротора і підвідних проводів між ЕМП і комутатором.

Проведені дослідження показують, що максимальне середнє значення електромагнітного моменту буде при мінімально можливому, з врахуванням існуючої технології виготовлення, повітряному проміжку δ і оптимальному відношенні ширини зубця ротора до його крокового

ділення α_r , яке теоретично дорівнює 0.42 і не залежить від розмірів. При цьому коефіцієнт полюсного перекриття статора

$$\alpha_s = \alpha_r \cdot m / (m - 1). \quad (4)$$

Коефіцієнт амплітуди першої гармоніки індуктивності секції K_L в першому наближенні можна прийняти в межах 0.4–0.45. Інтервал комутації струму секції γ доцільно вибрати в межах 130–160 електричних градусів.

За заданих значень струму секції I_c і повітряного проміжку δ кількість витків на зубці статора визначаємо за формулою

$$w_z = B_\delta \cdot \delta \cdot K_\mu / (I_c \cdot \mu_0). \quad (5)$$

Кількість зубців статора обчислюємо за формулою

$$Z_s = \frac{A \cdot \pi \cdot D \cdot m}{2 \cdot I_c \cdot w_z \cdot (\gamma^* + \theta_\epsilon^*)}, \quad (6)$$

де A – лінійне навантаження.

Величину θ_ϵ^* приймаємо такою, що дорівнює $(\frac{m}{2} - \gamma^*)/2$, враховуючи умову, що струм секції досягне значення нуля при $\theta = \pi$.

Кількість зубців статора необхідно відкоректувати відповідно до умови виконання m -фазної машини, тобто $Z_s = m \cdot q$.

Зубці статора з міркувань здешевлення технології виготовлення пропонуємо виконувати, як правило, з паралельними стінками (для укладання каркасних чи безкаркасних зосереджених котушок обмотки статора). Форма зубців ротора може бути довільною.

Поперечний перетин провідника обмотки статора визначають, враховуючи величину струму секції і допустиму густину струму в обмотці, яку вибирають з врахуванням лінійного навантаження: $J = (AJ) / A$.

Глибина пазів статора визначається необхідним обсягом міді обмотки статора відповідно до перетину вибраного стандартного ізолюваного провідника.

Глибина пазів ротора повинна бути в 16 разів більшою від довжини повітряного проміжку δ і її збільшення за межі 16.5 не доцільне, тому що не призводить до суттєвого збільшення першої гармоніки магнітної провідності.

Потім здійснюється розкладка дроту в пазу так, щоб ефективно використати місце під обмотку. Котушки в таких двигунах виконаємо так (рис. 2): обмотку розбиваємо на блоки; кількість блоків та кількість витків у кожному блоці залежить від розмірів паза.

Знаходимо кут зрізу котушки

$$\Theta = 2 \cdot \pi / (Z_s \cdot 2) = \pi / Z_s, \quad (7)$$

де Z_s – кількість зубців статора.

Звідси висота котушки

$$\begin{aligned} h_k &= h_{sz} - (D/2 - D/2 \cdot \cos(\pi / Z_s)) = \\ &= h_{sz} - D/2 \cdot (1 - \cos(\pi / Z_s)), \end{aligned} \quad (8)$$

де h_{sz} – висота зубця статора; $D/2$ – радіус статора.

Знаходимо ширину котушки у найширшому місці:

$$b_{k \max} = D/2 \cdot \sin(\pi / Z_s) - b_{sz}/2 - D_{ipr},$$

де b_{sz} – ширина зубця статора; D_{ipr} – діаметр ізолюваного провідника.

Знайдемо ширину котушки у найвужчому місці:

$$b_{k \min} = b_{k \max} - h_k \cdot \operatorname{tg}(\pi / Z_s)$$

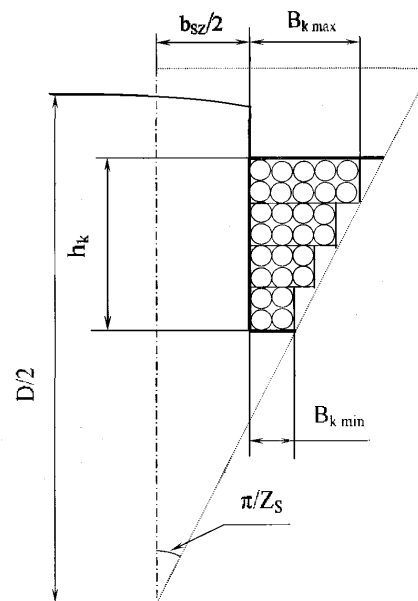


Рис. 2. Розкладка дроту по секціях

Розрахунок кількості провідників починаємо з першого блока у найширшому місці котушки. Кожний наступний блок вміщує по ширині на один виток менше ніж попередній.

Кількість провідників по ширині першого блока:

$$N_{sh1} = b_{kmax} / D_{ipr} .$$

Кількість провідників по ширині I-го блока:

$$N_{shI} = b_{kI} / D_{ipr}$$

Кількість провідників по висоті блока:

$$N_{w_bl} = D_{ipr} \cdot \text{ctg}(\pi / Z_s).$$

Кількість провідників у блоці:

$$N_{pr_bl} = (N_{sh} + 1 - I_b) N_{w_bl}$$

де I_b – номер блока.

Кількість провідників на зубці:

$$N_{pr_z} = N_{pr_z} + N_{pr_bl} .$$

Розрахунок проводимо до виконання умови:

$$N_{pr_z} > N_{nwz} ,$$

де N_{nwz} – кількість провідників, які потрібно помістити в котушку; N_{pr_z} – максимальна кількість витків, які може помістити котушка.

За необхідності останній блок можна зробити недозаповненим. Кількість витків в останньому блоці розраховуємо за таким алгоритмом:

$$N_{pr_0} = N_{pr_z} - N_{nwz} , \quad (9)$$

$$N_{w_bl_0} = N_{pr_0} / (N_{sh} - I_b) , \quad (10)$$

де $N_{w_bl_0}$ – кількість провідників по висоті в останньому блоці.

$$N_{pr_z} = N_{pr_z} + N_{w_bl_0} \cdot (N_{sh} - I_b). \quad (11)$$

Далі обчислюється активний опір обмотки статора та розрахунок магнітного кола для положення, коли зубець статора знаходиться навпроти зубця ротора з метою підготовки необхідних даних для обчислення коефіцієнтів апроксимації кривих намагнічення магнітопроводу ЕМП.

Використовується загальноприйнята методика розрахунку нерозгалуженого магнітного поля, тобто, так звана, обернена задача, коли відома МРС обмотки статора, а обчислюється магнітна індукція в повітряному проміжку. Потоки розсіяння обмотки статора враховуються коефіцієнтом розсіяння.

Магнітне коло поділяють на ділянки з різним перетином (див. рис. 1). Вважаємо, що в межах кожної ділянки індукція незмінна і тому знаходимо необхідну МРС для проведення магнітного потоку як суму спадів магнітних напруг в повітряному проміжку, зубцях і осерді статора та зубцях і спинці ротора. Для цього визначаються довжини магнітних ліній у зубцях статора

$$L_{sz} = h_{sz} + h_{sa} / 2, \quad (12)$$

повітряному проміжку

$$L_{\delta} = k_{\delta} \delta , \quad (13)$$

зубцях ротора

$$L_{rz} = h_{rz} + h_{ra} / 2, \quad (14)$$

спинці ротора

$$L_{ra} = (D + 2\delta + 2h_{rz} + h_{ra})\pi / 2q - b_{rz} / 4 , \quad (15)$$

та осерді статора

$$L_{sa} = (D - 2h_{sz} - h_{sa})\pi / 2q - b_{sz} / 4 , \quad (16)$$

а також, відповідно, площі поперечних перетинів цих ділянок

$$S_{sz} = l_s b_{sz} ; \quad S_{\delta} = \frac{\pi D}{z_s} \alpha_s l_s ; \quad S_{rz} = l_r b_{rz} ; \quad S_{ra} = l_r h_{ra} ; \quad S_{sa} = l_s h_{sa} . \quad (17)$$

Потім за попереднім значенням МРС та індукції в зубці статора визначають індукцію у повітряному проміжку

$$B_{\delta} = B_{sz} / k_{\sigma} , \quad (18)$$

й у решті ділянок магнітного кола, а саме:
осерді якоря

$$B_{sa} = B_{sz} \frac{S_{sz}}{S_{za}}, \quad (19)$$

зубцях ротора

$$B_{rz} = B_{\delta} \frac{S_{\delta}}{S_{ra}}, \quad (20)$$

та спинці ротора

$$B_{ra} = B_{\delta} \frac{S_{\delta}}{S_{ra}}, \quad (21)$$

де k_{σ} — коефіцієнт розсіяння магнітного потоку статора.

Напруженості магнітного поля у відповідних ділянках визначають з магнітних характеристик матеріалу статора й ротора, заданих у вигляді таблиці вузлів напруженості магнітного поля за рівномірної сітки значень індукції. Для обчислення значень між вузлами використаний метод лінійної інтерполяції.

МРС визначається як сума спадів магнітних напруг в усіх ділянках магнітного кола.

$$F = H_{sz} L_{sz} + F_{\delta} + H_{rz} L_{rz} + H_{ra} L_{ra} + H_{sa} L_{sa}, \quad (22)$$

де $F_{\delta} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta$ — спад магнітної напруги в повітряному проміжку.

Розрахунок магнітного кола для положення, коли зубець статора знаходиться навпроти зубця ротора, необхідний для підготовки вхідних даних для обчислення коефіцієнтів апроксимації кривих намагнічення магнітопроводу ЕМП, які використовуються підсистемою автоматизованого дослідження вентильного двигуна з пасивним ротором [4].

Висновок На основі запропонованої методики здійснено проектування декількох типорозмірів ВРД із зовнішнім ротором. Аналіз цих проектів показав, що методика дає змогу з достатньою для інженерної практики точністю проводити проектні розрахунки вентильних реактивних двигунів оберненої конструкції. Ступінь адекватності становить близько 10–15%.

1. Ткачук В.І. *Електромеханотроніка: Навч. посібник.* – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – С. 440. 2. Осідач Ю.В., Ткачук В.І. *Порівняльний аналіз електромагнітного моменту колекторного і вентильного реактивного двигунів постійного струму // Електромеханіка.* – Львів–Славськ, 1996. С. 140–142. 3. Осідач Ю.В., Ткачук В.І. *Основи проектування вентильних реактивних двигунів // Електромеханіка.* – Львів–Славськ, 1996. С. 143–145. 4. Ткачук В. *Підсистема автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів // Технічна електродинаміка.* – 1998. – С. 180–187.