

діаграми та досить високу швидкодію з утриманням моменту двигуна в припустимих межах. Частотний спосіб регулювання являється найбільш перспективним і широко використовуваним наразі способом регулювання швидкості АД. Змінюючи частоту f_1 споживаючої напруги, можна, у відповідності з рівнянням $\omega_0 = 2\pi \cdot f_1 / p$, змінювати кутову швидкість обертання магнітного поля, отримуючи тим самим різні штучні характеристики асинхронного двигуна.

Цей спосіб забезпечує плавне регулювання в широкому діапазоні, характеристики, які ми отримуємо мають високу жорсткість. Електричні втрати в роторі, зв'язані з ковзанням, в цьому випадку невеликі, тому частотний спосіб є найбільш економічним.

Посилання

- [1] О. М. Закладний, А. В. Праховник, та О. І. Соловей, *Енергозбереження засобами промислового електропривода*. Київ, Україна: Кондор, 2005.
- [2] С. Г. Герман-Галкин, *Матлаб & Симулінк, "Проектирование мегатронных систем на ПК"*. Ст. Петербург, Россия: КОРОНА – Век, 2008.
- [3] Н. Ф. Ильинский, "Регулируемый привод сегодня. Регулируемый электропривод. Опыт и перспективы применения", *Доклады научно-практического семинара, 2 февр. 2006 г.*, Москва, Россия: Издательство МЭИ, 2006.

Стаття надійшла до редакції 30.04.2017 р.

УДК 621.873.25

DOI: 10.20535/2079-5688.2017.32.96684

О.В. Чермалих, к.т.н., доц., **В.М. Пермяков**, к.т.н., доц., **Д.Д. Мугенов**, аспірант (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

ЗАСТОСУВАННЯ ТИРИСТОРНО-КОНТАКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ПРИ ВДОСКОНАЛЕННІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДІЮЧИХ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНИХ УСТАНОВОК

O.V. Chermalykh, V.M. Permiakov, D.D. Muhenov (National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute")

APPLICATION OF THYRISTOR-CONTACTOR CONTROL IN THE IMPROVEMENT OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF EXISTING HOISTING AND TRANSPORTING PLANTS

У статті розглянуті принципи побудови системи керування роторною станцією асинхронного двигуна із застосуванням тиристорних регуляторів струму в функції

відхилення дійсної швидкості від заданої. Такий підхід дозволяє реалізувати уніфіковану систему регулювання для управління асинхронним електроприводом з фазним ротором і пусковим реостатом та забезпечує плавний, без значних кидків моменту, потрібний закон запуску й гальмування двигуна при будь-якому характері навантаження.

Ключові слова: асинхронний електропривод; фазний ротор; тиристорний регулятор струму; роторна станція; пуск й гальмування; параметричне управління.

В статье рассмотрены принципы построения системы управления роторной станцией асинхронного двигателя с применением тиристорных регуляторов тока в функции отклонения действительной скорости от заданной. Такой подход позволяет реализовать унифицированную систему регулирования для управления асинхронным электроприводом с фазным ротором и пусковым реостатом, обеспечивая плавный, без значительных бросков момента, требуемый закон запуска и торможения при любом характере нагрузки.

Ключевые слова: асинхронный электропривод; фазный ротор; тиристорный регулятор тока; роторная станция; пуск и торможение; параметрическое управление.

The article describes the principles of constructing a system control for a rotor station of an asynchronous motor with the use of thyristor current regulators as a function of the deviation of the real speed from a given. This approach allows us to implement a unified control system for controlling an asynchronous electric drive with a phase rotor and a starting rheostat, ensuring a smooth without significant torque spikes the required law of starting and braking for any load character.

Keywords: asynchronous electric drive; phase rotor; thyristor current controller; rotary station; starting and braking; parametric control.

Вступ. Більшість діючих вітчизняних підйомних та конвеєрних установок значної потужності обладнані електроприводом на базі асинхронного двигуна з фазним ротором. Оптимізація режимів функціонування таких систем без заміни силової частини приводу найбільш просто досягається застосуванням керованих тиристорних регуляторів струму (ТРС) спільно із пусковою роторною станцією, котра в будь-якому випадку на сьогодні залишається в якості резервної [1, 2]. Схема ТРС має три вентиляльні групи, кожна з котрих містить два тиристири, включених зустрічно-паралельно. При послідовному підключенні ТРС до пускового реостату тиристорні групи з'єднуються за схемою “зірка”. В разі паралельного під'єднання ТРС до роторної станції застосовується схема “трикутник”.

Таким чином, включення пускового реостату в коло ротора асинхронного приводу, керованого ТРС, забезпечує обмеження кидків струму й нагріву двигуна.

Для отримання достатньої жорсткості механічних характеристик з ТРС в колі роторної станції застосовується зворотний зв'язок за швидкістю. В разі необхідності поліпшення динаміки й обмеження струму при переключенні ступенів реостату додається зворотний зв'язок за струмом ротора. В останньому випадку будується замкнена система за схемою підлеглого регулювання.

Окрім забезпечення плавного запуску й гальмування, до переваг приводу з ТРС в колі ротора відноситься можливість використання як високовольтних, так й низьковольтних двигунів. Це дозволяє побудувати уніфіковану систему

керування для всіх типів діючих підйомно-транспортних установок з асинхронним електроприводом та пусковою роторною станцією.

Систему з ТРС можливо без складних монтажних робіт встановлювати практично на всіх електроприводах, незалежно від схеми пускових реостатів.

Мета роботи. Розробка імітаційної моделі системи керування роторною станцією асинхронного двигуна із застосуванням ТРС для дослідження технологічних режимів запуску й гальмування основних механізмів підйомно-транспортних установок.

Результати дослідження. Система керування асинхронним приводом з ТРС відноситься до параметричних, так як управління здійснюється за рахунок використання ланки зі змінними параметрами, котрою являється опір роторного кола.

Керування ведеться таким чином, щоб перехід від одної пускової характеристики до іншої здійснювався в межах їх лінійних частин. При цьому, ступеневе відключення секцій роторної станції повинно відбуватись тільки за умовою, що поточне значення частоти обертання двигуна не менше критичної частоти обертання, яка відповідає критичному ковзанню характеристики, на котру здійснюється перехід.

Щоб не було кидків моменту за рахунок ступеневого переключення секцій пускового реостату, в момент подачі сигналу на відключення секцій необхідно східчасто змінити кут керування тиристорами ТРС до такого значення, щоб відносна жорсткість механічної характеристики залишалась постійною. Далі кут керування тиристорами повинен змінюватись відповідно до знаку зменшення моменту.

В якості об'єкту дослідження розглянуто асинхронний двигун з фазним ротором 5АНК355L3-10 для електроприводу шахтної підйомної установки.

Основні паспортні дані наступні:

$P_n = 200000$ Вт - номінальна потужність двигуна;

$\omega_n = 61$ с⁻¹ - номінальна кутова швидкість;

$\omega_c = 63$ с⁻¹ - синхронна частота обертання;

$\lambda = 2,2$ - перевантажувальна здатність;

Потрібні параметри згідно технологічного розрахунку:

$J = 294$ кг·м² - повний момент інерції системи.

$M_c = 3000$ Н·м - статичний момент навантаження.

Визначаємо додаткові необхідні параметри.

Номінальний M_n й максимальний M_m моменти двигуна

$$M_n = P_n / \omega_n = 3280 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad M_m = \lambda \times M_n = 7216 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (1)$$

Номінальне ковзання s_{ne} на природній характеристиці

$$s_{ne} = (\omega_c - \omega_n) / \omega_c = 0,032. \quad (2)$$

Потрібне кутове прискорення ε_m при періоді розгону $t_p = 8$ с

$$\varepsilon_m = \omega_n / t_p \approx 8 \text{ с}^{-2}. \quad (3)$$

Пусковий M_p та максимальний рушійний M_a моменти

$$M_p = J \cdot \varepsilon_m + M_c = 5362 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad M_a = 1,1 \cdot M_p \approx 5900 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (4)$$

Орієнтовна перевантажувальна здатність двигуна λ_a при рушійному моменті M_a

$$\lambda_a = M_a / M_n = 1,8. \quad (5)$$

Ковзання на природній характеристиці s_{ke} й s_{ae} , які відповідають моментам максимальному M_m та рушійному M_a

$$s_{ke} = s_{ne} (\lambda + \sqrt{(\lambda^2 - 1)}) = 0,13; \quad s_{ae} = s_{ke} (\lambda_a - \sqrt{(\lambda_a^2 - 1)}) = 0,065. \quad (6)$$

Графічним способом знаходимо необхідну кількість штучних механічних характеристик $n = 4$ й критичні ковзання за формулами:

$$s_{k1} = s_{ke}^2 / s_{ae} = 0,26; \quad s_{k2} = s_{k1} \cdot s_{ke} / s_{ae} = 0,52; \quad s_{k3} = s_{k2} \cdot s_{ke} / s_{ae} = 1,04. \quad (7)$$

Відповідні жорсткості переключення механічних характеристик з урахуванням того, що при побудові системи управління приводом нумерація відбувається в напрямку збільшення коефіцієнту жорсткості, розраховуються за формулами

$$\begin{aligned} \beta_{m5} = \beta_e = M_a / (\omega_c \cdot s_{ae}) = 1443; \quad \beta_{m4} = \beta_1 = \beta_e \cdot s_{ae} / s_{ke} = 721,5; \\ \beta_{m3} = \beta_2 = \beta_1 \cdot s_{ae} / s_{ke} = 360,75; \quad \beta_{m2} = \beta_3 = \beta_2 \cdot s_{ae} / s_{ke} = 180,4; \\ \beta_{m1} = \beta_4 = \beta_3 \cdot s_{ae} / s_{ke} = 90,2. \end{aligned} \quad (8)$$

Критичні кутові швидкості, c^{-1}

$$\omega_{k1} = \omega_c (1 - s_{k2}) = 30,14; \quad \omega_{k2} = \omega_c (1 - s_{k1}) = 46,47; \quad \omega_{k3} = \omega_c (1 - s_{ke}) = 54,63.$$

Імітаційну модель системи керування роторною станцією асинхронного двигуна із застосуванням ТРС для дослідження технологічних режимів запуску й гальмування основних механізмів підйомно-транспортних установок (рис. 1) синтезовано із застосуванням системи *MATLAB – Simulink* [3-6].

Елементи *AJ*, *Sat1*, *TD*, *Sum1* створюють структуру пристрою завдання на основі задатчика інтенсивності першого порядку.

Блок *AJ* забезпечує лінійну зміну сигналу завдання U_{wo} за прийнятий час розгону приводу t_p до величини $U_{wom} = 10$ В.

Блок *Sat1* обмежує сигнал на виході значенням 10 В.

Блок часової затримки *TD* подає на виході сигнал U_{wo} через час $t_z = 14$ с.

Суматор *Sum1* формує сигнал заданої швидкості U_w для режимів пуску, усталеного руху та гальмуванні.

Таким чином, реалізується наступний алгоритм функціонування моделі:

$0 \leq t \leq 1$ с - двигун нерухомий, швидкість дорівнює нулю;

$1 < t \leq 9$ с - розгін до номінальної швидкості;

$9 < t \leq 15$ с - усталений рух з постійною швидкістю;

$15 < t \leq 23$ с - гальмування до повної зупинки;

$23 < t < 25$ с - режим паузи з нульовою швидкістю;

$t = 25$ с - закінчення моделювання.

На виході суматора *Sum2* має місце сигнал X , як різниця між сигналами, пропорційними заданій швидкості U_w та фактичній U_{ow} . Останній визначається через коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю $K_c = 10 / \omega_n$. Таким чином

$$X = U_w - U_{ow}. \quad (9)$$

Блок виділення модулю *Abs* забезпечує тільки позитивні значення кутів керування тиристорами ТРС у всіх режимах, незалежно від знаку сигналу X .

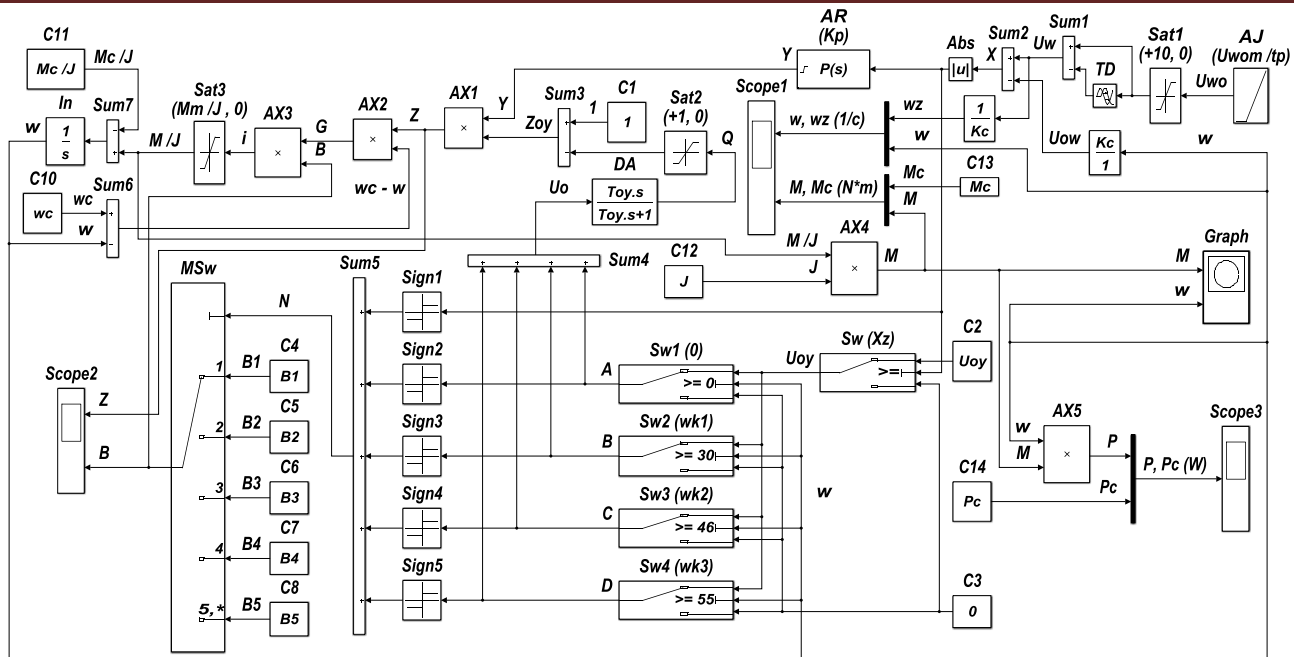


Рис. 1. Імітаційна модель системи керування роторною станцією з ТРС

Пропорційний регулятор швидкості AR має обмеження вихідного сигналу $Y_m = 1$. Коефіцієнт передачі K_p для прийнятого значення похибки $X_z = 0,2$ розраховується за формулою

$$K_p = 1 / X_z = 5. \tag{10}$$

За такою структурою П-регулятора швидкості діапазон зміни вихідного сигналу становить $0 \leq Y \leq 1$.

Для тиристорів основним керуючим сигналом є сигнал Z , котрий змінюється плавно від 0 до 1. Таке регулювання охоплює весь діапазон кутів управління вентилями α від закритого стану $Z = 0$ ($\alpha = 180$ ел. град) до повністю відкритого $Z = 1$ ($\alpha = 0$ ел. град).

Так як коефіцієнт поточної жорсткості $\beta = Z \cdot \beta_m$ і в момент переключення секцій при $M = M_a$ маємо $Z = 1$, то для того, щоб коефіцієнт β не змінювався, в момент переходу з першої характеристики на другу повинна виконуватись умова $Z = \beta_{m1} / \beta_{m2}$, при переході на третю характеристику $Z = \beta_{m2} / \beta_{m3}$ і т.д.

Якщо роторні опори обрано правильно, відношення коефіцієнтів жорсткості приблизно рівні. В нашому випадку

$$\beta_{m1} / \beta_{m2} \approx \beta_{m2} / \beta_{m3} \approx \beta_{m3} / \beta_{m4} \approx \beta_{m4} / \beta_{m5} \approx 0,5. \tag{11}$$

Для повної компенсації зміни рушійного моменту регулювання кутів відкриття тиристорів повинно відбуватися за експоненціальним законом зі сталою часу, рівній сталій часу двигуна T_m для відповідної секції пускового опору. Це потрібно для того, щоб при ступінчастій зміні β рушійний момент залишався постійним, а керування здійснювалось тільки за рахунок роботи тиристорів.

Таке управління можливо реалізувати за допомогою реальної диференційної ланки DA (див. рис. 1) з передатною функцією

$$W_{DA}(s) = T_{oy}s / (T_{oy}s + 1). \quad (12)$$

На практиці, з метою спрощення побудови системи, достатньо прийняти значення сталої часу T_{oy} однаковою для всіх секцій реостату. В нашому прикладі

$$T_{oy} = (T_{m2} + T_{m5}) / 2 = (J / \beta_{m2} + J / \beta_{m5}) / 2 = 0,9. \quad (13)$$

Блок *Sat2* обмежує сигнал Q значенням $Q_m = 1$.

Додатковий коригувальний сигнал Z_{oy} визначається через суматор *Sum3* в операторній формі виразом

$$Z_{oy}(s) = 1 - W_{DA}(s) \cdot U_o \quad (14)$$

Потрібний одиничний сигнал задає блок *C1*. При ступінчастому прикладанні вхідного сигналу U_o , який формується суматором *Sum4*, величина Z_{oy} буде змінюватись за часом від 0,56 до 1.

Ступеневий характер зміни U_o забезпечують керовані ключі Sw (спрацьовує при $X > X_z$) та $Sw1...Sw4$ (уставки відповідають нульовій та критичним кутовим швидкостям).

Початковий вплив U_{oy} формує блок *C2*

$$U_{oy} = (M_m - M_p) / M_p = 0,45. \quad (15)$$

Подачу нульового сигналу реалізує блок *C3*.

Алгоритм функціонування наступний:

$$\begin{aligned} A &= 0,45 && \text{при } \omega \geq 0; \\ B &= 0,45 && \text{при } \omega \geq \omega_{k1}; \\ C &= 0,45 && \text{при } \omega \geq \omega_{k2}; \\ D &= 0,45 && \text{при } \omega \geq \omega_{k3}. \end{aligned}$$

Таким чином сигнал U_o послідовно отримує значення 0,45; 0,9; 1,35; 1,8.

Ці сигнали використовуються і при синтезуванні логічного перемикаючого пристрою (ЛПП), котрий забезпечує керування секціями роторної станції.

Основним елементом ЛПП являється керований багатоканальний ключ MSw . На виході має місце сигнал B , котрий за рахунок перемикання ключа може отримувати значення

$$\begin{aligned} B1 &= \beta_{m1} / J = 0,3; & B2 &= \beta_{m2} / J = 0,62; & B3 &= \beta_{m3} / J = 1,23; \\ B4 &= \beta_{m4} / J = 2,45; & B5 &= \beta_{m5} / J = 4,9, \end{aligned} \quad (16)$$

які задаються відповідними блоками *C4*, *C5*, *C6*, *C7*, *C8*.

Управління ключем забезпечує сигнал N , значення котрого $N = 1, 2, 3, 4, 5$ формує суматор *Sum5*. Виділяють одиничні сигнали блоки *Sign1... Sign5* при позитивному вході.

Алгоритм роботи ЛПП:

$$\begin{aligned} A = B = C = D = 0 & \Rightarrow N = 1 \Rightarrow B = B1; \\ A > 0, B = C = D = 0 & \Rightarrow N = 2 \Rightarrow B = B2; \\ A > 0, B > 0, C = D = 0 & \Rightarrow N = 3 \Rightarrow B = B3; \\ A > 0, B > 0, C > 0, D = 0 & \Rightarrow N = 4 \Rightarrow B = B4; \\ A > 0, B > 0, C > 0, D > 0 & \Rightarrow N = 5 \Rightarrow B = B5. \end{aligned}$$

Таким чином, зміна величини B є командою на відключення секцій пускового реостату.

Модель містить три послідовно з'єднаних блоки множення $AX1$, $AX2$, $AX3$, котрі для отримання значення струму ротора i реалізують відповідні залежності

$$Z = Y \cdot Z_{oy}, \quad G = Z \cdot (\omega_c - \omega), \quad i = G \cdot B. \quad (17)$$

Різниця $(\omega_c - \omega)$ формується через суматор $Sum6$, а величину синхронної кутової швидкості ω_c задає блок $C10$.

Блок $Sat3$ обмежує вихідний сигнал M / J , котрий подається на позитивний вхід суматора $Sum7$, значенням $M_m / J = 24,5$.

Блок $C11$ задає сигнал $M_c / J = 10,2$, який поступає на негативний вхід суматора $Sum7$.

Таким чином суматор $Sum7$ з послідовно з'єднаним інтегратором Int реалізують основне рівняння руху електропривода в операторній формі

$$\omega = (M - M_c) / (J \cdot s). \quad (18)$$

Блок множення $AX4$ виділяє величину електромагнітного моменту M двигуна, перемножуючи сигнал M / J на J , котрий подається блоком $C12$.

Візуалізацію перехідних процесів забезпечують віртуальні осцилографи $Scope1$, $Scope2$, $Scope3$ та графобудівник $Graph$.

Двоканальний осцилограф $Scope1$ дає можливість отримати діаграми заданої ω_z та фактичної ω кутових швидкостей в період запуску, усталеного руху й гальмуванні (перший канал) та моментів двигуна M й статичного навантаження M_c (другий канал), котрі зображені на рис. 2, а. Значення прийнятого статичного моменту M_c задає блок $C13$.

Потрібна швидкісна діаграма на ділянках запуску та гальмуванні відпрацьовується досить точно, а в режимі усталеного руху має місце статична похибка, яка становить 2,4 %.

Діаграми моментів ілюструють рушійний режим роботи при пуску та гальмуванні, оскільки знаки моменту M і кутової швидкості ω співпадають. В такому випадку секції роторної станції при пуску послідовно відключаються, а при гальмуванні підключаються в зворотному напрямку. Коли відбувається ступеневе переключення секцій, в кривій моменту M спостерігаються незначні сплески.

Слід зазначити, що в разі реалізації режиму динамічного гальмування секції реостату повинні відключатися аналогічно режиму пуску.

Двоканальний осцилограф $Scope2$ дозволяє дослідити зміну внутрішніх параметрів системи, таких як Z (перший канал) і B (другий канал), які є безрозмірними (рис. 2, б). Графіки наочно ілюструють поєднання плавного та ступеневого регулювання.

В момент відключення секцій при запуску за стрибком сигналу B тиристри прикриваються в результаті ступінчатого характеру сигналу Z , а потім на кожній секції згідно експоненціального закону плавно відкриваються. Діапазон зміни сигналу Z становить $0,45 \leq Z \leq 0,85$, що відповідає реальним кутам відкриття тиристорів $99 \geq \alpha \geq 27$ ел. град.

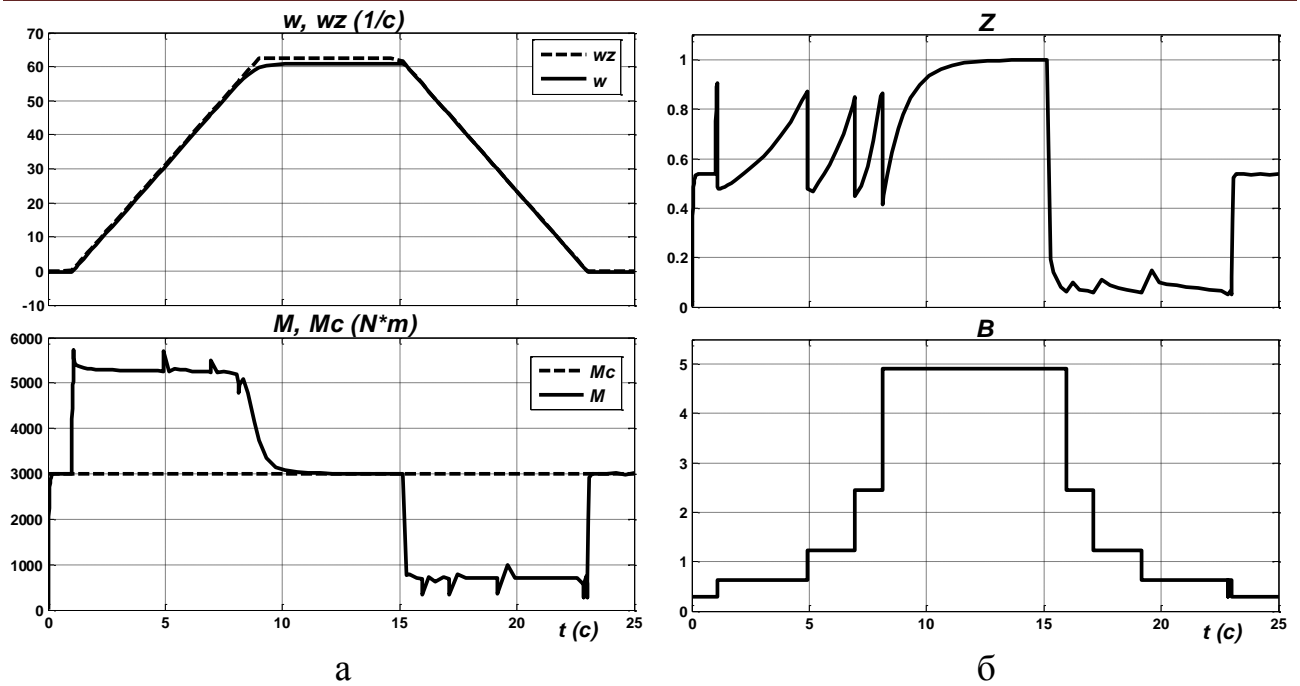


Рис. 2. Діаграми контрольованих величин:

а – кутових швидкостей та моментів; б – внутрішніх параметрів Z і B

При усталеному русі $Z = 1$, тиристри повністю відкриті, кут $\alpha = 0$ ел. град.

В режимі гальмування $Z \approx 0,1$, тобто $\alpha = 162$ ел. град. Таким чином, в цьому режимі тиристри фактично закриті і не працюють.

Використання графобудівника *Graph* дає можливість виключити параметр часу і отримати фазовий портрет механічних характеристик системи (рис. 3, а).

В режимі запуску, без урахування сплесків, підтримується приблизно постійним момент $M \approx 5300$ Н·м, близький до пускового $M_p = 5362$ Н·м. Потім двигун виходить на номінальну швидкість $\omega_n = 61$ s^{-1} при $M_c = 3000$ Н·м. Рухий режим гальмування відбувається з постійним моментом $M \approx 700$ Н·м.

Синтезована модель дозволяє оцінити характер зміни за часом механічної потужності P двигуна на його валу. Визначає цей показник блок множення $Ax4$, а завдання потужності P_c , яка відповідає статичному моменту M_c , забезпечує блок $C13$. Таким чином реалізуються залежності

$$P = M \cdot \omega, \quad P_c = M_c \cdot \omega_n = 183000 \text{ Вт.} \quad (19)$$

Діаграма механічних потужностей представлена на рис. 3, б.

На ділянці запуску приводу потужність P зростає лінійно, що відповідає постійному пусковому моменту. Пікове значення має місце в момент виходу на природну характеристику в точці $M = M_p$. Далі величина P спадає при русі на природній характеристиці і зменшенні моменту до $M = M_c$. В цей час поточне значення потужності стає рівним номінальному статичному $P = P_c$. На початку гальмування відбувається стрибок потужності за рахунок різкого зменшення моменту від статичного до гальмівного в 4,3 рази. Далі йде лінійне спадання потужності до нульового значення з постійним гальмівним моментом. Перевищення потужністю номінального статичного значення за часом складає 23 % від загальної тривалості перехідних процесів пуску та гальмування.

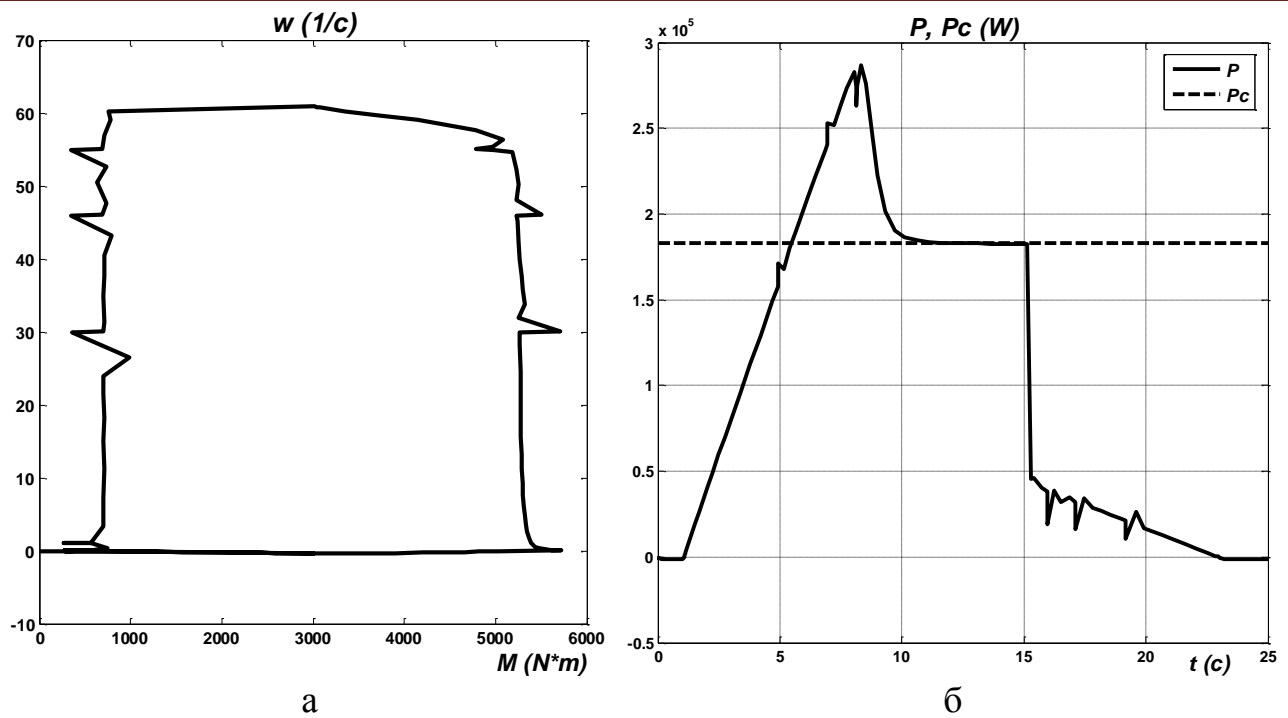


Рис. 3. Характеристики асинхронного електроприводу з ТРС:
 а – механічна $\omega = f(M)$; б – механічних потужностей $P, P_c = f(t)$

Висновки

Синтезована імітаційна структурна модель системи керування роторною станцією асинхронного двигуна із застосуванням ТРС для дослідження технологічних режимів запуску й гальмування основних механізмів підйомно-транспортних установок.

Отримані результати доводять можливість практичної реалізації системи й відпрацювання розглянутих алгоритмів функціонування електроприводу в режимах пуску та гальмуванні.

Використання ТРС дозволяє реалізувати уніфіковану систему регулювання для управління асинхронним електроприводом з фазним ротором і роторною станцією та забезпечує плавний, без значних кидків моменту, потрібний закон запуску й гальмування двигуна при будь-якому характері навантаження.

Для дослідження перехідних процесів в асинхронному електроприводі з ТРС доцільно застосовувати модель, котра реалізує параметричне управління, при якому зміна швидкості досягається ступінчастим перемиканням секцій пускового реостату та плавним регулюванням кута керування тиристорів відносно відхилення дійсної швидкості від заданої.

Посилання

- [1] Д. И. Родькин, В. В. Каневский, и Е. А. Ильин, “Область применения реостатно-тиристорного управления асинхронными приводами горного

- оборудования”, *Горная механика и автоматика. Республиканский межведомственный сборник*, №36, с.37-41,1980.
- [2] Ю. В. Гудзь, В. Г. Дубовик, и А. В. Чермалых, “Динамика асинхронного электропривода с тиристорным управлением в цепи ротора”, *Горная механика и автоматика. Республиканский межведомственный сборник*, №50, с.67-72, 1987.
- [3] Ю. Лазарев, *Моделирование процессов и систем в MATLAB*. Учебный курс. Санкт Петербург, Россия: Издательская группа ВHV, 2005.
- [4] В. П. Дьяконов, *Simulink 5/6/7: Самоучитель*. Москва, Россия: ДМК-Пресс, 2008.
- [5] В. П. Дьяконов, и А. А. Пеньков, *MATLAB и Simulink в электроэнергетике*. Москва, Россия: Горячая линия, 2009.
- [6] С. Г. Герман-Галкин, *Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК*. Санкт Петербург, Россия: КОРОНА-Век, 2008.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2017 р.