

ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З МАСИВНИМ ФЕРОМАГНІТНИМ РОТОРОМ ПРИ ПІДВИЩЕНІЙ ЧАСТОТІ ЖИВЛЕННЯ

Попович О.М., к.т.н., Головань І.В.
 Інститут електродинаміки НАН України
 Україна, 03680, Київ, пр-кт Перемоги, 56
 тел. (044) 454-26-37

Запропонована уточнена математична модель з урахуванням еквівалентних контурів втрат в сталі статора і ротора від вихрових струмів для формування пускових характеристик асинхронних двигунів з частотозалежними параметрами ротора.

Предложена математическая модель с учетом эквивалентных контуров потерь в стали статора и ротора от вихровых токов для формирования пусковых характеристик асинхронных двигателей с частотозависимыми параметрами ротора.

Асинхронні двигуни (АД) з гладким масивним феромагнітним ротором (МФР) є найбільш простими серед АД з масивними елементами магнітопроводу (МЕМ) ротора. Дані ротори мають частотозалежні параметри і забезпечують високу добротність пуску. Вони можуть ефективно використовуватись в умовах частих та важких пусків, при параметричному регулюванні швидкості. Частотозалежність параметрів забезпечується завдяки нелінійності процесів, що пов'язані із наявністю вихрових струмів в МЕМ: із витісненням потоку на периферію магнітопроводу та змінною величиною втрат в ньому. Конструкція АД з гладким масивним феромагнітним ротором (МФР), внаслідок притаманних їй вад, має обмежене використання при 50 Гц. При зміні умов роботи, завдяки значній нелінійності параметрів АД з МФР, її техніко-економічні показники можуть суттєво змінюватись. Пошук оптимального варіанту електроприводу для конкретного навантажувального механізму потребує врахування всіх альтернативних варіантів, і АД з МФР зокрема.

Розрахунок характеристик АД з МФР ускладнюється специфікою процесів в ньому. Найбільш точно таку задачу можна розв'язати методом кінцевих елементів (МКЕ) в тривимірній постановці. Але це потребує значних ресурсів обчислювальної техніки [6] і в практиці проектування АД може використовуватись лише для тестування більш простих моделей. Ефективність методів проектування можна суттєво покращити, якщо використовувати точні польові підходи для визначення залежностей зміни інтегральних параметрів АМ, і застосовувати їх при розрахунках режимів роботи.

Розрахунок режиму роботи АД з МФР в даній роботі виконано при застосуванні математичної моделі, де процеси в масивному магнітопроводі з розподіленими вихровими струмами еквівалентуються процесами в еквівалентних контурах вихрових струмів з зосередженими параметрами [5]. Застосовано дві багатофазні системи еквівалентних контурів. Для визначення їх розміщення в просторі та їх параметрів, циліндр МФР розподілено на z_r секторів. Вихорові струми кожного сектора еквівалентуються струмами двох взаємоперпендикулярних короткозамкнених витків. Зміна струму в цих контурах моделює зміну в

просторі МРС вихрових струмів в елементах масивного ротору. В розглядаємому випадку МФР, рівняння електричної та механічної рівноваги подібні до [5] при представленні зубцевих та ярмових роторних контурів контурами по радіальному і по тангенціальному напрямкам відповідно.

Для розв'язання рівнянь електричної рівноваги визначено параметри роторних контурів і виконано розрахунок магнітного кола для потоку взаємної індуктивності статор-ротор. Зосереджені струми роторних контурів еквівалентують розподілені вихорові струми в масиві ротора. Умовами еквівалентування є рівність втрат активної енергії та енергії магнітного поля при однаковій величині магнітного потоку взаємної індуктивності статор-ротор та частоті.

В відповідності до розподілу магнітного поля, що визначено в тривимірній постановці [6], розглянуто два основні шляхи проходження магнітного потоку взаємної індуктивності статор-ротор: по боковій поверхні циліндру ротора та по торцевій поверхні ротора.

Врахування нелінійних властивостей параметрів АД з МФР здійснено за рахунок визначення їх функціональної залежності, при кожному значенні ковзання, від незалежних змінних. Параметри по основному полю є функціями коефіцієнту насичення магнітного поля, що залежить від сумарної МРС машини [5]. Параметри статора можуть визначатись за допомогою відомих методик, наприклад [1]. Активний опір та індуктивність розсіювання роторного контуру, при фіксованому ковзанні, залежить від величини струмів.

Визначення параметрів контурів ротора здійснено в припущенні, що параметри поля змінюються в часі по синусоїдному закону. При цьому енергія в еквівалентний контур потрапляє при взаємодії з основним потоком взаємної індуктивності в відповідності до рівняння електричної рівноваги:

$$0 = r\dot{I} + j\omega\dot{L} + j\omega M\dot{I}_\mu, \quad (1)$$

яке, помножене на сполучений струм I^* , дає можливість записати, виходячи з співвідношення для трикутника комплексної потужності:

$$P^2 + Q_{\sigma}^2 = e^2 I^2; \quad I = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{\sigma}^2}}{e}; \quad (2)$$

$$r = \frac{P}{I^2}; \quad l = \frac{Q_{\sigma}}{\omega I^2},$$

де P – втрати активної потужності в елементах магнітопроводу, що еквівалентується контуром; Q_{σ} – реактивна потужність еквівалентного контуру, що обумовлена зміною запасу енергії магнітного поля розсіювання; I, I_{μ} – діючі струми контуру та намагнічування; $e = \omega M I_{\mu} = \omega \Phi / \sqrt{2}$ – діюче значення ЕРС, яка виникає в контурі при зміні потоку взаємної індуктивності, що зчіплюється з ним (Φ), з кутовою частотою ω ; r – активний опір; M – індуктивність, що обумовлена основним потоком статор-ротор; l – індуктивність розсіювання.

Розрахунок параметрів магнітного кола, при наявності двох шляхів потоку взаємної індуктивності, здійснено при умові їх паралельного з'єднання.

Параметри магнітного поля ротора по потоку бокової поверхні визначаються за допомогою двовимірної розрахункової моделі в площині, що перпендикулярна осі АД. Параметри магнітного поля ротора по потоку торцевих поверхонь також визначаються за допомогою подібної моделі, але при відсутності вихрових струмів і врахуванні витіснення потоку з ротора до торцевих поверхонь за допомогою еквівалентної магнітної проникності, що розраховувалась за результатами розв'язання одномірної польової задачі проникнення плоскої електромагнітної хвилі в проводячий феромагнітний напівпростір [7].

Реактивна енергія розсіювання в секторі ротора, в припущенні нехтування лобовими ефектами, визначається наступним чином:

$$Q_{\sigma} = (Q - Q_m) / z_r, \quad (3)$$

де Q – реактивна енергія в досліджуємі області (повітряний проміжок та ротор, статор не враховується внаслідок прийнятої умови набагато більшої величини магнітної проникності його матеріалу); $Q_m = e I_{\mu}$ – реактивна енергія по потоку взаємної індуктивності, що визначається як добуток діючих значень ЕРС та струму намагнічування ($I_{\mu} = 2F / \sqrt{2}$).

Врахування краєвих ефектів при протіканні вихрових струмів бокової поверхні ротора по краєвій (лобовій) зоні здійснено при розрахунках двовимірної польової задачі в площині, що співпадає з віссю машини. Картина струмів лобових частин розглядається в момент їх максимуму.

Визначення параметрів еквівалентних контурів при розв'язанні польової задачі в квазітривимірній постановці потребує узгодження залежностей параметрів. Для випадку розрахунків параметрів поля, в припущенні довгого ротора, рівняння електричної рівноваги еквівалентного контуру (1), з урахуванням,

що $rI = P / I$; $\omega l I = Q_{\sigma} / I$, можна представити:

$$\left| \omega \Phi / \sqrt{2} \right| = \left| P / I + j Q_{\sigma} / I \right|. \quad (4)$$

Врахування процесів в лобових зонах веде до виникнення, при даних струмах, додаткового споживання потужності. Згідно з (38), збільшення втрат на $P_{\text{л}}, Q_{\text{л}}$ може мати місце при збільшенні потоку на деяку величину $\Phi_{\text{л}}$:

$$\left| \omega \Phi_{\text{л}} / \sqrt{2} \right| = \left| P_{\text{л}}^* / I + j Q_{\text{л}}^* / I \right|. \quad (5)$$

Таким чином, в квазітривимірній постановці задачі, потужності, що визначено вище, будуть мати місце не при потоці Φ , а при більшому – Φ' . При його визначенні треба підсумовування проводити з урахуванням комплексності доданків:

$$\Phi' = \Phi \sqrt{\frac{(P + P_{\text{л}})^2 + (Q_{\sigma} + Q_{\text{л}})^2}{P^2 + Q_{\sigma}^2}}, \quad (6)$$

Даний вираз, з урахуванням залежностей зміни втрат потужності та зв'язку $F = f(\Phi')$, що отримано при розрахунках магнітного кола, дає можливість отримати залежності зміни параметрів еквівалентних контурів ротора в функції МРС.

Розроблену математичну модель по визначенню параметрів МФР реалізовано з використанням програм-оболонки по дослідженню електромагнітного поля методом кінцевих елементів. Масиви залежностей параметрів в функції МРС машини використано при розрахунках режимів роботи в системі MATLAB – SIMULINK.

Для тестування розробленої математичної моделі виконано порівняння із даними фізичного експерименту [4] по дослідженню характеристик АД з гладким МФР на базі АО2-81-2. Для порівняння результати зведено в табл. 1. Розбіжності, що мають місце, значною мірою обумовлено неврахуванням в процесі чисельного експерименту додаткових втрат. З урахуванням їх впливу здійснено корекцію розрахункових даних за допомогою інформації про суму основних і додаткових втрат в роторі, що отримано із фізичного експерименту [4]. Віднявши від даної суми розрахункове значення втрат в роторі, отримано залежність зміни додаткових втрат в робочій зоні. Приймав, що додаткові втрати змінюються в функції струму в ступені 1.7...2 [1], їх апроксимовано поліномом $P_{\text{дод}} = -1.656I^{1.7} + 9.38I^{2.0}$. Із використанням даного поліному виконано корегування розрахункових даних (табл. 1).

Таблиця 1

s, %	Фізичний експеримент				Розрахунок без врах. дод. втрат (з врах. дод. втрат)			
	I, А	cosφ, д.о	η, д.о	M _{ем} , Н·м	I, А	cosφ, д.о	η, д.о	M _{ем} , Н·м
1.55	32	0.62	0.64	27	30 (32)	0.57 (0.62)	0.67	34 (29.5)
3.53	51	0.67	0.73	51	50 (53)	0.64 (0.68)	0.714	66 (55)
6.6	70	0.69	0.69	73	77 (82)	0.66 (0.71)	0.65	100 (82)
9.0	100	0.71	0.66	103	96 (103)	0.66 (0.71)	0.63	127 (103)
100	270	-	-	270	275	0.58	-	258

При цьому додаткові втрати враховано відповідним опором, що підключено паралельно АД до джерела живлення. Це дозволило скорегувати величини струму та коефіцієнту потужності [2]. Розрахункову корисну потужність отримано відніманням від добутку електромагнітного моменту та частоти обертання ротора величини механічних та додаткових втрат (табл. 2).

Таблиця 2

f_c , Гц	50	100	200
U , В	260	400	540
$M_{дпн}$, Н·м	51	45	28
s , д.о	0.013	0.013	0.011
$P_2 = M_{дпн} \cdot \omega_r - P_{доб}$, кВт	16-2= =14	27.8-1.8= =26	34.8-1.7= =33.1
η , д.о	0.62	0.86	0.91
$\cos \phi$, д.о.	0.60	0.65	0.68
I_n , д.о	4.4	5.4	3.0
M_n , д.о	2.8	3.3	1.6
Добр. пуску, Н·м/А	1.1	1.05	0.92

Чисельний експеримент по дослідженню характеристик АД з МФР на базі АД АО2-81-2 виконано при варіюванні частотою та напругою живлення. При цьому отримано робочі, механічні (рис. 1, 2, 3) характеристики. Досліджено величину допустимого за нагрівом моменту ($M_{дпн}$) в припущенні сталого зовнішнього обдуву. Для цього фіксувалась точка на механічній характеристиці, в якій гріючі втрати дорівнювали таким для базового АД в номінальному режимі. Криву зміни допустимого за нагрівом моменту нанесено на фрагменти механічних характеристик (рис. 4, 5, 6), де цифрами позначено величину фазної напруги. Дані по робочому та пусковому режимам, при різних частотах, для напруги, що забезпечує максимум $M_{дпн}$, зведено в табл. 2. Дані пускового режиму є відносними до номінальних базового АД. Добротність пуску визначено відношенням пускових моменту та струму.

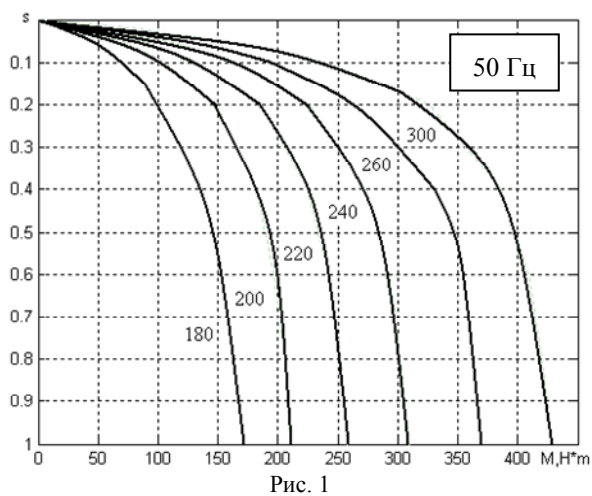


Рис. 1

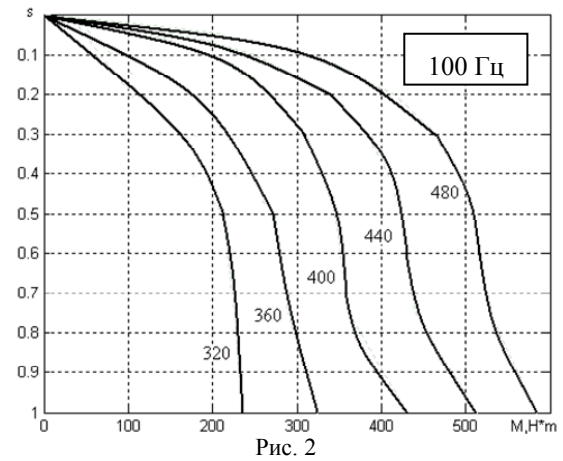


Рис. 2

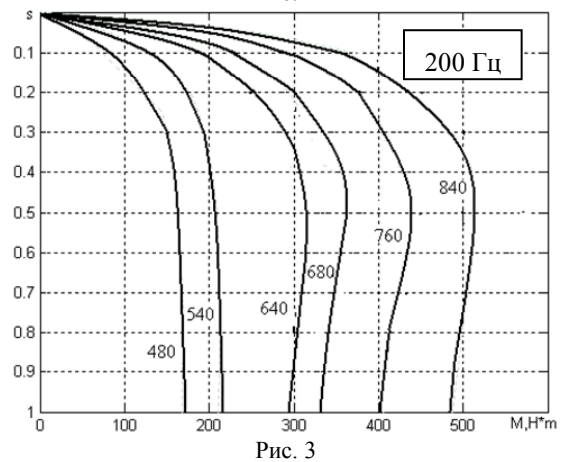


Рис. 3

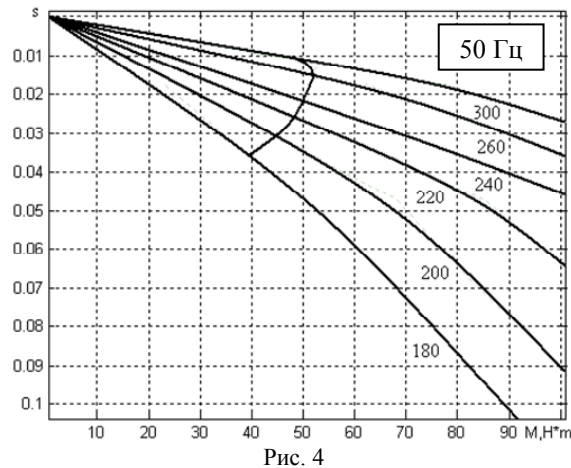


Рис. 4

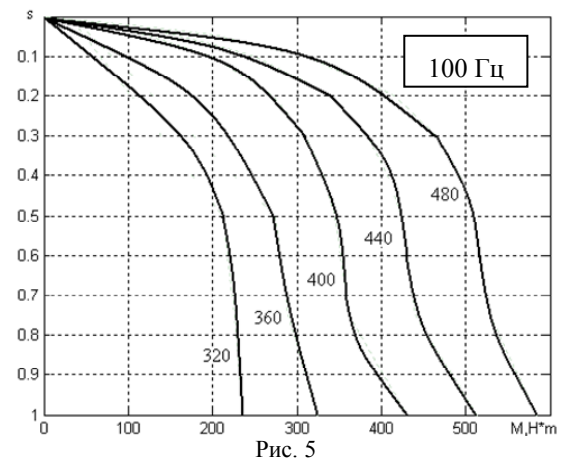


Рис. 5

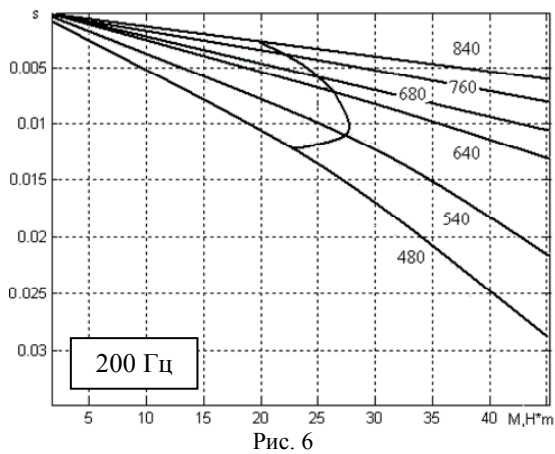


Рис. 6

ВИСНОВОК

1. Розроблена математична модель та алгоритм розрахунку характеристик АД з МФР в квазітривимірній постановці задачі дослідження електромагнітного поля машини забезпечують:

- достатню для інженерних розрахунків точність (розбіжності між результатами фізичного та математичного експерименту з корегованими по додатковим втратам знаходиться в межах 5%);
- ефективне використання часових ресурсів обчислювальної техніки;
- можливість дослідження режимів роботи в широкій межі варіювання напругою та частотою живлення, завдяки базуванню на результати моделювання електромагнітного поля без використання емпіричних залежностей.

2. Дослідження величини допустимого за перегрівом моменту АД з МФР при варіюванні напругою та частотою живлення показало:

- можливість визначення потрібного, за заданими критеріями, закону зміни відношення U/f ;
- зменшення відношення U/f , збільшення жорсткості механічних характеристик, збільшення енергетичних показників, незначну зміну добротності пуску при збільшенні частоти живлення.

3. Практичне використання АД з МФР при $f=50$ Гц обмежено величиною додаткових втрат, малою жорсткістю механічної характеристики і низькими енергетичними показниками. Коефіцієнт використання габаритної потужності складає 35%.

4. При збільшенні частоти живлення розрахункова енергоефективність АД з МФР (при застосованому алгоритмі визначення додаткових втрат) суттєво підвищується. Так, при $f=200$ Гц енергетичні показники і допустима потужність співрозмірні з показниками базового серійного двигуна. Завдяки даним властивостям, можливо практичне використання АД з МФР для приводу механізмів, що потребують збільшення частоти обертання при сталій потужності і в випадку обмеженості застосування шихтованого ротора при більших обертах внаслідок механічних обмежень (наприклад, в АД приводу занурених насосів).

5. Перспективи практичного використання АД з МФР на підвищену частоту живлення обумовлюють потребу ретельних досліджень в напрямку зменшення

додаткових втрат і застосування АД із різновидами МФР.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Бойко Е.П., Гаинцев Ю.М. Асинхронные двигатели общего назначения. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
- [2] Куцевалов В.М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами. - М.: Энергия, 1979. - 160 с.
- [3] Могильников В.С., Олейников А.М., Стрельников А.Н. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение. – М.: Энергоатомиздат. 1983.-120 с.
- [4] Лищенко А.И., Лесник В.А. Экспериментальное исследование рабочих и пусковых характеристик асинхронных двигателей с массивным ферромагнитным ротором. Препринт-436 ИЭД АН УССР, Киев, 1995. 31 с.
- [5] Попович О.М., Головань І.В. Математична модель для розрахунку пускових характеристик асинхронного двигуна з урахуванням еквівалентних контурів втрат в сталі статора і ротора. // Міжнародний симпозиум "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів". Електротехніка і електромеханіка. 2006, №1, С. 42-46.
- [6] Попович О.М., Головань І.В. Алгоритм розрахунку параметрів магнітного поля асинхронних двигунів з масивними ферромагнітними елементами в роторі. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. 2006, ч.3, С. 55-58.
- [7] Попович О.М., Головань І.В. Врахування джерела живлення при визначенні втрат в сталі асинхронних двигунів. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КПДУ. - Кременчук: КПДУ, 2005.- Вип.4 / 2005(33) - С. 150-152.

Надійшла 18.09.2006