

УДК 621.313.181.4.001

Андрейко І.І., Біляковський І.Є.
ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА

ЕЛЕМЕНТИ САПР ОДНОФАЗНИХ КОЛЕКТОРНИХ ДВИГУНІВ

© Андрейко І.І., Біляковський І.Є., 2000

У статті запропоновані методика оптимізації пазового шару якорів однофазних колекторних двигунів малої потужності та критерії оптимальності в задачах їх проектного та перевірного розрахунків із використанням пакетів комп'ютерних програм автоматизованого проектування.

Колекторні двигуни малої потужності є надзвичайно широко розповсюдженими. За літературними даними щорічно в світі виготовляють сотні мільйонів двигунів такого типу. Їх застосовують у промисловості, на транспорті, в електропобутовій техніці тощо.

Одними з найпоширеніших серед колекторних двигунів малої потужності у промисловості та електропобутовій техніці, зокрема, в переносних малогабаритних електричних інструментах, є колекторні двигуни однофазного струму послідовного збудження або, як їх часто називають, однофазні колекторні двигуни (ОКД).

Оскільки такі двигуни виготовляють у дуже великих кількостях і вартість їх виготовлення становить суттєву частку від вартості виготовлення всіх електричних машин як в Україні, так і за кордоном, їх енергетичні та техніко-економічні показники мають істотне народногосподарське значення.

При проектуванні однофазних колекторних двигунів доводиться розв'язувати задачі вибору їх конструкції і матеріалів, розрахунку основних розмірів і обмотувальних даних за заданими вихідними характеристиками, або задачі визначення вихідних характеристик за заданими геометрією двигуна, обмотувальними даними і властивостями використовуваних матеріалів. Тоді це відповідно або проектний розрахунок двигуна зі знаходженням кращого варіанта за вибраними критеріями або перевірковий розрахунок, який є необхідною ланкою проектного, оскільки після остаточного визначення геометрії машини та знаходження її обмотувальних даних необхідно виконати повний перевірковий розрахунок.

До того ж, проблема покращання основних показників ОКД важлива не лише під час розробки нових двигунів чи їх серій, а й при періодичному удосконаленні у зв'язку з появою нових ізоляційних матеріалів, електротехнічних сталей або при удосконаленні чи зміні робочого органу пристрою, в приводі якого ці двигуни використовуються, оскільки це може призвести до зміни частоти обертання, електромагнітного моменту, режиму роботи тощо.

Визначення основних розмірів однофазних колекторних двигунів під час їх проектування є достатньо складним технічним завданням внаслідок різноманіття конструктивних виконань, режимів роботи тощо [2]. Для досягнення високих техніко-економічних показників при цьому належить детально проаналізувати дані існуючих аналогів, зокрема, залежності енергетичних показників η , $\cos\phi$ та питомого активного об'єму $V_{\text{пнт}} = \pi d^2 l_a / (4P_H)$ від

номінальної корисної потужності P_n , а також електромагнітних навантажень – індукції B_δ у повітряному проміжку і лінійного навантаження A – від відношення P_n/n . Правильний вибір електромагнітних навантажень у цілому істотно впливає на показники ОКД.

Так, зокрема, значення лінійного навантаження якоря A разом із густиною струму в обмотці якоря для заданого режиму роботи двигуна визначають питомі втрати в обмотці якоря. Необхідно пам'ятати, що при зміні густини струму в обмотці якоря змінюються не тільки активні опори, але й дещо зміниться ЕРС обертання, а отже, й магнітний потік та індукція в повітряному проміжку B_δ .

Значення індукції B_δ , з іншого боку, визначає значення індукції не тільки в зубцях та спинці якоря, а й у всіх інших ділянках магнітного кола ОКД. Тому від B_δ залежить не лише переріз магнітопроводу двигуна, але й намагнічувальна сила (струм) обмотки збудження та втрати в сталі і в обмотках.

Отже, щоб намагнічувальна сила обмотки збудження була мінімальною за найменших витрат сталі магнітопроводу, необхідно значення B_δ вибирати достатньо високим, але з таким розрахунком, щоб індукції в найбільш навантажених ділянках магнітопроводу не перевищували деякого допустимого значення. Отже, внаслідок розрахунків варіантів магнітопроводу можна попередньо визначити локальне оптимальне значення B_δ .

Як правило, кращі масо-габаритні показники та менша вартість двигуна виявляються за максимально допустимого добутку індукції в повітряному проміжку B_δ та лінійного навантаження A , хоч енергетичні показники двигуна при цьому не будуть найкращими. Окрім того, в ОКД малої потужності, порівняно з іншими електричними машинами, електромагнітні навантаження, зі зрозумілих причин [1, 2], доводиться вибирати заниженими, що в результаті призводить до збільшення кількості провідників обмотки якоря, зниження коефіцієнта заповнення паза та значного підвищення густини струму в обмотці якоря.

За критерії оптимальності при проектуванні ОКД можна прийняти масу двигуна, масу активних матеріалів, корисну потужність на одиницю маси чи об'єму. Однак проектування однофазних колекторних двигунів пов'язане з перебором у визначеній послідовності поєднань незалежних змінних, збільшення кількості яких зумовлює необхідність істотно збільшувати кількість розглядуваних варіантів розрахунку для вибору оптимального. Як правило, це виявляється недоцільним внаслідок незначного впливу частини невідомих на оптимальність варіанта. Зменшення кількості незалежних змінних дають часткові оптимізації, зокрема, оптимізація зубцево-пазового шару та відношення B_δ/A , що, як свідчать дослідження, істотно впливають на показники двигуна.

Особливо необхідною оптимізація розмірів активного шару якоря є у випадках проектування однофазних колекторних двигунів із високим використанням активних матеріалів, тобто з підвищеною індукцією в повітряному проміжку. У цьому разі може істотно зростати струм намагнічування та втрати в сталі, відносні значення яких можна зменшити вибором оптимальних співвідношень ширини та висоти зубця, а також висоти спинки якоря. Це, своєю чергою, передбачає необхідність проведення оптимізаційних розрахунків ряду варіантів ОКД за різних значень згаданих величин.

Для розв'язання задачі оптимізації розмірів пазів приймемо, що лист виштамповки якоря зовнішнім діаметром d і внутрішнім d_b має Z зубців із паралельними стінками і постійною шириною b_z по всій висоті h_z , а площа паза, який при цьому має вигляд рівнобічної трапеції,

дорівнює $S_{\Pi(iд)}$. Для зв'язку між реальною площею S_{Π} і ідеальною $S_{\Pi(iд)}$ використаємо коефіцієнт неідеальності пазів

$$k_p = S_{\Pi} / S_{\Pi(iд)}. \quad (1)$$

Введемо конструкційні коефіцієнти

$$k_d = d_b / d; \quad (2)$$

$$k_z = S_{\Pi} Z / (\pi d^2 / 4), \quad (3)$$

які визначають відношення відповідно внутрішнього та зовнішнього діаметрів та відносну площу пазів якоря.

Основні величини, які визначають геометрію листа виштамповки якоря, можуть бути пов'язані між собою рівнянням, отриманим записуванням сумарної площі пазів для якоря з зубцями постійної ширини у вигляді

$$S_{\Pi} Z = k_p \left\{ (\pi/4) [d^2 - (d_b + 2h_a)^2] - (1/2) Z b_z (d - d_b - 2h_a) \right\}, \quad (4)$$

де h_a – висота спинки якоря

Магнітний потік полюса

$$\Phi = (2/\pi) B_{\delta} (\pi d / 2p) l_a = 2h_a l_a k_c B_a, \quad (5)$$

а магнітний потік зубця

$$\Phi_z = (\pi d / Z) B_{\delta} l_a = B_z b_z l_a k_c, \quad (6)$$

де l_a – довжина сердечника якоря; B_{δ} , B_z , B_a , – індукції відповідно в повітряному проміжку, зубцях та спинці якоря; p – кількість пар полюсів статора; k_c – коефіцієнт заповнення сталлю якоря.

З формул (5), (6) висота спинки якоря

$$h_a = d / (2p k_c \chi_a), \quad (7)$$

а ширина зубця якоря

$$b_z = (\pi d) / (Z k_c \chi_z), \quad (8)$$

де $\chi_z = B_z / B_{\delta}$ – відносне значення індукції в зубцях якоря; $\chi_a = B_a / B_{\delta}$ – відносне значення індукції в спинці якоря.

Після підстановки (3), (7), (8) у (4), отримаємо рівняння

$$k_z = k_p \left\{ \left[1 - \left(k_d + \frac{1}{pk_c \chi_a} \right)^2 \right] - \frac{2}{k_c \chi_z} \left(1 - k_d - \frac{1}{pk_c \chi_a} \right) \right\}, \quad (9)$$

яке пов'язує конструкційні коефіцієнти k_d і k_z з відносними значеннями індукцій χ_z і χ_a відповідно у зубцях та в спинці якоря.

Отримане рівняння дозволяє розв'язувати задачі визначення розмірів листа виштамповки якоря при різних накладених обмеженнях, зокрема, за необхідності отримати певний відносний активний опір обмотки якоря і за заданих конструктивних коефіцієнтів визначати відносні індукції χ_z та χ_a в зубцях і в спинці якоря, а також перевіряти виконання умови $B_z < B_{zдоп}$.

Можливим є також розв'язання задачі знаходження відносної площі пазів при заданому k_d та відомих значеннях відносних індукцій, чи знаходження k_z і перевірка за χ_z значення індукції в зубцях за вибраними наперед з технологічних міркувань k_d , висоті спинки якоря та ширині зубця.

При цьому, якщо співвідношення між χ_z і χ_a невідомі, можна прийняти $\chi_z \approx \chi_a$ при $2p \geq 4$ і $\chi_z = 1.2 - 1.3 \chi_a$ при $2p = 2$.

Аналогічне рівняння отримуємо для оптимізації геометричних розмірів статора однофазного колекторного двигуна. Для цього, за відповідні конструктивні коефіцієнти приймають відношення внутрішнього діаметра його статора до зовнішнього та відносну площу, зайняту обмоткою збудження двигуна. Однак вплив співвідношення геометричних розмірів статора на техніко-економічні показники двигуна є значно меншим від впливу на них відповідних співвідношень геометричних розмірів пазового шару якоря ОКД.

Також належить враховувати, що досить часто для ОКД надто малих потужностей (5...20 Вт) можливості використання оптимальних геометричних розмірів зубцевого шару обмежені технологією виготовлення, особливо це стосується ширини зубця та мінімальної ширини паза.

На підставі наведеного вище та з використанням відомих методик [1, 3] розроблено алгоритм та складено пакет комп'ютерних програм, які дають змогу розраховувати ОКД у діапазоні потужностей 10...200 Вт. Програми, складені алгоритмічними мовами Фортран та Паскаль, дають можливість етапами проводити вибір головних розмірів двигуна з можливою оптимізацією зубцевого шару за наведеною вище методикою – з метою отримання задовільних значень намагнічувального струму та втрат у сталі, електромагнітний розрахунок із можливою оптимізацією відношення B_δ/A – з метою покращання енергетичних та техніко-економічних показників, спрощений тепловий розрахунок та визначення електро-механічних характеристик. Можлива оптимізація за деякими іншими критеріями (добутком $B_\delta A$, відношеннями P_n/V , P_n/M – де V , M – об'єм та маса машини) за допомогою порівняння розрахованих варіантів. При цьому належить по чергово змінювати одну з величин, залишаючи інші незмінними або обмежувати їх певними співвідношеннями, для чого в кінці кожного етапу передбачена можливість повернення на його початок.

Оптимізація співвідношень індукції B_δ в повітряному проміжку та лінійного навантаження A виконуються комп'ютерним розрахунком відповідних варіантів двигунів і подальшого їх порівняння з погляду обраних критеріїв оптимальності за відомими методами [1, 3].

Пакет комп'ютерних програм містить базу даних із основними характеристиками використовуваних у проектуванні однофазних колекторних двигунів електротехнічних сталей, обмотувальних провідників та конструкційних матеріалів і його можна використовувати в інженерній практиці та в навчальному процесі як елемент САПР ОКД.

1. Ермолин Н.П. Расчет коллекторных машин малой мощности. 2-е изд. Л., 1973.
2. Puternicki P. Projektowanie silnikow komutatorowych malej mocy. Warszawa, 1992.
3. Копылов И.П., Горяинов Ф.А. и др. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П.Копылова. М., 1980.