

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК: 621.319.53

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.023>

МАТЕМАТИЧНА ТА КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ У РЕЖИМІ ДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ З САМОЗБУДЖЕННЯМ

В.М. Шамардіна*, канд.техн. наук, **К.О. Земцова****,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
м. Харків, вул. Кирпичова, 2, 61002, Україна
e-mail: Kateryna.Zemtsova@ieee.khpi.edu.ua

Одним із важливих викликів сьогодення є забезпечення енергоефективності та покращення експлуатаційних характеристик найбільш поширених асинхронних електроприводів (АЕП) виробничих та підйомно-транспортних машин. Підвищення загального діапазону регулювання і стабільне регулювання швидкості в АЕП часто забезпечується застосуванням систем імпульсно-ключового або фазо-імпульсного регулювання частоти обертання асинхронного двигуна із фазним ротором, в яких регулювання здійснюється в колі випрямленого струму ротора. Наявність у таких схемах випрямляча напруги роторної обмотки створює умови для застосування режиму динамічного гальмування з самозбудженням (ДГС). У роботі запропоновано математичну модель асинхронного двигуна із фазним ротором у режимі ДГС у системі нерухомих відносно ротора осей координат (d, q) з урахуванням характеристики насиченості магнітної системи машини. Апробацію моделі проведено у процесі комп'ютерного моделювання із використанням можливостей пакету Simulink Matlab. Створена модель має практичну цінність, під час формування енергоефективних гальмівних режимів АЕП вона дасть змогу аналізувати складні електромагнітні перехідні процеси й обґрунтовано обирати структуру та параметри їхніх електричних схем. Бібл. 4, рис. 6.

Ключові слова: динамічне гальмування з самозбудженням, математична та комп'ютерна модель, вантажопідйомні механізми, енергоефективність.

Актуальність роботи. На сучасних вантажопідйомних машинах завдяки низці переваг найбільш поширеним є застосування асинхронних електроприводів (АЕП). Підйомно-транспортні механізми мають значні моменти інерції, тому в їхніх електроприводах можливий процес повернення частини кінетичної або потенційної енергії в мережу або використання її для формування гальмівних режимів. У системах АЕП за наявності в ланцюзі ротора випрямленого струму доцільним є використання режиму динамічного гальмування із самозбудженням [1], що дає змогу значно підвищити енергетичні показники електропривода (ЕП).

Схеми динамічного гальмування із самозбудженням (ДГС) характеризуються [1]:

- відсутністю вузлів підживлення, їхньою відносною простотою та невеликою вартістю;
- автоматичною залежністю струму збудження від навантаження електродвигуна, що забезпечує жорсткі характеристики привода і відносно високий діапазон регулювання швидкості;
- високими енергетичними показниками, так як електрична енергія з мережі практично не споживається.

У режимі ДГС здійснюється або зміна напрямку обертання двигуна в механізмах із активним характером статичного навантаження, або гальмування механізму тільки до зупинки (особливо за реактивного навантаження). При ДГС в обмотку статора асинхронного двигуна із фазним ротором (АД ФР) подається постійний струм, обумовлений випрямленою напругою випрямляча, що підключається до обмоток ротора. Застосування ДГС дає змогу підвищити швидкодію АЕП порівняно з іншими гальмівними режимами [2] або без втрат електричної енергії, або за незначного її споживання.



Під час удосконалення структур АЕП підйомних механізмів важливим завданням є підвищення їхньої енергоефективності, чому і сприяє використання режиму ДГС, тому актуальними є роботи зі створення математичних моделей, які враховують фактори впливу на формування цього режиму.

Метою роботи є побудова математичної моделі АД ФР у режимі ДГС з урахуванням характеристики насиченості магнітної системи машини з можливістю перевірки її адекватності шляхом комп'ютерного моделювання із використанням пакету Simulink Matlab.

У режимі ДГС значення динамічних параметрів АД ФР обумовлюються нелінійністю характеристики намагнічування, тобто ступенем насичення магнітної системи машини [1–4], що необхідно враховувати під час моделювання цього режиму. У розрахунках електроприводів вантажопідйомних механізмів доцільно використовувати узагальнену характеристику намагнічування, яка наведена в довідниках для кранових АД ФР, її аналітична залежність отримана за методом найменших квадратів:

$$x_{\mu} = 2\pi L_{\mu} = 0,0066 + \frac{1,2}{\sqrt{0,456 + I_{\mu}^2}}, \quad (1)$$

де $x_{\mu} = 2\pi L_{\mu}$ – реактивний опір взаємної динамічної індуктивності від; I_{μ} – струм намагнічування.

Відомо, що на результати комп'ютерного моделювання впливає вибір двофазної системи координат при математичному описі [4]. У режимі ДГС в АД ФР виникає електрична несиметрія в статорному колі, яка потребує використання системи нерухомих осей координат (α, β) відносно статора, і чергується несиметрія в колі ротора, що вимагає використання системи координат (d, q). Наявність випрямляча в колі ротора обумовлює доцільність використання під час дослідження ДГС системи нерухомих осей координат (d, q) відносно ротора. Надалі така модель буде корисною і під час досліджень АЕП з електричним зв'язком АД через коло випрямлених струмів роторів, електроприводів з машинами подвійного живлення.

У разі живлення обмоток статора двигуна від джерела напруги система електропривода має два зворотних зв'язка за ЕРС машини, що залежать від складових струму статора і потокозчеплення ротора. Тому під час розроблення моделі АД необхідно визначення сигналів: i_{sd} – струм статора за віссю d ; i_{sq} – струм ротора за віссю q ; Ψ_{rd} – потокозчеплення ротора за віссю d ; Ψ_{rq} – потокозчеплення ротора за віссю q [4].

Рівняння електричної рівноваги в системі координат (d, q) набувають вигляду:

$$\begin{cases} U_{sd} = i_{sd} R_s + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_{ел} \Psi_{sq} \\ U_{sq} = i_{sq} R_s + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_{ел} \Psi_{sd} \\ U_{rd} = i_{rd} R'_r + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} \\ U_{rq} = i_{rq} R'_r + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} \end{cases}, \quad (2)$$

де U_{sd}, U_{sq} – напруги на обмотці статора двигуна відповідно по осях d, q ; R_s – опір обмотки статора; $\omega_{ел}$ – електрична частота обертання ротора двигуна.

Електромагнітний момент двигуна M та електричну частоту обертання ротора $\omega_{ел}$ можна описати системою:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} Z_p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}); \\ J \frac{d\Omega}{dt} &= M - M_c; \\ \omega_{ел} &= Z_p \omega, \end{aligned} \quad (3)$$

де Z_p – кількість пар полюсів двигуна, ω – механічна швидкість обертання ротора двигуна.

Треба враховувати, що на величину струмів обмоток ротора i_{rd}, i_{rq} та статора i_{sd}, i_{sq} двигуна впливають як власні індуктивності статора L_s і ротора L_r , так і взаємна їхня індукти-

вність L_μ [4], це визначається за системою рівнянь (4).

Комп’ютерна модель АД ФР у пакеті Simulink Matlab, що створена на основі рівнянь (1) – (4), показана на рис. 1, де a – моделювання потокозчеплення обмотки ротора Y_{rd}, Y_{rq} ; b – моделювання потокозчеплення обмотки статора Y_{sd}, Y_{sq} і електрично-механічної частини АД ФР; c – моделювання струмів обмотки ротора i_{rd}, i_{rq} та обмотки статора i_{sd}, i_{sq} .

$$\begin{aligned}
 i_{sd} &= \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2} (\Psi_{sd} L_r - \Psi_{rd} L_\mu); \\
 i_{sq} &= \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2} (\Psi_{sq} L_r - \Psi_{rq} L_\mu); \\
 i_{rd} &= \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2} (\Psi_{rd} L_r - \Psi_{sd} L_\mu); \\
 i_{rq} &= \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2} (\Psi_{rq} L_r - \Psi_{sq} L_\mu); \\
 i_\mu &= \sqrt{(i_{sd} + i_{rd})^2 + (i_{sq} + i_{rq})^2}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Перехідний процес зміни струму намагнічування двигуна i_μ за рівняннями (4) під час розгону двигуна та переходу в режим ДГС зображено на рис.2.

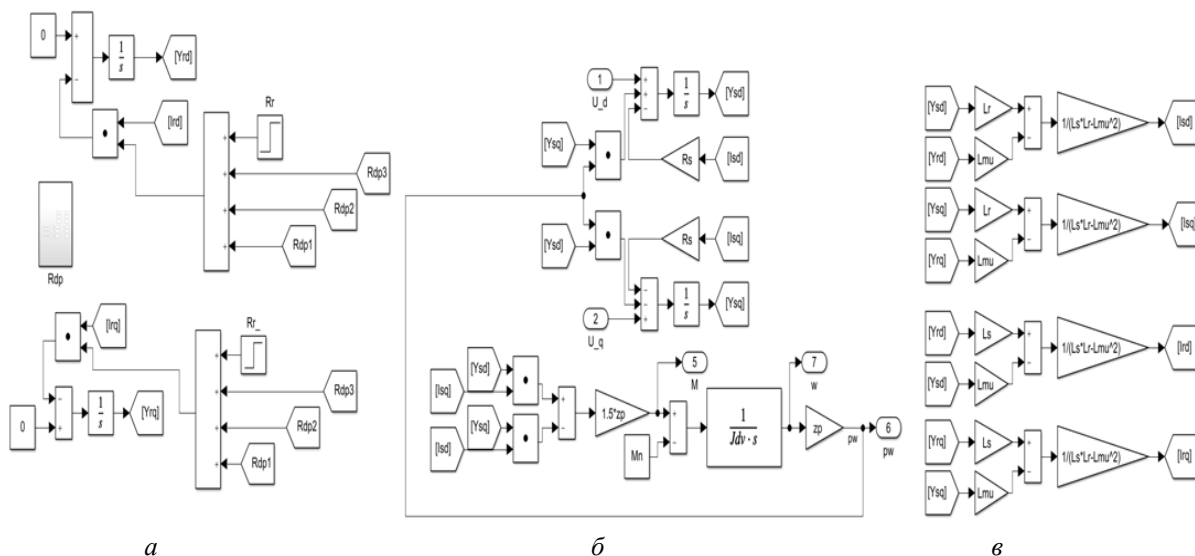


Рис. 1. Комп’ютерна модель асинхронного двигуна із фазним ротором у пакеті Simulink Matlab

Окремим етапом є побудова імітаційної моделі реалізації режиму ДГС, в якому для створення постійного струму збудження в статорі АД ФР використовують випрямлену ЕРС, що індукуються в роторі. Початкову напругу збудження АД можна створити за допомогою додаткового малопотужного випрямляча, до якого підключаються обмотки статора. Недолік цього способу полягає в тому, що необхідно мати зовнішнє джерело живлення, але потужність його незначна.

Під час математичного моделювання безпосередньо режиму ДГС необхідно створити блок випрямлення напруги ротора та визначення моменту її подачі на обмотку статора для початку процесу гальмування. Схема комп’ютерної моделі дає змогу визначити складові напруги на роторі U_{rd}, U_{rq} за рівнянням (2), що показано на рис. 3 а, а потім за допомогою блоку Universal Bridge у пакеті Simscape Matlab [4] випрямити їх, що показано на рис. 3 б.

Далі, відповідно до системи рівнянь (2), використовуємо вже випрямлену напругу ротора, у результаті отримаємо математичну модель двигуна в режимі ДГС у вигляді системи

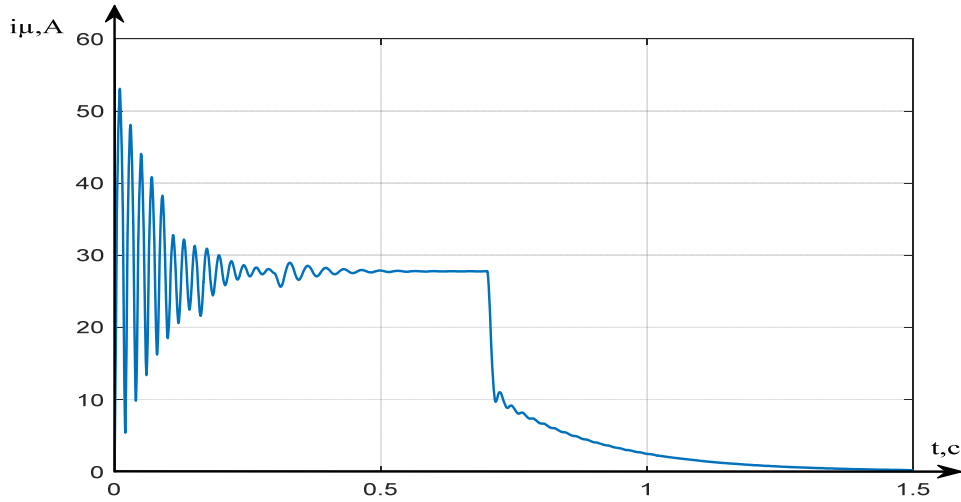


Рис. 2. Перехідний процес зміни струму намагнічування двигуна i_{μ} за рівняннями (4) під час розгону двигуна та переходу в режим динамічного гальмування із самозбудженням

диференціальних рівнянь (5), за цією математичною моделлю створено комп'ютерну модель АДФР у режимі ДГС у пакеті Simulink Matlab, що показана на рис. 4.

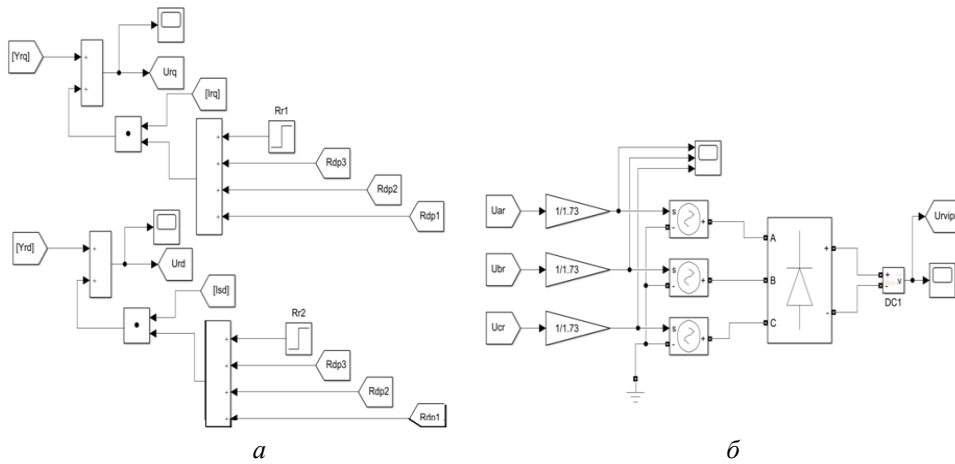


Рис. 3. Схема комп'ютерної моделі режиму динамічного гальмування із самозбудженням:
 а – визначення складових напруги обмотки ротора U_{rd} , U_{rq} ;
 б – визначення складових напруги обмотки ротора U_{rd} , U_{rq} за допомогою блоку Universal Bridge

$$\begin{cases}
 U_{rd\text{unp.}} = i_{sd} R_s + \frac{d \Psi_{sd}}{dt} - \omega_{\text{ел}} \Psi_{sq} \\
 U_{rq\text{unp.}} = i_{sq} R_s + \frac{d \Psi_{sq}}{dt} + \omega_{\text{ел}} \Psi_{sd} \\
 U_{rd} = i_{rd} R'_r + \frac{d \Psi_{rd}}{dt} \\
 U_{rq} = i_{rq} R'_r + \frac{d \Psi_{rq}}{dt} \\
 M = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}) \\
 J \frac{d \Omega}{dt} = M - M_c \\
 \omega_{\text{ел}} = Z_p \omega
 \end{cases} \quad (5)$$

де $U_{rd\text{випр.}}$ – випрямлена напруга обмотки ротора двигуна за віссю d ; $U_{rq\text{випр.}}$ – випрямлена напруга обмотки ротора двигуна за віссю q .

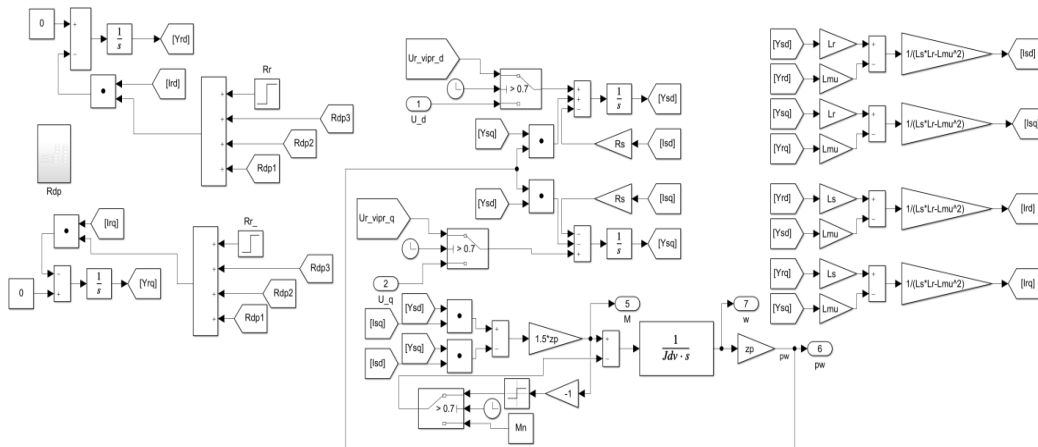


Рис. 4. Комп’ютерна модель асинхронного двигуна із фазним ротором у режимі динамічного гальмування із самозбудженням у пакеті Simulink Matlab

На рис. 5 наведено графіки перехідних процесів швидкості ω і електромагнітного моменту двигуна M , на рис. 6 – струмів ротора I_r і статора I_s . У разі переходу в режим ДГС спостерігається значний стрибок електромагнітного моменту двигуна M , його величину можна обмежити шляхом зменшення напруги, яка подається на статорні обмотки з виходу потенціометра, що підключається до виходу випрямляча в роторі.

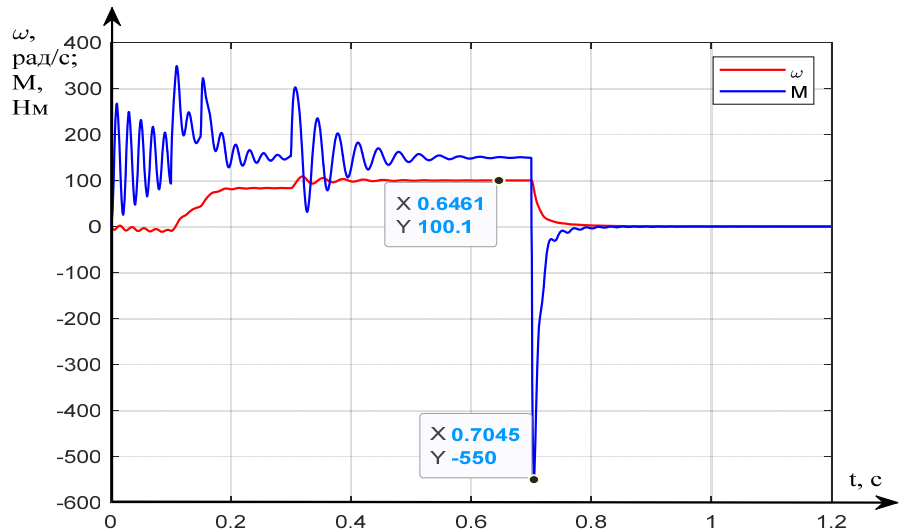


Рис. 5. Графіки перехідних процесів швидкості ω і електромагнітного моменту двигуна M

Висновки. 1. У системі нерухомих осей координат (d, q) створено математичну модель АД ФР у режимі ДГС за врахування насиченості магнітної системи двигуна, на базі якої побудовано комп’ютерну модель із використанням можливостей пакету Simulink Matlab.

2. Виконано апробацію отриманої моделі під час дослідження пуску АД ФР та гальмування в режимі ДГС, адекватність моделі підтверджено у зі-

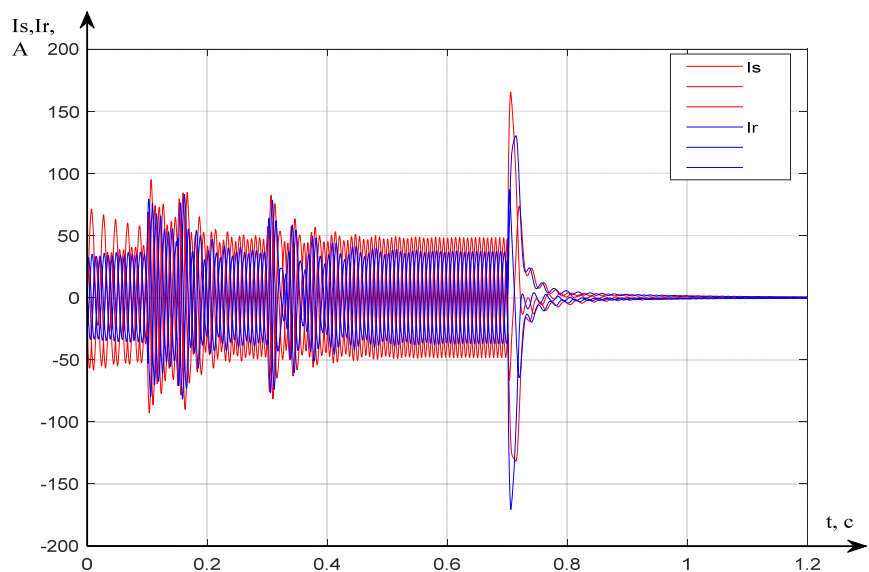


Рис. 6. Графіки перехідних процесів струмів ротора I_r і статора I_s

ставленні із результатами раніш проведених досліджень статичних характеристик двигуна МТФ 312-6 у режимі ДГС.

3. Запропоновані моделі мають практичну цінність, під час формування енергоефективних гальмівних режимів АЕП вони дають змогу аналізувати складні електромагнітні перехідні процеси й обґрунтовано обирати структуру та параметри їхніх електричних схем.

1. Шамардіна В.М., Земцова К.О. Визначення області самозбудження асинхронного двигуна у багатодвигунному електроприводі. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2023. № 9–10 (187–188). С. 78–92. DOI: <http://eee.khpi.edu.ua/issue/view/17718>
2. Ir. Muhaimin, M.T Dynamic Breaking Application of Three Phase Induction Motor using PLC. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Indonesia. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012097>
3. Кулагін Д.О. Визначення динамічних індуктивностей асинхронного двигуна з урахуванням процесів насичення. *Електротехніка та електроенергетика*. 2014. № 1. С. 55–60
4. Чорний О.П., Толочко О.І., Титюк В.К., Родькін Д.Й., Чекавський Г.С. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія. Кременчук: ПП Шчербатих О.В., 2016. 302 с.

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELS OF AN INDUCTION MOTOR WITH A PHASEROTOR IN THE MODE OF DYNAMIC BRAKING WITH SELF-EXCITATION

V.M. Shamardina, K.O. Zemtsova,

National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute,
Kharkiv, Ukraine; 2 Курпучова ст., 61002
e-mail: Kateryna.Zemtsova@iee.khpi.edu.ua

One of the important challenges of today is to ensure energy efficiency and improve the performance of the most common induction electric drives (IEDs) for production and lifting and handling machines. Increasing the overall control range and stable speed control in AEDs is often ensured by the use of pulse-key or phase-pulse control systems for the speed of rotation of the AD FR, in which the control is carried out in the rectified rotor current circuit. The presence in such schemes of a rotor winding voltage rectifier creates conditions for the use of the dynamic self-excitation braking (DSB) mode. The paper proposes a mathematical model of the AD FR in the DBS mode in the system of coordinate axes (d, q) fixed relative to the rotor, taking into account the saturation characteristics of the magnetic system of the machine. The model was tested by computer simulation using the capabilities of the Simulink Matlab package. The created model is of practical value; in the formation of energy-efficient braking modes of AEPs, it will allow analysing complex electromagnetic transients and reasonably choosing the structure and parameters of their electrical circuits. Ref. 4, fig. 6.

Keywords: dynamic braking with self-excitation, mathematical and computer model, lifting mechanisms, energy efficiency.

1. Shamardina V.M., Zemtsova K.O. Determination of the self-excitation region of an induction motor in a multi-motor electric drive. *Enerhozberzhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt*. 2023. No 9–10 (187–188). Pp. 78–92. DOI: <http://eee.khpi.edu.ua/issue/view/17718> (Ukr)
2. Ir. Muhaimin, M.T Dynamic Breaking Application of Three Phase Induction Motor using PLC. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Indonesia. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012097>
3. Kulagin D. Definition of dynamic inductances of the asynchronous engine with regard to processes of saturation. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka*. 2014. No 1. Pp. 55–60. (Ukr)
4. Chorny O., Tolochko O., Tytyuk V., Rodkin D., Chekavskiy G. Mathematical models and specifics of numerical calculations of dynamic characteristics of electric drives with induction motors: monograph. Kremen-chuk: PE Shcherbatykh O.V., 2016. 302 p. (Ukr)

Надійшла: 13.05.2024
Прийнята: 05.07.2024

Submitted: 13.05.2024
Accepted: 05.07.2024