

В.С. Маляр, А.В. Маляр

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАТКОВОГО АКТИВНОГО ОПОРУ В КОЛІ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ НА ПУСКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯВНОПОЛЮСНИХ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

На основі розробленого методу розрахунку усталених асинхронних режимів явнополюсних синхронних двигунів запропоновано методику математичного моделювання пускових характеристик. Задача розрахунку стаціонарного асинхронного режиму розв'язується як крайова для диференціальних рівнянь електричної рівноваги контурів двигуна. Алгебраїзація системи диференціальних рівнянь здійснюється шляхом апроксимації рівнянь стану кубічними сплайн-функціями на сітці вузлів періоду з урахуванням періодичного закону зміни координат. В результаті здійснюється перехід від їх континуальних значень до вузлових. Розрахунок пускових статичних характеристик здійснюється методом продовження по параметру. Для дослідження впливу величини пускового опору на асинхронні характеристики двигуна використано математичну модель двигуна, в якій враховуються реальні контури пускової обмотки, насичення та несиметрія магнітопроводу. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: явнополюсний синхронний двигун, асинхронний режим, пусковий опір, статичні характеристики, крайова задача, апроксимація сплайнами.

На основе разработанного метода расчета установившихся асинхронных режимов явнополюсных синхронных двигателей предложена методика математического моделирования пусковых характеристик. Задача расчета стационарного асинхронного режима решается как крайовая для дифференциальных уравнений электрического равновесия контуров двигателя. Алгебраизация системы дифференциальных уравнений осуществляется путем аппроксимации уравнений состояния кубическими сплайн-функциями на сетке узловых точек периода с учетом периодического закона изменений координат. В результате осуществляется переход от их континуальных значений к узловым. Расчет пусковых статических характеристик осуществляется методом продолжения по параметру. Для исследования влияния величины пускового сопротивления на асинхронные характеристики двигателя использовано математическую модель двигателя, в которой учитываются реальные контуры пусковой обмотки, насыщение и несимметрия магнитопровода. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: явнополюсный синхронный двигатель, асинхронный пуск, пусковое сопротивление, статические характеристики, крайовая задача, аппроксимация сплайнами.

Вступ. Застосування синхронних двигунів (СД) для електроприводів великої потужності забезпечує високі техніко-економічні показники однак існує проблема їх пуску [1-3]. СД виготовляються здебільшого з явновраженими полюсами, на яких розміщена обмотка збудження. Для виходу на синхронний режим ротор двигуна необхідно розігнати до близької до синхронної швидкості обертання, після чого подати в обмотку збудження постійний струм, в результаті чого ротор увійде в синхронізм з магнітним полем обмотки статора.

Проблема пуску синхронних двигунів, які працюють в потужних електроприводах, є однією з основних [4-6]. Особливо актуальна ця проблема для тих синхронних електроприводів, в яких пуск здійснюється під навантаженням. Її суть полягає в забезпеченні необхідного пускового моменту, який зумовлений умовами роботи приводу. В практиці відомі різні способи пуску і схеми, які їх реалізують, яким властиві як недоліки, так і переваги. Вибір конкретного способу вирішення проблеми пуску потребує ефективних щодо адекватності методів отримання функціональних залежностей, які б давали можливість аналізувати як якісні, так і кількісні сторони динаміки пускового процесу. Вони є основою для розроблення пускових систем [4], які забезпечують технологічну надійність роботи електрообладнання і його економічність щодо витрат електроенергії, що важливо для електроприводів, які працюють в умовах частих пусків.

Як відомо, основним способом пуску СД є асинхронний пуск, який здійснюється шляхом його прямого вмикання на номінальну напругу, а електромагнітний

момент розвивається за рахунок розміщеної в полюсах явнополюсного ротора пускової обмотки [2]. Загальноприйнято обмотку збудження на час пуску замикати на розрядний активний опір величиною, яка у (5-10) разів перевищує її власний опір r_f , рідше накоротко. Призначення цього опору – уникнення перенапруг в обмотці збудження на початку асинхронного пуску. Питання впливу додаткового пускового опору в обмотці збудження на величину електромагнітного моменту, як правило, не розглядалось або досліджувалось з використанням настільки спрощених математичних моделей, що отримати достовірні результати мало ймовірно.

Електромагнітний момент, який створює в асинхронному режимі пускова обмотка ротора СД, недостатній для його пуску під навантаженням, тому використовують різні засоби, спрямовані на його підвищення [5, 6]. Зокрема, одним із шляхів вирішення проблеми покращення пускових властивостей СД є вмикання послідовно в обмотку збудження конденсаторів, які компенсують її індуктивний опір, однак неправильний вибір значення їх ємності може призвести до виникнення явища резонансу напруг або до зниження пускового електромагнітного моменту замість підвищення [7]. Цих недоліків позбавлений спосіб покращення пускових характеристик за допомогою активного опору в обмотці збудження [1]. Однак проблема дослідження асинхронного пуску СД, обмотка збудження якого закорочена на активний опір, незважаючи на її важливе практичне значення, залишається невирішеною до цих пір.

Питання обґрунтованого вибору величини додаткового опору в обмотці збудження може бути вирішене шляхом математичного моделювання, однак це потребує використання розвинених математичних моделей СД і розроблення ефективних методик числового аналізу.

Метою роботи є розроблення математичної моделі та методики розрахунку асинхронних режимів СД з метою дослідження впливу активного опору в контурі обмотки збудження на пускові характеристики СД.

Математична модель. Розглянемо СД, обмотка статора якого живиться від трифазної мережі, а на роторі розміщена пускова обмотка з n стержнями на кожному полюсі та обмотка збудження.

Як відомо [2], усталені синхронні режими СД можна аналізувати на основі використання заступних схем, проте в умовах несинхронного обертання ротора, навіть в усталеному режимі, електромагнітні процеси, які протікають в електричних контурах двигуна, є динамічними. А оскільки заступні схеми не дають можливості врахувати основні чинники, що впливають на динаміку процесів в СД, то для аналізу асинхронних режимів СД непридатні.

Внаслідок явнополюсної конструкції ротора і несиметрії пускової обмотки, розподіл магнітної індукції у повітряному проміжку відрізняється від синусоїдного, а електромагнітний момент в усталеному асинхронному режимі має постійну складову і змінну, яка коливається з подвійною частотою. Крім того, внаслідок насичення магнітопроводу СД, потокозчеплення контурів, а отже і електромагнітні параметри, нелінійно залежать від усіх його струмів.

Практика розрахунків процесів в СД, свідчить, що визначальний вплив на поведінку двигуна в асинхронному режимі має пускова обмотка, а отже від адекватності її описання в математичній моделі залежить точність отриманих результатів розрахунку. Іншими чинниками є несинусоїдний розподіл намагнічувальних сил електричних контурів СД і насичення магнітної системи. Тільки врахування цих чинників у їх взаємозв'язку може слугувати основою для розроблення відповідних методик розрахунку на основі використання сучасних числових методів.

Асинхронні режими СД описуються нелінійною системою диференціальних рівнянь (ДР) електро-механічної рівноваги, яка може бути записана як в реальних фазних, так і в перетворених системах координат. Вибір системи координат є визначальним, оскільки від неї залежить можливість врахування тих чи інших чинників, які впливають на динаміку процесу. Крім того, для явнополюсного СД важливим є спосіб моделювання пускової обмотки: у вигляді двох еквівалентних чи реальних фізичних контурів.

Більшість задач аналізу не потребують використання під час математичного моделювання розгляду процесів в кожному стержні пускової обмотки, тому її можна еквівалентувати двома ортогональними контурами, орієнтованими по поздовжній (d) та поперечній (q) осях [2]. Оскільки у створенні електромагнітного моменту в асинхронному режимі пускова обмотка є визначальною, то з метою отримання адекватних результатів будемо розглядати утворені її стержнями

реальні контури [10], між якими внаслідок насичення магнітопроводу існують нелінійні взаємоіндуктивні зв'язки. Проте, обмотку статора, оскільки вона симетрична і живиться симетричною трифазною системою напруг, можна розглядати у відомих d, q координатних осях. За таких умов процес асинхронного пуску СД у разі замикавання обмотки збудження на активний опір $r_a = k \cdot r_f$, де k – кратність додаткового опору, описується нелінійною системою ДР електромагнітної рівноваги контурів

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} &= \omega\psi_q - r_{id} + U_m \sin \theta; \\ \frac{d\psi_q}{dt} &= -\omega\psi_d - r_{iq} + U_m \cos \theta; \\ \frac{d\psi_1}{dt} &= -r_{1,1}i_1 + r_{1,2}i_2 - r_{1,n}i_n; \\ &\dots \\ \frac{d\psi_n}{dt} &= -r_{n,1}i_1 + r_{n,n-1}i_{n-1} - r_{n,n}i_n; \\ \frac{d\psi_f}{dt} &= -(r_f + r_a) i_f, \end{aligned} \quad (1)$$

де ψ_k, i_k ($k = d, q, 1, \dots, n, f$) – потокозчеплення та струми відповідних контурів; r, r_f, r_{jk} – активні опори обмоток: статора, збудження та демпферних контурів (r_{jk}), власних – при $j=k$ і взаємних – при $j \neq k$; θ – кут вибігу ротора.

Система ДР (1), доповнена рівнянням руху ротора, дає змогу досліджувати перехідні процеси в асинхронних режимах роботи СД. Очевидно, що перехідний процес асинхронного пуску потребує числового інтегрування ДР на часовому інтервалі, достатньому для виходу двигуна на усталений асинхронний режим. Однак для проектування СД і, зокрема, відповідних пускових систем для електроприводів [4], та дослідження їх пускових властивостей необхідно мати ефективний алгоритм розрахунку статичних характеристик, який би давав змогу досліджувати вплив параметрів пускової обмотки і обмотки збудження на перебіг процесів в СД в пусковому режимі.

Як відомо [2], в усталеному асинхронному режимі явнополюсного СД кут θ вибігу ротора, неперервно зростає за законом

$$\theta = -\omega_0 \int s dt + \theta_0,$$

де θ_0 – початкове його значення, а $s = 1, 0 - \omega/\omega_0, \omega_0, \omega$ – кутова частота напруги живлення та кутова швидкість обертання ротора двигуна, виражена в електричних радіанах.

Оскільки при необмеженому зростанні кута θ функції $\sin \theta$ та $\cos \theta$, якими визначається значення прикладеної напруги, змінюються за періодичним законом, то потокозчеплення, струми контурів і, як наслідок, електромагнітний момент, є періодичними функціями. Ковзання s ротора в межах періоду коливається відносно середнього значення

$$s_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T_a} s dt,$$

однак для розв'язування більшості задач його можна прийняти незмінним і рівним середньому значенню.

Методика розв'язування задачі. Дослідження впливу активного опору в колі обмотки збудження на електромагнітний момент можна здійснити на основі розрахунку статичної характеристики, яку отримують [2] шляхом розрахунку послідовності усталених асинхронних режимів, розрахованих для різних значень ковзання. Правомірність такого підходу пояснюється тим, що механічна стала часу набагато перевищує електромагнітну. Оскільки в усталеному асинхронному режимі з ковзанням s процеси в СД змінюються з періодом

$$T_a = 2\pi / (s\omega_0),$$

то задача його розрахунку полягає у визначенні періодичних залежностей координат. Їх розрахунок шляхом розв'язування еволюційної задачі потребує інтегрування системи ДР на значному часовому інтервалі, а тому непридатний для розрахунку статичних характеристик. Розрахувати зазначені залежності з мінімальним обсягом обчислень можна шляхом розв'язування крайової задачі для системи ДР (1) з періодичними крайовими умовами [9].

З метою скорочення викладення алгоритму розрахунку періодичних залежностей координат режиму на періоді T_a запишемо систему ДР (1), одним векторним рівнянням

$$\frac{d\vec{\psi}}{dt} = \vec{z}(\vec{\psi}, \vec{i}, \vec{u}, t), \quad (2)$$

де

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} U_m \sin \theta + \omega_0(1-s)\psi_q - r_i i_d \\ U_m \cos \theta - \omega_0(1-s)\psi_d - r_i i_q \\ -r_1 i_1^i + r_1 i_2^i - r_{1n} i_n \\ \vdots \\ -r_n i_1^i + r_{n,n-1} i_{n-1}^i - r_{nn} i_n \\ -(r_f + r_a) i_f \end{pmatrix}.$$

До рівняння (2) входить часова координата t , а отже розраховувати з його використанням статичні характеристики є проблемою. Проте за умови постійного ковзання воно описує стаціонарний асинхронний режим СД, який характеризується періодичною негармонічною зміною координат. Внаслідок нелінійних електромагнітних зв'язків між контурами двигуна систему ДР (2), яка описує електромагнітні процеси, неможливо звести до алгебричних шляхом переходу до комплексної змінної, а розрахунок усталеного режиму полягає у визначенні функціональних залежностей миттєвих значень координат впродовж періоду T_a .

Визначення цих залежностей – це крайова задача для системи ДР (2). В математиці, як правило, крайові задачі розглядають для ДР другого порядку, однак внаслідок того, що крайові умови задані періодичними залежностями, їх постановка можлива для ДР першого порядку. Для розв'язування крайової задачі систему ДР (2) необхідно алгебривувати на періоді, тобто здійснити перехід від диференціальних рівнянь до алгебричних.

В літературі відомі різні способи алгебривзації, серед яких різницеві методи різних порядків, колокації, в тому числі й тригонометричної, та інші. Однак найбільш ефективними виявились проєкційні методи [8], суть яких полягає в тому, що розв'язок оператор-

ного рівняння в заданому підпросторі визначається шляхом проєктування диференціального рівняння на деякий інший підпростір. Проєкційні методи є основою побудови різних обчислювальних схем розв'язування крайових задач [8]. Різниця між ними полягає у виборі базисних функцій для апроксимації відповідних кривих В статті пропонується метод аналізу асинхронних режимів роботи СД проєкційним методом, розробленим на основі застосування кубічних сплайнів [9]. Суть методу полягає в переході від системи ДР (2) неперервної змінної до дискретних алгебричних рівнянь. Для цього розділимо період T на m проміжків $h_j = t_j - t_{j-1}$ ($j = \overline{1, m}$) і на кожному з них компоненти вектора $\vec{\psi}$ апроксимуємо сплайнами третього порядку вигляду

$$\psi(t) = a_j + b_j(t_j - t) + c_j(t_j - t)^2 + d_j(t_j - t)^3, \quad (3)$$

де a_j, b_j, c_j, d_j – коефіцієнти сплайна, співвідношення між якими визначаються властивостями сплайн-функцій, які у вузлах сітки зістиковані між собою за значенням функцій і є двічі диференційовані на всьому періоді. Співвідношення між коефіцієнтами сплайна витікають з його властивостей і визначаються для кожної координати вектора $\vec{\psi}$ виключно сіткою вузлів на періоді

$$\frac{3}{h_j} a_{j-1} - \left(\frac{3}{h_j} + \frac{3}{h_{j+1}} \right) a_j + \frac{3}{h_{j+1}} a_{j+1} = h_j c_{j-1} + 2(h_j + h_{j+1}) c_j + h_{j+1} c_{j+1}. \quad (4)$$

$$b_j = \frac{a_{j-1} - a_j}{h_j} - \frac{h_j}{3} (c_{j-1} - 2c_j). \quad (5)$$

В матричній формі рівняння (4) з урахуванням умов періодичності сплайна $a_{n+j} = a_j, c_{n+j} = c_j$, має вигляд

$$W_{21} \vec{A} + W_{22} \vec{C} = 0, \quad (6)$$

де $\vec{A} = (a_1, \dots, a_N)^*$; $\vec{C} = (c_1, \dots, c_N)^*$, а верхній індекс (*) означає транспонування вектора.

Рівняння (2) для j -го вузла сітки має вигляд

$$\left. \frac{d\vec{\psi}}{dt} \right|_j = \vec{z}_j(\vec{\psi}_j, \vec{i}_j, \vec{u}_j), \quad (7)$$

в якому $\vec{u}_j = (U_m \sin \theta_j, U_m \cos \theta_j, 0, \dots, 0)^*$.

Оскільки, як випливає з (3), в j -ій вузловій точці

$$a_j = y_j; \quad b_j = -dy/dt|_j = -\vec{z}_j,$$

рівняння (5) набуває вигляду

$$\frac{a_{j-1} - a_j}{h_j} - \frac{h_j}{3} (c_{j-1} - 2c_j) = -z_j$$

або в матричній формі

$$W_{11} \vec{A} + W_{12} \vec{C} = -\vec{Z}, \quad (8)$$

де $\vec{Z} = (z_1, \dots, z_m)^*$. Отже задача визначення сплайна (3) зводиться до визначення коефіцієнтів a_j та c_j .

Визначивши вектор \vec{C} з рівняння (6), для визначення вузлових значень координат (вектора \vec{A}) отримуємо рівняння

$$(W_{11} + W_{12}W_{22}^{-1}W_{21})\vec{A} = -\vec{Z}, \quad (9)$$

де W_{11} , W_{12} , W_{21} , W_{22} – блоки-матриці, розміру $m \times m$, елементи яких визначаються виключно коефіцієнтами рівнянь (4), (5).

Отримана система (9) алгебричних рівнянь km -го порядку, де $k = 2+m+1$ – кількість рівнянь системи ДР (2), є дискретним відображенням, яке її апроксимує на сітці вузлів періоду T_a повторюваності процесу. До неї входять значення координат, які відповідають фіксованим значенням часової координати t_j у вузлах періоду, залежності між якими в кожний момент часу нелінійні. Оскільки $\vec{A} = \vec{\psi}$, а $\vec{Z} = \vec{Z}(\vec{\psi}, \vec{u})$, причому $\vec{\psi} = \vec{\psi}(\vec{i})$, її можна подати у вигляді нелінійного рівняння вигляду

$$\vec{Q}(\vec{\Psi}, \vec{I}, \vec{U}) = 0. \quad (10)$$

Його розв'язком є значення вектора

$$\vec{I} = (\vec{i}_1, \dots, \vec{i}_j, \dots, \vec{i}_m)^*, \quad \vec{i}_j = (i_{dj}, i_{qj}, i_{lj}, \dots, i_{nj}, i_{fj})^*,$$

які визначаються вектором \vec{u} прикладених напруг та електромагнітними параметрами СД.

Для розв'язування нелінійної алгебричної системи (10) застосовується метод продовження по параметру [8, 9] в поєднанні з ітераційним методом Ньютона, згідно з яким на кожному l -му крокові ітерації вектор \vec{I} уточнюється за формулами

$$\vec{I}^{(l+1)} = \vec{I}^{(l)} - \Delta \vec{I}^{(l)}; \quad W \Delta \vec{I}^{(l)} = \vec{Q}^{(l)},$$

де $\vec{Q}^{(l)}$ – вектор нев'язок системи (10) при $\vec{I} = \vec{I}^{(l)}$.

Вимушуючою силою в рівнянні (10) є вектор $\vec{U} = (\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_m)^*$, нарощуючи який від нуля до номінального значення, отримуємо значення векторів $\vec{\Psi}$ та \vec{I} , які відповідають заданому значенню ковзання $s = s_0$. Отримані значення координат є початковими умовами для розрахунку статичних характеристик.

Елементами блоків матриці Якобі є диференціальні індуктивні опори контурів двигуна, які визначаються шляхом розрахунку заступної схеми магнітного кола СД згідно з прийнятою моделлю [10]. Результатом розрахунку магнітного кола є визначення кривої магнітної індукції в повітряному проміжку двигуна методами теорії кіл, що дає змогу визначити потокозчеплення контурів, які входять до вектора нев'язок і залежать від сукупності струмів усіх контурів двигуна.

Для дослідження впливу величини додаткового активного опору в обмотці збудження на пускові характеристики необхідно, задаючись значенням ковзання, за викладеним вище алгоритмом визначити значення координат режиму при значенні пускового опору в обмотці збудження $r_a = 0$, а потім нарощувати його величину в необхідних межах, уточнюючи розв'язок методом Ньютона. Сукупність координат, визначених на кожному крокові інтегрування, дають змогу визначити багатовимірну характеристику як їх залежність від пускового опору в обмотці збудження.

Аналогічно виконується розрахунок статичних пускових характеристик як залежностей координат від ковзання. При цьому додатковий опір в обмотці збудження приймається незмінним, а змінюється в заданих межах ковзання.

Для дослідження перехідного процесу пуску СД необхідно разом із системою ДР (1) інтегрувати числовим методом рівняння механічної рівноваги ротора

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{\omega_0} - 1;$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0}{J} \left(\frac{3}{2} p_0 (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - M_c \right), \quad (11)$$

де p_0 – кількість пар полюсів; J – момент інерції системи електроприводу; M_c – момент навантаження на валі двигуна.

На кожному крокові інтегрування для визначення електромагнітних параметрів, якими є елементи матриці $\partial \vec{\psi} / \partial \vec{i}$ диференціальних індуктивностей контурів двигуна, необхідно розв'язувати систему рівнянь, яка описує розгалужене магнітне коло СД.

Зауважимо, що під час розрахунку періодичної зміни координат методом розв'язування крайової задачі магнітний стан розраховується лише для вузлових точок періоду, що є набагато меншим від їх розрахунку методом усталення.

Результати досліджень. Нижче наведені приклади результатів розрахунку за розробленою методикою усталених режимів і статичних характеристик явноплюсних синхронних двигунів СДС3-17-41-16 ($P = 1600$ кВт, $U = 6000$ В, $2p = 16$; $n = 8$) і СДНЗ-2-19-49-24 ($P = 1600$ кВт, $U = 6000$ В, $2p = 24$; $n = 5$), які відрізняються кількостями пар полюсів та стержнів на полюсі.

Приклад періодичних залежностей струму збудження і електромагнітного моменту двигуна СДС3 при ковзанні $s = 1,0$ наведено на рис. 1.

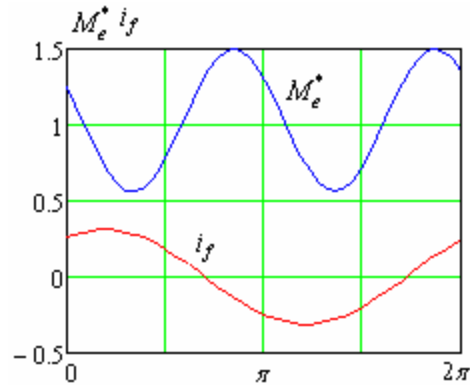


Рис. 1. Періодичні залежності струму в обмотці збудження двигуна СДС3 і електромагнітного моменту при закороченій обмотці збудження

Як видно з рис. 2, залежності пускового ($s = 1$) електромагнітного моменту від додаткового опору в обмотці збудження для СД однакової потужності, але з різною кількістю пар полюсів і стержнів на кожному з них суттєво відрізняються. Розрахунок залежності рушійного електромагнітного моменту від пускового опору дає змогу визначити таке його значення, за якого момент буде максимальним.

Аналіз результатів розрахунку (рис. 2) свідчить, що 5-10-кратне значення пускового опору, яке зазвичай використовують, неоптимальне з погляду забезпечення максимального значення пускового моменту. Однак значне завищення пускового опору може дати зворотний ефект.

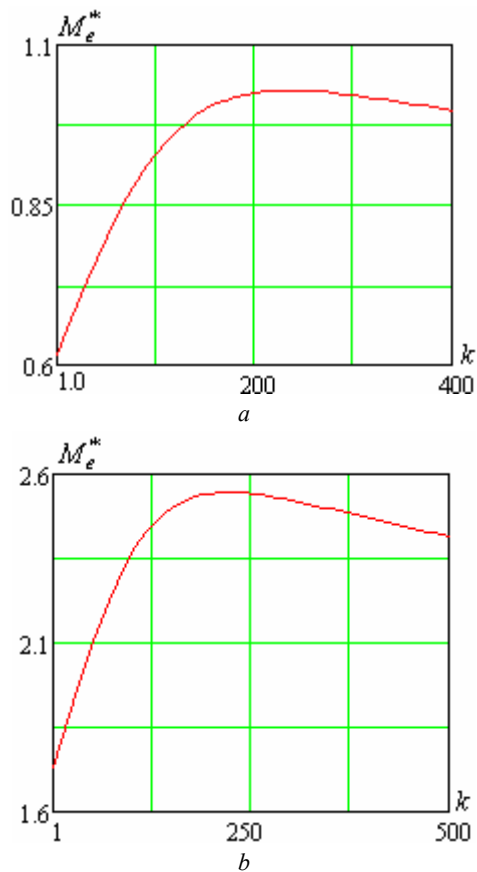


Рис. 2. Залежності пускового ($s = 1$) електромагнітного моменту від кратності додаткового опору в обмотці збудження для двигунів СДСЗ (а) і СДНЗ (б)

Розроблена математична модель та методика розрахунку дає змогу дослідити вплив на асинхронні характеристики пускової обмотки і обмотки збудження окремо, що важливо як для проектування пускової обмотки, так і розроблення оптимальних систем автоматизованого керування пуском СД. Для цього в програмі розрахунку опір обмотки, яку необхідно виключити з розгляду, множиться на велике (10^3-10^6) число. Приклад результатів таких досліджень наведено на рис. 3, з яких видно наскільки відрізняються створювані обмоткою збудження асинхронні моменти для різних двигунів. Зокрема, в перший момент асинхронного пуску створюваною обмоткою збудження асинхронний момент мало впливає на електромагнітний момент в цілому. Максимальне його значення проявляється при малих ковзаннях, однак воно, як видно з рис. 3, суттєво відрізняється для різних двигунів.

За відсутності пускової обмотки в околі значення ковзання $s = 0,5$ в кривій асинхронного моменту проявляється одноосний ефект (крива рис. 4,б). Однак зумовлений явноплюсністю ротора СД провал в кривій електромагнітного моменту практично нівелюється пусковою обмоткою, хоча за достатньо великого значення пускового опору в обмотці збудження він проявляється (рис. 5). Відповідним вибором значення пускового опору можна досягнути не тільки збільшення пускового моменту, але й максимального (рис. 5). Крім того, при цьому дещо зменшується пусковий струм в обмотці статора.

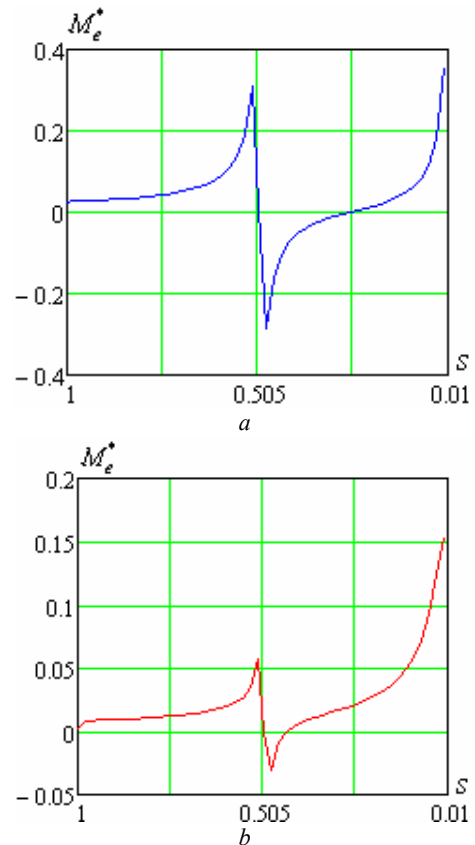


Рис. 3. Пускові характеристики електромагнітного моменту, який створює обмотка збудження за відсутності пускової обмотки для двигунів СДСЗ (а) і СДНЗ (б)

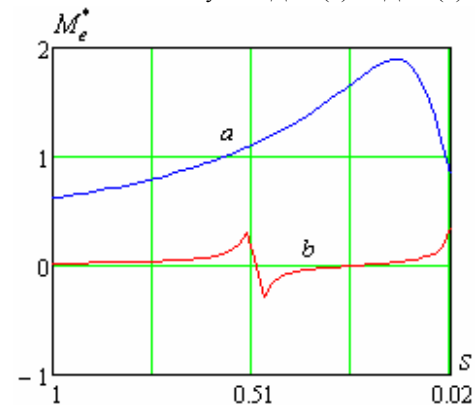


Рис. 4. Механічні характеристика двигуна СДСЗ: а – із замкненою обмоткою збудження і пусковою обмоткою; б – за відсутності пускової обмотки

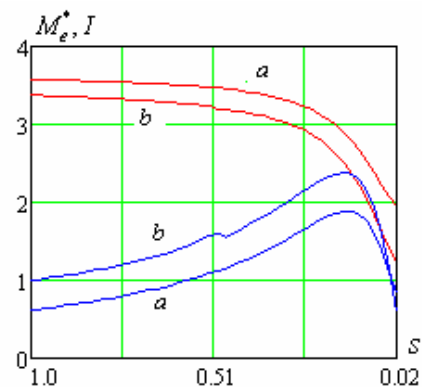


Рис. 5. Залежності від ковзання електромагнітного моменту і струму двигуна СДСЗ при замкненій ($r_a = 0$) обмотці збудження – (а) і замкненій на додатковий опір $r_a = 250 r_f$ – (б)

Висновки.

1. Розроблено математичну модель та методику розрахунку асинхронних режимів і статичних характеристик явнополюсних синхронних двигунів, що дає змогу досліджувати вплив значення пускового активного опору в обмотці збудження на величину електромагнітного моменту.

2. Показано, що за допомогою вмикання резисторів в обмотку збудження можна не тільки підвищити рушійний електромагнітний момент двигуна, але й впливати на його пускові характеристики в цілому.

3. Розроблені математична модель та методика розрахунку можуть бути використані в процесі проектування явнополюсних синхронних двигунів для оптимізації їх пускового опору і пускової обмотки з метою формування необхідних для конкретного електроприводу пускових характеристик.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Абрамович Б.Н. О кратности пускового сопротивления синхронных двигателей // *Электротехническая промышленность. Электрические машины*. – 1974. – №4(38). – С. 14-15.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. *Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов*. – СПб.: Питер, 2010. – 350 с.
3. Басков С.Н., Радионов А.А., Усатый Д.Ю. Пуск асинхронного двигателя в электроприводах с повышенным пусковым моментом // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2004. – №2. – С. 47-49.
4. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов : Монография. – Кременчуг: «ЧП Щербатых А.В.», 2006. – 280 с.
5. Пивняк Г.Г., Кириченко В.И., Бородай В.А. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных электродвигателей // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. – 2002. – ч.2. – С. 62-65.
6. Кириченко В.И., Бородай В.А., Яланский А.А. Улучшение пусковых свойств крупных синхронных машин // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. – 2003. – №6(64). – С. 38-40
7. Мальяр В.С., Мальяр А.В., Добушовська І.А. Моделирование асинхронных режимов синхронного двигателя с конденсаторами в колі обмотки збудження // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №5. – С. 31-33. doi: 10/20998/2074-272X.2012.5.06.
8. Ортега Дж., Пул У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений: перевод с англ. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
9. Мальяр В.С., Мальяр А.В. Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических устройств // *Электронное моделирование*. – 2005. – т.27. – №3. – С. 39-53.
10. Фильц Р.В., Лябук Н.Н. Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин. – Львов: Світ, 1991. – 176 с.

REFERENCES

1. Abramovich B.N. About starting resistance ratio of synchronous motors. *Electrical engineering industry. Electric machines*, 1974, no.4(38), pp. 14-15. (Rus).
2. Voldek A.I., Popov V.V. *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electric machines. AC machines]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2010. 350 p. (Rus).
3. Baskov S.N., Radionov A.A., Usaty D.Yu. Start of asynchronous motors in electric drives with increased starting torque. *Russian Electromechanics*, 2004, no.2, pp. 47-49. (Rus.)

4. Chorny A.P., Gladyr A.I., Osadchuk Yu.G., Kurbanov I.R., Voshun A.N. *Puskovyye sistemy nereguliruemyykh elektroprivodov* [Start-up systems of unregulated electric drives]. Kremenchug, Scherbatykh A.V. Publ., 2006. 280 p. (Rus).
5. Pivnyak G.G., Kirichenko V.I., Boroday V.A. About new direction in improvement large synchronous electric motors. *Technical electrodynamic. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2002, chapter 2, pp. 62-65. (Rus).
6. Kirichenko V.I., Boroday V.A., Yalanskiy A.A. Improved properties of starting modes of large synchronous machines. *Visnik Of The Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2003, no.6(64), pp. 38-40. (Rus).
7. Malyar V.S., Malyar A.V., Dobushovska I.A. Simulation of asynchronous modes of synchronous motors with capacitors in the excitation circuit. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.5, pp. 31-33. (Ukr). doi: 10/20998/2074-272X.2012.5.06.
8. Ortega J., Poole W. *An introduction to numerical methods for differential equations*. Boston, Jr. Pitman Publ. Inc., 1981. 344 p.
9. Malyar V.S., Malyar A.V. Mathematical simulation of periodic modes of electrotechnical appliances. *Electronic modeling*, 2005, vol.27, no.3, pp. 39-53. (Rus).
10. Filts R.V., Lyabuk N.N. *Matematicheskoye modelirovaniye yavnopolysnykh sinkhronnykh mashin* [Mathematical simulation of salient-pole synchronous motor]. Lviv, Svit Publ., 1991. 176 p. (Rus).

Надійшла (received) 06.01.2018

Мальяр Василь Сафронів¹, д.т.н., проф.,
Мальяр Андрій Васильович¹, д.т.н., проф.,
¹ Національний університет «Львівська політехніка»,
79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,
тел/phone +380 32 2582119,
e-mail: mvs@polynet.lviv.ua; svmalyar@polynet.lviv.ua

V.S. Malyar¹, A.V. Malyar¹
¹ Lviv Polytechnic National University,
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Studying the effect of an additional active resistance in the field winding circuit on starting characteristics of salient-pole synchronous motors.

On the basis of the developed method for calculating steady-state asynchronous operation modes of salient-pole synchronous motors, a procedure of mathematical modelling of the starting characteristics is proposed. The problem of calculating the steady-state asynchronous mode is solved as a boundary value one for differential equations of motor circuit electrical equilibrium. Algebraization of the system of differential equations is carried out by approximating the equations of state using cubic spline functions on a grid of period nodes, taking into account the periodic law of variation of the coordinates. This results in the changeover from continual values to nodal ones. The starting static characteristics are calculated using the parameter continuation method. The study of the effect of the starting resistance value on the asynchronous characteristics of the motor relied on a mathematical model of the motor taking into consideration real field circuits, saturation and asymmetry of the magnetic path. References 10, figures 5.

Key words: salient-pole synchronous motor, asynchronous operation mode, starting resistance, static characteristics, boundary value problem, spline approximation.