

◆ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ ◆

УДК 621.313.333

ПРОЕКТУВАННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ МЕТОДИКИ ПРОПОРЦІЙНОГО ПЕРЕРАХУНКУ

О.В. Бібік, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: bibik@ied.org.ua

Запропоновано на етапі попереднього проектування вентильно-індукторних двигунів (ВІД) використання методики пропорційного перерахунку для визначення їх конструктивних даних згідно з номінальними значеннями потужності і частоти обертання ротора. Методика базується на зв'язку енергетичних показників машин базової і нової, яка геометрично їй подібна, з їх лінійними розмірами, струмом, числом витків і активним опором обмотки. Розроблено ВІД з конфігурацією 6/4 потужністю 100 Вт і частотою обертання ротора 3000 об/хв. Результати проектування підтверджено дослідженнями його робочих режимів за допомогою імітаційної моделі з нелінійними параметрами. Бібл. 6, рисунок, таблиця.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун, методика пропорційного перерахунку, імітаційна модель, нелінійні параметри, квазісталі режими.

Вступ. Особливість проектування вентильно-індукторних двигунів (ВІД) визначається їх складністю та особливістю електромеханічного перетворення енергії. Робочі режими ВІД навіть за постійного навантаження є безперервними перехідними процесами (квазісталі режими), що обумовлюється комутацією фаз. Вони характеризуються несинусоїдністю електричних і магнітних величин та нелінійністю параметрів. У загальному випадку проектування цих двигунів засновано на розв'язанні системи нелінійних неоднорідних диференціальних рівнянь, що потребує значних чисельних витрат. Ці обставини підкреслюють, що класичні методики, які використовуються для проектування традиційних електричних машин, недоцільні для ВІД [1–3]. Для проектування ВІД використовують такі підходи: енергетичний, польовий, підхід на основі розрахунку перехідних процесів, а також їх поєднання.

За енергетичним підходом опис процесів електромеханічного перетворення енергії та розгляд балансу електричної, магнітної та механічної енергії у ВІД проводяться на інтервалі комутації однієї фази T_k , що розраховується за формулою

$$T_k = \frac{2\pi(z_1 - z_2)}{z_1 \cdot z_2},$$

де z_1, z_2 – число полюсів статора і ротора відповідно.

Розрахунок ВІД здійснюється на основі енергетичних діаграм – низки залежностей потокозчеплення фази від струму фази $\psi_\phi = f(i_\phi)$ для фіксованих положень ротора за допомогою чисельних розрахунків або експериментальним шляхом. Визначення енергії, що перетворюється у вентильно-індукторних двигунах з електричної W_e в механічну (коенергію) $W_{коен}$, дає можливість оцінити їх середній момент і потужність.

Тому у разі проектування ВІД традиційно використовують допущення, які дають змогу спростити математичну модель, а також зменшити час розрахунків. Це обумовлює актуальність розроблення методик на етапі попереднього (ескізного) проектування, що дає змогу скоротити час визначення раціональної магнітної структури із забезпеченням технічних вимог.

Метою статті є розроблення і обґрунтування (апробація) методики пропорційного перерахунку (МПП) для попереднього (ескізного) проектування вентильно-індукторних дви-

гунів із визначенням їх геометричних розмірів, струмів і обмоткових даних згідно з номінальними значеннями їх потужності та частоти обертання ротора.

Основні положення методики базуються на розгляді енергетичних процесів у контурі фази вентильно-індукторних двигунів у разі їх живлення імпульсами струму прямокутної форми [4]. Початкове положення ротора ВІД відповідає мінімальній індуктивності контура, коли зубець статора з котушкою розміщений навпроти паза ротора (неузгоджене положення). У цьому положенні ротора потокозчеплення контура має мінімальне значення $\psi_{\min}$. У разі зміни кута поворота ротора індуктивність і потокозчеплення контура зростатимуть, досягаючи максимального значення $\psi_{\max}$ у випадку узгодженого розташування зубців статора і ротора.

За умови $i = \text{const}$ енергія, що знаходить від джерела струму, буде

$$W_e = \int_{\psi_{\min}}^{\psi_{\max}} i d\psi = i(\psi_{\max} - \psi_{\min}) = i \cdot \Delta\psi.$$

Енергія, яку витрачає джерело W_e , йде на приріст магнітного поля контура і на виконання роботи A (або коенергія). За законом збереження енергії $W_e = W_m + A$.

Зміна магнітної енергії пов'язана із зміною потокозчеплення контура від $\psi_{\min}$ до $\psi_{\max}$: $W_m = \frac{i \cdot \Delta\psi}{2}$, а виконана контуром робота складає:

$$A = W_e - W_m = \frac{i \cdot \Delta\psi}{2}. \quad (1)$$

За умови відсутності електричних втрат в контурі енергія, що надходить від джерела струму і пов'язана із зміною його потокозчеплення від $\psi_{\min}$ до $\psi_{\max}$, розподіляється порівну: одна половина йде на приріст магнітного поля, друга – на виконання роботи. Беручи до уваги те, що величина $\psi_{\max}$ на порядок перевершує $\psi_{\min}$, з достатньою точністю можна записати $\Delta\psi = 0,9 \cdot \psi_{\max}$.

Вказана величина роботи (1) виконується одним зубцем статора за один цикл перетворення. Цей параметр є основним енергетичним показником машини, який визначається як

$$A = 0,45 \cdot i_n \cdot \psi_{\max}, \quad (2)$$

де i_n – номінальний струм котушки.

Таким чином, енергетичний показник визначається як величина роботи, що виконується одним зубцем статора за один цикл перетворення енергії за умови рівності магнітної енергії і коенергії в контурі вентильно-індукторного двигуна у разі його живлення від джерела постійного струму.

За один оберт ротора ВІД у контурі відбудеться таких z_2 перетворень електричної енергії в механічну роботу. Тоді за один оберт ротора двигуном буде виконано роботу $A_M = Az_1z_2$. Якщо двигун робить n обертів за секунду, то його потужність і момент дорівнюють

$$P = A_M \cdot n = \frac{1}{2\pi} Az_1z_2\omega; \quad (3)$$

$$M = \frac{P}{\omega_r} = \frac{1}{2\pi} Az_1z_2. \quad (4)$$

Розглянемо дві геометрично подібні машини, одна з яких приймається за базову (позначено літерою “Б”), друга, що розробляється (нова), без позначки. Відношення моментів цих машин згідно з виразом (4) дорівнює відношенню їх енергетичних показників:

$$\frac{M}{M_B} = \frac{A}{A_B} = \frac{i \cdot \psi_{\max}}{i_0 \cdot \psi_{\max 0}}.$$

За однакових значень індукції в повітряному проміжку і густини струму відношення моментів двигунів і енергетичних показників буде пропорційне четвертому ступеню лінійних розмірів ВІД. Якщо L – узагальнений лінійний розмір ВІД (діаметр, довжина тощо), то

$$\frac{M}{M_B} = \frac{A}{A_B} = \left(\frac{L}{L_B} \right)^4.$$

Лінійні розміри нової машини можуть бути визначені через лінійні розміри базової машини за допомогою рівняння

$$L = L_B \sqrt[4]{\frac{M}{M_B}} = K_L L_B, \quad (5)$$

де $K_L = \sqrt[4]{\frac{M}{M_B}}$ – коефіцієнт перерахунку лінійних розмірів (геометрії) машини.

Струм котушки і повітряний проміжок будуть пропорційні другому ступеню лінійних розмірів:

$$i = i_B \sqrt{\frac{M}{M_B}} = i_B K_i; \quad \delta = \delta_B \sqrt{\frac{M}{M_B}} = \delta_B K_\delta, \quad (6)$$

де $K_i = K_\delta = \sqrt{\frac{M}{M_B}}$ – коефіцієнти перерахунку струму і повітряного проміжку ВІД.

Вибір напруги. У разі живлення ВІД напругою 380 В (промислової мережі) остання проходить двократне перетворення. Спочатку напруга перетворюється за допомогою випрямляча в постійну напругу U_d , після чого вона за допомогою комутатора подається на фази ВІД.

Двигуни потужністю до 1 кВт доцільно живити від однофазної мережі. У випадку діючого значення напруги 220 В напруга на вихідному фільтрі випрямляча буде ≈ 300 В. Вона може бути прийнята як розрахункова для ВІД потужністю до 1 кВт. Двигуни більшої потужності живляться від трифазної мережі напругою 380 В. Після випрямлення її за допомогою моста Ларіонова напруга на вихідному фільтрі складатиме 500 В. Таким чином, залежно від мережі розрахункова напруга U_d може мати два значення: 300 або 500 В.

Вибір кількості витків котушки. Кожна фаза обмотки ВІД містить дві послідовно сполучені котушки, які живляться імпульсами струму прямокутної форми від напівпровідникового перетворювача. Вказана форма струму забезпечується за рахунок широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги і введення зворотного зв'язку за струмом. Для надійної роботи ШІМ амплітуда модульованої напруги U_d має перевершувати електрорушійну силу (ЕРС) самоіндукції котушок фази. У разі послідовного з'єднання котушок у фазі ВІД напруга U_d принаймні в два рази має перевищувати ЕРС самоіндукції котушки. Ці умови можуть бути використані для визначення кількості витків у котушці фази.

Ширина (або кутова величина) зубця статора в радіанах дорівнює $\beta_s = \frac{\pi}{z_1}$. За частотою обертання ротора двигуна ω_r зміна потокозчеплення котушки від 0 до ψ_{max} відбудеться за час $\Delta t = \frac{\beta_s}{\omega_r}$. Електрорушійна сила і ψ_{max} котушки дорівнюють

$$e = \frac{\Delta \psi}{\Delta t} = \frac{\psi_{max}}{\beta_s} \omega_r = \frac{U_d}{2}; \quad \psi_{max} = \frac{U_d \cdot \beta_s}{2 \cdot \omega_r}. \quad (7)$$

Потокозчеплення котушки виразимо через потік Φ і витки котушки w_k : $\psi_{max} = \Phi \cdot w_k$. В однофазній котушці базового ВІД $\Phi_B = \psi_B$. У разі однакових значень індукцій потік проекрованої машини і базової відрізнятимуться пропорційно квадрату лінійних розмірів, тобто $\Phi = \psi_B \cdot \sqrt{\frac{M}{M_B}}$.

Потокозчеплення нового двигуна можна виразити через ψ_B : $\psi_{\max} = \psi_B \cdot \sqrt{\frac{M}{M_B}} \cdot w_k = \frac{U_d \cdot \beta_s}{2\omega}$.

Звідки

$$w_k = \frac{U_d \cdot \beta_s}{2\psi_B \cdot \omega_r \sqrt{\frac{M}{M_B}}} \cdot \frac{U_d \cdot \beta_s}{2\psi_B \omega_r \sqrt{\frac{M}{M_B}}} \text{ або } w_k = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_d}{\psi_B \cdot \omega_r \cdot z_1 \sqrt{\frac{M}{M_B}}} \quad (8)$$

Знайдене згідно з (8) значення w_k є максимально допустимим. Реальне число витків котушки вибирається на 10...20 % менше.

Розрахунок опору котушки. Беручи до уваги, що активний опір провідника пропорційний його довжині й обернено пропорційний до його перетину, в геометрично подібних котушках їх активний опір буде обернено пропорційний до лінійних розмірів:

$$r = \frac{1}{K_L} r_B \quad (9)$$

Активний опір багатовиткової котушки запишемо як

$$r_k = r \cdot w^2 \quad (10)$$

Алгоритм проектування та приклад розрахунку. Підхід щодо попереднього проектування ВІД на основі методики пропорційного перерахунку включає: розрахунок геометричних розмірів індукторної машини і параметрів обмотки згідно з МПП; формування вхідних даних – нелінійних залежностей потокозчеплення для одного витка $\psi_\phi^*(i_\phi, \theta)$ та електромагнітного моменту фази $M(i_\phi, \theta)$ від кута (геометричного) повороту ротора й струму фази, що розраховуються методом скінчених елементів відповідно до розробленої геометрії; дослідження робочих режимів за допомогою запропонованої імітаційної моделі та визначення показників квазісталіх режимів.

На основі цієї методики розроблено ВІД з конфігурацією 6/4 для номінальних потужності 100 Вт і частоти обертання ротора двигуна 3000 об/хв [5]. За базовий обрано двигун тієї ж конфігурації 6/4 з геометричними параметрами статора і ротора, що наведено у таблиці. За результатами розрахунків ВІД з використанням програмного пакета FEMLAB отримано [4]: середнє значення моменту двигуна – 4 Н м; максимальну індукцію в повітряному проміжку у разі узгодженого розташування зубців статора і ротора – 1,8 Тл; максимальне потокозчеплення котушки за номінального струму – $1,54 \cdot 10^{-3}$ Вб·с; енергетичний показник – $A=1$ Дж. З використанням рівнянь (5) і (6) визначено коефіцієнти перерахунку та лінійні розміри і обмоткові дані спроектованого ВІД (таблиця).

Показники, розмірність	Позначення	ВІД	
		базовий	розрахунок МПП
Зовнішній діаметр, мм	D_a	151,2	80
Діаметр розточки, мм	D_i	80	42,6
Довжина статора, мм	l	40	40
Повітряний проміжок, мм	δ	0,4	0,25
Перетин міді котушки, мм ²	S_{Mkam}	360	102,6
Номінальний повний струм одно- виткової котушки, А	I_n	1300	726

Аналіз масогабаритних показників ВІД і асинхронного однофазного двигуна типу ДАО потужністю 100 Вт ($D_a = 124$ мм, $D_i = 67$ мм $l = 34,5$ мм) показав, що у разі їх проектування на одну і ту ж потужність і частоту обертання ротора ВІД має менші зовнішній і внутрішній діаметри на 38 і 26 % та відповідно масу сталі – на 54 %.

прямляча U_d ; активний опір і число витків обмотки статора; кути вмикання (позначено як $(teta_min)$) і вимикання (позначено як $(teta_max)$); залежності $\psi_\phi^*(i_\phi, \theta)$, $M(i_\phi, \theta)$, які формуються у вигляді двовимірної таблиці у блоці Look-Up Table.

Чисельний експеримент. За допомогою імітаційної моделі досліджено робочий режим ВІД для напруги ланки постійного струму 300 В і номінального навантаження. В результаті чисельних розрахунків квазістатичних режимів ВІД для моменту навантаження, середнє значення якого $M_{cp} = 0,33$ Нм, кутів вмикання і вимикання (50 і 80 град для узгодженого положення зубців статора і ротора), отримано миттєві часові залежності струмів фаз, сумарного електромагнітного моменту та частоти обертання двигуна. Розраховано середні значення втрат, споживаної й корисної потужностей та частоту обертання ротора двигуна. Останні показники ($P_2 = 102,8$ Вт, $\omega_r = 313$ рад/с) відповідають даним щодо проектування.

Висновки. На етапі попереднього (ескізного) проектування вентиляно-індукторних двигунів запропоновано і обґрунтовано використання методики пропорційного перерахунку для визначення їх геометричних розмірів, обмоткових даних та параметрів, які відповідають даним потужності та частоті обертання двигуна. Методика базується на зв'язку енергетичних показників машин базової і нової, яка геометрично їй подібна, та забезпечує скорочення часу вибору раціональних варіантів ВІД.

Підхід щодо попереднього проектування ВІД з конфігурацією 6/4 потужністю 100 Вт і частотою обертання ротора 3000 об/хв апробований у разі дослідження його робочих режимів з номінальним навантаженням за допомогою імітаційної моделі, вхідними параметрами якої є *нелінійні* залежності потокозчеплення фази та електромагнітного моменту від кута повороту ротора й струму фази, що *розраховано методом скінченних елементів*.

Встановлено, що за проектування ВІД і АД на одну і ту ж потужність і частоту обертання масогабаритні показники ВІД значно нижчі, ніж у АД. Для розробленого варіанта ВІД зовнішній і внутрішній діаметри менше на 38 і 26 % відповідно, маса сталі – на 54 %.

1. Ильинский Н.Ф., Штайнбрунн, Прудникова Ю.И., Федоров А.Г., Бычкова Е.В. Проектирование вентиляно-индукторных машин общепромышленного назначения. *Вестник МЭИ*. 2004. № 1. С. 37-43.
2. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Особенности проектирования индукторной машины для вентиляно-индукторного двигателя. *Изв. вузов. Электромеханика*. 2008. № 1. С. 60–68.
3. Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентиляных индукторных двигателей. Москва: Издательство МЭИ, 2005. 56 с.
4. Розробка методів та засобів забезпечення енергоефективності електромеханотронних перетворювачів енергії. Звіт по НДР (Заключний) Інститут електродинаміки НАН України № ДР № 0107U000071. 2008. 153 с.
5. Пінчук О.І., Бібік О.В. Розробка вентиляно-індукторного двигуна для компресора побутового холодильника *Тези доповідей VIII Всеукраїнської наук. конф. Наукові розробки молоді на сучасному етапі*, 23-24 квітня 2009 р., Київ КНУТД. С. 40.
6. Бібік О.В., Мазуренко Л.І., Жуков Л.О. Дослідження квазістатичних режимів вентиляно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика"*. 2012. Ч. 3. С. 416-418.

УДК 621.313.333

Е.В. Бибик, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ПЕРЕРАСЧЕТА

Предложено на этапе предварительного проектирования вентиляно-индукторных двигателей использовать методику пропорционального пересчета для определения их конструктивных данных согласно номинальным значениям мощности и частоты вращения ротора. Методика базируется на связи энергетических показателей машин базовой и новой, геометрически ей подобной, с их линейными размерами, токами, числом витков и активным сопротивлением обмотки. Разработан ВИД с конфигурацией 6/4 мощностью 100 Вт и частотой вращения ротора 3000 об/м. Результаты подтверждены исследованиями рабочих режимов двигателя с помощью имитационной модели с нелинейными параметрами. Библ. 6, рисунок, таблица.

Ключевые слова: вентиляно-индукторный двигатель, методика пропорционального перерасчета, имитационная модель, нелинейные параметры, квазиустановившиеся режимы.

O.V. Bibik

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

DESIGNING OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS BASED ON PROPORTIONAL RECALCULATION TECHNIQUE

At the stage of preliminary design of valve-induction motors, it is proposed to use a method of proportional conversion to determine their constructive data in accordance with the nominal values of power and rotor speed. The methodology is based on the connection of the energy indices of the basic and new machines, which is geometrically similar to it, with their linear dimensions, current, the number of turns and the active resistance of the winding. The results of the design are confirmed by studies of operating modes using an imitation model using nonlinear parameters, calculated by the finite element method. References 6, figure, table.

Key words: switched reluctance motor, proportional recalculation technique, simulation model, nonlinear parameters, quasi-static regimes.

1. Ilynskyi N.F., Shtaynbrunn, Prudnikova Y.I., Fedorov A.G., Bychkova E.V. Designing of switched reluctance machines for general industrial purposes. *Vesnik MEI*. 2004. No 1. P. 37–43. (Rus)
2. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. Features of designing an inductor machine for switched reluctance motor. *Izv. universities. Electromechanics*. 2008. No 1. Pp. 60–68. (Rus)
3. Fisenko V.G., Popov A.N. Designing of switched reluctance motors. Moskva: Publishing house MEI. 2005. 56 p. (Rus)
4. Development of Methods and Tools for Enhancing Energy Efficiency of Electromechanotronics Energy Transformers. *Research Report (Final)* Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. DR № 0107U000071. 2008. 153 p. (Ukr)
5. Pinchuk O.I., Bibik O.V. Development of the switched reluctance motor for the compressor of the domestic refrigerator. *Abstracts of the VIII All-Ukrainian sciences. conf. Scientific developments of youth at the present stage*. 23-24 april. 2009. Kiev: KNUTD. P. 40. (Ukr)
6. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Zhukov L.O. Investigation of quasi-static modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electromechanical and energy saving systems*. Thematic issue Problems of Automated Electric Drive: Theory and Practice. 2012. Pp. 416–418. (Ukr)

Надійшла 25.02.2019

Received 25.02.2019

УДК 621.313: 004.896

КВАЗІЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СКРЕБКОВИХ І ГВИНТОВИХ КОНВЕЄРІВ У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

М.М. Заблодський^{1*}, докт. техн. наук, **В.Є. Плюгін^{2**}**, докт. техн. наук, **Д.І. Морозов³**, канд. техн. наук, **К.В. Худобін³**, канд. техн. наук

¹ – Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ-41, 03041, Україна
e-mail: zablodskiyinn@gmail.com

² – Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна
e-mail: vladyslav.pliuhin@kname.edu.ua

³ – Донбаський державний університет,
пр. Леніна, 121, Лисичанськ, Луганська обл., Україна
e-mail: dimorozov3@gmail.com

Розроблено математичну модель систем імпульсно-фазового керування і досліджено динамічні режими асинхронних машин у складі електроприводу скребкового і гвинтового конвеєрів. Встановлено, що застосування квазічастотного керування забезпечує досягнення стабільної низької швидкості й покращення пускових властивостей приводу порівняно із застосуванням двошвидкісних двигунів. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: математична модель, квазічастотне керування, асинхронна машина, масивний ротор, динамічний режим.