

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.12

УДК 621.313.323

Качура О.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-6338-0974, e-mail: fem@ukr.net

Колычев С.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-1017-5125, e-mail: kolychev.sergey58@gmail.com

С'янов О.М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-4120-4926, email: alexandr.sianov@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Kachura Oleksii, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electronics and Electronical Communications

Kolychev Sergey, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Syanov Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electronics and Electronical Communications

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ІНДУКЦІЙНИМ РЕОСТАТОМ У КОЛІ ФАЗНОГО РОТОРА

У роботі досліджено перехідні процеси пуску в асинхронному двигуні (АД) з фазним ротором (АДФ) з увімкненими у роторне коло індукційними реостатами (ІР). Метою роботи є одержання перехідних характеристик пуску АД з ІР шляхом моделювання режимів роботи в реальному масштабі часу. На основі аналізу існуючих математичних моделей АД з ІР встановлено, що у більшості випадків електромагнітні процеси у роторному колі АДФ описуються рівняннями електричних кіл. Як відомо ланцюгові моделі базуються на сукупності припущень, що призводить до ряду обмежень, серед яких аналіз процесів переважно в ustalених режимах, значні похибки при дослідженні характеристик АДФ з ІР в області критичних ковзань, відсутність можливості дослідження впливу конструкції ІР на електромагнітні параметри АД. Зазначені недоліки негативно впливають на точність розрахунків. Підвищити точність і частково усунути зазначені недоліки стало можливим завдяки створенню нової математичної моделі АДФ з ІР, що базується на застосуванні чисельних методів, зокрема методу кінцевих елементів (МКЕ).

Ключові слова: асинхронний двигун; індукційний реостат; модель; метод кінцевих елементів; електромагнітний момент; кутова швидкість.

The paper investigates the transient starting processes in an induction motor (IM) with a phase rotor (IMP) with induction rheostats (IR) included in the rotor circuit. The aim of this work is to obtain the transient characteristics of the starting of a IM with IR by modeling the operating modes in real time. Based on the analysis of existing mathematical models of the IM with IR, it was found that in most cases electromagnetic processes in the rotor circuit of the IMP are described by the equations of electric circuits. It is known that circuit models are based on a set of assumptions, which leads to a number of limitations, including the analysis of processes mainly in steady—state modes, significant errors in the study of the characteristics of IM with IR in the area of critical slip, and the inability to study the influence of the IR design on the electromagnetic parameters of IM. These shortcomings negatively affect the accuracy of calculations. It became possible to improve the accuracy and partially eliminate these shortcomings by creating a new mathematical model of the IMF with IR based on the use of numerical methods, in particular the finite element method (FEM).

Keywords: induction motor; induction rheostat; model; finite element method; electromagnetic torque; angular velocity.

Постановка проблеми

Задача підвищення надійності підйомно-транспортного обладнання в сьогодишніх економічних умовах залишається актуальною. Кранові механізми, волочильні стани, канатні машини — неповний перелік обладнання, що експлуатується на підприємствах різних галузей, і,

як правило, є застарілим. Особливої уваги заслуговують кранові механізми підйому й переміщення, що функціонують в умовах ударних навантажень, підвищеної вібрації і зазнають агресивного впливу навколишнього середовища.

Несприятливі умови функціонування обладнання призводять до частих ремонтів і систематичних простоїв. У зв'язку з цим до кранових механізмів висувається ряд вимог: висока відмовостійкість, простота обслуговування, помірний ціна. Частково вказаним вимогам відповідають електроприводи (ЕП) змінного струму, які комплектуються асинхронними двигунами з фазним ротором і додатковими опорами у роторному колі. У якості останніх часто використовуються комплектні комірочки опорів з додатковою контактною апаратурою.

Багаторічний досвід експлуатації подібних установок показує, що застосування таких ЕП на кранових механізмах призводить до ряду негативних наслідків: 1) зменшення надійності ЕП внаслідок використання силового комутаційного обладнання; 2) необхідність періодичного залучення ремонтного персоналу для обслуговування контактної апаратури; 3) збільшення масогабаритних показників ЕП.

У ситуації, що склалася, підвищення надійності кранового устаткування є актуальним завданням, що може бути вирішене шляхом використання індукційних реостатів у колі фазного ротора АД. Даний підхід дозволяє позбутися контактної апаратури у роторі й уникнути застосування східчастої системи комутації пускових опорів, а завдяки нелінійним електромагнітним параметрам ІР — забезпечити плавний пуск АДФ із заданим струмом. Виникаючі при цьому втрати потужності у роторному колі виносяться за об'єм АД. Механічна характеристика АДФ при цьому набуває бажаного екскаваторного виду.

Аналіз основних досліджень та публікацій

Аналізу впливу індукційного опору у колі фазного ротора на характеристики АД присвячено роботи [1, 2], в яких електромагнітні процеси описано рівняннями потокозчеплень на основі законів Кірхгофа. У результаті отримано еквівалентні заступні схеми, де ІР представлено сукупністю опорів намагнічування й розсіювання.

У роботі [3] запропоновано математичну модель дискової конструкції ІР, що являє собою два магнітозв'язаних контури зі струмами. Авторами отримана система диференціальних рівнянь, що записана для миттєвих значень струмів і придатна для дослідження електромагнітних перехідних та усталених процесів в АД.

У роботі [4] зроблена спроба відійти від традиційних підходів представлення ІР у вигляді системи магнітозв'язаних контурів. Натомість запропонована методика розрахунку, заснована на роботах Л. Р. Неймана. Авторами досліджена дискова конструкція ІР та отримані аналітичні вирази для еквівалентних опорів ІР з урахуванням нелінійних параметрів феромагнітних ділянок.

Робота [5] містить результати дослідження стрижневої конструкції ІР. Запропонована методика розрахунку базується на ланцюговій моделі з ітераційним уточненням параметрів ІР.

У роботі [7] запропонована матрична математична модель, що дозволяє досліджувати ІР разом з АД в усталених режимах. Модель враховує несиметрію і нелінійність електромагнітних параметрів АД, структуру обмоток статора і ротора, зміну параметрів ІР в функції частоти струму в роторі.

Розглянуті математичні моделі дозволяють із задовільною точністю аналізувати процеси, що відбуваються в ІР. Разом з тим вони мають недоліки, серед яких: 1) прив'язка моделі до окремої конструкції ІР; 2) аналіз характеристик АД переважно в усталених режимах; 3) значні похибки при дослідженні характеристик АДФ з ІР в області критичних ковзань; 4) відсутність можливості дослідження впливу конструкції ІР на електромагнітні параметри АД. Крім того, ланцюгові моделі базуються на сукупності припущень, що, у кінцевому результаті, негативно впливає на точність розрахунків.

Підвищити точність розрахунків і частково усунути зазначені недоліки стало можливим завдяки використанню чисельних методів, зокрема методу кінцевих елементів. Таким чином, розробка комплексної математичної моделі, що базується на МКЕ і дозволяє досліджувати перехідні процеси у режимах критичних ковзань є актуальною.

Формулювання мети дослідження

На основі існуючих теоретичних моделей розробити комплексну математичну модель трифазного АДФ з ІР у колі фазного ротора, яка дозволить досліджувати перехідні процеси у режимах критичних ковзань з урахуванням особливостей конструкції ІР, їх масогабаритних показників, нелінійних властивостей матеріалів.

Виклад основного матеріалу

Фізичні процеси в ІР можуть бути описані системою диференціальних рівнянь Максвелла, яка після ряду відомих математичних перетворень [11], трансформується у рівняння Лапласа, записані відносно векторного магнітного потенціалу:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Рівняння (1) є узагальненим, права частина якого залежить від окремого елемента конструкції ІР. Його вирішення пов'язане з вирішенням тривимірної задачі. У декартовій системі координат рівняння (1) набуває вигляду

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_{02}, \quad (2)$$

де x, y, z — координати досліджуваного об'єкта; \vec{A} — вектор магнітного потенціалу; ν — магнітний опір матеріалу; σ — електропровідність матеріалу; J_{02} — щільність струму в обмотках ІР; t — час, впродовж якого протікають досліджувані процеси.

Вираз (2) має бути доповнений рівнянням рівноваги напруги в обмотці ІР:

$$u_{02} = r_{02} i_{02} + \frac{d\Psi_{02}}{dt}, \quad (3)$$

де u_{02} — напруга, прикладена до обмотки ІР; r_{02} — активний опір обмотки ІР; i_{02} — струм, що протікає в обмотці ІР; Ψ_{02} — повне потокозчеплення обмоток.

Щільність струму в обмотці ІР визначається:

$$J_{02} = \frac{N_{wr} i_{02}}{S_{wr}}, \quad (4)$$

де N_{wr} — число витків обмотки фази ІР; S_{wr} — площа, яку займає обмотка ІР.

Потокозчеплення котушки може бути визначене як:

$$\frac{d\Psi_{02}}{dt} = \frac{N_{wr} l}{S_{wr}} \int_{S_{wr}} \frac{\partial A}{\partial t} dS_{wr}, \quad (5)$$

де l — довжина одного витка.

Підставивши (5) в (3), отримаємо

$$u_{02} = r_{02} i_{02} + \frac{N_{wr} l}{S_{wr}} \int_{S_{wr}} \frac{\partial A}{\partial t} dS_{wr}. \quad (6)$$

На основі рівняння (1) представимо ІР у вигляді сукупності диференціальних рівнянь:

$$-\nabla(\nu \nabla A) = \begin{cases} 0 - \text{у повітряному проміжку;} \\ -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \text{в екрані ІР;} \\ \frac{N_{wr} i_{02}}{S_{wr}} - \text{у котушці ІР.} \end{cases} \quad (7)$$

У загальному вигляді АД може бути описаний системою диференціальних рівнянь для багатофазної системи:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + \frac{d \sum_{n=1}^i \Psi_{1n}(i_{02}, \gamma)}{dt}; \\ u_2 &= r_2 i_2 + \frac{d \sum_{n=1}^i \Psi_{2n}(i_{02}, \gamma)}{dt}; \\ &\dots \\ u_k &= r_k i_k + \frac{d \sum_{n=1}^i \Psi_{kn}(i_{02}, \gamma)}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де u_1, u_2, u_k — миттєві значення лінійної напруги; r — активний опір фаз; Ψ — повні потокозчеплення фаз; γ — кут повороту ротора.

Усі перелічені величини залежать від часу t .

Отриману систему диференціальних рівнянь необхідно доповнити рівняннями руху ротора:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{M - M_C}{J}; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_2, \end{aligned}$$

де ω_2 — частота обертання ротора; M — електромагнітний момент на валу двигуна; M_C — момент статичного навантаження; J — момент інерції ротора.

Для шестиконтурної моделі АД система рівнянь (8) трансформується до наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} u_A &= R_A i_A + \frac{d\Psi_A(i, \gamma)}{dt}; \\ u_B &= R_B i_B + \frac{d\Psi_B(i, \gamma)}{dt}; \\ u_C &= R_C i_C + \frac{d\Psi_C(i, \gamma)}{dt}; \end{aligned} \right\} \left\{ \begin{aligned} u_a &= R_{aA} i_a + \frac{d\Psi_a(i, \gamma)}{dt}; \\ u_b &= R_b i_b + \frac{d\Psi_b(i, \gamma)}{dt}; \\ u_c &= R_c i_c + \frac{d\Psi_c(i, \gamma)}{dt}; \end{aligned} \right\} \left\{ \begin{aligned} M - M_C &= J \frac{d\omega_2}{dt}; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_2. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Повні потокозчеплення фази А статора і ротора відповідно можуть бути визначені:

$$\begin{aligned} \Psi_A(i, \gamma) &= L_A(i) i_A + M_{AB}(i) i_B + M_{AC}(i) i_C + M_{Aa}(i) \cos(p\gamma) i_a + \\ &+ M_{Ab}(i) \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) i_b + M_{Ac}(i) \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) i_c; \\ \Psi_a(i, \gamma) &= L_a(i) i_a + M_{ab}(i) i_b + M_{ac}(i) i_c + M_{aA}(i) \cos(p\gamma) i_A + \\ &+ M_{aB}(i) \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) i_B + M_{aC}(i) \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) i_C, \end{aligned}$$

де L — власні індуктивності фаз обмоток; M — взаємні індуктивності між фазами обмоток; γ — геометричний кут повороту ротора відносно осей фаз обмоток.

Комбінуючи (7) і (9), отримаємо повну систему диференціальних рівнянь АДФ з IP у ланцюгово-польовій постановці:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A = R_A i_A + \frac{d\Psi_A(i, \gamma)}{dt}; \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\Psi_B(i, \gamma)}{dt}; \\ u_C = R_C i_C + \frac{d\Psi_C(i, \gamma)}{dt}; \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} u_a = R_{aA} i_a + \frac{d\Psi_a(i, \gamma)}{dt}; \\ u_b = R_b i_b + \frac{d\Psi_b(i, \gamma)}{dt}; \\ u_c = R_c i_c + \frac{d\Psi_c(i, \gamma)}{dt}; \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} M - M_C = J \frac{d\omega_2}{dt}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega_2; \end{array} \right\} -\nabla(v \nabla A) = \left\{ \begin{array}{l} 0; \\ -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}; \\ \frac{N_{wr} i_{02}}{S_{wr}}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Розв'язок (10) має ґрунтуватися на вирішенні диференціальних рівнянь у формі Коші разом з рівняннями Пуассона, записаними у часткових похідних для векторного магнітного потенціалу у тривимірній постановці. Для цього скористаємося методом кінцевих елементів (МКЕ).

У роботі досліджено дискову конструкцію ІР з масивними феромагнітними пластинами (рис. 1, а). Дана конструкція проста у виготовленні, має повне екранування фаз обмоток і форму радіального перерізу у вигляді прямокутника (рис. 1, б). Матеріал пластин — конструкційна сталь Ст3.

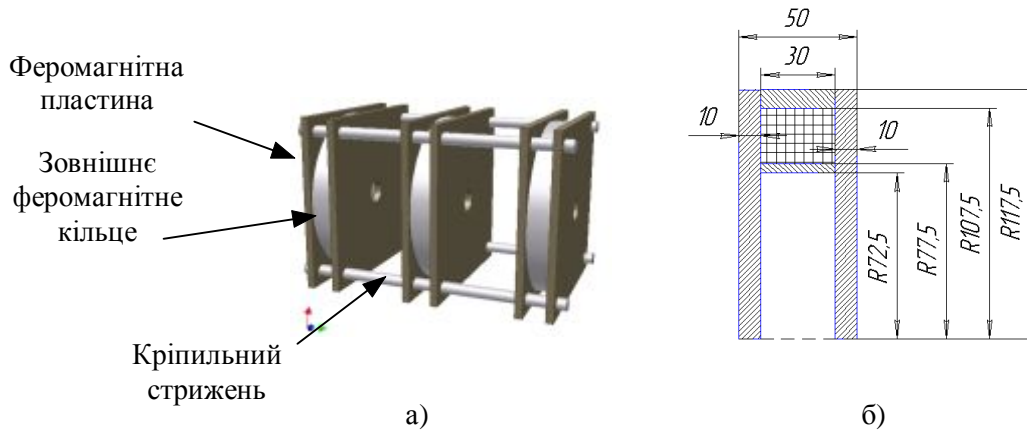


Рис. 1. Дискова конструкція ІР з феромагнітними пластинами

Для розрахунку перехідних процесів пуску АД з ІР скористаємося студентською версією пакета прикладного програмного забезпечення для електромагнітних розрахунків ANSYS Maxwell. У середовищі створена віртуальна імітаційна модель АД з фазним ротором і ІР (рис. 2). До моделі входять джерела фазної напруги E1, E2, E3, вимірювальні прилади (вольтметри VM1, VM2, VM4, ватметр WM1, амперметри AM1, AM2), трифазний АДФ M з інерційним блоком ASMS, кінцево-елементна модель ІР FEA1. Параметри двигуна представлено у табл. 1.

У роботі виконано моделювання режиму пуску АДФ типу МТВ–412–8 без навантаження на валу. На рис. 3 зображено розподіл магнітної індукції у поперечному перерізі ІР (1/4 конструкції) для моменту часу $t = 0,005$ с.

Отриманий результат показує, що у початковий момент пуску АДФ магнітне поле переважно сконцентроване в області котушок та прилеглих ділянках екрануючої поверхні і досягає найбільшого значення в 2,1 Тл при частотах, близьких до 50 Гц. По мірі розгону двигуна частота струму у роторі зменшується, що призводить до “розтікання” магнітного поля вглиб екрануючих пластин.

Отриманий результат показує, що у початковий момент пуску АДФ магнітне поле переважно сконцентроване в області котушок та прилеглих ділянках екрануючої поверхні і досягає найбільшого значення в 2,1 Тл при частотах, близьких до 50 Гц. По мірі розгону двигуна частота струму у роторі зменшується, що призводить до “розтікання” магнітного поля вглиб екрануючих пластин.

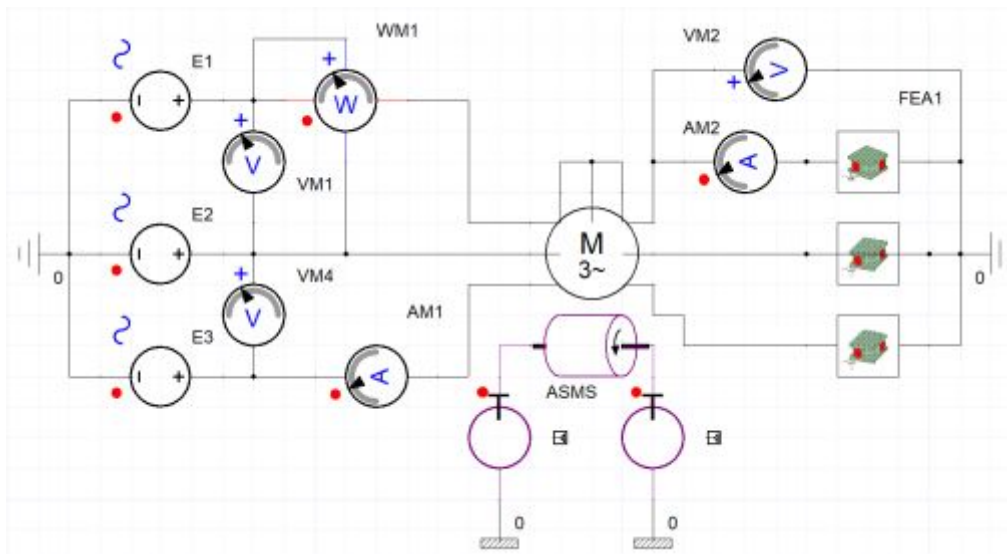


Рис. 2. Схема моделі АД з фазним ротором і ІР дискової конструкції

Таблиця 1. Параметри досліджуваного АДФ

r_{01} , Ом	x_{01} , Ом	r_{02} , Ом	x_{02} , Ом	x_{μ} , Ом	J , кгм ²	M_c , Нм
0,17	0,333	0,074	0,218	9,28	3	$0,01 M_H$

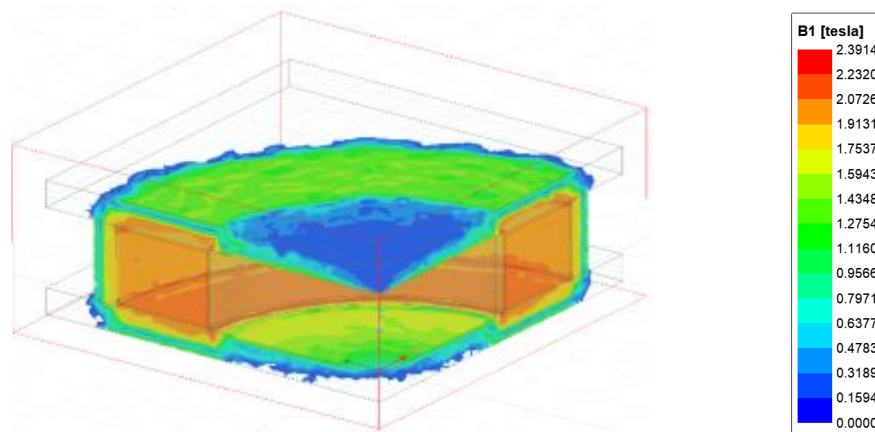


Рис. 3. Картина розподілу магнітної індукції для моменту часу $t = 0,005$ с

Сумісне моделювання АД з ІР дозволило отримати перехідні характеристики режиму пуску (рис. 4). Результати дозволяють зробити висновок проте, що кутова швидкість обертання ротора змінюється практично лінійно до величини 50 рад/с і нелінійно на ділянці від 50 рад/с до швидкості ідеального холостого ходу. При цьому у характеристики відсутні будь-які коливання, поштовхи або розриви. Характеристика механічного моменту (рис. 4, б) має коливальний характер з від'ємними значеннями на початковому етапі пуску. Максимальне значення моменту складає 680 Нм, мінімальне — 100 Нм. Пусковий струм статора сягає максимального значення 120 А (рис. 4, в), ротора — 170 А (рис. 4, г). Струм ротора на початку пуску має періодичні коливання, що поступово зменшуються зі збільшенням частоти обертання ротора.

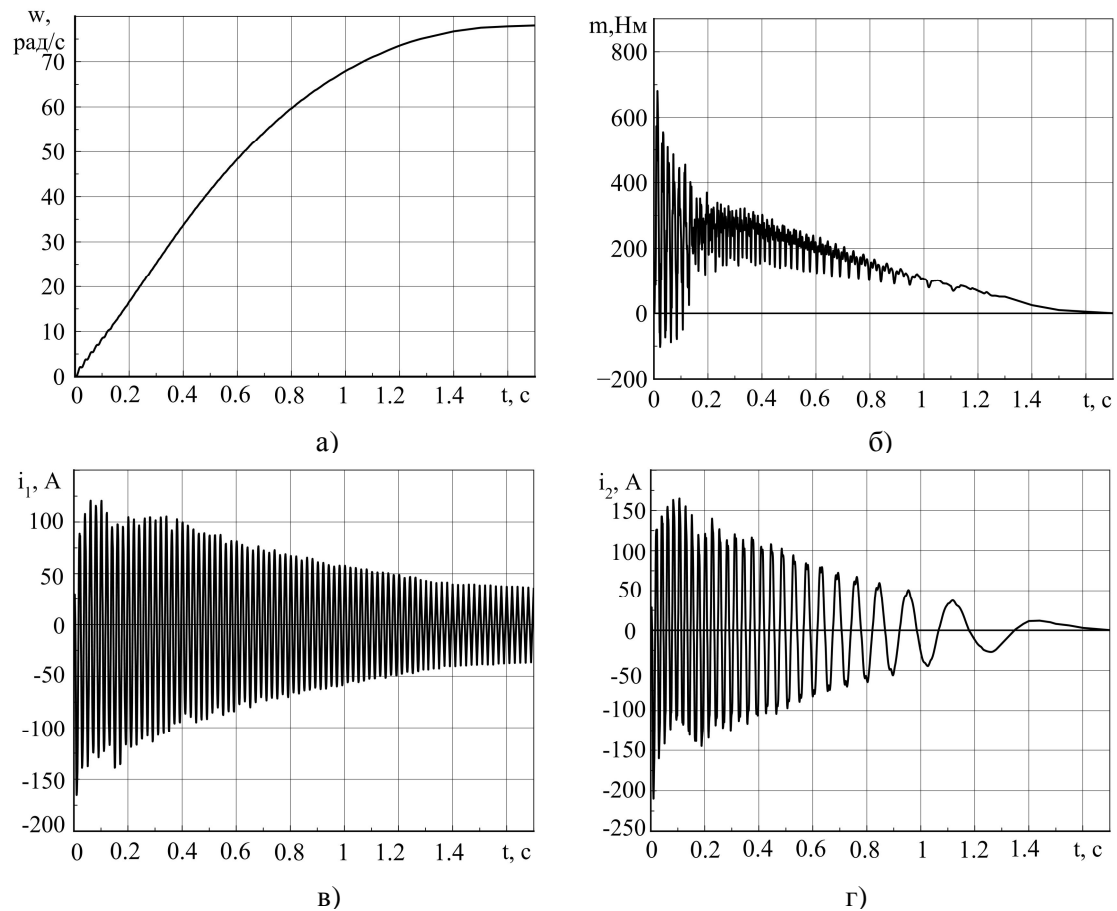


Рис. 4. Графіки перехідного процесу пуску АД з ІР: а — кутова швидкість обертання ротора; б — механічний момент на валу двигуна; в — пусковий струм статора; г — пусковий струм ротора

Висновки

Розроблений і реалізований алгоритм розрахунку перехідних режимів пуску асинхронного двигуна з фазним ротором з використанням комбінованої математичної моделі, що включає рівняння електромагнітного поля й електричних кіл. Створена модель є універсальною і дозволяє досліджувати характеристики АДФ з ІР довільної конструкції як у статичних, так і динамічних режимах.

У результаті сумісного розв'язку рівнянь поля й електричних кіл у реальному масштабі часу отримано перехідні характеристики пуску двигуна МТВ–412–8. Аналіз перехідних процесів показує, що на початковому етапі пуску зміна швидкості двигуна носить практично лінійний характер, а розгін всього ЕП відбувається плавно при відсутності поштовхів електромагнітного моменту. Отримані результати пояснюються формуванням механічної характеристики АДФ екскаваторного типу завдяки наявності у роторному колі нелінійного індукційного опору. Це, у свою чергу, дозволяє зробити висновок про позитивний вплив ІР на пускові характеристики ЕП, підвищуючи в цілому його надійність.

Список використаної літератури

1. Тигунов А.П. Расчет параметров индукционных сопротивлений и характеристик регулируемого асинхронного двигателя: автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 1983. 22 с.
2. Власов В.Г. Бесконтактные асинхронные двигатели с индукционными частотно зависимыми сопротивлениями в цепи ротора: автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 1970. 18 с.

3. Розов Ю.М., Тигунов А.П. Методические рекомендации по расчету асинхронного двигателя с индукционным роторным сопротивлением. Киев: Наук. думка, 1981. 52 с.
4. Абрамов А.Г. Размерный ряд индукционных автоматических реостатов для электродвигателей с фазным ротором. *Электричество*. 1965. № 12. С. 46–49.
5. Вербовой А.П. Решение уравнений электромагнитного равновесия индукционных сопротивлений с учетом процессов в экранах. *Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр.* Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1997. С. 26–33.
6. Вербовой А.П. Уравнения, схема замещения и векторная диаграмма индукционных сопротивлений с учетом процессов в экранах. *Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр.* Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1996. С. 31–38.
7. Вербовой А.П. Математическая модель для исследования электромагнитных процессов в трехфазных индукционных реостатах. *Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр.* Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1999. С. 21–26.
8. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., Сьянов А.М. Определение и исследование электромагнитных параметров индукционных сопротивлений. *Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр.* Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1997. С. 38–48.
9. Вербовой А.П. Методика определения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки индукционного сопротивления. *Техн. электродинамика*. 1997. № 3. С. 60–64.
10. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., Сьянов А.М. Определение электромагнитных параметров индукционных реостатов по экспериментальным данным. *Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр.* Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1998. С. 66–76.
11. Сьянов А.М. Математические модели и исследование процессов в статических и динамических режимах работы асинхронных двигателей с учетом нелинейных электромагнитных параметров: автореф. дис. докт. техн. наук. Киев, 1997. 34 с.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR STUDYING THE TRANSIENT STARTING PROCESSES OF AN INDUCTION MOTOR WITH AN INDUCTION RHEOSTAT IN THE PHASE ROTOR CIRCUIT

Abstract

The task of improving the reliability of lifting and handling equipment in today's economic environment remains a pressing one. Crane mechanisms, drawing mills, and rope machines are an incomplete list of equipment used at enterprises in various industries, and, as a rule, they are outdated. Particular attention should be paid to crane lifting and handling mechanisms that operate under shock loads, high vibration, and are exposed to aggressive environmental influences.

Unfavorable operating conditions of the equipment lead to frequent repairs and systematic downtime. In this regard, a number of requirements are imposed on crane mechanisms: high fault tolerance, ease of maintenance, and reasonable price. These requirements are partially met by electric drives (ED), which are equipped with asynchronous motors with a phase rotor and additional resistances in the rotor circuit. As the latter, complete resistance cells with additional contact equipment are often used.

Many years of experience in the operation of such installations shows that the use of such ED on crane mechanisms leads to a number of negative consequences: 1) reduction of the reliability of the ED due to the use of power switching equipment; 2) the need to periodically involve repair personnel to maintain contact equipment; 3) increase in the weight and dimensions of the ED. In the current situation, improving the reliability of crane equipment is an urgent task that can be solved by using induction rheostats in the phase rotor circuit of the IM. This approach eliminates the contact equipment in the rotor and avoids the use of a stepwise switching system for starting resistances, and, due to the nonlinear electromagnetic parameters of the IR, ensures a smooth start of the IMP with a given current. The resulting power losses in the rotor circuit are carried out beyond the IM volume. In this case, the mechanical characteristic of the IMP acquires the desired excavator type.

References

- [1] Tiginov A.P. (1983) Raschet parametrov induktsionnykh soprotivleniy i harakteristik reguliruemogo asinhronnogo dvigatelya [Calculation of induction resistance parameters and characteristics of an adjustable induction motor] *Ph.D. thesis abstract*. Kiev. 1983. 22 p. [in Ukrainian].
- [2] Vlasov V.G. (1970) Beskontaktnyye asinhronnyye dvigateli s induktsionnyimi chastotno zavisimyimi soprotivleniyami v tsepi rotora. [Contactless induction motors with induction frequency-dependent resistances in the rotor circuit] *Ph.D. thesis abstract*. Kiev. 1970. p. 18 p. [in Ukrainian].
- [3] Rozov Y.M. & Tiginov A.P. (1981) *Metodicheskie rekomendatsii po raschetu asinhronnogo dvigatelya s induktsionnyim rotornym soprotivleniem* [Methodical recommendations for the calculation of an induction motor with induction rotor resistance] Kiev: Nauk. dumka. 1981. 52 p. [in Ukrainian].
- [4] Abramov A.G. (1965) Razmernyy ryad induktsionnykh avtomaticheskikh reostatov dlya elektrodvigateley s faznym rotorom [Size range of inductive automatic rheostats for electric motors with phase-wound rotor] *Elektrichestvo*. 1965. № 12. P. 46–49. [in Ukrainian].
- [5] Verbovoy A.P. (1997) *Reshenie uravneniy elektromagnitnogo ravnovesiya induktsionnykh soprotivleniy s uchetom protsessov v ekranah* [Solving the equations of electromagnetic equilibrium of inductive resistances, taking into account the processes in the screens] Kiev, In—t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 1997. P. 26–33. [in Ukrainian].
- [6] Verbovoy A.P. (1996) *Uraveniya, shema zamesheniya i vektornaya diagramma induktsionnykh soprotivleniy s uchetom protsessov v ekranah* [Equations, substitution diagram and vector diagram of inductive resistances taking into account the processes in the screens] Kiev, In—t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 1996. P. 31–38. [in Ukrainian].
- [7] Verbovoy A.P. (1999) *Matematicheskaya model dlya issledovaniya elektromagnitnykh protsessov v trehfaznykh induktsionnykh reostatah* [Mathematical model to study electromagnetic processes in three-phase induction rheostats] Kiev, In—t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 1999. P. 21–26. [in Ukrainian].
- [8] Verbovoy A.P. & Verbovoy P.F. & Syyanov A.M. (1997) *Opreделение i issledovanie elektromagnitnykh parametrov induktsionnykh soprotivleniy* [Determination and study of electromagnetic parameters of induction resistors] Kiev, In—t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 1997. P. 38–48. [in Ukrainian].
- [9] Verbovoy A.P. (1997) *Metodika opredeleniya induktivnogo soprotivleniya rasseyaniya obmotki induktsionnogo soprotivleniya* [Method for determining the inductive resistance of the induction resistance winding dissipation] *Tehn. elektrodinamika*. 1997. № 3. P. 60–64. [in Ukrainian].
- [10] Verbovoy A.P. & Verbovoy P.F. & Syyanov A.M. *Opreделение elektromagnitnykh parametrov induktsionnykh reostatov po eksperimentalnyim dannym* [Determination of electromagnetic parameters of induction rheostats from experimental data] Kiev, In—t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 1998. P. 66–76. [in Ukrainian].
- [11] Syyanov A.M. (1997) *Matematicheskie modeli i issledovanie protsessov v staticheskikh i dinamicheskikh rejimakh raboty asinhronnykh dvigateley s uchetom nelineynykh elektromagnitnykh parametrov*. [Mathematical models and investigation of processes in static and dynamic modes of asynchronous motors with regard to nonlinear electromagnetic parameters]. *Abstract of doctoral thesis*. Kiev, 1997. 34 p.

Надійшла до редакції 06.06.2023