

УДК 621.313.292.001.2

В.Д. Завгородній, І.Ф. Снітков, В.І. Черніков

Національний університет “Львівська політехніка”, СКБ електромеханічних систем

КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОННО КЕРОВАНИХ ДВИГУНІВ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ЗБУДЖЕННЯ НА ОСНОВІ РЕДИЗАЙНУ АСИНХРОННИХ МАШИН

© Завгородній В.Д., Снітков І.Ф., Черніков В.І., 2001

Сучасні енергоощадні технології базуються на застосуванні керованих електроприводів, що якнайбільше враховують індивідуальні особливості виконавчих механізмів. Сьогодні прогрес у цій галузі стримується обмеженою номенклатурою електродвигунів та їх неадаптивністю до електронних систем керування. У статті запропоновано один із способів вирішення цієї проблеми на базі принципів редизайну електричних машин.

Modern energy saving techniques are based on application of regulated electric drives, which are as possible taking into account individual customer necessities. Now advance in this area restrains due to limited spectrum of existing motors of conventional designs and theirs nonadaptivity with electronic drivers. In this paper one of the directions of this compromissable problem solving on the base of redesign of failed electric machines is discussed.

Вступ. Всезростаюча номенклатура електроприладів побутової, медичної та науково-дослідної техніки вимагає розробки та застосування різноманітних електроприводів невеликої потужності, якнайбільше адаптованих до індивідуальних особливостей виконавчих механізмів і оптимізованих за критеріями енергоощадності та ресурсозберігання. На сьогодні вирішення цієї проблеми значно полегшує наявність на ринку за порівняно помірними цінами спеціалізованих мікросхем керування виконавчими двигунами (драйверів), які характеризуються мізерним енергоспоживанням на власні потреби. Тенденція світового ринку до зниження цін на мікропроцесорні елементи систем керування водночас диктує необхідність подальшого спрощення конструкції, підвищення технологічності та здешевлення виробництва самих виконавчих елементів. Саме тому останнім часом багато уваги приділено вдосконаленню конструкцій вентильно-реактивних двигунів та використанню в якості виконавчих елементів малопотужних трифазних двигунів магнітоелектричного збудження (які можна розглядати як безщіткові двигуни постійного струму або як частотно керовані синхронні двигуни) як таким, що характеризуються найпростішою конструктивною схемою і дозволяють керування ними без наявності давачів положення ротора.

Стримує цей процес обмеженість номенклатури наявних на ринку виконавчих двигунів традиційного конструктивного виконання, тому зараз часто один і той же двигун вимушено застосовують в електроприводах широкого діапазону номінальних моментів та частот обертання всупереч вимог критерію ресурсозбереження, бо розробка та випуск невеликих партій адаптованих до конкретного приладу двигунів економічно невиправдані. На наш погляд, найбільш доцільне компромісне вирішення цього питання можна здійснити повторним використанням електричних машин, що вийшли з ладу, після їх переробки та заміни технічних даних (їх редизайном) [1].

Ідея ця не нова та раніше її реалізація стримувалася складністю організації на промисловій основі обліку різнотипних електричних машин, що вийшли з ладу, їх складування та можливості миттєвого виклику, але з появою комп'ютерних систем обліку та складування цей процес став економічно доцільним. На сьогодні в США до 90 % електричних машин отримують повторне життя і здебільшого із зміненими технічними даними [1]. Основна перевага цього підходу полягає в тому, що перепроектування та виготовлення по суті нової машини під індивідуальне замовлення здійснюється в лічені дні при економії ресурсів та матеріалів, що так актуально для сьогоdnішнього стану економіки України.

Особливості конструктивного виконання електронно керованих двигунів (ЕКД) магнітоелектричного збудження. Ці особливості ЕКД по відношенню до їх аналогів визначаються їх функційним призначенням – забезпечення безредукторного керування виконавчими механізмами порівняно низьких частот обертання ($5\div 50$ рад/с) при мінімально можливих габаритах та прийнятному енергоспоживанні. Це, насамперед, забезпечується за рахунок максимально можливої в даному габариті полюсності, що можливе при виконанні якірної обмотки із зосереджених котушок на кожному із зубців, яка належить до обмоток неперехресного типу і характеризується практично відсутнім електромагнітним зв'язком між її фазами, що полегшує роботу драйвера.

Компонування активної частини типових конструкцій ЕКД з внутрішнім та зовнішнім ротором показано на рис. 1, остання переважно застосовується при необхідності збільшення моменту інерції обертювих частин приводу.

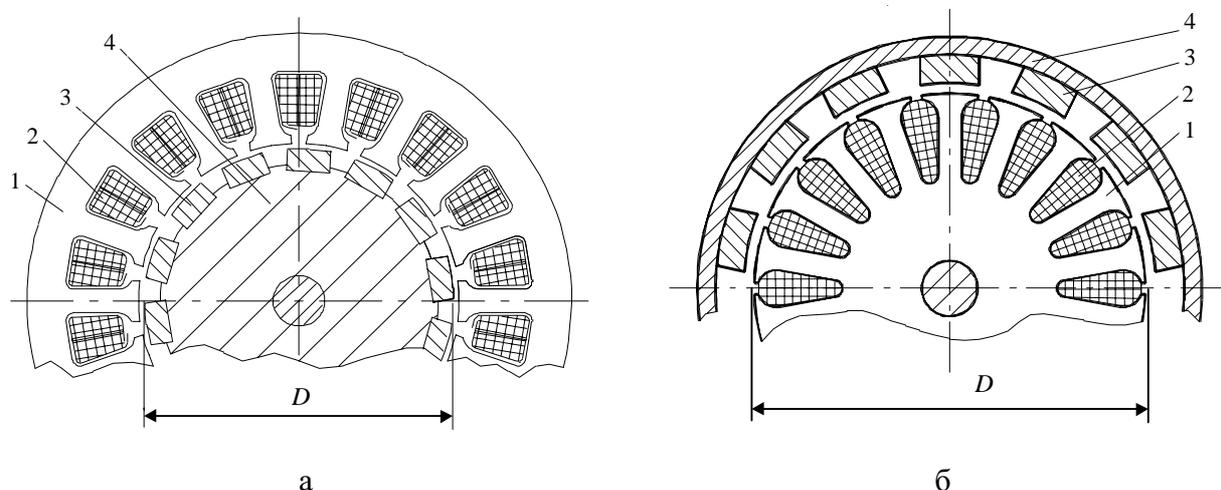


Рис. 1. Типові конструкції виконавчих двигунів магнітоелектричного збудження з внутрішнім (а) та зовнішнім (б) ротором:

- 1 – шихтований магнітопровід якоря(статора); 2 – обмотка якоря;
3 – постійні магніти індуктора; 4 – суцільний магнітопровід індуктора

Оскільки більшість драйверів промислового випуску мають шеститактний вихід, то обмотка якоря повинна бути трифазною, що водночас забезпечує оптимальне використання об'єму активного простору, а кількість зубців якоря z повинна бути кратною трьом, а ще краще – шести. З умови максимального використання магнітного поля індуктора його полюсність $2p$ повинна задовольняти умову $2p = z \pm 2x$, де $x=1$ або 2 , але так, щоб числа z та p по можливості не мали спільних дільників.

Магніти індуктора виготовляють з матеріалів типу магнітотвердих феритів, $SmCo$ або $FeNdB$, які мають лінійну криву розмагнічування і забезпечують мале значення індуктивного опору якірної обмотки. Алгоритми побудови якірних обмоток детально викладено в [2] (при заміні числа S на z); тут тільки зазначимо, що вони забезпечують високе значення обмоткового коефіцієнта, який в цьому випадку визначається за формулою $K_{об} = (3/\pi) \cdot \cos(\pi x/z) \approx 0,9 \div 0,95$.

Конструкція ЕКД з зовнішнім якорем завжди реалізується на виштамповках магнітопроводів трифазних асинхронних машин, а з зовнішнім індуктором – на виштамповках якорів машини постійного струму з кількістю зубців кратною трьом, яке здебільшого непарне ($z = 9; 15; 21; \dots$).

Електроприводи з глибиною регулювання частоти обертання >50 поки що реалізуються на драйверах, які вимагають наявності датчика положення ротора. Як видно з практики, при числах z , що кратні шести, на якірних виштамповках ЕКД завжди можна реалізувати і датчик положення, як показано на рис. 2, бо при визначеному p завжди існують дві симетричні групи, по три пари поряд розташованих зубців у кожній, на одній з яких розміщуються витки обмотки збудження w_f , а на іншій – три сигнальних обмотки w_s , ЕРС яких зсунуті на 120 ел. градусів.

Базові проектні співвідношення.

Наведене нижче стосується малопотужних ЕКД різноманітних систем електроприводів приладобудування та побутової техніки, основним проектним критерієм яких є досягнення максимального питомого моменту на одиницю об'єму (маси) при забезпеченні допустимого перегрівання. Цим критерієм найбільше відповідає розглянута конструкція ЕКД, яка порівняно з іншими допускає більші питомі електромагнітні навантаження (значення індукції в повітряному проміжку B_δ та допустима густина струму J_δ в провідниках обмотки якора).

Відомо [3], що максимальна електромагнітна потужність P_{sm} (момент M_{sm}) синхронного двигуна існує при його оптимальному збудженні, коли ЕРС фази обмотки E_ϕ при частоті обертання ω задовольняє умову $E_\phi = 0,5U_\phi \sqrt{1 + \sigma^2}$, де U_ϕ – діюче значення фазної напруги; $\sigma = x_\phi / r_\phi$; r_ϕ та x_ϕ – відповідно активний та індуктивний опори якірної обмотки, і визначається за формулою

$$P_{sm} = mU_\phi^2 / 4r_\phi \quad (M_{sm} = mU_\phi^2 / 4\omega r_\phi). \quad (1)$$

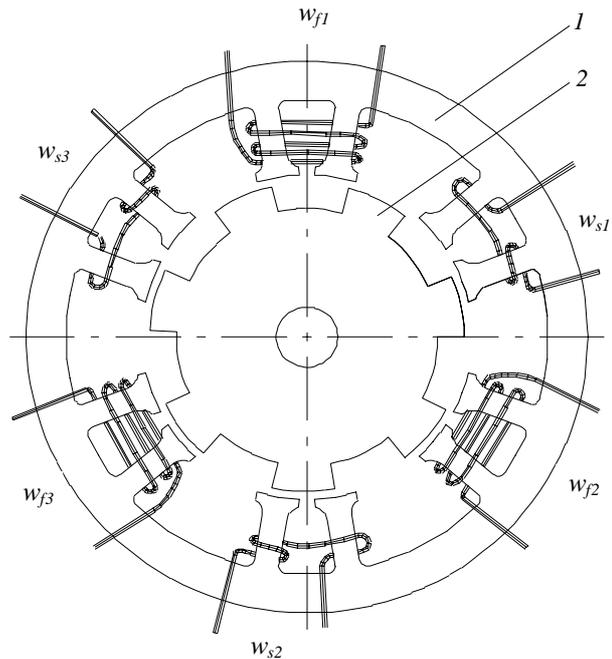


Рис. 2. Конструкція датчика положення ротора:

1 – шихтований магнітопровід якора;

2 – р-зубцевий магнітопровід ротора;

w_f та w_s – обмотки збудження і сигнальні обмотки

Відомо також [4], що максимальна електромагнітна потужність машини постійного струму P_{am} має місце при $\omega \approx 0,5\omega_{xx}$ (ω_{xx} – частота обертання при неробочому ході) і при напрузі якоря U_a та його опорі r_a визначається за формулою

$$P_{am} = U_a^2 / 4r_a \quad (M_a = U_a^2 / 4\omega r_a). \quad (2)$$

Як (1), так і (2) визначають максимальну електромагнітну потужність у термінах зовнішніх до машини параметрів U_ϕ та U_a , які не відображають внутрішньої їх структури, тому вирази для розрахункової електромагнітної потужності доцільніше записати в термінах відповідних ЕРС (E_ϕ та E_a), що дає

$$P_{sm} = mE_\phi^2 / r_\phi \sqrt{1 + \sigma^2} = mE_\phi I_{скз}; \quad P_{am} = E_a^2 / r_a = E_a I_{акз}, \quad (3)$$

де $I_{скз}$ та $I_{акз}$ – струми короткого замикання синхронного та двигуна постійного струму при їх роботі в генераторних режимах з однаковою частотою обертання ω .

Як зазначалось, параметри наявних на ринку драйверів диктують виконання обмоток ЕКД постійного струму трисекційними, для яких справедливі співвідношення $E_a = \pi\sqrt{2/3}E_\phi$; $I_a = \pi I_\phi / \sqrt{6}$ і $r_a = 2r_\phi$, що свідчить про повну тотожність (1) та (2) і незалежність результату від вибору однієї з альтернативних математичних моделей для опису енергетичних співвідношень у конструкціях, що розглядаються.

Зважаючи на те, що математична модель синхронної машини дозволяє легше і точніше врахувати особливості конструктивного виконання, і в першому проектному наближенні нехтуючи величиною σ^2 , за основні співвідношення приймемо

$$P_m = 3E_\phi^2 / r_\phi; \quad M_m = 3E_\phi^2 / \omega r_\phi. \quad (4)$$

Величину E_ϕ при кількості витків фази W_ϕ і коефіцієнті полюсної дуги α запишемо в термінах основних геометричних розмірів (діаметра розточки якоря D та активної довжини l) і індукції B_δ як

$$E_\phi = 1,11 \cdot W_\phi \cdot K_{об} \cdot \alpha \cdot \omega \cdot B_\delta \cdot D \cdot l. \quad (5)$$

Кількість витків фази визначимо через площу пазів якоря $S_n = K_n \pi D^2 / 4$ та площу поперечного перетину провідника q при коефіцієнті заповнення паза міддю $K_з$ як

$$W_\phi = S_n \cdot K_з / 6q = \pi \cdot D^2 K_з \cdot K_n / 24q. \quad (6)$$

Тоді опір фазної обмотки якоря при розрахунковій температурі $T = 75^\circ C$ в термінах геометричних параметрів S_n та l буде визначатись виразом

$$r_\phi = 10^{-6} W_\phi \cdot l_\phi / 46q = 10^{-6} K_з \cdot S_n \cdot l / 46 \cdot 3q^2 \cdot (1 + \lambda_l), \quad (7)$$

де $l_\phi = 2l(1 + \lambda_l)$ – довжина витка обмотки; λ_l – відносна довжина лобової частини.

Підставивши (5), (6) та (7) в (4), отримаємо зв'язок між геометричними параметрами двигуна, вираженими в см, і заданими величинами $M_з$ та $\omega_з$ як

$$\frac{M_з}{\omega_з} \leq 18 \cdot 10^{-4} \frac{K_n \cdot K_з (K_{об} \cdot \alpha \cdot B_\delta)^2}{1 + \lambda_l} D^4 \cdot l. \quad (8)$$

При врахуванні для цього типу конструкції двигуна кількісних величин $K_n = 0,38 \div 0,43$; $K_3 = 0,3 \div 0,32$; $\alpha = 0,7 \div 0,8$ та коефіцієнта перевантаження по моменту k зв'язок між геометричними розмірами та заданими параметрами запишемо як

$$D^4 \cdot l \geq 1,17 \cdot 10^{-4} (1 + \lambda_n) M_3 k / B_\delta \omega. \quad (9)$$

При відносній довжині активної частини $\lambda = l/D$ попереднє бажане значення розточки якоря у відповідності з (9) визначається як

$$D \geq 6,5 \cdot \left(\frac{1 + \lambda_n}{\lambda} \cdot \frac{k}{B_\delta} \cdot \frac{M_3}{\omega_3} \right)^{0,2}. \quad (10)$$

Перед подальшою проробкою конструкції машини при вибраних D та l необхідно перевірити їх задовільність умовам нагрівання. Якщо міру нагрівання оцінювати за величиною J_δ , яка в нашому випадку залежить лише від параметрів D , l_n та ω у відповідності з виразом $J = 0,51 K_{ob} \cdot \alpha \cdot \omega_3 B_\delta D / (1 + \lambda_n)$, А/мм², то на вибрану величину D накладається обмеження

$$D \leq 3J_\delta (1 + \lambda_n) / \omega_3 B_\delta. \quad (11)$$

Якщо величина D за (10) не задовольняє (11), то її необхідно визначити за (11), а активну довжину l за (9), закругливши отримані значення до величин наявного парку машин, що підлягають редизайну. Внаслідок цього буде повністю ідентифікована геометрія магнітного кола якоря, а саме D , l , кількість зубців z , S_n , K_n та інші величини, а також кількість полюсів індуктора $2p$, подальше визначення геометричних параметрів якого (α , ширина та висота магнітів) здійснюється за відомими процедурами.

Що ж стосується дименціоналізації якірної обмотки, то її треба здійснювати з врахуванням параметрів драйвера. Зрозуміло, що насамперед допустимі значення напруги U_{dm} та струму I_{dm} драйвера повинні задовольняти умову

$$U_{dm} \cdot I_{dm} \geq 2M_3 \cdot \omega_3 \cdot k. \quad (12)$$

При невиконанні (12) необхідно орієнтуватись на тип драйвера, що дозволяє застосування зовнішнього циклоконвертора (наприклад типу ТДА 5142 Т [5]).

З метою поліпшення технологічності обмотки та збільшення K_3 при вибраному типі драйвера доцільно забезпечити повне його використання по допустимому струму, прийнявши $I_\delta = I_{dm} / k$, що з врахуванням співвідношення між величинами I_ϕ та I_δ ($I_\phi = \sqrt{6} I_\delta / \pi$) дозволяє визначити проектну кількість витків фази W_ϕ та кількість витків у пазу W_n як

$$W_\phi = 7,3 \cdot 10^3 M_3 \cdot k / D \cdot l \cdot I_{dm}; \quad W_n = 6W_\phi / z. \quad (13)$$

За відомих S_n та K_n , діаметр обмоткового дроту d (мм) можна визначити за формулою

$$d = 0,05 D \sqrt{\lambda \cdot K_n \cdot K_3 \cdot I_\delta / M_3}, \quad (14)$$

значення якого повинно бути закруглене до найближчого стандартного, після чого уточнюється кількість витків W_ϕ за S_n та K_3 . Далі визначається напруга силової частини

драйвера U_δ , яка повинна задовольняти умову $U_\delta \leq U_{\delta m}$, за формулою

$$U_\delta \approx 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot W_\phi \cdot \omega_3 \cdot B_\delta \cdot D \cdot l, \text{ В} \quad (15)$$

Приклад застосування принципів редизайну. Для електропривода медичного приладу, аналіз діаграми руху якого показав, що максимальне відношення M/ω має місце при $M_3 = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$ і $\omega_3 = 15 \text{ рад/с}$, котрі надалі прийняті за задані величини, необхідно підібрати прототип статора, який буде підлягати переробці в конструкцію ЕКД. При коефіцієнті перевантаження $k = 1,25$ максимальна споживана потужність двигуна у відповідності з (12) становитиме 15 ВА, а відтак його керування можна здійснювати драйвером типу ТДА 5145 фірми Philips ($U_{\delta m} = 18 \text{ В}$ та $I_{\delta m} = 1,5 \text{ А}$) [5]. При використанні постійних магнітів з матеріалу *FeNdB* значення індукції $B_\delta = 0,8 \text{ Тл}$.

Прийнявши з конструктивних міркувань попередні значення $\lambda_n = 1$; $\lambda = 0,17$, визначимо за (10) діаметр розточки, при якому вказаний двигун можна реалізувати, $D \geq 5,9 \text{ см}$. З іншого боку, при допустимому значенні густини струму $J_\delta = 12,5 \text{ А/мм}^2$ у відповідності з (11) $D \leq 6,3 \text{ см}$.

Вказаним вимогам відповідає статорна виштамповка асинхронних двигунів 4А63, яка характеризується параметрами $K_n = 0,4$; $D = 6,1 \text{ см}$ і має кількість зубців $z = 24$. Уточнена величина l повинна становити $l = 0,9 \text{ см}$. Доцільно прийняти $l = 1 \text{ см}$. Кількість витків фази W_ϕ та витків в пазу W_n за (13) становлять $W_\phi = 400$ і $W_n = 100$. Діаметр обмоткового дроту за (14) $d = 0,43 \text{ мм}$. Прийmemo стандартний дріт ПЕВ2 з $d = 0,41 \text{ мм}$ та $q = 0,132 \text{ мм}^2$, тоді $W_n = 120$, що відповідає $W_\phi = 480$ і вимагає напруги силової частоти драйвера за (15) $U_\delta = 11,6 \text{ В}$ ($U_\delta < U_{\delta m} = 18 \text{ В}$).

Наступним кроком має бути перевірко́вий розрахунок конструкції двигуна з врахуванням математичної моделі драйвера і оптимізації режимів роботи приводу. На вказаній виштамповці двигуна 4А63 в СКБ електромеханічних систем НУ “Львівська політехніка” був розроблений ЕКД типу ДСТ90-3 [6], який випускається малими партіями.

1. *Dashevskiy R. About redesign of electrical motors // Вестн. ХГПУ: Новые решения в современных технологиях. – 2000. – Вып. 8. – С. 65–66.* 2. *Завгородний В. Алгоритмы построения неперекрестных обмоток // Proc. of 2-nd ISTC on Unconventional electromechanical systems. – Szczecin 1996. – Vol. 2. – P. 415–420.* 3. *Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. – М., 1988. – 479 с.* 4. *Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – М., 1989. – 184 с.* 5. *Brushless DC motor drive circuit. Product specification. – 1992. <http://www.semiconductors>.* 6. *Двигун синхронний трифазний ДСТ90-3. Технічні умови ТУУ 02071010.50-10. – 2001. – 23 с.*