

УДК 621.86

Б. І. Мокін, д. т. н., проф.; О. Б. Мокін, д. т. н., проф.; О. М. Кривоніс

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПІДЙОМНОГО КРАНА З УРАХУВАННЯМ ЗМІН У ЧАСІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ МАХОВИХ МАС

У роботі проведено огляд наявних публікацій, що присвячені дослідженням процесів у електромеханічних системах підйомних кранів, які виникають під час підйому/опускання вантажів. Проведений аналіз цих робіт показав, що автори цих публікацій не враховують зміну у часі приведенного моменту інерції махових мас системи електропривода, що є некоректним. Оскільки під час підйому/опускання вантажу момент інерції махових мас електропривода та момент навантаження стають функціями часу, потрібно проводити моделювання режимів роботи системи керування електроприводом підйомного крану з урахуванням змінних параметрів, зумовлених змінами в часі приведенного моменту інерції та моменту навантаження тягового електродвигуна під час підйому/опускання вантажу.

В наведених розділах роботи детально розглянуті режими роботи системи керування електроприводом підйомного крану та проведено моделювання режимів роботи системи керування електроприводом підйомного крану з урахуванням змінних параметрів, зумовлених змінами в часі приведенного моменту інерції та моменту навантаження тягового електродвигуна під час підйому/опускання вантажу. За отриманими загальними рівняннями динаміки та з урахуванням наведених співвідношень для визначення обертових моментів електродвигунів, побудовані імітаційні моделі для асинхронного електродвигуна КМ АИР250М. Імітаційні моделі побудовані в ППП Matlab із використанням ПП Simulink, що дає змогу проводити подальший аналіз з максимальною ефективністю та мінімальними затратами часу.

Наведено результати дослідження з урахуванням наведених параметрів під час розгону, гальмування за максимальної швидкості, на холостому ході та реверсі тягового електропривода. Виконано порівняльний ґрунтовний аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: модель, система керування, електродвигун, крановий механізм.

Вступ

Аналіз публікацій, присвячених дослідженням процесів у електромеханічних системах підйомних кранів, що виникають під час підйому/опускання вантажів, узагальнений у роботі [1], показав, що авторами цих публікацій не враховано зміну у часі приведенного моменту інерції махових мас системи електропривода, оскільки вони використовують математичну модель динаміки у вигляді:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{ed} - M_w = \Delta M . \quad (1)$$

де ω – кутова швидкість вала електродвигуна, а M_{ed}, M_w , – відповідно, тяговий момент електродвигуна та момент навантаження, створюваний силою ваги вантажу. Але, оскільки під час підйому вантажу й намотуванні завдяки цьому троса на барабан, з'єднаний через редуктор із валом електродвигуна, та розмотуванні цього троса з барабана під час опускання вантажу момент інерції махових мас електропривода та момент навантаження стають функціями часу, то, як показано в роботі [2], фактично для оцінки процесів у електромеханічній системі підйомного крану необхідно використовувати рівняння динаміки системи електропривода не у вигляді (1), а у вигляді –

$$J(t) \frac{d\omega}{dt} + \omega(t) \frac{dJ}{dt} = M_{ed} - M_w(t) = \Delta M(t). \quad (2)$$

Розв'язання поставленого завдання

Відповідно до графіку робочого циклу електродвигуна кранового механізму для процесу підйому/опускання вантажу, приведеного на рис. 1, знайдемо загальне рівняння динаміки для кожної ділянки часу.

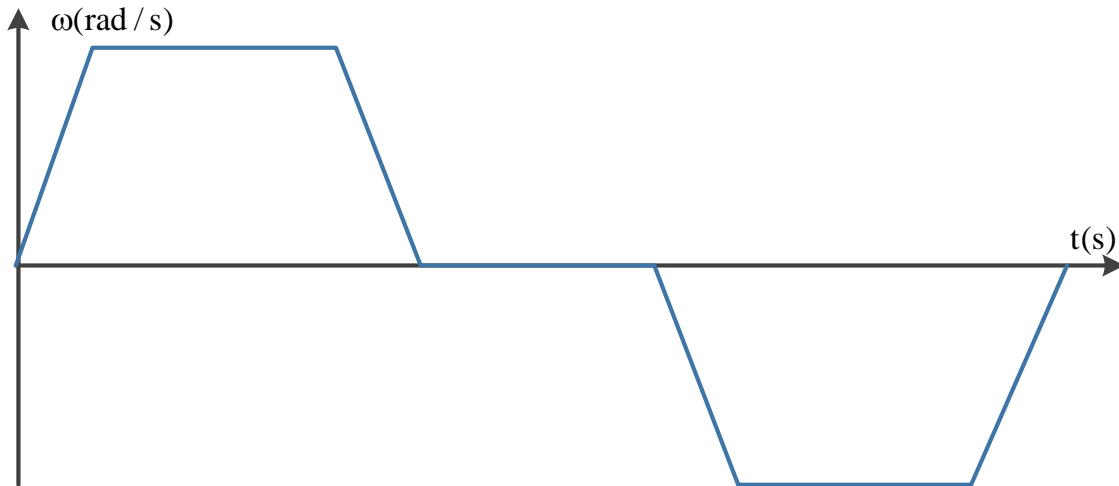


Рис. 1. Графік робочого циклу обертання вала електродвигуна системи електропривода підйомного крана

Перша ділянка, яку ми розглянемо: від моменту пуску до виходу на усталену кутову швидкість тягового електродвигуна згідно з [2]:

$$\frac{d\omega}{dt} = const, \quad (3)$$

тобто, на цьому відрізку часу вантаж підіймають чи опускають зі сталим кутовим прискоренням, а це означає, що зі сталим прискоренням змінюватимуться і приведений момент інерції

$$\frac{d^2 J}{dt^2} = const, \quad (4)$$

з якої подвійним інтегруванням отримаємо функцію

$$J(t) = J_0 \pm c_1 t \pm \frac{c_2}{2} t^2, \quad (5)$$

і момент навантаження

$$\frac{d^2 M_w}{dt^2} = const, \quad (6)$$

з якої подвійним інтегруванням отримаємо функцію

$$M_g(t) = M_{g0} \pm \alpha_1 t \pm \frac{\alpha_2}{2} t^2. \quad (7)$$

З урахуванням конкретизованих функцій $J(t)$, $M_w(t)$, $\omega(t)$ знайдемо загальне рівняння динаміки для моменту пуску:

$$\begin{aligned} \left(J_0 \pm c_1 \cdot t \pm \frac{c_2}{2} \cdot t^2 \right) \frac{d\omega}{dt} \pm (c_1 + c_2 \cdot t) \cdot \omega(t) = \\ = M(t) - M_{w_0} \pm \alpha_1 \cdot t \pm \frac{\alpha_2}{2} \cdot t^2. \end{aligned} \quad (8)$$

З урахуванням залежності (3) інтегруванням $\frac{d\omega}{dt}$ отримаємо функцію

$$w(t) = w_0 \pm \varepsilon \cdot t, \quad (9)$$

під час розмотування/змотування троса на барабан відповідно, де ε – кутове прискорення під час обертання вала електродвигуна, w_0 – початкове значення кутової швидкості.

Підставляючи вирази (5) у рівняння (4), отримаємо рівняння

$$\begin{aligned} \left(J_0 \pm c_1 \cdot t \pm \frac{c_2}{2} \cdot t^2 \right) \frac{d\omega}{dt} \pm (c_1 + c_2 \cdot t) \cdot \omega(t) = \\ = M(t) - M_{w_0} \pm \alpha_1 \cdot t \pm \frac{\alpha_2}{2} \cdot t^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Розглянемо варіант, у якому в початковий момент часу значення

$$J_0, c_1, w_0, \alpha_1 = 0 \quad (11)$$

система перебуває в стані спокою.

З урахуванням 7 рівняння 6 для моменту пуску/гальмування електродвигуна під час підйому/опускання вантажу запишемо

$$\frac{3}{2} c_2 \cdot \varepsilon \cdot t^2 = M(t) - M_{w_0} \pm \frac{\alpha_2}{2} \cdot t^2. \quad (12)$$

Тепер розглянемо другу ділянку від моменту виходу тягового електродвигуна на сталу кутову швидкість до моменту початку гальмування, згідно з [2] на цій ділянці електродвигун рухається зі сталою кутовою швидкістю

$$w = const, \quad (13)$$

як результат зі сталою швидкістю в часі змінюватимуться і приведені момент інерції

$$\frac{dJ}{dt} = const, \quad (14)$$

з якої інтегруванням отримаємо функцію

$$J(t) = J + ct, \quad (15)$$

і момент навантаження

$$\frac{dM_w}{dt} = const, \quad (16)$$

з якої інтегруванням отримаємо функцію

$$M_g(t) = M_{g_1} \pm \alpha_1 t_1. \quad (17)$$

З урахуванням 13 – 17 рівняння 2 для цього періоду часу запишемо

$$\pm (J_1 + c_1 t_1) \cdot \omega = M(t) - M_{g_1} \pm \alpha_1 t_1, \quad (18)$$

з урахуванням 11 це рівняння перепишемо

$$\pm J_1 \cdot \omega = M(t) - M_{g_1}. \quad (19)$$

Розглянемо третій відрізок часу від початку гальмування до зупинки для якого загальне рівняння динаміки матиме вигляд аналогічний ділянці розгону тільки з протилежними знаками.

Як установлено в роботах [1, 2] в якості тягових електричних двигунів кранових механізмів використовують електродвигуни постійного струму послідовного чи незалежного збудження, а також асинхронні електродвигуни з коротко замкнутими чи фазними роторами.

За отриманими загальними рівняннями динаміки (8, 11) та з урахуванням наведених у [2] співвідношень для визначення обертових моментів електродвигунів, побудовані імітаційні моделі в ППП Matlab із використанням ПП Simulink, для асинхронного електродвигуна КМ АИР250М, зображеного на рис. 2, з параметрами: $P = 90$ кВт; $U = 380$ В; $I_H = 163,6$ А; $M_H = 573$ Нм; $J = 1,1$ кг·м²; $n_c = 1500$ об/хв; $\cos\phi_H = 0,89$; $\eta_H = 94$ %; $s_H = 1,5$ %;

$$\frac{M_{max}}{M_H} = 2,5.$$

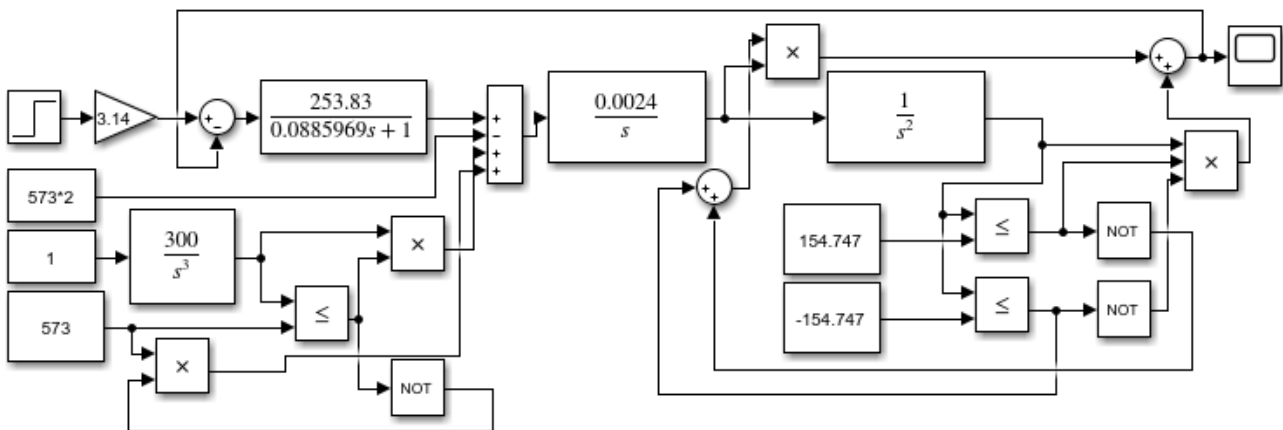


Рис. 2. Імітаційна математична модель тягового асинхронного двигуна КМ АИР250М

Результати моделювання цієї моделі можна оцінити з графіка кутової швидкості обертання вала асинхронного електродвигуна рис. 3, на якому зображено моделювання процесів підйому, зупинки та опускання вантажу з номінальним навантаженням на вал та в режимі холостого ходу.

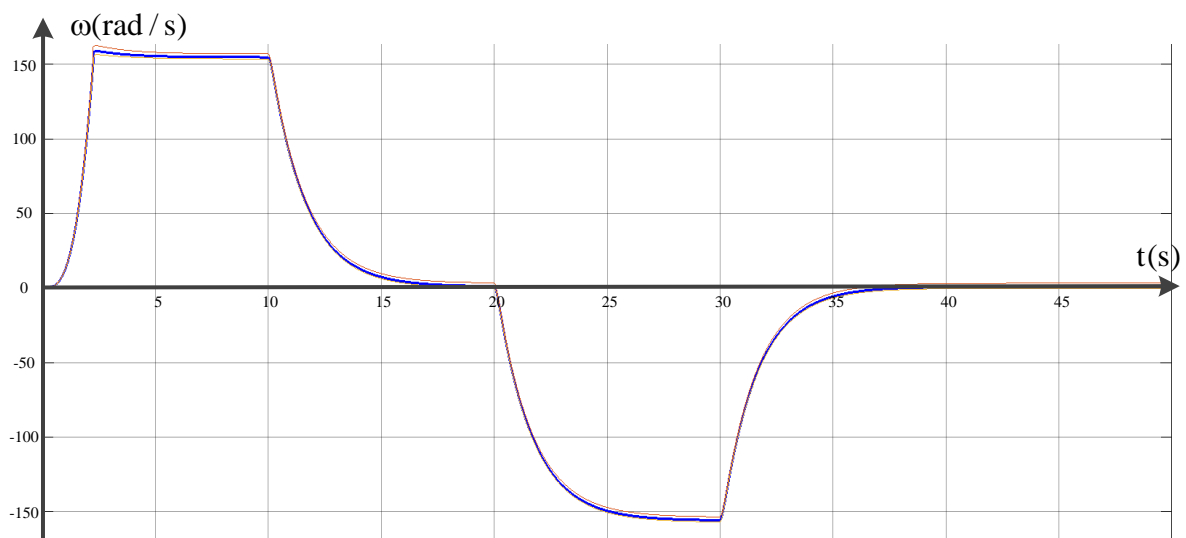


Рис. 3. Графік кутової швидкості обертання вала тягового асинхронного електродвигуна КМ АИР250М системи електропривода підйомного крана, отриманий на основі імітації в ПП Simulink математичної моделі (2)

Висновки

Виконано моделювання режимів роботи системи керування електроприводом підйомного крана з урахуванням запропонованого загального рівняння динаміки (2), за результатами якого було отримано графік, зображений на рис. 3.

Порівнюючи графіки, зображені на рис. 1 та 3, бачимо, що вони суттєво відрізняються. А це є свідченням того, що системи керування крановими електроприводами необхідно синтезувати, використовуючи не математичну модель динаміки у вигляді (1), як це прийнято, а використовуючи математичну модель динаміки у вигляді (2).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналіз основних задач та їх рішень в процесі керування електроприводами кранових механізмів [Електронний ресурс] / Б. І. Мокін, О. М. Кривоніс // Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця. – 2018. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2018/paper/view/3937>.
2. Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters. Electrical and Computer Engineering (UKRCON) [Електронний ресурс] / В. І. Mokin, О. В. Mokin, О. М. Kryvonis // 2017 IEEE First Ukraine Conference on (YSF-2017). – 2017. – DOI:10.1109/UKRCON.2017.8100504. – Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/19708/Synthesis%20of%20mathematical%20models%20for%20one%20class%20of%20electromechanical%20systems%20with%20variable%20parameters%20-%20IEEE%20Conference%20Publication.pdf?sequence=1&isAllowed=y/>.

Стаття надійшла до редакції 24.01.2020 р.

Стаття пройшла рецензування 08.02.2020 р.

Мокін Борис Іванович – академік НАПН України, д. т. н., професор, професор кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, професор кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки, e-mail: borys.mokin@gmail.com.

Мокін Олександр Борисович – д. т. н., професор, завідувач кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, e-mail: abmokin@gmail.com.

Кривоніс Олександр Михайлович – аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, e-mail: kryvonis.ol@gmail.com.
Вінницький національний технічний університет.