

Н. Д. Красношарпа¹
 М. В. Пушкар¹
 Р. А. Крикун¹

ВПЛИВ НАСИЧЕННЯ МАГНІТОПРОВОДУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З МАСИВНИМИ ТОРЦЕВИМИ ФЕРОМАГНІТНИМИ ЕКРАНАМИ НА АНАЛІЗ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

¹Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Асинхронні електроприводи широко застосовуються в різних галузях промисловості. Більшість таких приводів є нерегульованими. Їхнім основним недоліком є невеликий пусковий момент за високих пускових струмів. У нерегульованих асинхронних електроприводах для зменшення значення пускового струму зі збільшенням значення крутного моменту можливе використання асинхронних двигунів з масивними лицьовими феромагнітними екранами елементів за межами робочого повітряного зазору. За відповідного вибору геометрії екрана в таких асинхронних двигунах можна сформуванати механічну характеристику типу «екскаватор». Це дозволяє отримати пусковий крутний момент моменту двигуна з величиною, близькою до максимуму, що одночасно обмежує значення пускового струму. Обмеження значень пускових струмів при збільшенні величини крутного моменту асинхронного двигуна з масивними лицьовими феромагнітними екранами елементів обертового контуру за межами робочого повітряного зазору покращує динамічні властивості електропривода і зменшує втрати енергії в пускових режимах.

Однак наявність феромагнітних екранів призводить до додаткових втрат у стаціонарних робочих режимах за рахунок збільшення активного опору уповільнених стержнів обмотки ротора та електромагнітних ефектів самих екранів. Використання таких двигунів доцільне в електроприводах, які працюють з частковими запусками, коли зменшення втрати енергії в режимі пуску перевищує додаткові втрати при роботі на постійній швидкості.

Параметри роторного контуру такого двигуна залежать від струму та ротора, а для їх розрахунку використовується ітераційна процедура. В режимах запуску струми асинхронного двигуна значно перевищують номінальні значення, що приводить до зміни величини магнетизму магнітного контуру. Процедура одночасного визначення змінних двох різних контурів, які впливають один на один, досить складна.

Виконано порівняльний аналіз величин втрат з урахуванням насичення магнітної мережі машини та без неї. Розглянуто процеси за прямого запуску електропривода та з насиченням поточної величини за рахунок використання пристроїв з м'яким стартером. Результати дослідження порівнюються з аналогічними режимами роботи електропривода серійним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором тієї ж потужності.

Результати досліджень показали, що за таких умов вплив величин насичення на параметри пускових режимів зменшується, тому помилка в обчисленнях енергетичних індексів у разі нехтування цього параметра становить 7...8 %, що допустимо для інженерних розрахунків.

Ключові слова: електропривід, асинхронний двигун, масивний феромагнітний екран.

Вступ

Асинхронні електроприводи мають найбільше поширення в різних галузях промисловості, однак на сьогоднішній день більшість з них в Україні є нерегульованими. Головними недоліками таких електроприводів є невеликий пусковий момент за значних пускових струмів. В асинхронних електроприводах, які працюють з частими пусками, це призводить до поламак та скорочення терміну служби обладнання. Ця проблема повністю вирішується у разі застосування частотно-регульованих електроприводів, проте вони мають високу вартість і, за відсутності потреби в регулюванні

швидкості, часто їх використання виявляється економічно недоцільним. Для зниження величини пускових струмів в нерегульованих електроприводах також можуть застосовуватись пристрої плавного пуску, які обмежують струм під час пуску за рахунок зниження величини прикладеної напруги. Такі пристрої суттєво дешевші, ніж перетворювачі частоти, однак електромагнітний момент двигуна буде зменшуватись пропорційно квадрату напруги. Це призводить до затягування пускових режимів або взагалі унеможлиблює їх. Одним з можливих шляхів вирішення цієї проблеми є використання машин спеціальних конструкцій [1]. Сформувані механічну характеристику «екскаваторного типу» можна в асинхронному двигуні з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором (рис. 1) [2] за відповідного вибору геометрії екранів. На рис. 1 позначені: 1 — статорна обмотка, 2 — стрижень роторної обмотки, 3 — короткозамикаюче кільце, 4 — феромагнітні дискові екрани, 5 — магнітопровід ротора АД.

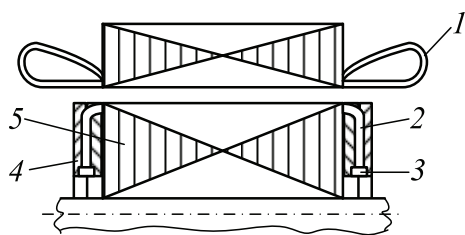


Рис. 1. Конструкція асинхронного двигуна з двосторонніми масивними торцевими екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором

печується більша величина динамічного моменту, ніж у випадку серійної машини, що покращує динамічні властивості електропривода.

Мета дослідження — оцінити вплив насичення магнітопроводу асинхронної машини з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором на визначення величини втрат в пускових режимах.

Результати дослідження

Складність аналізу процесу електромеханічного перетворення енергії в таких електричних машинах полягає в тому, що напруженість магнітного поля та магнітна проникність на внутрішніх поверхнях торцевих екранів змінюється в залежності від струму стрижнів ротора та розрахункового радіуса струмового шару. Тому для визначення еквівалентних активного і реактивного опорів, що враховують процеси в масивних екранах запропонована методика їх визначення, яка передбачає ітераційну процедуру [3]. На першому кроці задаються значення струму ротора за певного ковзання і нульових величин еквівалентних опорів з подальшим уточненням струму і визначенням значень опорів. Однак зміна величини струму ротора призводить до одночасної зміни струму намагнічування і, з насиченням магнітної системи, до зміни опору контуру намагнічування, що, в свою чергу, також впливає на величину струму ротора.

Використання двох взаємозалежних ітераційних процедур значно ускладнює аналіз процесів в такому двигуні. Розрахунки можуть бути спрощені, якщо знехтувати насиченням магнітної системи. З іншого боку, подовжені стрижні роторної обмотки та наявність екранів призводять до додаткових втрат енергії, в наслідок чого використання двигунів запропонованої конструкції доцільно лише в електроприводах, які працюють з частими пусками, коли зменшення втрат в пусковому режимі буде перевищувати додаткові втрати енергії. Тому аналіз втрат енергії в пускових режимах, коли може суттєво проявлятися вплив насичення магнітної системи, для електроприводів з модифікованими асинхронними двигунами певної конструкції потрібен для визначення доцільності їх використання.

Пускові режими асинхронних електроприводів характеризуються значними електричними втратами, які, окрім величини пускових струмів, залежать ще і від часу пуску: чим менша величина динамічного моменту електропривода в процесі пуску, тим тривалішим є пусковий режим і двигун більше часу працює з підвищеними величинами струмів, що супроводжується зростанням електричних втрат.

Для визначення ступеня впливу врахування насичення магнітної системи асинхронного двигуна на величину втрат в пусковому режимі проведено дослідження на математичній моделі для серійного

асинхронного двигуна 4A160S2Y3 потужністю 15 кВт та аналогічного модифікованого з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором [4]. Розміри масивних феромагнітних екранів вибирались за умови формування механічної характеристики двигуна «екскаваторного» типу відповідно до методики, викладеної в [3]: осьова довжина $l_0 = 0,033$ м і радіальна товщина $h = 0,015$ м. Механічні та електромеханічні характеристики цих двигунів показані на рис. 2, де $M1, M2$ — механічні характеристики серійного та модифікованого асинхронних двигунів, а $I1, I2$ — електромеханічні характеристики цих двигунів, відповідно.

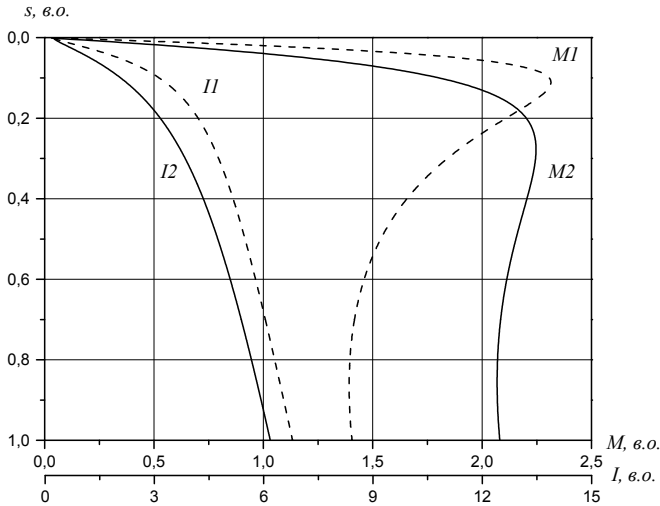


Рис. 2. Механічна та електромеханічна характеристики серійного асинхронного двигуна 4A160S2Y3 та модифікованого з двосторонніми масивними торцевими екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором

В процесі моделювання встановлено, що поєднання двох взаємозалежних ітераційних процедур потребує суттєвого зниження точності розрахунків кожного з параметрів. За нехтування насиченням магнітопроводу двигуна ітераційна процедура визначення еквівалентних внесених параметрів екранів тривала до розбіжності значень струму ротора 0,001 А, а за врахування насичення — лише 0,5 А. Аналогічна ситуація і з визначенням індуктивного опору намагнічування — в двигуні серійної конструкції розбіжність не перевищувала 0,001 Ом, а з розрахунком опорів екранів — 0,5 Ом (номінальна величина індуктивного опору намагнічування для цього двигуна 31 Ом).

Дослідження проводились для електроприводів з чотирикратним відносно двигуна сумарним моментом інерції з двома видами навантажень — вентиляторним та

постійним, рівним номінальному моменту двигуна. Визначались такі показники пускових режимів: час пуску та величини споживаних активної, реактивної та повної потужностей. Результати подані в таблиці: чисельник — з урахуванням насичення магнітопроводу, а знаменник — без урахування. Також проведені дослідження за використання пристроїв плавного пуску [5]. В розрахунках задавалось обмеження пускового струму на рівні чотирикратного номінального. Так як для серійного двигуна з постійним моментом на валу, рівним номінальному, такий пуск є ускладненим, то аналізувалися лише процеси з вентиляторним характером навантаження.

Аналіз пускових режимів асинхронних електроприводів з серійним двигуном 4A160S2Y3 та модифікованим з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру

Параметр	Постійний момент навантаження		Вентиляторний момент навантаження		Вентиляторний момент навантаження з обмеженням пускового струму	
	Модифікований АД	Серійний АД	Модифікований АД	Серійний АД	Модифікований АД	Серійний АД
Час пуску, с	1,22	2,13	0,87	1	1,3	2
	1,26	2,22	0,9	1,02	1,44	2,1
Активна енергія, Дж	5,9·10 ⁴	11,7·10 ⁴	4,1·10 ⁴	5,6·10 ⁴	4,1·10 ⁴	5,6·10 ⁴
	6,3·10 ⁴	12,2·10 ⁴	4,4·10 ⁴	7,5·10 ⁴	4,4·10 ⁴	5,7·10 ⁴
Реактивна енергія, Дж	6,8·10 ⁴	18,5·10 ⁴	4,3·10 ⁴	7,7·10 ⁴	4,4·10 ⁴	8,4·10 ⁴
	7,3·10 ⁴	19,4·10 ⁴	4,7·10 ⁴	8,7·10 ⁴	4,7·10 ⁴	8,7·10 ⁴
Повна енергія, Дж	9,1·10 ⁴	22·10 ⁴	6·10 ⁴	9,7·10 ⁴	6,1·10 ⁴	10,2·10 ⁴
	9,7·10 ⁴	23·10 ⁴	6,5·10 ⁴	12·10 ⁴	6,5·10 ⁴	10,5·10 ⁴

Висновки

Аналіз отриманих результатів показує, що врахування насичення магнітопроводу асинхронної машини суттєвіше впливає на точність розрахунків в дослідженні пускових режимів серійного асинхронного двигуна. Використовуючи модифіковану електричну машину з масивними торцевими феромагнітними екранами, завдяки більшому пусковому моменту з меншими значеннями струмів змен-

шується час пуску (тобто час роботи електричного двигуна зі збільшеними струмами) і втрати енергії. В такому електроприводі похибка аналізу пускових режимів за нехтування насиченням магнітопроводу не перевищує 7...8 %, що є достатнім для більшості інженерних розрахунків. Тому для електроприводів з асинхронним двигуном з масивними торцевими ферромагнітними екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором можна реалізовувати простіший алгоритм розрахунків з однією ітераційною процедурою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. А. Ставинский, и Р. А. Ставинский, *Короткозамкнутый ротор асинхронных двигателей с пониженной материалоемкостью и улучшенными пуско-регулирующими свойствами* [Online], Режим доступа: http://storage.library.opu.ua/online/periodic/ee_52/16.htm.
- [2] Н. Д. Красношапка, «Пускові режими асинхронних електроприводів з властивостями джерела моменту і з системами обмеження пускових струмів» автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи», Ін-т електродинаміки НАН України, Київ, 2006.
- [3] Н. Д. Красношапка, «Особенности определения параметров динамической модели асинхронного двигателя с ферромагнитными экранами частей короткозамкнутой роторной обмотки.» *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, Вип. Електротехніка, 1999, с. 98-104.
- [4] Н. Д. Красношапка, В. В. Тихонов, В. П. Захарченко, Т. А. Мазур, та О. М. Тачиніна, «Математична модель асинхронної машини з підвищеним пусковим моментом,» *Проблеми інформатизації та управління*, № 1 (37), с. 73-77, 2012.
- [5] Н. Д. Красношапка, «Управление динамическими режимами асинхронного электропривода с повышенным пусковым моментом,» *Проблеми інформатизації та управління*, № 1 (41), 2013, с. 44-49.

Рекомендовано кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.01.2018

Красношапка Наталія Дмитрівна — канд техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода, e-mail: n.krasnoshapka@gmail.com ;

Пушкар Микола Васильович — канд техн. наук, старший викладач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода;

Крикун Ростислав Анатолійович — студент факультету електроенергетики та автоматики.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

N. D. Krasnoshapka¹
M. V. Pushkar¹
R. A. Krykun¹

Influence of Magnetic Saturation of Induction Motor with Massive Ferromagnetic Shields on the Analysis of Electric Drive Startup Modes

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Asynchronous electric drives have become widely spread for different industrial applications, many of them are unregulated. Their main disadvantage is small starting torque at high starting currents.

In unregulated asynchronous electric drives to reduce the value of the starting current with an increase in the torque value, is possible with the use of asynchronous motors with massive face ferromagnetic screens of the elements of the rotary circuit outside the working air gap. With the appropriate choice of screen geometry in such asynchronous motors, it is possible to form a mechanical characteristic of the "excavator type". This allows obtaining the starting torque of the motor, with the value close to the maximum, while simultaneously limiting the value of starting current. Limiting the value of starting currents with increasing the magnitude of the torque of an asynchronous motor with massive face ferromagnetic screens of elements of the rotary circuit outside of the working air gap improves the dynamic properties of the electric drive and reduces energy loss in the starting modes.

However, the presence of ferromagnetic screens leads to additional losses in the steady-state operating modes due to an increase of the active resistance of the elongated rods of the rotor winding and the electromagnetic effects of the screens themselves. The use of such motors is expedient, in electric drives, which operate with frequent startups, when the reduction of energy losses in the starting mode exceeds additional losses at operation on the steady speed.

The parameters of the rotor circuit of such motor depend on slip and rotor current, and for their calculation, iterative procedure is used. In startup modes, the currents of the asynchronous motor significantly exceed the nominal values, which lead to a change in the value of magnetization of the magnetic circuit. The procedure for simultaneous

determination of variables of two different contours that affect each other is rather complicated.

The paper deals with a comparative analysis of the loss value, taking into account the saturation of the magnetic circuit of the machine and without it. The processes considered in the direct start of the electric drive and with the saturation of the current value due to the use of soft-starter devices. The results of the research are compared with the similar operation modes of the electric drive with serial asynchronous motor with squirrel-cage rotor of the same power.

The results of the studies have shown that under such conditions the influence of magnitude saturation on the parameters of starting modes decreases, therefore, the error in calculating energy indices when neglecting this parameter is 7...8 %, which is acceptable for a considerable part of engineering calculations.

Keywords: electric drive, induction motor, massive ferromagnetic shield.

Krasnoshapka Natalia D. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Automation of Electromechanics Systems and Electric Drive, e-mail: n.krasnoshapka@gmail.com ;

Pushkar Mykola V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Automation of Electromechanics Systems and Electric Drive;

Krykun Rostyslav A. — Student of the Department of Electroenergy and Automation

Н. Д. Красношопка¹
Н. В. Пушкар¹
Р. А. Крикун¹

Влияние насыщения магнитопровода асинхронного двигателя с массивными торцевыми ферромагнитными экранами на анализ пусковых режимов электропривода

¹Национальный технический университет Украины
 «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Асинхронные электроприводы широко применяются в разных областях промышленности. Большинство таких приводов являются нерегулируемыми. Их основной недостаток — небольшой пусковой момент при высоких пусковых токах. В нерегулируемых асинхронных электроприводах для уменьшения значения пускового тока с увеличением значения крутящего момента возможно использование асинхронных двигателей с массивными лицевыми ферромагнитными экранами элементов за пределами рабочего воздушного зазора. При соответствующем выборе геометрии экрана в таких асинхронных двигателях возможно сформировать механическую характеристику типа «экскаватор». Это позволяет получить пусковой крутящий момент двигателя со значением, близким к максимуму, одновременно ограничивая значение пускового тока. Ограничение значения пусковых токов при увеличении величины крутящего момента асинхронного двигателя с массивными лицевыми ферромагнитными экранами элементов вращающегося контура за пределами рабочего воздушного зазора улучшает динамические свойства электропривода и уменьшает потери энергии в пусковых режимах.

Однако наличие ферромагнитных экранов приводит к дополнительным потерям в стационарных рабочих режимах за счет увеличения активного сопротивления удлиненных стержней обмотки ротора и электромагнитных эффектов самих экранов. Использование таких двигателей целесообразно в электроприводах, которые работают с частыми запусками, когда уменьшение потерь энергии в режиме пуска превышает дополнительные потери при работе на постоянной скорости.

Параметры роторного контура такого двигателя зависят от тока скольжения и ротора, а для их расчета используется итерационная процедура. В режимах запуска тока асинхронного двигателя значительно превышают номинальные значения, что приводит к изменению величины намагниченности магнитной цепи. Процедура одновременного определения переменных двух разных контуров, которые влияют друг на друга, довольно сложна.

Проведен сравнительный анализ величины потерь с учетом насыщения магнитной цепи машины и без нее. Рассмотрены процессы при прямом запуске электропривода и с насыщением текущего значения за счет использования устройств с мягким стартером. Результаты исследования сравниваются с аналогичными режимами работы электропривода с серийным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором той же мощности.

Результаты исследований показали, что при таких условиях влияние величины насыщенности на параметры пусковых режимов уменьшается, поэтому ошибка в вычислениях энергетических индексов с пренебрежением этим параметром составляет 7...8 %, что приемлемо для части инженерных расчетов.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, массивный ферромагнитный экран.

Красношопка Наталия Дмитриевна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: n.krasnoshapka@gmail.com ;

Пушкар Николай Васильевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода;

Крикун Ростислав Анатолієвич — студент факультета електроенергетики і автоматики