

АСИНХРОННІ ДВИГУНИ З МАСИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ МАГНІТОПРОВОДУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАНУРЕНИХ СВЕРДЛОВИННИХ НАСОСІВ

О. М. Попович, І. В. Головань, кандидати технічних наук (НТУУ «КПІ»)

Для погружных асинхронных двигателей скважинных насосов с улучшенными (за счет увеличения скорости вращения) удельными показателями исследованы характеристики магнитного поля при пилообразном изменении диаметров статора и ротора в осевом направлении. Показаны возможности создания осевой силы для уменьшения нагрузки на упорный подшипник.

Ключевые слова: погружные асинхронные двигатели, магнитное поле, осевая сила, упорный подшипник.

Для зануренных асинхронных двигателей свердловинных насосов с покращенными (за рахунок збільшення швидкості обертання) питомими показниками досліджено характеристики магнітного поля при пилкоподібній зміні діаметрів статора і ротора в осьовому напрямку. Показано можливості створення осьового зусилля для зменшення навантаження на упорний підшипник.

Ключові слова: занурені асинхронні двигуни, магнітне поле, осьова сила.

For submersible asynchronous hole pumps motors with improved (due to increase in rotation speed) specific parameters magnetic field characteristics at sawtooth change of stator and rotor diameters in an axial direction are studied. Opportunities for creation of axial force with a view to reduce the loading on the axial bearing are shown.

Keywords: submersible asynchronous motors, magnetic field, axial force, axial bearing.

Сучасний розвиток перетворювальної та обчислювальної техніки створює передумови для розширення області застосування спеціалізованих асинхронних машин та машин традиційної конструкції в спеціальних режимах. Застосування спеціалізованих асинхронних машин дозволяє максимально узгодити їх властивості з вимогами навантажувального механізму і забезпечити суттєве підвищення техніко-економічних показників електромеханічних систем, що проектуються. Магнітопроводи таких машин часто мають масивні елементи, що забезпечує раціональне суміщення елементів двигуна з елементами навантажувального механізму та ефективно формування потрібних механічних характеристик.

До асинхронних машин з масивними елементами магнітопроводу (МЕМ) належать АД з різними конструкціями масивних феромагнітних роторів. Такі ротори мають частотозалежні параметри і забезпечують високу добротність пуску. Вони ефективно використовуються в умовах частих та важких пусків, при параметричному регулюванні швидкості. Частотозалежність параметрів забезпечується завдяки нелінійності процесів, пов'язаних з наявністю вихрових струмів в МЕМ, витісненням потоку на периферію магнітопроводу та змінною величиною втрат в ньому. Подібні процеси мають місце і в АД із зменшеною висотою спинки ярма ротора, наприклад в занурених АД приводу свердловинних насосів, у деяких типорозмірах двополюсних двигунів загально-

промислового призначення. Зменшення ярма ротора веде до проходження змінного магнітного потоку через вал, наведення в ньому вихрових струмів і їх участю в процесі електромеханічного перетворення енергії. Використання МЕМ АД дозволяє поліпшити їх техніко-економічні характеристики при застосуванні у приводі механізмів з особливими вимогами до пускових та інших динамічних режимів, а також при розробленні електромеханічних перетворювачів з урахуванням специфіки конкретних технологічних механізмів. В останньому випадку висока ефективність досягається при суміщенні в одному елементі конструкції функцій як електромеханічного перетворювача, так і виконавчого органу механізму. Збільшення масштабів застосування АД з МЕМ повинно спиратись на досягнення при розробленні технологій створення ефективних електротехнічних матеріалів, здатних виконувати функції провідників струму і магнітного потоку; конструюванні механізмів з вбудованими (суміщеними) електромеханічними перетворювачами; вдосконаленні та розробленні математичних моделей та методик розрахунку АД з розподіленими струмами.

Техніко-економічні характеристики електромеханічної системи подачі рідини з свердловини можна суттєво покращити, якщо при проектуванні враховувати можливість збільшення обертів приводного валу насоса. При цьому, відповідно до законів пропорційності турбомашин, подача збільшується пропорційно обертам, а напір – пропорційно їх квадрату. Позитивними наслідками збільшення частоти обертання валу приводного двигуна насоса є покращення його масо-габаритних показників, збільшення потужності, покращення врівноваженості ротора при збільшенні кількості полюсів у випадку живлення від джерела підвищеної частоти. До негативних наслідків підвищення частоти обертання ротора АД зануреного свердловинного насоса відносяться збільшення втрат на тертя і зменшення надійності внаслідок прискореного зносу упорного підшипника. Дослідження можливостей зменшення впливу згаданих недоліків при застосуванні ротора АД із МЕМ має спиратися на достовірний математичний експеримент.

Розрахунок характеристик АД з МЕМ ротора ускладнюється специфікою процесів у ньому, зокрема тривимірним розподілом магнітного поля, а саме: крайовими ефектами, витісненням магнітного потоку з магнітопроводу вихровими струмами, нелінійністю параметрів та несинусоїдністю процесів. Найбільш точно таку задачу можна розв'язати методом кінцевих елементів (МКЕ) у тривимірній постановці. Однак це потребує значних ресурсів обчислювальної техніки і в практиці проектування АД частіше використовується для тестування більш простих моделей. Навіть при використанні розрахунку магнітного поля МКЕ у двовимірній постановці задачі безпосереднє визначення параметрів робочого режиму за результатами розв'язання польової задачі потребує значних витрат машинного часу, що пов'язано з великою кількістю ітерацій. Ефективність методів проектування можна суттєво підвищити, якщо використовувати точні польові підходи для визначення залежностей зміни інтегральних параметрів АМ і застосовувати їх при розра-

хунках режимів роботи. У зв'язку з цим для створення ефективних конструкцій АД з МЕМ ротора та дослідження режимів їх роботи було розроблено математичну модель визначення параметрів ротора таких двигунів [1].

Розроблена математична модель визначення параметрів ротора АД з МЕМ враховує параметри магнітного поля в роторі по боковій та торцевій поверхням, в лобових зонах і дозволяє отримати квазітривимірний розв'язок задачі, який враховує особливості складного тривимірного розподілу магнітного поля і не потребує додаткового уточнення. Така модель дозволяє підвищити ефективність проектування АД з МЕМ ротора за рахунок достатньо точного визначення параметрів магнітного поля ротора МКЕ, мінімізації обсягу польових розрахунків завдяки аналізу лише області ротора (параметри поля серійного статора АД із потрібною точністю визначаються традиційними методами) і мінімізації їх кількості при визначенні нелінійних залежностей зміни параметрів ротора для подальшого їх використання при розрахунках параметрів експлуатаційних режимів АД коловими методами.

Визначення параметрів АД з МЕМ ротора, зокрема з масивним феромагнітним ротором (МФР), виконується при застосуванні математичної моделі, в якій всі процеси в роторі, в тому числі і в масивному магнітопроводі з розподіленими вихровими струмами, еквівалентуються процесами в еквівалентних контурах струмів з зосередженими параметрами. Умовами еквівалентування є рівність втрат активної енергії та енергії магнітного поля при однаковій величині магнітного потоку взаємної індуктивності статор–ротор та частоті.

Урахування нелінійних властивостей параметрів АД з МЕМ ротора здійснено шляхом визначення їх функціональної залежності від незалежних змінних при кожному значенні ковзання. Параметри по основному полю є функціями коефіцієнта насичення магнітного поля, що залежить від сумарної МРС машини. Параметри статора визначаються за допомогою відомих методик. Активний опір та індуктивність розсіювання роторного контуру при фіксованому ковзанні також залежить від сумарної МРС машини. Розрахунок параметрів магнітного кола при наявності двох шляхів потоку взаємної індуктивності (по торцям та боковій поверхні) здійснюється за умови їх паралельного з'єднання, тобто при однакових значеннях падіння магнітного потенціалу на цих ділянках. Для визначення параметрів еквівалентних контурів ротора з МЕМ при розв'язанні польової задачі в квазітривимірній постановці проводиться узгодження сформованих залежностей параметрів, отриманих без урахування взаємного впливу процесів у боковій та торцевій поверхнях і в лобовій зоні.

Застосований алгоритм [1] дозволяє визначати параметри машини при квазітривимірному аналізі електромагнітного поля (ЕМП) з урахуванням особливостей співвідношення конструктивних параметрів машини і її робочих режимів. Особливості такого підходу розглянуто при порівнянні результатів розрахунку з його використанням і при врахуванні лобових параметрів масивного ротора за допомогою лобових коефіцієнтів [2].

Так, у разі відсутності торцевого мідного короткозамикаючого кільця наведені струми в МФР, у торцевій його частині, замикаються по шляхам з відносно великим питомим електричним опором, в результаті чого еквівалентний опір ротора може значно зрости і призвести до зменшення потужності, яка передається ротору. Підхід [2], що ґрунтується на збільшенні величини опору відповідно до лобового коефіцієнту, який визначається як відношення полюсного поділу до довжини осердя ротора, є справедливим у разі слабкого проникнення електромагнітного поля вглиб масиву ротора, яке має місце під час пуску двигуна. В робочих режимах необхідно враховувати реальний розподіл струмів по глибині масиву ротора. Квазітривимірний аналіз ЕМП дає можливість при визначенні коефіцієнта збільшення опору врахувати співвідношення струмів у торцевій частині ротора за поздовжнім та поперечним напрямками в залежності від глибини проникнення ЕМП, що особливо важливо при визначенні даного параметра при різних ковзаннях ротора.

В результаті проведення чисельного експерименту з розрахунку по визначенню параметрів ротора і робочого режиму асинхронного двигуна з гладким МФР було виявлено, що розбіжність розрахункових (при застосуванні квазітривимірної аналізу ЕМП) і експериментальних даних про параметри робочого режиму не перевищує 5 %. Застосування лобового коефіцієнта, отриманого по відомим співвідношенням [2], приводить до завищення опору ротора на 25 % і, як наслідок, до збільшення похибки визначення параметрів робочого режиму до 20 %.

Дослідимо можливості змін конструкції АД зануреного свердловинного насоса, які забезпечать його надійну роботу при великих швидкостях. Для цього створимо в робочому режимі осьову силу, що компенсує вагу ротора і зменшує знос упорного підшипника завдяки заміні сталої величини повітряного проміжку величиною, що змінюється вздовж осі насоса, при якій з'являється осьова складова сили електромагнітного тяжіння між статором і ротором.

При заданні пилкоподібної залежності зміни діаметрів статора і ротора в осьовому напрямку прийемо, що мінімальна відстань між статором і ротором у радіальному напрямку дорівнює величині повітряного проміжку δ серійного АД, а максимальний діаметр ротора дорівнює мінімальному діаметру статора. При цьому повітряний проміжок в осьовому напрямку періодично змінюється. Цей період ділиться на «робочу» і «неробочу» частини: з малою і великою відстанню між пакетами статора і ротора, з довжинами $k_p \delta$; $k_n \delta$.

Залежності зміни в осьовому напрямку внутрішнього діаметра статора D_s і зовнішнього діаметру ротора D_r визначаються виразами

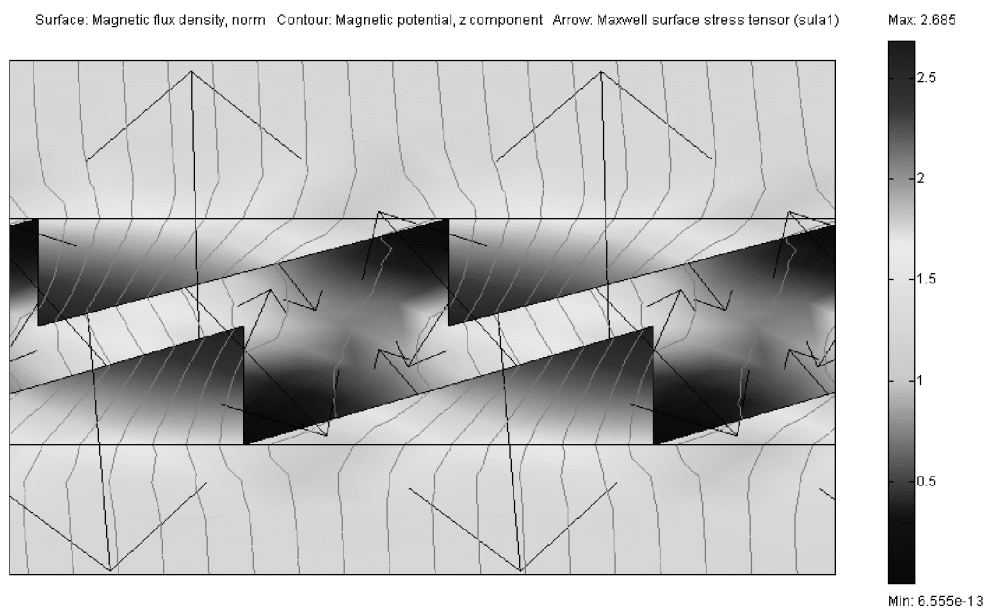
$$D_s(x) = D_i + 2x/k_p - 2\delta(1 + k_n/k_p) \cdot \text{fix}(x/(\delta(k_p + k_n)));$$

$$D_r(x) = D_i + 2(x + k_n \delta)/k_p - 2\delta(1 + k_n/k_p)[1 + \text{fix}((x + k_n \delta)/(\delta(k_p + k_n)))] ,$$

де fix – функція визначення цілої частки; D_i – діаметр розточки статора серійного АД; x – координата вздовж осі машини.

Дослідження осьової сили при варіюванні величин k_p , k_n здійснено при чисельному розрахунку характеристик електромагнітного поля методом кінцевих елементів у площині, що проходить крізь вісь машини і зубці статора і ротора. Розрахункова модель у цій площині має ділянку магнітопроводу з нескінченно великою магнітною проникністю, яка з'єднує діаметрально протилежні ділянки ярма статора і охоплена обмоткою із струмом. Величина струму обмотки обиралась із умови отримання номінальної індукції в повітряному проміжку, розміри якого, як і розміри та характеристики матеріалу магнітопроводу, відповідають базовому серійному АД. У результаті розв'язку цієї задачі було визначено індукцію в повітряному проміжку і радіальні електромагнітні сили (за величиною тензора магнітного натягу). Їх величина відповідає максимуму цих сил при розрахунках двовимірного поля в площині, перпендикулярній осі серійного базового АД при розрахунках номінального режиму. При цьому осьові сили були відсутні.

При корегуванні повітряного проміжку відповідно до наведених виразів і величин $k_p = 2$; $k_n = 2$ без зміни величини збуджуючого струму отримано характеристики електромагнітного поля, при яких магнітний потік машини залишився практично незмінним, радіальна сила зменшилась на 14 % і з'явилась осьова сила величиною 16 % від номінальної радіальної сили. Приклад розв'язання такої польової задачі наведено на рисунку, де показано ізолінії векторного магнітного потенціалу, вектори тензора магнітного натягу (зображено стрілками). Більша інтенсивність сірого кольору на ділянках магнітопроводу вказує на більший рівень індукції, на ділянках повітряного проміжку – навпаки (це обумовлено чорно-білою інтерпретацією кольорової ілюстрації).



Картина розподілу векторного магнітного потенціалу і тензору магнітного натягу АД із пилкоподібною залежністю зміни діаметрів статора і ротора в осьовому напрямку

Отримані результати свідчать, що при використанні викладеного алгоритму досліджень можна визначити конфігурацію повітряного проміжку, яка забезпечить незмінну величину основного потоку i , відповідно, електромагнітного моменту АД при перерозподілі електромагнітних зусиль з радіального на осьовий напрямок. При цьому створена осьова сила компенсує вагу ротора і зменшує навантаження на упорний підшипник. Збереження незмінної величини магнітного потоку при виникненні «неробочої» частини повітряного проміжку пояснюється зменшенням немагнітного проміжку (нормально до поверхонь статора і ротора) в «робочій» частині. Збільшення насичення прилеглих частин магнітопроводу не вплинуло на збільшення магнітного опору внаслідок їх локального характеру.

1. Попович О. М., Головань І. В. Врахування масивних елементів магнітопроводу при проектуванні асинхронних машин / Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 21. – С. 36–46.

2. Куцевалов В. М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами. – М.: Энергия, 1979. – 158 с.