

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.14

УДК 621.313.323

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

Количев 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 Electrical Engineering and Electromechanics

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

Syanov Olexander, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПУСКОВИМИ РЕОСТАТАМИ У КОЛІ ФАЗНОГО РОТОРА

У роботі досліджено перехідні процеси в асинхронному двигуні (АД) з фазним ротором (ФР) із увімкненими у роторне коло пусковими реостатами (ПР). Метою роботи є одержання перехідних характеристик пуску АД з ПР шляхом моделювання перехідних режимів роботи в реальному масштабі часу. У результаті моделювання отримані перехідні процеси для симетричного й несиметричного режиму роботи. Показано, що використання пускових реостатів приводить до виникнення додаткових коливань струму в статорному колі, що, у свою чергу, впливає на характер пускового електромагнітного моменту. Враховуючи негативні фактори, що виникають при експлуатації контактної апаратури в реальних умовах, у роботі досліджено перехідні процеси пуску АД з ПР при несиметричному вмиканні пускових резисторів у роторному колі. Отримані результати моделювання дозволяють зробити висновки про негативний вплив зазначених режимів на характер перехідних процесів пуску АД, що на практиці може призводити до аварійних ситуацій.

Ключові слова: асинхронний двигун; пусковий реостат; модель; струм; момент; швидкість.

The paper investigated transition processes in an induction motor (IM) with a phase rotor (FR) and launch rheostats (LR) included in the rotor circuit. The purpose of the article is to obtain transitional characteristics of the start of IM with the LR modeling transitional operating modes in a real time. As a result of modeling, transition processes were obtained for a symmetrical and asymmetric mode of operation. It is shown that the use of launch rheostats leads to additional fluctuations of the current in the stator circuit, which, in turn, has a negative effect on the electromagnetic moment. Considering the negative factors that arise during the operation of the contact equipment in real conditions, the work of transitional processes of IM with LR in asymmetric inclusion of launch rheostats in the rotor circuit were investigated in the operation. The obtained modeling results allow us to make conclusions about the negative impact of these modes on the nature of transitional processes of IM, which in practice can lead to emergency situations.

Keywords: induction motor; launch rheostat; model; electric current; torque; speed.

Постановка проблеми

Електропривод на базі трифазного асинхронного двигуна (АД) є самим масовим у промисловості і сільському господарстві. Це пов'язано з простотою виготовлення й експлуатації АД, їх меншими, у порівнянні із двигунами постійного струму, масою, габаритами, вартістю й надійністю у роботі. АД поділяються на короткозамкнені (АДК) і з фазним ротором (АДФ).

АДК характеризуються підвищеними пусковими струмами й моментами й, в основному, працюють у статичному режимі [1]. АДФ, у порівнянні з АДК, мають поліпшені пускові й регулювальні властивості, однак їм властиві такі недоліки як більша маса, габарити й вартість.

Крім основного статичного режиму роботи АД часто працюють у перехідних режимах [2]. Перехідні режими мають місце при зміні навантаження на валу, напруги живлення, частоти мережі, напрямку обертання при підключенні й відключенні від мережі, при зміні параметрів машини. Найбільш важкими перехідними режимами є процеси пуску, гальмування, реверсу, повторного включення. У цих режимах виникають значні стрибки струму до $6I_H$, тривалість яких залежить від моменту інерції системи "АД-механізм". У свою чергу стрибки струму приводять до поштовхів механізму, підвищеним електродинамічним зусиллям в обмотках статора й ротора. Електромагнітний момент у перехідних режимах має характер загасаючих коливань зі значними амплітудами, а максимальні значення моменту можуть досягати $5M_H$. Багаторазові, а іноді й знакозмінні значення електромагнітного моменту АД в перехідних режимах викликають прискорене зношення механічного устаткування й самого двигуна.

У механізмах з повторно короткочасними режимами роботи (кранові механізми, волочильні стани, канатні машини й ін.) знаходять широке застосування, в основному, АД з фазним ротором. У цьому випадку необхідні додаткові пускові реостати й контактори, що дозволяють обмежити стрибки струму й електромагнітного моменту й, тим самим, збільшити плавність роботи електропривода. Таким чином, дослідження перехідних процесів в АДФ у повторно-короткочасних режимах роботи є актуальним завданням.

Аналіз основних досліджень та публікацій

Для аналізу систем електроприводів на базі асинхронного двигуна традиційно використовуються математичні моделі, побудовані на основі узагальненої двофазної електричної машини [1].

У ряді робіт [2, 3] запропоновані трифазні математичні моделі АД у реальній системі координат, спрямованій по осях фазних обмоток статора. У роботі [4] розроблена математична модель для дослідження статичних режимів роботи, у якій АД представлено у вигляді кіл. Проведено моделювання статичних характеристик і виконано їх порівняння з експериментальними.

Процес пуску АД з індукційним накопичувачем енергії у колі ротора досліджено у роботі [5]. Авторами запропонована математична модель АДФ у матричній формі, що містить нелінійні параметри накопичувачів енергії.

У роботі [6] запропонована математична модель АДФ із індукційними реостатами у колі фазного ротора. Показано, що реостати можуть мати різне конструктивне виконання, габаритні й вагові показники. На основі розробленої математичної моделі отримано покращені пускові властивості електропривода.

Розглянуті математичні моделі АДФ з різними елементами у колі фазного ротора дозволяють одержати перехідні процеси за умови повної симетрії як активних так і реактивних параметрів роторного кола. На практиці часто виникають ситуації аварійного характеру, викликані несиметрією режимів у результаті зміни опору однієї або декількох фаз ротора. Зазначені процеси є наслідком механічного або температурного впливу, що нерідко виникає у виробничих умовах. Таким чином, розробка комплексної математичної моделі АДФ, що дозволяє аналізувати перехідні процеси у несиметричних режимах є актуальним завданням.

Формулювання мети дослідження

На основі існуючих теоретичних моделей та практичного досвіду експлуатації АД у промислових умовах розробити універсальну математичну модель трифазного АДФ з пусковими реостатами у колі фазного ротора, яка дозволить досліджувати перехідні процеси пуску АД при несиметричних режимах.

Виклад основного матеріалу

У спрощеному вигляді в реальній системі координат АД може бути описаний системою диференціальних рівнянь у матричній формі [6]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} R_{01} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} R'_{02}(i) + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

де u_i — миттєві значення фазних напруг; i_i — миттєві значення фазних струмів; R_{01}, R'_{02} — активні опори фаз АД; Ψ_i — повні потокозчеплення фаз АД.

Потокозчеплення статора й ротора можуть бути записані [6]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} L_s + \begin{bmatrix} i_B + i_C \\ i_C + i_A \\ i_A + i_B \end{bmatrix} M_s + [C_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} M_{sr}; \\ \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} L_r + \begin{bmatrix} i_c + i_b \\ i_c + i_a \\ i_a + i_b \end{bmatrix} M_r + [C_r] \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} M_{sr}, \end{aligned} \quad (2)$$

де L_s — власні індуктивності фаз статора, $L_s(i) = L_A(i) = L_B(i) = L_C(i)$; M_s — взаємні індуктивності фаз статора, $M_s(i) = M_{AB}(i) = M_{AC}(i) = M_{BA}(i) = M_{BC}(i) = M_{CA}(i) = M_{CB}(i)$; M_{sr} — взаємні індуктивності фаз статора і ротора,

$$\begin{aligned} M_{sr}(i) &= M_{Ab}(i) = M_{Ac}(i) = M_{Ba}(i) = M_{Bb}(i) = \\ &= M_{Aa}(i) = M_{Bc}(i) = M_{Ca}(i) = M_{Cb}(i) = M_{Cc}(i); \end{aligned}$$

L_r — власні індуктивності фаз ротора, $L_r(i) = L_a(i) = L_b(i) = L_c(i)$; M_r — взаємні індуктивності фаз ротора, $M_r(i) = M_{ab}(i) = M_{ac}(i) = M_{ba}(i) = M_{bc}(i) = M_{ca}(i) = M_{cb}(i)$; M_{sr} — взаємні індуктивності фаз ротора і статора,

$$\begin{aligned} M_{sr}(i) &= M_{aA}(i) = M_{aB}(i) = M_{aC}(i) = M_{bA}(i) = \\ &= M_{bB}(i) = M_{bC}(i) = M_{cA}(i) = M_{cB}(i) = M_{cC}(i). \end{aligned}$$

Квадратні матриці C_S і C_R , що входять до системи (2), мають наступний вигляд

$$\begin{aligned} [C_S] &= \begin{bmatrix} \cos(p\gamma) & \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(p\gamma) & \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(p\gamma) \end{bmatrix}; \\ [C_R] &= \begin{bmatrix} \cos(p\gamma) & \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(p\gamma) & \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(p\gamma) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

де γ — кут повороту ротора відносно статора; p — кількість пар полюсів.

Система рівнянь (1) має бути доповнена диференціальними рівняннями механічної рівноваги:

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{M - M_c}{J};$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_2,$$

де ω_2 — частота обертання ротора; M — електромагнітний момент двигуна [7]; M_c — момент статичного навантаження; J — сумарний момент інерції ротора.

У розглянутій математичній моделі АД прийняті наступні припущення: відсутнє насичення магнітного кола і гістерезис; криві магніторушійної сили і магнітні індукції розподілені у просторі синусоїдально; індуктивні опори розсіювання не залежать від положення ротора.

Для моделювання перехідних процесів скористаємося студентською версією пакета прикладного програмного забезпечення для електромагнітних розрахунків ANSYS Maxwell.

Віртуальна схема моделі АД з фазним ротором і пусковими реостатами показана на рис. 1. До моделі входять джерела фазної напруги E1, E2 і E3, вимірювальні прилади (вольтметри VM1, VM2, ватметр WM1, амперметр AM1, пускові контактори S1-S6, блоки керування контакторами і пускові резистори R1-R9).

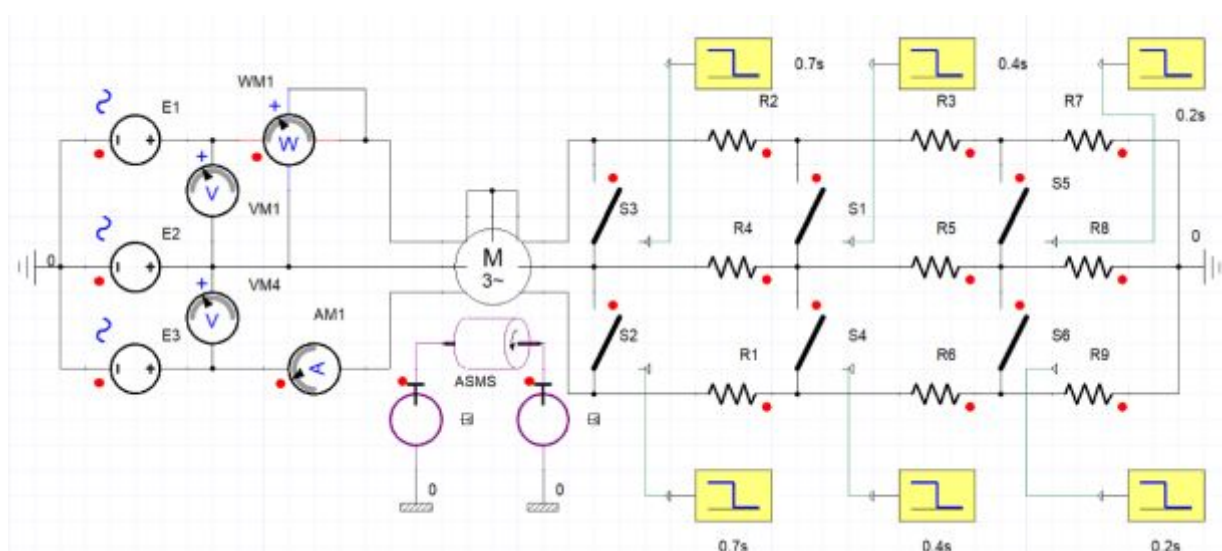


Рис. 1. Схема моделі АД з фазним ротором і пусковими резисторами

Виконано моделювання режиму пуску АДФ типу МТВ-412-8 без навантаження на валу. Параметри двигуна представлено у табл. 1.

Таблиця 1. Параметри досліджуваного АД

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	$0,01 M_H$

Пускові резистори першого щабля (R7, R8, R9) мають опір $R = 0,4$ Ом, другого (R3, R5, R6) $R = 0,4$ Ом і третього (R2, R4, R1) $R = 0,3$ Ом. Час замикання контактів першої групи (S5, S6) $t_{01} = 0,3$ с, другої (S1, S4) $t_{02} = 0,5$ с, третьої (S2, S3) $t_{03} = 0,7$ с.

Результати моделювання режиму пуску АДФ без навантаження показано на рис. 2.

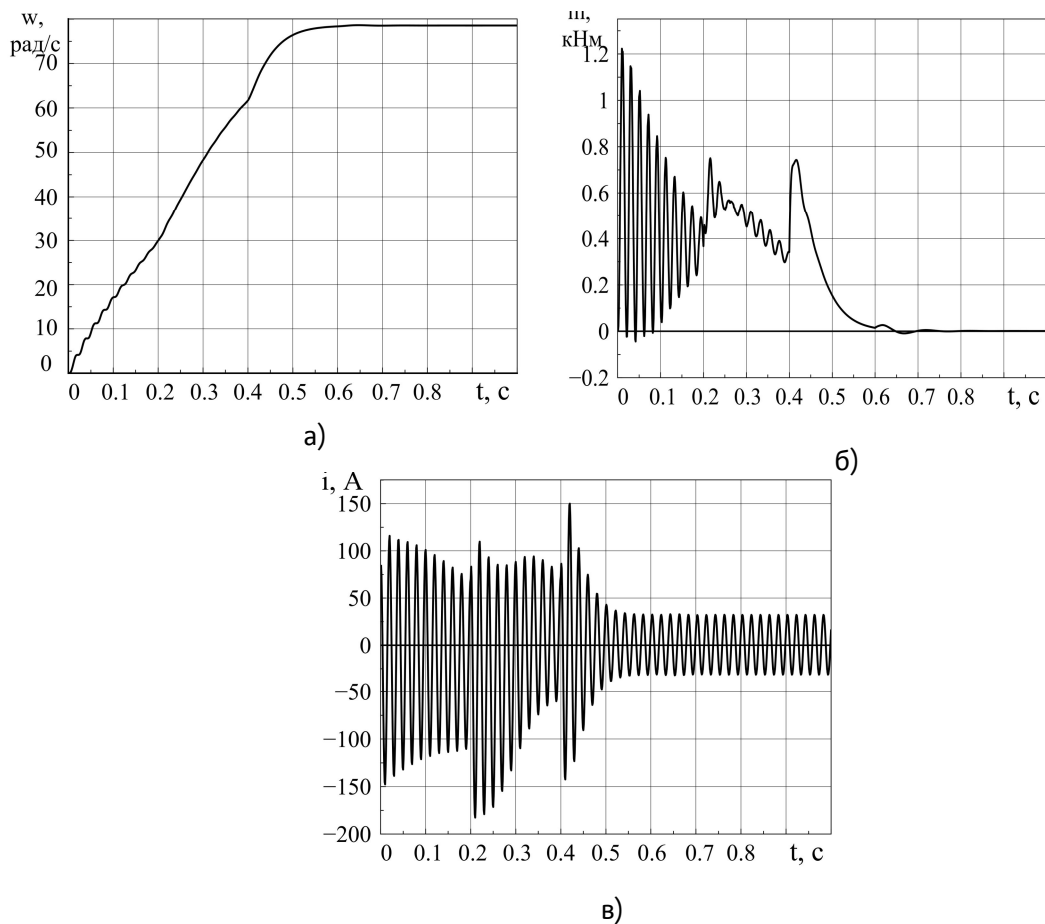


Рис. 2. Перехідний процес пуску АДФ: а – кутова швидкість обертання ротора; б — крива зміни електромагнітного моменту; в - пусковий струм в обмотці статора

З рис. 2 видно, що кутова швидкість обертання ротора (рис. 2, а) зростає практично лінійно, а в моменти замикання контакторів має місце незначний злам кривої ω_2 . Процес пуску АД закінчується виходом кутової швидкості обертання ротора на швидкість ідеального холостого ходу. Електромагнітний момент двигуна (рис. 2, б) у початковий момент часу є знакозмінним і змінюється від 1,23 кНм до -40 Нм. При цьому на характеристиці чітко видно стрибки, викликані комутацією у роторному колі. Крива моменту встановлюється на значенні, рівному моменту опору тертя в підшипниках і щітковому вузлі. Пусковий струм сягає максимального пускового значення 150 А і перевищує номінальний в 1,8 рази.

Одним з найбільш важких перехідних режимів роботи АДФ є несиметричний пуск при обриві однієї з фаз. У цьому випадку у двигуні мають місце значні втрати потужності, що призводить до миттєвого перегріву обмоток і кратному зростанню магнітних втрат у статорі й роторі. При цьому стрибки пускового струму статора перевищують $6I_n$, а швидкість обертання двигуна “застряє” на $1/2 \omega_2$.

На рис. 3 показані перехідні процеси пуску АДФ в аварійному режимі, при якому відбувається обрив однієї з фаз у колі ротора, починаючи з моменту часу $t = 0,1$ с до $t = 0,7$ с (рис 3, а). При цьому електромагнітний момент має суттєво виражені знакозмінні коливання й сягає максимальних значень від $M = 3,2$ кНм до $M = -1,45$ кНм (рис. 3, б). Стрибки пускового струму мають максимальні значення близько 600А (рис. 3, в), що перевищує номінальний струм статора у 6,8 разів.

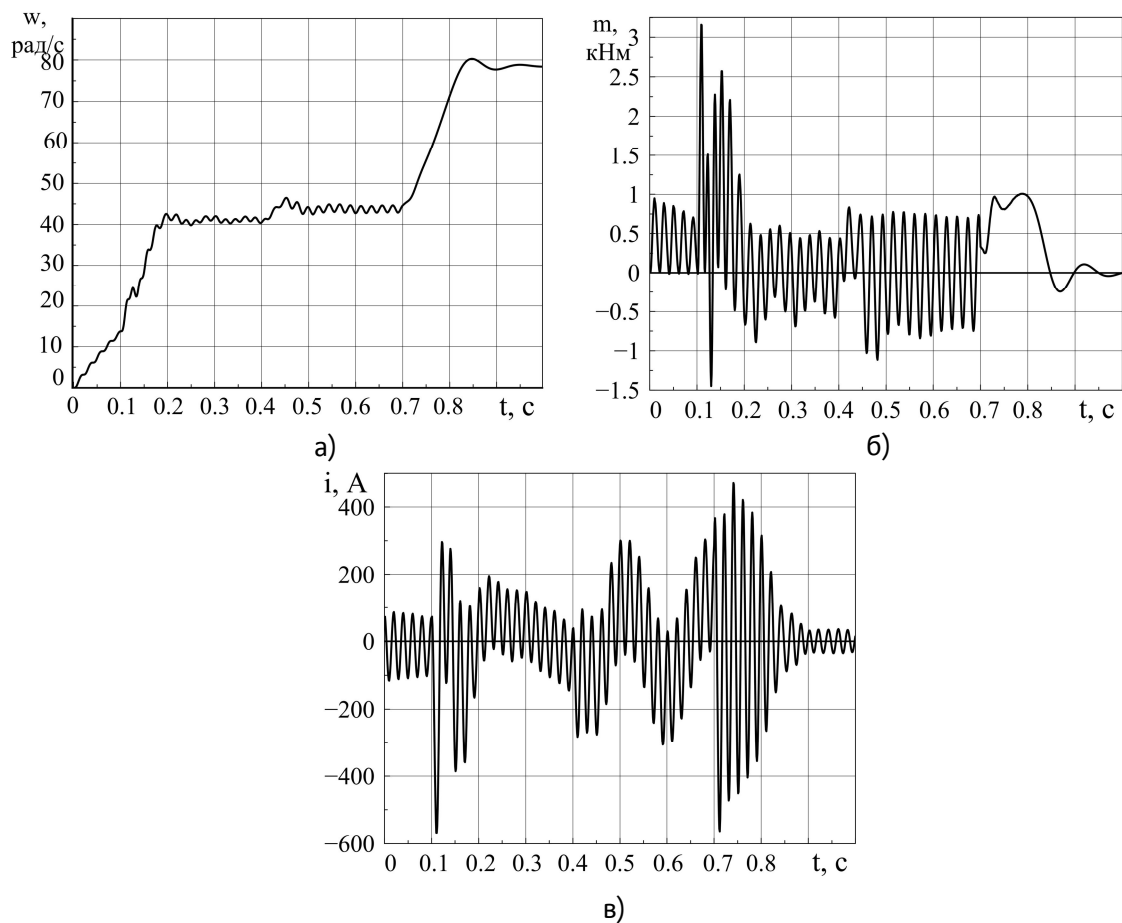


Рис. 3. Перехідні процеси пуску АДФ з несиметричним вмиканням пускових резисторів: а — кутова швидкість обертання ротора; б — електромагнітний момент двигуна; в — пусковий струм в обмотці статора

Висновки

Отримані результати моделювання показали, що при виникненні несиметричних режимів пуску електропривода на базі АДФ, викликаних обривом однієї з фаз у колі ротора, мають місце суттєво виражені негативні процеси. Вони характеризуються різкими стрибками пускового струму в статорі й, викликані цим, істотні стрибки електромагнітного моменту, що спричиняє ударну дію на весь механізм електропривода. Крім того, моделювання показало, що обрив однієї з фаз ротора в процесі пуску призводить до зниження швидкості обертання двигуна й неможливості його роботи в номінальному режимі. Це, в свою чергу, призводить до росту ковзання, що збільшує магнітні втрати, викликаючи значне нагрівання як обмоток, так і магнітопроводів АДФ. Зазначені негативні явища є небезпечними як для двигуна, так і всього електропривода.

Список використаної літератури

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин : учеб. для вузов. М. : Высш. шк., 2001. 327 с.
2. Захаренко В.С., Дорощенко И.В. Особенности имитационного моделирования асинхронного двигателя для составления модели с учетом коммутации и при несимметричных схемах включения. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*, 2011. № 3. С. 66–74.

3. Дорощенко И.В., Тодарев В.В. Модель трехфазной асинхронной машины с фазным ротором в MATLAB SIMULINK. *Современные проблемы машиноведения: материалы XII Международной научно-технической конференции*. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. С. 159–161.
4. Количев С.В., Качура О.В. Исследование пуска асинхронного электродвигателя с индукционно-емкостным накопителем энергии в цепи ротора. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське: ДДТУ, 2016. Том 2. № 29 (2016). С. 115–119.
5. Качура О.В., Кулик М.В., С'янов О.М. Дослідження асинхронних двигунів з нелінійними елементами у колі фазного ротора. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика"*. Кременчук. 2012. Випуск 3/2012(19). С.408–411.
6. Качура О.В., Количев С. В., С'янов О.М. Индукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: монографія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 209 с.
7. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., С'янов О.М. Проектування асинхронних двигунів: монографія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 528 с.
8. Качура А.В., Мороз Л.Ю., С'янов А.М. Математическое моделирование вентильного реактивного двигателя с уменьшенным моментом инерции. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки*. 2015. Вип. 2. С. 127–135.
9. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов по спец. "Электромеханика" – М.: Высш. шк., 1989. 312 с.
10. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов Под ред. О.Д. Гольдберга. М.: Высш. шк., 1984. 431 с.
11. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов под. ред. И.П. Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2011. 767 с.

TRANSITIONAL PROCESSES INVESTIGATION OF INDUCTION MOTOR STARTING WITH LAUNCH RHEOSTATS IN THE PHASE ROTOR CIRCLE

Abstract

An induction motor electric drive (IM) is the most popular in industry and agriculture. This is the result of the ease of manufacture and operation, smaller than DC motors weight, dimensions, cost and reliability. Induction motors are divided into short-circuited (IMS) and with phase rotor (IMP). IMSs are characterized by high starting currents, torque and mainly operate in static mode. IMP has improved regulating properties, but they are characterized by disadvantages as greater weight, dimensions and cost.

In addition to the main static mode of operation, the IMS is often operated in transitional modes. Transitional modes occur when change shaft loading, power supply, circuit frequency, rotation direction when connected and disconnected from the network, when changing the parameters of the motor. The most difficult transitional modes are the processes of start-up, breaking, reverse and reconnection. There are current jumps in these modes and their duration depends on moment of inertia of all mechanism. Current jumps lead to the shocks of the drive, increased efforts in the windings of the stator and rotor. The electromagnetic torque in transitional modes has oscillation character with significant amplitudes, and the maximum rotor torque achieves five-time of nominal. Repeated and sometimes variable values of the electromagnetic torque IM in transitional modes cause accelerated wear of the mechanism, equipment and the motor.

In mechanisms with repeated modes of operation (crane mechanisms etc.) IMP are widely used. In this case, additional start-up rheostats and contactors are required to limit current jumps and

electromagnetic torque and as a result increase the smooth operation of the electric drive. Thus, the study of transitional processes in IMP in repeated modes is an actual task.

References

- [1] Kopylov, I.P. (2001) *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin: ucheb. dlya vuzov [Mathematical modeling of electric machines: Textbook. for universities]*. Vyssh. shk., 2001. p. 327. [in Russian].
- [2] Zaharenko, V.S., Doroshenko V.S. (2011) *Osobennosti imitacionnogo modelirovaniya asinhronnogo dvigatelya dlya sostavleniya modeli s uchetom kommutatsii i pri nesimmetrichnykh shemakh vklyucheniya [Features of the simulation of the asynchronous engine for compiling the model, taking into account switching and with asymmetric switching schemes]*. Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. P. O. Suhogo. 2011. № 3. p. 66–74. [in Russian].
- [3] Doroshenko, I.V., Todarev V.V. (2018) *Model trehfaznoj asinhronnoj mashiny s faznym rotorom v MATLAB SIMULINK [Model of a three -phase asynchronous machine with a phase rotor in Matlab Simulink]*. Sovremennye problemy mashinovedeniya: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoy konferencii. Gomel: GGTU im. P. O. Suhogo, 2018. p. 159–161. [in Russian].
- [4] Kolichev S.V., Kachura O.V. (2016) *Issledovanie puska asinhronnogo elektrodvigateľa s indukcionno-emkostnym nakopiteľem energii v cepi rotora [Study of launching an asynchronous electric motor with an induction-capacitive energy drive in the rotor circuit]* Zbirnik naukovih prac DDTU. Kam'yanke: DDTU, 2016. Tom 2. № 29. p. 115-119. [in Russian].
- [5] Kachura O.V., Kulik M.V., S'yanov O.M. (2012) *Doslidzhennya asinhronnih dviguniv z nelineijnimi elementami u koli faznogo rotora [Research of asynchronous engines with nonlinear elements in the phase rotor circle]*. Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi. Tematichnij vipusk "Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya j praktika". Kremenčuk. 2012. Vipusk 3/2012(19). p.408-411. [in Ukrainian].
- [6] Kachura O. V., Kolichev S. V., S'yanov O. M. (2011) *Indukcijni reostati z pokrashenimi masogabaritnimi pokaznikami dlya asinhronnih dviguniv z faznim rotorom: monografiya. [Induction Rheostats with improved massave rates for asynchronous motors with phase rotor]*. (Monografiya). Dniprodzerzhinsk: DDTU, 2011. 209 p. [in Ukrainian].
- [7] Verbovoj A.P., Verbovoj P.F., S'yanov O.M. (2013) *Proektuvannya asinhronnih dviguniv [Design of asynchronous engines]*. (Monografiya). Dniprodzerzhinsk: DDTU, 2013. 528 p. [in Ukrainian].
- [8] Kachura A.V., Moroz L.Y., Syanov A.M. (2015) *Matematicheskoe modelirovanie ventilnogo reaktivnogo dvigatelya s umenshennym momentom inercii. [Mathematical modeling of a valve reactive engine with a reduced moment of inertia]*. Zbirnik naukovih prac Dniprodzerzhinskogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Tehnični nauki. 2015. Vip. 2. p. 127-135. [in Russian].
- [9] Ivanov-Smolenskij A.V. (1989) *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinah: Ucheb. posobie dlya vuzov po spec. "Elektromehanika". [Electromagnetic forces and energy transformation in electric machines: textbook. A manual for universities in special. "Electromechanics"]*. M.: Vyssh. shk., 1989. 312 p. [in Russian].
- [10] Goldberg O.D., Gurin Y.S., Sviridenko I.S. (1984) *Proektirovanie elektricheskikh mashin: Uchebnik dlya vtuzov. [Design of electrical machines: Textbook for TUZ]*. M.: Vyssh. shk., 1984. 431 p. [in Russian].
- [11] Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. (2011) *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov. [Design of electric machines: a textbook for universities]* M.: Izdatelstvo Yurajt, 2011. 767 p. [in Russian].