

DOI: 10.31319/2519-2884.45.2024.15

УДК 621.313.333

Загребасєв М.С., здобувач третього (доктор філософії) рівня,
e-mail: mihail19091997zagrebaev@gmail.com

Звонецький М. С., здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: mzv2@ukr.net

Рязанцев О.В., к.ф.-м.н., доцент, ORCID: 0000-0002-7253-5966 e-mail: oryazancev@dstu.dp.ua

С'янов О.М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-4120-4926, e-mail: alexandr.sianov@gmail.com
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Zahrebaiev Mykhailo, Postgraduate student, Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Zvonetskiy Mykhailo, Postgraduate student, Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Ryazantsev Oleg, Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Department of Electronics and Electronic Communications

Sianov Oleksandr, Doctor of Science, Professor, Department of Electronics and Electronic Communications, Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНУТОЮ КЛІТКОЮ НА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

У роботі розглянуто електромагнітні параметри асинхронного двигуна (АД) з короткозамкнутою кліткою загальнопромислового застосування 4AA63A4U3 з метою їх використання в математичних моделях при дослідженні перехідних процесів у електроприводі. Метою роботи є дослідження перехідних характеристик АД на основі електромагнітних параметрів схем заміщення. На основі порівняльного аналізу електромагнітних параметрів, наведених у довідковій літературі, та розрахованих у програмі ANSYS Maxwell в пакеті RMXprt, встановлено, що активний опір обмотки статора співпадає з довідковим значенням, індуктивність на 21 % менше, індуктивність взаємодукції на 2,6 % більше, приведений активний опір ротора на 48,3 % менше, приведені значення індуктивності розсіювання на 37,8 % менше. Використання отриманих електромагнітних параметрів АД у електросхемній математичній моделі показало, що параметри, визначені у пакеті RMXprt, дають більш точні результати розрахунків перехідних характеристик порівняно з довідковими даними.

Ключові слова: асинхронний двигун з короткозамкнутою кліткою; схема заміщення; електромагнітні параметри; перехідні процеси; експериментальні дослідження.

The paper considers the electromagnetic parameters of an asynchronous motor (AM) with a short-circuited rotor of general industrial application 4AA63A4U3 for their mathematical models when investigating transient processes in electric drives. The purpose of the work is to study the transient characteristics of AD based on the electromagnetic parameters of substitution schemes. On the basis of a comparative analysis of the electromagnetic parameters given in the reference literature and calculated in the ANSYS Maxwell program in the RMXprt package, it was established that the active resistance of the stator winding coincides with the reference value, the inductance is 21 % less, the mutual inductance is 2,6 % more, given the active resistance of the rotor is 48,3 % less, the reduced value of the dissipation inductance is 37,8 % less. The use of the received electromagnetic parameters of AD in the schematic mathematical model showed that the parameters defined in the RMXprt package give more accurate results of calculations of transient characteristics compared to the reference data.

Keywords: asynchronous motor with squirrel-cage rotor; equivalent circuit; electromagnetic parameters; transient processes; experimental research.

Постановка проблеми

Асинхронні двигуни (АД) широко використовуються у всіх сферах промисловості завдяки їх простій конструкції та мінімальним затратам при експлуатації. АД споживають приблизно 65 % від загального обсягу електроенергії, що використовується підприємствами. Але АД має також і недоліки такі як: чутливість до напруги живлення, велике значення струму в перехідних процесах таких як пуск, реверс, гальмування та повторне включення. При пуску струм може перевищувати номінальний у 5—8 разів і триватиме кілька секунд. В момент пуску двигун має низький коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності. Швидкість обертання валу двигуна залежить від частоти мережі живлення та від кількості полюсів обмоток статора. Вищевказані недоліки залежать від електромагнітних параметрів АД, які розраховуються на етапі проектування та досліджуються експериментально.

Аналіз основних досліджень та публікацій

Визначення характеристик та електромагнітних параметрів АД здійснюється на етапі проектування асинхронних машин та експериментальних досліджень. Найбільш відомою методикою проектування є робота [1], в якій метод проектування АД серії 4А базується на великій кількості графічних експериментально визначених залежностей, по яким визначаються основні електромагнітні показники. В ході проектування визначаються електромагнітні параметри по Г-образній схемі заміщення. Також в цій роботі розглянуто алгоритм визначення електромагнітних параметрів ротора по шарам паза ротора, що підвищує точність визначення характеристик АД.

Методики проектування [2, 3] повністю ґрунтуються на роботі [1] та повторюють її.

У роботі [4] розглянуто проектування АД та їх перерахунок після ремонтно-відновлювальних роботах. Наведено додаткові дані з компонування та конструкції машин загальнопромислового та вибухозахищеного виконання.

На сьогоднішній день проектування АД неможливо без використання комп'ютерної техніки та програмного забезпечення це дало змогу підвищити швидкість проектування АД різної конструкції та врахувати нестандартні умови використання.

Сучасні методи проектування [5] розробляються з метою використання не лише для перевірочних розрахунків АД загального призначення, але й для проектування АД різної конструкції. При цьому використовується діалоговий метод взаємодії з персональним комп'ютером при проектуванні та визначаються нелінійні електромагнітні параметри в залежності від ковзання.

Застосування новітніх підходів розрахунків заснованих на рішенні рівнянь Максвела чисельним методом скінченних елементів дає можливість визначати нелінійні електромагнітні параметри в залежності від ковзання. Так у роботі [6] виконано визначення параметрів по результатам розрахунку розподілу поля в площині АД, що дало можливість визначити опір взаємодування, обмотки статора та ротора.

Розрахунок електромагнітних параметрів виконується не тільки на етапі проектуванні а також при експериментальних дослідженнях. Так в роботі [7] показано визначення електромагнітних параметрів АД з масивними феромагнітними елементами. В таких АД електромагнітні параметри АД є нелінійні в залежності від ковзання.

У роботі [8] розглянуті методи визначення електромагнітних параметрів по результатам експериментальних досліджень. Автори пропонують визначати електромагнітні параметри по результатам перехідних процесів при яких проводяться натурні вимірювання фазних струмів, напруги та швидкості. Потім виконується пошук параметрів схеми заміщення.

У роботі [9] показано взаємозв'язок теоретичних та експериментальних досліджень електромагнітних параметрів АД з індукційними опорами. Показано вплив електромагнітних параметрів індукційних опор на характеристики АД. Електромагнітні параметри індукційних опор нелінійні та залежать від частоти струму в роторі.

З аналізу результатів попередніх досліджень електромагнітних параметрів можна зробити висновок, що на сьогоднішній час дослідники приділяють найбільшу увагу визначення нелінійних електромагнітних параметрів. Це пов'язано з оптимізацією конструкції та врахування в розрахунках масивних феромагнітних елементів конструкції. Але найбільше використання набули постійні електромагнітні параметри в розрахунках, тому уточнення значень параметрів є актуальним.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження перехідних процесів АД на основі електромагнітних параметрів схем заміщення.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом дослідження було обрано асинхронний двигун серії 4А типу 4АА63А4У3 [10], технічні характеристики якого наведені в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Технічні характеристики та електромагнітні параметри асинхронного двигуна типу 4АА63А4У3

Типорозмір електродвигуна	$P_{нв}$ кВт	$\eta_{нв}$ %	$\cos\varphi_n$	X_{μ}	R'_{01}	X'_{01}	R''_{02}	X''_{02}	R''_{2n}
4АА63А4У3	0,25	68	0,65	1,4	0,15	0,082	0,14	0,17	0,14

Таблиця 2. Геометричні параметри та дані обмоток двигуна

Типорозмір електродвигуна	2р	$U_{лн}$ В	D_{a1}/D_{i1} мм/мм	l_1 мм	δ мм	Z_1/Z_2	S_n	n/a	d/d''	$k_{об}$	l_{ω} мм	r_1 Ом	a_k/b_k мм/мм	Скос пазів, мм
4АА63А4У3	4	380	100/61	56	0,25	24/18	169	1/1	0,38/0,42	0,966	272	29	4,5/11,8	8,0

Двигун має одношарову концентричну обмотку схема якої наведена на рис. 1.

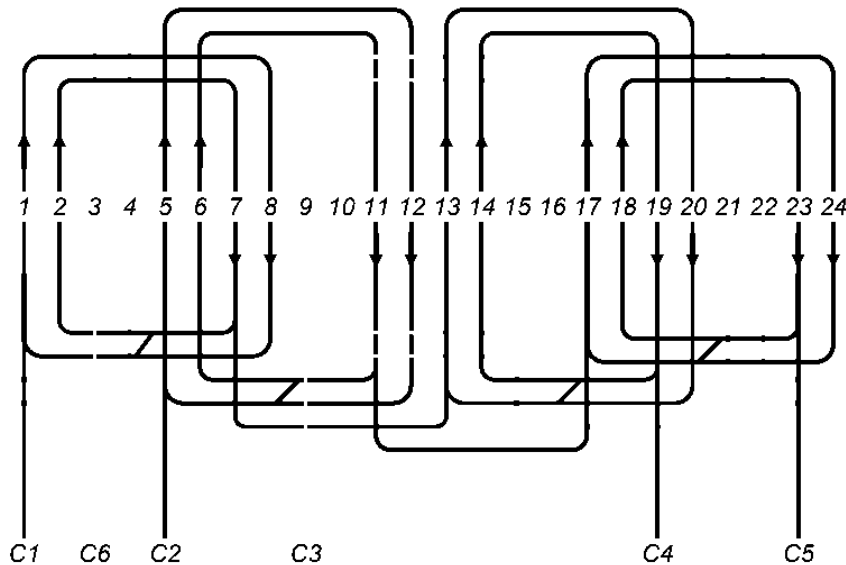


Рис. 1. Схема одношарової концентричної обмотки при $Z=24$, $2p=4$

З табл. 1 видно що електромагнітні параметри АД (X_{μ} , R'_{01} , X'_{01} , R''_{02} , X''_{02}) визначені при номінальному навантаженні, наведені у відносних одиницях та (R'_{02} , X'_{02}) активний опір короткозамкнутої клітки ротора, та індуктивний опір розсіювання приведені до обмотки статора. Електромагнітні параметри визначені для «Г» подібної схеми заміщення. Відповідність параметрів еквівалентних схем однорідних серій така, що перехід від «Г»-подібної до «Т»-подібної еквівалентної схеми не призводить до помітних похибок. Тому для практичних розрахунків цілком припустимо вважати, що параметри співпадають.

Визначимо електромагнітні параметри в реальних одиницях для цього розрахуємо номінальне значення струму статора АД без урахування механічних втрат [9]

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{3 \cdot U_{н.ф.} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n},$$

де $U_{н.ф.}$ — фазне значення напруги.

Активний опір обмотки статора АД знаходимо по формулі

$$R_{01} = \frac{R_{01}' \cdot U_{н.ф.}}{I_n}.$$

Активний опір обмотки ротора АД, при номінальному режимі роботи:

$$R_{02}' = \frac{R_{02}'' \cdot U_{н.ф.}}{I_n}.$$

Для режиму короткого замикання:

$$R_{02}' = \frac{R_{2n}'' \cdot U_{н.ф.}}{I_n}.$$

Індуктивності розсіювання обмоток статора та ротора АД при номінальному режимі роботи визначаємо по формулам

$$L_{01}' = \frac{X_{01}' \cdot U_{н.ф.}}{2\pi \cdot f_n \cdot I_n};$$

$$L_{02}' = \frac{X_{02}'' \cdot U_{н.ф.}}{2\pi \cdot f_n \cdot I_n}.$$

Індуктивність взаємоіндукції:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu} \cdot U_{н.ф.}}{2\pi \cdot f_n \cdot I_n}.$$

Результати розрахунків електромагнітних параметрів АД в реальних одиницях при номінальному режимі роботи типорозміру 4АА63А4У3 (табл. 1), зведені у табл. 3.

Таблиця 3. Розраховані електромагнітні параметри АД при номінальному режимі роботи та короткому замиканні

Типорозмір електродвигуна	R_{01} , Ом	L_{01} , Гн	L_{μ} , Гн	L'_{02} , Гн	R'_{02} , Ом	R''_{2n} , Ом	I_n , А	M_n , Нм
4АА63А4У3	38,5	0,067	1,14	0,14	35,98	38,52	0,856	1,73

Розраховані електромагнітні параметри АД визначені по довідниковій літературі та широко використовуються при розрахунку перехідних процесів в електроприводі.

В останні роки набули розвитку діалогові програми проектування АД. Одна з найбільш відомих є пакет програм Ansys, який відкритий для використання здобувачами освіти. Пакет Ansys включає три програмні продукти, що дозволяють моделювати різні типи електричних машин у системах електроприводу: Maxwell 2D/3D, Simplorer, RMXprt, також можливе їх одночасне використання. Maxwell 2D/3D — це програмне забезпечення для моделювання електромагнітних полів, яке дозволяє аналізувати та проектувати різноманітні електромагнітні системи у тривимірному і двовимірному просторі. Simplorer — це інтегроване середовище для моделювання та аналізу систем електроприводу та електромагнітних полів, яке надає можливість створення комплексних моделей для розробки схемних моделей електричних систем. Середовище Simplorer має інструменти для моделювання електричних, механічних та термічних процесів у реальному часі, які дозволяють підвищити надійність систем. Програма RMXprt дозволяє здійс-

нювати інженерні розрахунки електричних машин на основі теорії електричних схем. RMxprt підтримує широкий спектр типів електричних машин: трифазні та однофазні АД, синхронні двигуни і генератори, двигуни постійного струму тощо. Для створення моделей в даній статі використовуються програмні засоби Simplorer та RMxprt.

При виконанні перевірного розрахунку АД 4AA63A4Y3 враховані: номінальна напруга, кількість полюсів, марка сталі осердя, внутрішній і зовнішній діаметр виточки статора, довжина осердя, кількість пазів на статорі та роторі, форма пазів і їх розміри, тип обмотки, кількість елементарних провідників в пазі та їх діаметри і т.п. В результаті внесення необхідних даних в програму створено поперечний переріз АД (рис.2,а) та розподіл обмотки по пазам статора (рис.2,б).

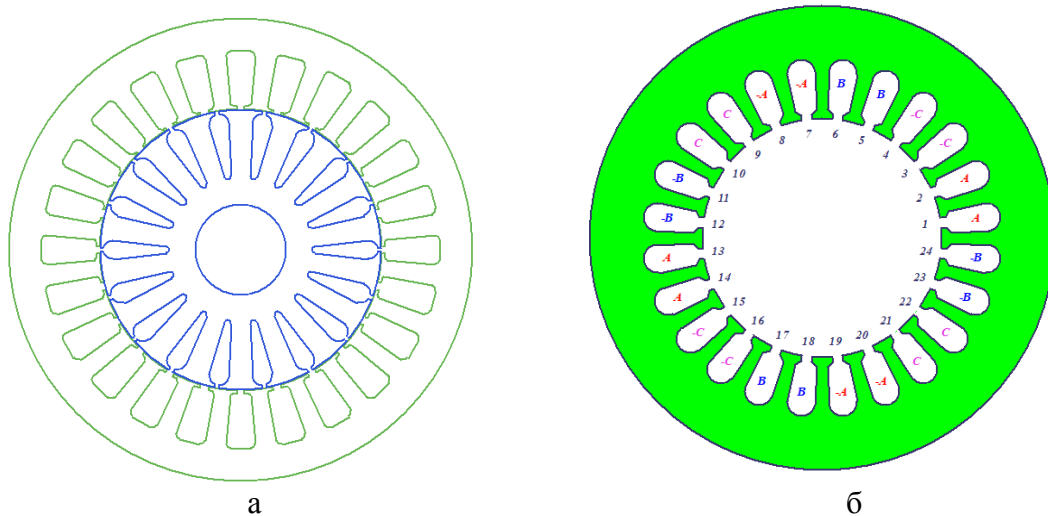


Рис. 2. Модель спроектованого за довідниковими даними двигуна типорозміру 4AA63A4Y3 у середовищі Maxwell RMxprt

У табл. 4 представлені розраховані електромагнітні параметри АД при номінальному навантаженні. При порівнянні табл. 1 з табл. 3 видно активний опір повністю співпадає з довідковим значенням. Індуктивність розсіювання обмотки статора розрахована в середовищі Maxwell RMxprt менше на 21 %, індуктивність взаємодукції більше на 2,6 %, приведена індуктивність розсіювання обмотки ротора на 37,8 % менше та приведений активний опір короткозамкнутої клітки менше на 48,3 % при однакових значеннях номінального струму та моменту.

Таблиця 4. Електромагнітні параметри АД розраховані в середовищі Maxwell RMxprt

Типорозмір електродвигуна	R_{01} , Ом	L_{01} , Гн	L_{μ} , Гн	L'_{02} , Гн	R'_{02} , Ом	I_n , А	M_n , Нм
4AA63A4Y3	38,5	0,053	1,17	0,087	18,6	0,856	1,73

Для розрахунку перехідних процесів в АД скористаймося математичною моделлю у вигляді електричної принципової схеми [9, 11]. На таку модель накладається ряд припущень:

- відсутність насичення магнітної ланки;
- відсутність гістерезису;
- синусоїдальний розподіл у просторі кривих МДС та магнітних індукцій;
- незалежність індуктивних опорів розсіювання від положення ротора;
- повна симетрія обмоток статора.

У цьому випадку модель АД в реальних координатах у формі матричного запису має вигляд [9,11]:

$$\left. \begin{aligned} [u] &= [R][i] + [L(\gamma)] \frac{d[i]}{dt} + [G(\gamma)] \frac{d\gamma}{dt} p[i] \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{m - M_c}{J}; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_2; \end{aligned} \right\},$$

де $[u]$ — матриця напруги статора та ротора; $[R]$ — матриця активних опорів; $[i]$ — матриця струмів; $[L(\gamma)]$ — матриця індуктивностей в залежності від кута повороту ротора; $[G(\gamma)]$ — матриця похідних від матриці $[L(\gamma)]$; p — кількість пар полюсів; ω_2 — кутова швидкість обертання ротора; m — електромагнітний момент двигуна визначається як частинна похідна за геометричним кутом повороту ротора від загального запасу електромагнітної енергії

$$m = \frac{\partial W_{em}}{\partial \gamma};$$

M_c — момент статичного навантаження АД; J — момент інерції АД.

Для реалізації цієї моделі було використано середовище Ansys Maxwell та Ansys Simploter. У середовищі Simploter існують спеціальні програмні модулі які дозволяють виконати розробку схеми для дослідження перехідних процесів. В результаті була створена електрична схема (рис. 3) з можливістю пуску АД, відключення двигуна від мережі на час перемикавання контакторів, та підключення двигуна до мережі зі зміною фаз (реверс), та накидом номінального навантаження.

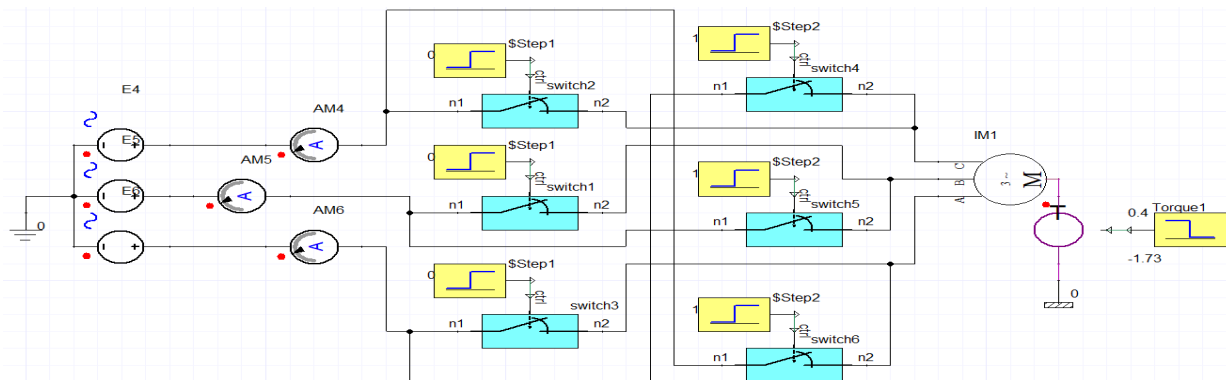


Рис. 3. Електрична схема для моделювання перехідних процесів в АД

Алгоритм роботи схеми (рис. 3) наступний: три однофазних синусоїдальних генератора з'єднані "зіркою" з середньою точкою із встановленим зсувом фаз відносно один одного на 120° . Таким чином, сформовано трифазну мережу живлення для трифазного АД. Синусоїдальна напруга, що генерується, через амперметри подається на 3 електричних ключів (switch1, switch2, switch3) одночасно для пуску АД. Кожен з ключів керується відповідним лічильником-генератором (Step1). Перші три ключі спрацьовують одночасно і працюють до заданого часу, при цьому ротор двигуна обертається в певному напрямку відповідно до фаз живлення. Як тільки швидкість обертання досягає номінального значення при холостому ході (XX), лічильники—генератори (Step1) генерують логічний "0", і відповідні силові ключі відмикаються. Після цього формується час паузи при якій АД відключений від мережі (10 мс). Після закінчення паузи спрацьовують наступні три лічильники (Step2), генеруючи на виході логічну "1", і керувані ними електричні ключі (switch4, switch5, switch6) замикаються, пропускаючи через себе трифазну напругу в обмотки асинхронного двигуна, але зі зміною двох фаз. В цьому випадку АД працює в реверсному режимі з навантаженням холостого ходу. Для моделювання накиду номінального навантаження включається блок Torque1 який навантажує двигун номінальним обертаючим моментом.

Таким чином, у схему вбудований алгоритм пуску, паузи, реверсу та накиду навантаження. Крім того, у схемі встановлені вимірювальні прилади, такі як амперметри та вольтметри, для подальшого зняття даних і виведення результатів. В результаті проведеного моделювання та експериментальних досліджень отримані залежності струму, кутової швидкості обертання ротора, моменту від часу та зображені на рис. 4 та рис. 5. Суцільними лініями показані розраховані залежності, а пунктирними лініями експериментально отримані огинальні струму та кутова частота обертання ротора. Для експериментальних досліджень використовувався осцилограф Hantek 6254BC, з записом струму та швидкості обертання ротора в залежності від часу.

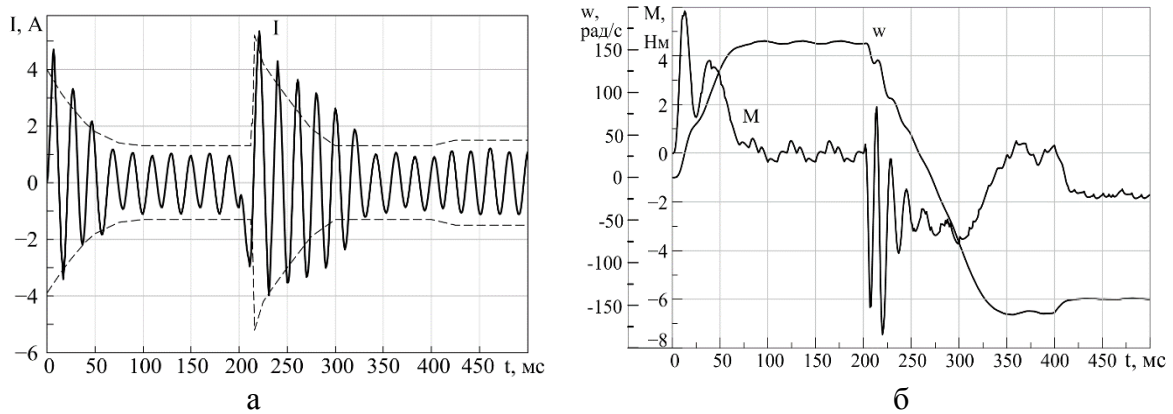


Рис. 4. Залежності струму (а), електромагнітного обертаючого моменту та кутової частоти обертання (б) та експериментально отриманими огинальними (пунктирні лінії) в залежності від часу в АД при використанні електромагнітних параметрів за даним довідника [10]

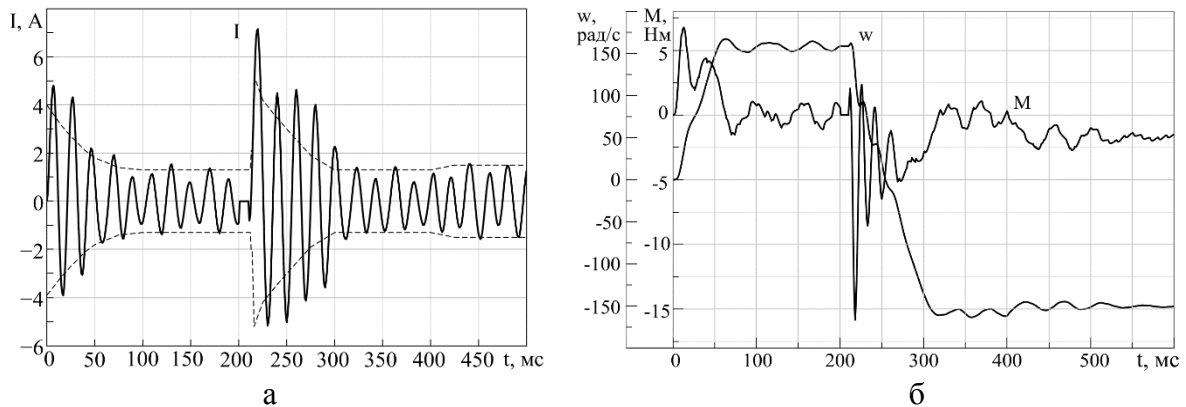


Рис. 5. Залежності струму (а), електромагнітного обертаючого моменту та кутової частоти обертання (б) та експериментально отриманими огинальними (пунктирні лінії) в залежності від часу в АД при використанні електромагнітних параметрів отриманих у середовищі Ansys Maxwell

При порівнянні залежностей струму отриманих з використанням електромагнітних параметрів з довідникових даних [10] від часу (рис. 4) встановлено, що максимальне амплітудне значення струму в момент пуску становить 4,7 А, тривалість пуску складає 100 мс, після паузи при реверсі максимальне значення струму складає 5,3 А, тривалість реверсу після паузи 10 мс становить 115 мс. Холостий хід складає 100 мс, при цьому амплітуда струму складає 1А. При

накиді номінального навантаження амплітуда струму складає 1,2А. При цьому кутова швидкість ротора зменшилась на 10,7 %.

При порівнянні з експериментально отриманою огинальною струму (рис. 4) видно що пікове значення амплітуди струму менше на 15,2 %, тривалість пуску менше на 16,67 %. Амплітудне значення струму холостого ходу більше на 16,6 %. При реверсі огинальна амплітуди струму менше на 17,5 %. При накиді навантаження амплітудне значення струму більше на 17,2 %. Тривалість пуску при експериментальних дослідженнях складала 50 мс і це менше в порівнянні з розрахованим (150 мс) на 66 %.

Виконуючи порівняння залежностей струму отриманих при використанні електромагнітних параметрів отриманих засобами математичного моделювання RМхprt встановлено (рис. 5), що максимальне амплітудне значення струму в момент пуску становить 4,8А що перевищує експериментальні дані (4 А) на 16,6 %. Тривалість пуску моделі АД складає 80 мс. Експериментальні значення струму в режимі холостого ходу практично співпадають. В режимі реверсу амплітуда складає 7,1 А, що перевищує експериментально отримане (5,2А) на 26 %. Тривалість реверсу співпадає з експериментальними. При накиді навантаження експериментальні значення струму практично співпадають з розрахунковими.

Виконане порівняння результатів за довідниковим і розрахунковим методами з експериментально отриманими показує, що використання програмного засобу RМхprt дає можливість підвищити точність розрахунків. Так, практично повністю співпадає амплітуда струму з експериментально отриманим значенням в режимі холостого ходу та при номінальному навантаженні, а також співпадає тривалість пуску та реверсу.

Висновки

Моделі, засновані на розрахунках у RМхprt, при використанні у режимі холостого ходу та номінального навантаження, показали, що амплітуди струму практично повністю збіглися з експериментальними даними. Отримані результати пускового струму свідчать, що прийняті припущення при створенні моделі дають відхилення амплітудних значень струму під час пуску та розгону АД від експериментальних значень на 16,6%. Для отримання більш точних результатів перехідних процесів необхідно використовувати нелінійні електромагнітні параметри в залежності від ковзання.

Список використаної літератури

1. Ryszard Palka, Marcin Wardach. Design and Application of Electrical Machines: Textbook. Mdpi AG, 2022. 352 p.
2. Mittle V.N., Arvind Mittal. Design Of Electrical Machines. Standard Publishers Distributors. 2009. 752 p.
3. Міліх В.І. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкнутою обмоткою ротора: *навч. посібник [для студ. електротехн. спеціальностей]*. Харків : НТУ «ХП», 2009. 99 с.
4. Проектування електричних машин: *навч. посіб.* / Д. Ципленков та ін. Д. : Нац. техн. ун-т «Дніпр. політехніка», 2020. 408 с.
5. Вербовий А.П., Вербовий П.Ф., С'янов О.М. Проектування асинхронних двигунів: *монографія*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 528 с.
6. Железняков А. Визначення електромагнітних параметрів асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором за результатами чисельних досліджень його електромагнітних полів та процесів. *АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНІКА, ЗВ'ЯЗОК*. Збірник наукових праць ДОНИЖТ. 2022. № 67. С. 4–10.
7. Вербовий П.Ф. Експериментальне визначення параметрів асинхронних короткозамкнутих двигунів. *Техн. електродинаміка*. 1983. № 1. С. 79–85.
8. Бешта О.С., Балахонцев О.В., Михайленко О.В Федорейко В.С., Худолій С.С., Худий Є.Г. Ідентифікація параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна в пакетному режимі// *Діагностика в електромеханических системах* Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2007. С. 472–475.

9. Качура О.В., Количев С.В., С'янов О.М. Індукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: *монографія*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 209 с.
10. Електродвигуни серії АІР, 4А, АО, ВАО, ВР, АІМ поставка, ремонт, опис та довідникові данні. Укрнасоссервіс [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ukr-nasos.com.ua/ru/uslugi/elektrodvigatelya-seriy-air-4a-ao-prodazha-remont-opisanie-i-obmotochnyie-dannyye.html>
11. Вербовий П.Ф., Заболотний А.П., С'янов О.М. Асинхронні двигуни для тиристорного електроприводу: *монографія*. Київ : Наукова думка, 1994. 244 с.

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A SHORT-CIRCUITED CAGE ON TRANSIENT PROCESSES

Abstract

The article discusses the electromagnetic parameters of an asynchronous motor (AD) with a short-circuited cage of general industrial application for the study of transient processes in an electric drive. The main purpose of the study is to determine the transient characteristics of AD by comparing parameters with reference data and calculations in the ANSYS Maxwell RMXprt program. The parameters defined in the program were found to provide more accurate results for transients.

The comparative analysis showed that the active resistance of the stator winding coincides with the reference value, while the inductance is 21 % lower and the mutual inductance is 26 % higher. The use of these parameters in the mathematical model of AD made it possible to obtain more accurate results in comparison with traditional reference values, which contributes to a better understanding of transient processes.

The obtained results emphasize the importance of using modern tools, such as ANSYS Maxwell RMXprt, in the study of electromagnetic parameters to increase the accuracy of modeling transient processes in AD, which is relevant for optimizing their designs and operational characteristics.

References

- [1] Ryszard Palka, Marcin Wardach. (2022). Design and Application of Electrical Machines: Textbook. Mdpi AG. 352 p.
- [2] Mittle V.N., Arvind Mittal. (2009). Design Of Electrical Machines. Standard Publishers Distributors. 752 p.
- [3] Milykh V.I. (2009) Proektuvannia tryfaznykh asynkhronnykh dvyhuniv z korotkozamknenoiu obmotkoiu rotora [Design of three-phase asynchronous motors with a short-circuited rotor winding]. *Study guide*. Kharkiv : NTU «KhPI». 99 p. [in Ukrainian].
- [4] D. Tsyplenkov and others. (2020) Proiektuvannia elektrychnykh mashyn [Designing electric machines]. *Study guide*. D. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet "Dniprovska politekhnika". 408 p. [in Ukrainian].
- [5] Verbovyi A.P., Verbovyi P.F., Sianov O.M. (2013). Proektuvannia asynkhronnykh dvyhuniv: monohrafiia [Design of asynchronous motors: monograph]. Dniprodzerzhynsk: DDTU, 528 p. [in Ukrainian].
- [6] Zhelezniakov A. (2022). Vyznachennia elektromahnitnykh parametriv asynkhronnoho dvyhuna z korotkozamknutym rotorom za rezultatatmy chyselnykh doslidzhen yoho elektromahnitnykh poliv ta protsesiv [Determination of electromagnetic parameters of an asynchronous motor with a short-circuited rotor based on the results of numerical studies of its electromagnetic fields and processes]. *AVTOMATYKA, TELEMEKHANIKA, ZVIAZOK*. Zbirnyk naukovykh prats DO-NYZhT. № 67. P. 4–10 [in Ukrainian].
- [7] Verbovyi P.F. (1983). Eksperymentalne vyznachennia parametriv asynkhronnykh korotkozamknutykh dvyhuniv [Experimental determination of parameters of asynchronous short-circuit motors]. *Tekhnichna elektrodynamika*. № 1. P. 79–85. [in Ukrainian].

- [8] Beshta O.S., Balakhontsev O.V., Mykhailenko O.V Fedoreiko V.S., Khudolii S.S., Khudyi Ye.H. (2007). Identyfikatsiia parametriv skhemy zamishchennia asynkhronnoho dvyhuna v paketnomu rezhymi [Identification of the parameters of the asynchronous motor replacement scheme in batch mode]. *Dyagnostyka v elektromekhanicheskyykh systemakh* Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychiy universytet. P. 472–475 [in Ukrainian].
- [9] Kachura O.V., Kolychev S.V., Sianov O.M. (2011). Induktsiini reostaty z pokrashchenymy masohabarytnymy pokaznykamy dlia asynkhronnykh dvyhuniv z faznym rotorom: monohrafiia [Induction rheostats with improved mass-dimensional indicators for asynchronous motors with a phase rotor: monograph]. Dniprodzerzhynsk: DDTU. 209 p. [in Ukrainian].
- [10] Elektrodyhuny serii AYR, 4A, AO, VAO, VR, AYM postavka, remont, opys ta dovidnykovi danni. Ukrnasoservis. [Electric motors of the AIR, 4A, AO, VAO, VR, AIM series supply, repair, description and reference data. Ukrnasoservice]. *ukr-nasos.com.ua*. Retrieved from <https://ukr-nasos.com.ua/ru/uslugi/elektrodvigatelya-seriy-air-4a-ao-prodazha-remont-opisanie-i-obmotochnyye-dannyye.html> [in Ukrainian]
- [11] Verbovyi P.F., Zabolotnyi A.P., Sianov O.M. (1994). Asynkhronni dvyhuny dlia tyristornoho elektropryvodu: monohrafiia [Asynchronous motors for thyristor electric drive: monograph]. Kyiv: Naukova dumka. 244 p. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 16.09.2024