

УДК 621.86

АНАЛІЗ ПУСКО-ГАЛЬМІВНИХ ПРОЦЕСІВ КРАНОВИХ МЕХАНІЗМІВ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ПРИВОДОМ

О.В. Григоров, професор, д.т.н., В.В. Стрижак, аспірант,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. Проведено аналіз пуско-гальмівних режимів роботи кранових механізмів із частотно-регульованим приводом на прикладі механізму повороту крана на колоні. На основі проведених теоретичних досліджень запропоновано практичні рекомендації щодо шляхів покращення робочих характеристик приводів кранових механізмів.

Ключові слова: механізм повороту, частотно-регульований привід.

АНАЛИЗ ПУСКО-ТОРМОЗНЫХ ПРОЦЕССОВ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ

О.В. Григоров, профессор, д.т.н., В.В. Стрижак, аспирант,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

Аннотация. Проведён анализ пуско-тормозных режимов работы крановых механизмов с частотно-регулируемым приводом на примере механизма поворота крана на колонне. На основе проведенных теоретических исследований предложены практические рекомендации относительно путей улучшения рабочих характеристик приводов крановых механизмов.

Ключевые слова: механизм поворота, частотно-регулируемый привод.

ANALYSIS OF STARTING-BRAKING PROCESSES IN CRANE MECHANISMS WITH VARIABLE-FREQUENCY DRIVES

O. Grygorov, Professor, Doctor of Engineering Sciences, V. Stryzhak, post-graduate
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

Abstract. Starting-braking operation modes of crane mechanisms with frequency-controlled drives have been analyzed with pillar-crane slewing mechanisms taken as an example. Practical recommendations on ways to improve the performance of crane mechanism drives have been proposed on the basis of theoretical studies.

Key words: slewing mechanism, frequency-controlled drive.

Вступ

Останнім часом намітилась тенденція до застосування в механізмах підйомно-транспортних машин частотно-регульованого приводу. При реконструкції застарілих кранів реостатно-регульовані електроприводи, якими вони, як правило, обладнані, також все частіше замінюються на частотно-регульовані [1–8]. При цьому застосування частот-

ного керування у крановому електроприводі досліджено недостатньо.

Аналіз публікацій

Частотне керування приводами докладно описане в роботах із загальної теорії електропривода, але в більшості робіт розглядається електропривід загального призначення, а головна увага приділяється електричним

параметрам двигунів і перетворювальної техніки, як, наприклад, в роботах [9, 10]. В галузі підйомно-транспортних машин застосування частотно-регульованого електропривода досліджено переважно для ліфтів [11]. Як показує останній досвід застосування частотно-регульованого приводу в механізмах кранів для спорудження й обслуговування гідроагрегатів Дністровської ГАЕС [12], в цій галузі залишаються невирішені питання [13, 14].

Мета і постановка задачі

Мета досліджень – запропонувати практичні рекомендації щодо шляхів покращення робочих характеристик приводів кранових механізмів на основі аналізу зміни їх динамічних характеристик в пуско-гальмівних процесах. Поставленої мети можна досягти шляхом вирішення таких завдань: складання математичної моделі механізму повороту крана на колоні, встановлення залежностей зміни динамічних характеристик упродовж пуско-гальмівних процесів, оцінки ефективності застосування частотно-регульованого приводу при реконструкції кранових механізмів, формулювання рекомендацій щодо шляхів покращення робочих характеристик.

Аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів

Вихідна швидкість ω , прискорення α , крутний момент M електродвигуна, потужності, що споживається $N_{\text{спож}}$ та рекуперується $N_{\text{рек}}$, в підсумку залежать від закону зміни в часі частоти струму f та ряду констант, що характеризують привід та зовнішнє навантаження. В системах керування крановими частотно-регульованими приводами найбільш просто реалізуються такі зміни частоти струму в часі:

– стрибкоподібна зміна

$$f = 0 \text{ при } t < 0, \quad f = f_{\text{уст}} \text{ при } t > 0;$$

– лінійна зміна

$$f = 0 \text{ при } t < 0, \quad f = k \cdot t_{\text{уст}} \text{ при } t_{\text{уст}} > t > 0,$$

$$f = f_{\text{уст}} \text{ при } t > t_{\text{уст}}.$$

Найбільш просте рішення, отримуємо за стрибкоподібної зміни частоти f , що відповідає режиму прямого пуску асинхронного двигуна та може мати місце за миттєвої зміни частоти живлення. Такі режими можуть

застосовуватись при реалізації оптимальних за швидкістю законів керування, однак при цьому втрачаються ті переваги, заради яких впроваджується регульований привід. Виникають негативні фактори, притаманні асинхронному приводу із прямим пуском короткозамкненого двигуна: кидки струму короткого замикання, крутного моменту і т.д. Лінійна зміна в часі частоти струму f забезпечується відповідними налаштуваннями частотного перетворювача.

Досліджувати пуско-гальмівні процеси будемо на прикладі механізму повороту крана на колоні в/п 5 т (рис. 1), частотний привід якого має відповідні налаштування. Основні характеристики крана і механізму повороту зведено до табл. 1.

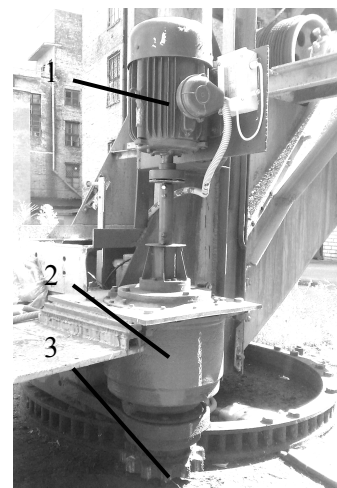


Рис. 1. Механізм повороту крана на колоні в/п 5 т: 1 – електродвигун; 2 – планетарний редуктор; 3 – цівкова передача

Дослідимо закони зміни ω , M за лінійної зміни частоти струму f . Щоб зосередити увагу на характері перехідних процесів, представимо механізм повороту крана у вигляді одномасової динамічної моделі (рис. 2) з абсолютно жорстким зв'язком (в подальших дослідженнях можна розглянути багатомасову динамічну модель). Така схема може бути використана при розгляді роботи крана з піднятим вантажем на максимальну висоту, або з порожнім гаком. У відповідній цій умові схемі електроприводу з лінійною механічною характеристикою швидкість ідеального неробочого ходу ω_0 є узагальнювальним керуючим впливом. Значення ω_0 для асинхронного електроприводу визначається частотою струму статора f .

Таблиця 1 Основні характеристики крана на колоні і механізму повороту

Основні характеристики	Величина
Вантажопідіймальність, кг	5000
Виліт стріли, м	8,5
Максимальна висота підйому вантажу, м	10
Механізм повороту крана:	
Двигун: Тип	АО2-42-4
Потужність, кВт	5,5
Номинальна швидкість, об/хв	1450
Мом. інерції ротора, кгм ²	0,12
Передавальне число механізму (сюди входить передавальне число планетарного редуктора $i_{ред} = 252$ та передавальне число відкритої цівкової пари $i_n = 6$)	1512
Момент інерції крана без вантажу відносно осі обертання (моменти інерції противаги, поворотної платформи та стріли), кгм ²	$180 \cdot 10^3$
Момент статичного опору обертанню крана, Нм	1700
Коефіцієнт корисної дії редуктора	0,8
Коефіцієнт корисної дії цівкового зачеплення	0,9

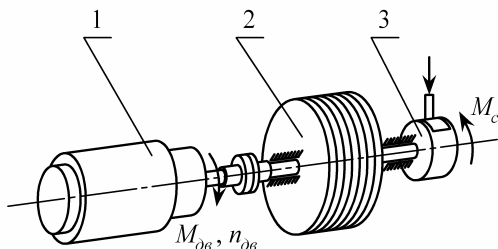


Рис. 2. Приведена двомасова схема механізму повороту крана: 1 – електродвигун; 2 – привведений момент інерції механізму до вала двигуна; 3 – привведений статичний момент до вала двигуна

Найбільш повно роботу асинхронного приводу описує рівняння (2), яке можна отримати із системи рівнянь (1). Електромеханічні перехідні процеси в досліджуваній системі описуються рівнянням механічної характеристики і рівнянням руху електроприводу з прийнятим вище припущенням

$$\begin{cases} M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega) - T_e \frac{dM}{dt} \\ M - M_{ст} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

Розв'язуючи друге рівняння відносно моменту M і підставляючи цей вираз у перший, отримаємо диференціальне рівняння системи, розв'язане відносно швидкості

$$T_e \cdot T_m \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \frac{M_{ст}}{\beta}, \quad (2)$$

де $\omega_0 = \frac{2\pi}{p} f$ – швидкість ідеального неробочого ходу; β – коефіцієнт жорсткості лінеаризованої механічної характеристики; T_m – електромеханічна стала; T_e – електрична стала.

Розглянемо перехідний процес електроприводу з урахуванням того, що вплив електромагнітної інерції в розімкненому приводі за частотного регулювання швидкості є незначним, тобто приймаємо $T_e \approx 0$. В цьому випадку рівняння (2) набуває спрощеного вигляду

$$T_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \frac{M_{ст}}{\beta}. \quad (3)$$

Розглянемо процес розгону приводу за лінійної зміни f . У зв'язку з тим, що нами досліджується привід механізму повороту, з метою більш повної оцінки перехідних процесів доцільно припустити

$$f(t) = 0 \text{ при } 0 \leq t \leq \tau, \text{ де } \tau = \frac{M_{ст} \cdot t_{уст}}{\beta \cdot \omega_{0уст}}$$

Загальний розв'язок рівняння (3) складається із загального розв'язку однорідного рівняння $\omega_0(t)$ й часткового розв'язку неоднорідного рівняння $\omega_1(t)$

$$\omega(t) = \omega_0(t) + \omega_1(t).$$

Загальний розв'язок однорідного рівняння

$$\omega_0(t) = \alpha \cdot e^{-t/T_m}.$$

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння візьмемо у вигляді

$$\omega_1(t) = \frac{1}{T_m} \cdot e^{-t/T_m} \cdot \int_0^t e^{t'/T_m} \cdot f(t') \cdot dt'. \quad (4)$$

Оскільки $\omega(0) = 0$ (початкова умова), то $\omega_0(t) = 0$ і $\omega(t) = \omega_1(t)$. У зв'язку з тим, що $f(t)$ має 3 ділянки: $0 \leq t \leq \tau$, $\tau \leq t \leq t_{\text{уст}}$ і $t_{\text{уст}} < t$, доцільно розглянути поведінку $\omega(t)$ на цих ділянках, які називаються також етапами руху:

1) $0 \leq t \leq \tau$. На цьому етапі $\omega(t) = 0$, оскільки $f(t) = 0$. Фізичний зміст цього виразу полягає в тому, що швидкість електродвигуна буде дорівнювати нулю до тих пір, поки під дією певної величини $f_{\text{тр}}$ двигун не подолає момент статичного опору, тобто $\omega_0 - M_{\text{ст}} / \beta$ стане більше «0».

2) $\tau \leq t \leq t_{\text{уст}}$:

$$\frac{1}{T_{\text{м}}} e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}} \left[\frac{\omega_{0\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} T_{\text{м}}^2 e^{t/T_{\text{м}}} \left(\frac{t}{T_{\text{м}}} - 1 \right) - \frac{M_{\text{ст}}}{\beta} T_{\text{м}} e^{t/T_{\text{м}}} - \right. \\ \left. - \frac{\omega_{0\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} T_{\text{м}}^2 e^{\tau/T_{\text{м}}} \left(\frac{t}{T_{\text{м}}} - 1 \right) + \frac{M_{\text{ст}}}{\beta} T_{\text{м}} e^{\tau/T_{\text{м}}} \right] ; \quad (5)$$

3) $t_{\text{уст}} < t$:

$$\omega(t) = e^{-(t-t_{\text{уст}})/T_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{уст}} + \\ + \omega_0 \cdot \left(1 - e^{-(t-t_{\text{уст}})/T_{\text{м}}} \right), \quad (6)$$

де $\omega_{\text{уст}}$ – значення швидкості, знайдене за формулою (5) при $t = t_{\text{уст}}$; $\omega_{0\text{уст}}$ – усталене значення швидкості.

Результат комп'ютерного моделювання зміни частоти струму, швидкості ідеального неробочого ходу і швидкості обертання вала двигуна у процесі розгону механізму обертання крана на колоні без вантажу представлено на рис. 3. Час розгону обрано таким чином, щоб він наближено співпадав із часом відпрацювання усіх ступенів опорів фазнороторного двигуна, якби його було встановлено на даному механізмі. Також враховано умову, рекомендовану для стрілових кранів – прискорення кінця стріли має бути $a \leq 1 \text{ м/с}^2$.

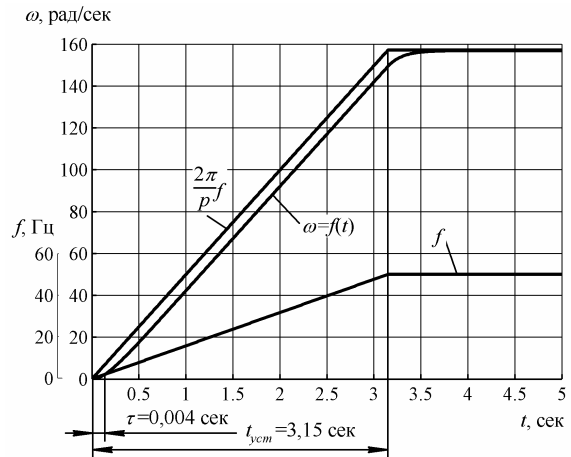


Рис. 3. Зміна частоти струму, швидкості ідеального неробочого ходу і швидкості обертання вала двигуна в період розгону

Розглянемо процес гальмування асинхронного приводу за лінійної зміни параметра f : $f(t) = f_{\text{уст}} \cdot (1 - t/t_{\text{уст}})$. На рис. 4 представлено зміну в часі параметра ω_0 та

$f(t) = \omega_0 - \frac{M}{\beta}$. Зменшення $f(t)$ буде тривати до $t = \tau = \left[(-M_{\text{ст}} / \beta + \omega_{0\text{уст}}) \cdot t_{\text{уст}} \right] / \omega_{0\text{уст}}$, з тієї причини, що момент $M_{\text{ст}}$ не є рушійним, активним (як було б у випадку дослідження механізму підйому вантажу). Момент $M_{\text{ст}}$ – пасивний, статичний момент опору повороту крана. За швидкості повороту, що дорівнює нулю, значення $M_{\text{ст}} = 0$.

Загальний розв'язок рівняння (3) для випадку гальмування за аналогією з розгоном будемо шукати у вигляді

$$\omega(t) = \omega_0(t) + \omega_1(t).$$

Зазначимо, що на початку гальмування при $t = 0$

$$\omega(0) = \omega_0 = \omega_{0\text{уст}} - M_{\text{ст}} / \beta.$$

Загальний розв'язок однорідного рівняння $\omega_0(t) = \omega_0 \cdot e^{-t/T_{\text{м}}}$. Частковий розв'язок неоднорідного рівняння для кожної з ділянок $0 \leq t \leq \tau_1$ та $t \geq \tau_1$ буде різним:

1) $0 \leq t \leq \tau_1$:

$$\begin{aligned}\omega(t) &= \omega_0 \cdot e^{-t/T_M} + \omega_1(t) = \\ &= \omega_0 - \frac{\omega_{0\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} T_M \left(e^{t/T_M} - 1 + e^{-t/T_M} \right); \quad (7)\end{aligned}$$

2) $t > \tau_1$:

$$\omega(t) = e^{-t/T_M} \cdot \left(\omega_0 + e^{\tau_1/T_M} \cdot \omega_1(t) \right). \quad (8)$$

Результат комп'ютерного моделювання зміни частоти струму, швидкості ідеального неробочого ходу і швидкості обертання вала двигуна в період гальмування механізму обертання крана на колоні без вантажу представлено на рис. 4.

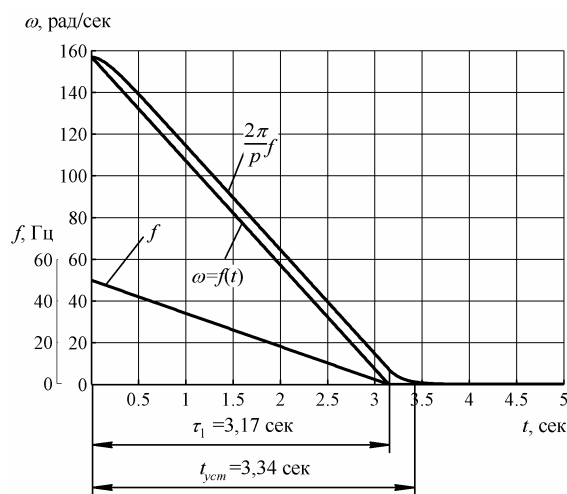


Рис. 4. Зміна частоти струму, швидкості ідеального неробочого ходу і швидкості обертання вала двигуна в період гальмування

Як видно з рис. 3, для досліджуваного приводу зміну швидкості у процесі розгону можна приймати лінійною. Перехідний процес можна вважати наближено закінченим при $t_{\text{пот}} = t_{\text{уст}}$, оскільки в цей період часу величина поточної швидкості $\omega_{\text{пот}}$ досягає 95 % від величини усталеної швидкості ω . Це тим більше справедливо для режимів $t_{\text{уст}} > 2$ с.

Як показують розрахунки, для регульованих приводів із величинами співвідношення $t_{\text{уст}}/T_M \geq 10$, про динаміку перехідного процесу (з точки зору відхилення поточної швидкості електропривода від заданої системою керування) необхідно говорити лише у випадку необхідності отримання особливо точних результатів, що може бути виправда-

но у кранах, що працюють в автоматичному режимі за заданою програмою.

У всіх інших випадках використання крана з частотно-регульованим приводом його швидкодія визначається швидкодією системи керування, і за лінійної зміни параметра керування f від $f_{\text{пуск}}$ до $f_{\text{уст}}$ за $t_{\text{уст}}$ перехідний процес зміни швидкості можна вважати закінченим до часу $t_{\text{уст}}$ з достатньою для практики точністю.

Як видно з рис. 4, усе вказане вище є справедливим і для періоду гальмування приводу, тобто перехідний процес для досліджуваного приводу, характеризуваного величиною $T_M = 0,151$ с (на початку гальмування), практично закінчується до часу $t_{\text{уст}}$. Зміна швидкості в часі носить лінійний характер.

Динамічні характеристики електродвигунів мають особливості, пов'язані з комутаційними явищами при ввімкненні, які виражаються в пульсаціях моменту, в результаті чого максимальне значення електромагнітного моменту перевищує момент короткого замикання (пусковий момент двигуна). В теорії електроприводу прийнято описувати електромагнітний момент асинхронного електродвигуна системою диференціальних рівнянь для потокозчеплення, як це зроблено, наприклад, в [9, 10]. Однак у нашому випадку для моделювання реального механізму такий підхід є неприйнятним, а внаслідок необхідності врахування великої кількості непаспортних величин. Навіть за наявності названих величин, внаслідок неминучих їх похибок у результаті моделювання виходить значна похибка основної складової моменту.

Тому задля визначення характеру зміни крутного моменту на валу електродвигуна у процесі розгону при застосуванні частотно-регульованого привода досліджуваного механізму і подальшого порівняння його з характером зміни крутного моменту на валу електродвигуна при застосуванні фазороторного двигуна, що є традиційним для кранових механізмів, розв'язуємо друге рівняння системи (1) відносно моменту. При розгоні будемо мати

$$M = J_{\Sigma} \ddot{\alpha} + M_{\text{ст}}, \quad (9)$$

а при гальмуванні

$$M = J_{\Sigma} \ddot{\omega} - M_{\text{ст}}. \quad (10)$$

Аналіз виразів (9), (10) при підстановці в них раніше знайдених значень ω показує, що в загальному випадку максимальна величина моменту на валу електродвигуна виникає при $t = t_{\text{уст}}$ та $t = \tau_1$ при пуску та гальмуванні відповідно.

На рис. 5 зображено зміну крутного моменту на валу електродвигуна механізму повороту крана на фоні механічних характеристик, які проходить привід на перехідних етапах роботи.

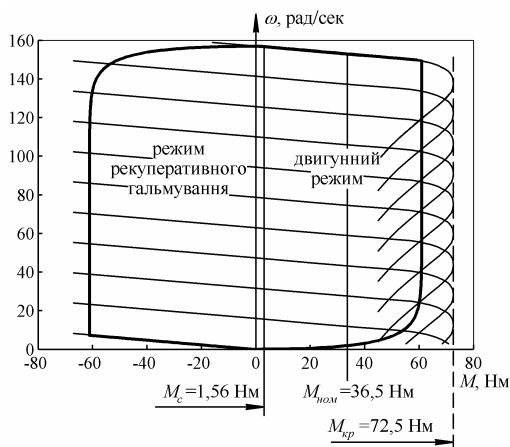


Рис. 5. Графіки зміни електромагнітного крутного моменту електродвигуна у процесі розгону і гальмування з переходом в рекуперативний режим

Зміна прискорення у процесі розгону приво-ду (на ділянці $\tau \leq t \leq t_{\text{уст}}$) може бути знайдена шляхом диференціювання виразу (5). При цьому отримаємо

$$\ddot{\omega}(t) = \frac{\omega_{0\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} \left[1 + \left(\frac{\tau}{T_M} - 1 \right) e^{(\tau-t)/T_M} \right] - \frac{1}{T_M} \frac{M_{\text{ст}}}{\beta} e^{(\tau-t)/T_M}. \quad (11)$$

Зміна прискорення у процесі гальмування приво-ду на ділянці $0 \leq t \leq \tau_1$ може бути знайдена диференціюванням виразу (7)

$$\ddot{\omega}(t) = -\frac{\omega_{0\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} \left(1 - e^{t/T_M} \right). \quad (12)$$

Раніше наведеними формулами для розрахунку крутного моменту на валу електродвигуна в періоди розгону і гальмування (9), (10) зручно користуватися, якщо спочатку було отримано поточні значення ω для $M_{\text{дв. розг}}$ і $M_{\text{дв. гальм}}$. Якщо значення ω не було отримано, то доцільно користуватися формулами з урахуванням значень прискорень на відповідних ділянках.

З урахуванням виразів (11), (12) можна отримати

$$M_{\text{дв. розг}} = J \frac{\omega_{0\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} \left[\left[1 + \left(\frac{\tau}{T_M} - 1 \right) e^{\frac{\tau-t}{T_M}} \right] - \frac{1}{T_M} \frac{M_{\text{ст}}}{\beta} e^{\frac{\tau-t}{T_M}} \right] + M_{\text{ст}}; \quad (13)$$

$$M_{\text{дв. гальм}} = J \frac{\omega_{0\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} \left(1 - e^{t/T_M} \right) - M_{\text{ст}}. \quad (14)$$

Найбільший інтерес для розрахунку являють собою величини максимальних моментів, що розвиває електродвигун у перехідних процесах, що може бути отримано підстановкою в формулу (13) значення $t = t_{\text{уст}}$, а у формулу (14) – значення $t = \tau_1 \approx t_{\text{уст}}$. Для кранових приводів можна вважати в цей момент у формулі (13) $\omega \approx \omega_0$, а у формулі (14) $\omega \approx 0$, що впливає з раніше наведених пояснень до графіків на рис. 3 і 4. Якщо з міркувань точності прийняті припущення не застосовні, то для отримання розв'язку у формулу (13) замість ω повинен бути підставлений вираз (5), а в формулу (14) замість ω – вираз (7).

Необхідність у цьому може виникнути при розрахунку перехідних процесів у приводах, де час перехідних процесів вимірюється десятими долями секунди.

На рис. 6 представлено чисельно розраховану за наведеними вище виразами зміну в часі крутного моменту на валу двигуна АО2-42-4 механізму повороту крана на колоні (крива 1). Для порівняння приведено розраховану зміну (крива 2) крутного моменту фазороторного двигуна (МТН-112-6), аналогічного до встановленого за потужністю з відповідними параметрами реального механізму повороту. На практиці останнім часом при реконструк-

ції кранів стало поширеним видалення з ланцюга ротора опорів і подальша експлуатація двигунів кранової серії з живленням від частотного перетворювача. Щоб показати, як при цьому змінюється крутний момент на валу двигуна, проведено чисельний експеримент: розраховано зміну в часі крутного моменту двигуна МТН-112-6 з короткозамкненим ротором і частотним регулюванням швидкості з відповідними параметрами реального механізму повороту (крива 3).

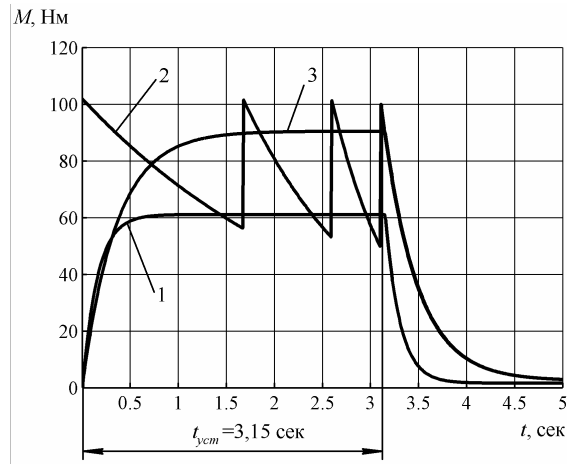


Рис. 6. Графіки зміни в часі крутного моменту на валу електродвигуна у процесі розгону механізму повороту крана на колоні: 1 – двигун АО2-42-4 з частотним керуванням; 2 – двигун МТН-112-6 з фазним ротором; 3 – двигун МТН-112-6 з живленням від частотного перетворювача

Як ясно з аналізу графіків на рис. 5 і 6, при частотному регулюванні швидкості перехідні процеси для досліджуваного приводу протікають, в основному, за постійної величини крутного моменту на валу електродвигуна за лінійної зміни частоти струму. Перехідні процеси характеризуються плавним зростанням крутного моменту. Величина крутного моменту буде зростати до періоду $t = t_{уст}$, а потім різко спадати, тобто при $t = t_{уст}$ ($t = \tau_1$) будемо мати точку зламу у графіках зміни моменту електродвигуна.

Як видно з порівняння кривих 2 і 3, частотне регулювання швидкості має перевагу, порівняно з реостатним, за рахунок того, що за однакових значень середньопускового моменту у другому випадку момент зростає плавно, а в першому миттєво прикладається максимальне значення крутного моменту, що є

негативним, з точки зору терміну служби елементів механізму і металоконструкції крану.

З наведених вище міркувань можна сформулювати кілька практичних рекомендацій щодо шляхів покращення робочих характеристик кранових механізмів з частотно-регульованим приводом. З метою запобігання роботі двигуна в режимі короткого замикання, навіть достатньо незначний період часу, і пов'язаним з цим втратам енергії на нагрів, необхідно виключити перший період розгону шляхом відповідного налаштування перетворювача частоти (параметр – частота пуску). При розрахунку перехідних процесів дуже важливо задати системі керування електродвигунами вірного темпу зміни частоти, тобто величину df/dt , таким чином, щоб не викликати появи на валу електродвигуна крутних моментів, більших, ніж бажані. При невірному виборі темпу зміни частоти навантаження у приводі можуть досягти величини, обмеженої лише налаштуванням запобіжних пристроїв (наприклад, моментних важелів, або муфт граничного моменту). При цьому, залежно від типу запобіжного пристрою, може статися зупинка привода або буде витрачатися зайва енергія на нагрів.

Задача вибору вірного темпу зміни частоти може бути сформульована так: знайти величину $f_{уст}/t_{уст}$, за якої крутний момент на валу електродвигуна не перевищуватиме заданої величини M .

Розв'язок може бути знайдено з виразів (13) і (14). Для періоду розгону

$$\frac{\gamma_{уст}}{t_{уст}} = \frac{\frac{M - M_{ст}}{J} + \frac{M_{ст}}{T_m \beta} e^{(\tau - t_{уст})/T_m}}{\frac{2\pi}{p} \left[1 + \left(\frac{\tau}{T_m} - 1 \right) e^{\frac{\tau - t_{уст}}{T_m}} \right]}. \quad (15)$$

Для періоду гальмування

$$\frac{\gamma_{уст}}{t_{уст}} = \frac{M + M_{ст}}{J \frac{2\pi}{p} (e^{-\tau_1/T_m} - 1)}. \quad (16)$$

Враховуючи реальні співвідношення між τ , $t_{уст}$, T_m , τ_1 для кранових приводів зі збереженням достатньої точності, формули (15) і (16) можуть бути значно спрощені.

Для періоду розгону

$$\frac{\gamma_{\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} = \frac{M - M_{\text{ст}}}{J \frac{2\pi}{p}}. \quad (17)$$

Для гальмування

$$\frac{\gamma_{\text{уст}}}{t_{\text{уст}}} = -\frac{M + M_{\text{ст}}}{J \frac{2\pi}{p}}. \quad (18)$$

Висновки

Проведено аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів із частотно-регульованим приводом на прикладі механізму повороту крана на колоні. Дослідження показали, що застосування частотного регулювання швидкості у приводах кранових механізмів дозволяє: здійснити розгін веденої маси з майже безударним навантаженням, що сприятливо позначається на роботі вузлів механізму та збільшує їх термін служби; здійснити безступеневий розгін, на відміну від ступеневого розгону із приводом від асинхронного двигуна з фазним ротором; застосувати замість кранових двигунів більш дешеві асинхронні короткозамкнені двигуни загальнопромислового призначення.

На основі проведених теоретичних досліджень запропоновано практичні рекомендації щодо шляхів покращення робочих характеристик кранових механізмів.

Література

1. Певзнер Е.М. Электрооборудование грузоподъемных кранов / Е.М. Певзнер, Е.В. Попов, М.И. Аксёнов и др. – М.: Россельхозакадемия, 2009. – 360 с.
2. Решетняк С.Н. К вопросу о применении частотно-регулируемого привода шахтных подъемных установок / С.Н. Решетняк // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – №5. – С. 230–232
3. Ласточкин В.М. Методика по силовому расчету частотно-регулируемых электроприводов крановых механизмов / В.М. Ласточкин, Ф.А. Шамрай // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2007. – №7. – 20 с.

4. Браславский И.Я. Об эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в подъемно-транспортных машинах / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, Ю.В. Плотников // Проблемы автоматизации электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Х. – 2003. – №10, Т.1. – С. 144–145
5. Попов Е.В. Проектирование электроприводов крановых механизмов / Е.В. Попов // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – №12. – 42 с.
6. Радимов С.Н. Частотный электропривод механизмов кранов с напольным управлением / С.Н. Радимов, К.А. Аниченко, А.В. Горячев и др. // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2007. – №7. – С. 22–24.
7. Balasubramaniam M. Crane drive and control systems: Part 2. / Mahadevan Balasubramaniam, Gerhard Fischer // Port technology international - Edition 41
8. Busschots F. Application of field oriented control in crane drives / F. Busschots, R. Belmans, W. Geysen // Proc. IEEE-IAS, Annual Meeting, Dearborn, Michigan, 1991. – P. 347–353.
9. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
10. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
11. Радионов А.Г. Повышение качественных характеристик лифтов: возможные решения / А.Г. Радионов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2007. – №7. – С. 40–41.
12. Grygorov O.V. Realization of energy-saving control modes on cranes of great load-carrying capacity / O.V. Grygorov, Y.I. Zaytsev, V.P.Svirgun, V.V. Stryzhak // Revista Minelor – nr. 4/2010 – S. 7–14.
13. Григоров О.В. Энергосбережения шляхом застосування раціонального керування асинхронних електроприводів ВПМ / О.В. Григоров, В.П. Свіргун, В.В. Стрижак та ін. // Вісник НТУ «ХПИ»: зб. наук. пр. Темат. вип. «Технології в машинобудуванні». – 2010. – №49. – С. 124–129.

Рецензент: І.Г. Міренський, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 4 червня 2012 р.