

Коваленко В. О.,  
Стрижак В. В.,  
Іглін С.П.,  
Коваленко О. О.,  
Стрижак М. Г.

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
E-mail: stryzhak.vsevolod@gmail.com

ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУСКУ  
МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ КРАНУ З ЧАСТОТНО-  
РЕГУЛЬОВАНИМ ПРИВОДОМ

УДК 621.8

DOI 10.37700/ts.2020.21.201-210

*Коваленко В. О., Стрижак В. В., Іглін С.П., Коваленко О. О., Стрижак М. Г. «Динамічні характеристики пуску механізму повороту крана з частотно-регульованим приводом»*

*Застосування частотно-регульованого приводу знаходить широке застосування в механізмах підйомно-транспортних машин. Електроприводи на основі двигунів з фазним ротором, також все частіше переводиться на частотне регулювання. Недостатність досліджень кранового частотно-регульованого приводу приводить до того, що його переваги і можливості використовуються не в повній мірі. Стаття націлена на дослідження зміни динамічних характеристик привода за різних режимів роботи в перехідних етапах робочого циклу оскільки ці характеристики суттєво впливають на величину максимальних напружень і, відповідно, довговічність елементів вантажопідйомних машин.*

*В галузі підйомно-транспортних машин застосування частотно-регульованого електропривода досліджено переважно для ліфтів, робота кранового електропривода традиційно розглядається виходячи з припущення про лінійний закон зміни частоти живлення. Характеристики роботи частотно-регульованого приводу кранових механізмів за інших законів зміни частоти живлення залишається вивченим недостатньо.*

*Дослідження пуско-гальмівних процесів виконано на прикладі механізму повороту крана на колоні в/п 5 т, що обладнаний частотно-регульованим приводом з відповідними налаштуваннями. Приведені основні характеристики крана і механізму повороту. Механізм повороту крана представлено у вигляді одномасової динамічної моделі з абсолютно жорстким зв'язком.*

*Досліджено закономірності зміни динамічних характеристик роботи привода за різних режимів розгону і частотного регулювання швидкості двигуна. Розглянуто тип зміни частоти від нуля до номінального значення за лінійним законом, параболічним та двома типами S-подібного закону. Складено математичну модель кранового механізму, встановлено закономірності зміни параметра регулювання – частоти живлення приводного двигуна. Визначені закономірності зміни впродовж розгону кутової швидкості і крутного моменту. Встановлено, що для всіх типів розгону забезпечується безударне прикладення навантаження, що позитивно впливає на термін служби механізмів і металоконструкцій кранів.*

**Ключові слова:** механізм повороту, частотно-регульований привід, динамічні навантаження, крутний момент.

*Коваленко В. А., Стрижак В. В., Іглін С. П., Коваленко О. А., Стрижак М. Г. «Динамические характеристики пуска механизма поворота крана с частотно-регулируемым приводом»*

*Применение частотно-регулируемого привода находит широкое применение в механизмах подъемно-транспортных машин. Электроприводы на основе двигателей с фазным ротором, также все чаще переводится на частотное регулирование. Недостаточность исследований кранового частотно-регулируемого привода приводит к тому, что его преимущества и возможности используются не в полной мере. Статья нацелена на исследование изменения динамических характеристик привода при различных режимах работы в переходных этапах рабочего цикла поскольку эти характеристики существенно влияют на величину максимальных напряжений и, соответственно, долговечность элементов грузоподъемных машин.*

*В области подъемно-транспортных машин применение частотно-регулируемого электропривода исследовано преимущественно для лифтов, работа кранового электропривода традиционно рассматривается исходя из предположения о линейном законе изменения частоты питания. Характеристики работы частотно-регулируемого привода крановых механизмов при других законах изменения частоты питания остается изученным недостаточно.*

*Исследование пуско-тормозных процессов выполнено на примере механизма поворота крана на колонне г/п 5 т, оборудованный частотно-регулируемым приводом с соответствующими настройками. Приведены основные характеристики крана и механизма поворота. Механизм поворота крана представлен в виде одномассовой динамической модели с абсолютно жесткой связью.*

*Исследованы закономерности изменения динамических характеристик работы привода при различных режимах разгона и частотном регулировании скорости двигателя. Рассмотрены тип изменения частоты от нуля до номинального значения по линейному закону, параболическому и двумя типами S-образного закона. Составлена математическая модель кранового механизма, установлены закономерности изменения параметра регулирования – частоты питания приводного двигателя. Определены закономерности изменения угловой скорости и крутящего момента на протяжении разгона. Установлено, что для всех типов разгона*

обеспечивается безударное приложения нагрузки, что положительно влияет на срок службы механизмов и металлоконструкций кранов.

**Ключевые слова:** механизм поворота, частотно-регулируемый привод, динамические нагрузки, крутящий момент.

V. Kovalenko, V. Stryzhak, S. Iglin, O. Kovalenko, M. Stryzhak "Dynamic characteristics of starting the crane rotation mechanism with a frequency-controlled drive"

The use of a variable frequency drive is widely used in the mechanisms of hoisting-and-transport machines. Electric drives based on wound rotor motors are also increasingly being transferred to frequency control. The lack of research on the crane variable frequency drive leads to the fact that its advantages and capabilities are not fully utilized. The article is aimed at studying the change in the dynamic characteristics of the drive under various operating modes in the transient stages of the operating cycle, since these characteristics significantly affect the value of maximum stresses and, accordingly, the durability of elements of lifting machines.

In the field of hoisting-and-transport machines, the use of a frequency-controlled electric drive has been studied mainly for elevators; the operation of a crane electric drive is traditionally considered based on the assumption of a linear law of change in the supply frequency. The characteristics of the operation of a frequency-controlled drive of crane mechanisms with other laws of change in the supply frequency remains insufficiently studied.

The study of starting and braking processes was carried out on the example of a crane swing mechanism on a column with a lifting capacity of 5 tons, equipped with a frequency-controlled drive with appropriate settings. The main characteristics of the crane and swing mechanism are given. The crane slewing mechanism is presented in the form of a single-mass dynamic model with an absolutely rigid connection.

The regularities of changes in the dynamic characteristics of the drive operation at various acceleration modes and frequency regulation of the engine speed are investigated. The type of frequency change from zero to the nominal value according to the linear law, parabolic and two types of S-shaped law is considered. A mathematical model of the crane mechanism was compiled, the regularities of changing the control parameter - the frequency of the drive motor power supply - were established. Regularities of changes in angular speed and torque during acceleration are determined. It has been established that for all types of acceleration, shockless load application is provided, which has a positive effect on the service life of crane mechanisms and metal structures.

**Keywords:** rotation mechanism, variable frequency drive, dynamic loads, torque.

## Вступ

Застосування частотно-регульованого приводу знаходить все ширше застосування в механізмах підйомно-транспортних машин. Електроприводи на основі двигунів з фазним ротором, також все частіше переводиться на частотно-регулювання [1–8]. Недостатність досліджень кранового частотно-регульованого приводу приводить до того, що його переваги і можливості використовуються не в повній мірі. Актуальним напрямком досліджень є вплив застосування частотного регулювання швидкості на збільшення терміну служби елементів механізмів і металокопункції вантажопідйомних машин. Стаття націлена на дослідження зміни динамічних характеристик приводу за різних режимів роботи в перехідних етапах робочого циклу оскільки ці характеристики суттєво впливають на величину максимальних напружень і, відповідно, довговічність елементів вантажопідйомних машин.

## Аналіз останніх досліджень

В більшості робіт із загальної теорії електропривода при розгляді систем частотного регулювання швидкості двигунів головна увага приділяється електричним параметрам і перетворювальній техніці [11, 12]. В галузі підйомно-транспортних машин застосування частотно-регульованого електропривода досліджено переважно для ліфтів [13]. Доведена ефективність частотно-регульованого приводу в порівнянні з іншими системами кранових приводів з точки зору енергоефективності і сприятливої динаміки під час пуско-гальмівних процесів. Однак робота кранового електропривода традиційно розглядається виходячи з припущення про лінійний закон зміни частоти живлення [14]. Характеристики роботи частотно-регульованого приводу кранових механізмів за інших законів зміни частоти живлення залишається вивченим недостатньо.

### Формулювання мети дослідження

Мета досліджень – отримання закономірностей зміни динамічних характеристик роботи привода кранового механізму з частотним регулюванням швидкості двигуна за різних режимів розгону. Тип зміни частоти від нуля до номінального значення за лінійним законом, параболічним та S-подібним. Поставленої мети можна досягти шляхом вирішення наступних завдань: складання математичної моделі кранового механізму, встановлення закономірностей зміни параметра регулювання – частоти живлення приводного двигуна, визначення закономірностей зміни динамічних характеристик роботи привода.

### Результати досліджень

Динамічні характеристики роботи привода – швидкість  $\omega$ , прискорення  $\dot{\omega}$ , крутний момент  $M$  електродвигуна залежать від закону зміни в часі частоти струму  $f$  та ряду констант, що характеризують привод та зовнішнє навантаження.

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

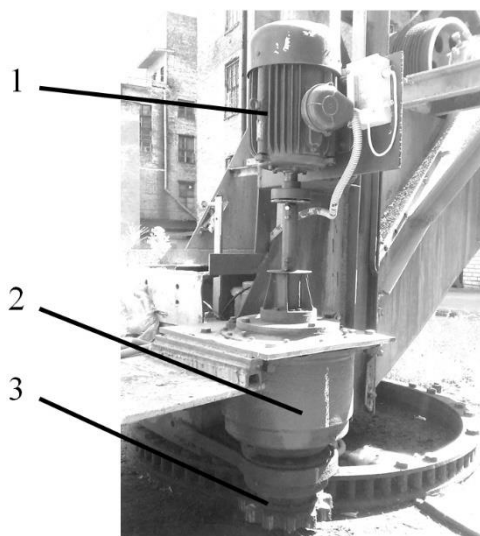


Рис. 1. Механізм повороту крана на колоні в/п 5 т:  
1 – електродвигун; 2 – планетарний редуктор; 3 – цівкова передача

Дослідимо закони зміни  $\omega$ ,  $M$  за різних законів 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).

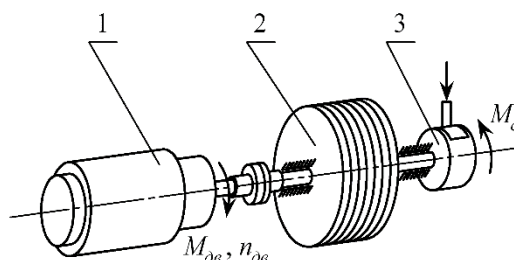


Рис. 2. Приведена схема механізму повороту крана:  
1 – електродвигун; 2 – приведений момент інерції механізму до вала двигуна; 3 – приведений статичний момент до вала двигуна

Така схема може бути використана при розгляді роботи крана з піднятим вантажем на максимальну висоту, або з порожнім гаком. У відповідній цій умові схемі електропривода з лінійною механічною характеристикою швидкість ідеального неробочого ходу  $\omega_0$  є узагальнювальним керуючим впливом. Значення  $\omega_0$  для асинхронного електропривода визначається частотою струму статора  $f$ .

Таблиця 1

**Основні характеристики крана на колоні і механізму повороту**

Основні характеристики крана	Величина
Вантажопідйомність, кг	5000
Виліт стріли, м	8,5
Максимальна висота підйому вантажу, м	10
Характеристики механізму повороту	Величина
Двигун:	
Тип	АО2-42-4
Потужність, кВт	5,5
Номінальна швидкість, об/хв	1450
Мом. інерції ротора, кгм <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	$180 \cdot 10^3$
Момент статичного опору обертанню крана, Нм	1700
Коефіцієнт корисної дії редуктора	0,8
Коефіцієнт корисної дії цівкового зачеплення	0,9

Робота електропривода описується системою рівнянь (1). При цьому прийняті наступні припущення: зв'язок між двигуном і механізмом є абсолютно жорстким, розгойдування вантажу не враховується.

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

де:  $M$  – крутний момент на валу електродвигуна;

$\beta$  – коефіцієнт жорсткості лінеаризованої механічної характеристики;

$\omega_0 = \frac{2\pi}{p} f$  – швидкість ідеального неробочого ходу;

$\omega$  – кутова швидкість обертання валу електродвигуна;

$T_e$  – електрична стала;

$M_{ст}$  – момент статичного опору повороту;

$J_{\Sigma}$  – сумарний момент інерції механізму.

З цієї системи рівнянь отримана залежність (2).

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:  $T_m$  – електромеханічна стала, що визначається характеристиками жорсткості механічної характеристики приводу і моментом інерції механізму.

Ця залежність описує електромеханічні перехідні процеси в досліджуваній системі з урахуванням механічної характеристики приводу і прийнятими припущеннями.

Пошук закономірностей зміни динамічних характеристик виконано чисельним методом за системою (1). Для розрахунку використані наступні дані механізму повороту, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Параметри математичної моделі механізму повороту**

Параметр	Позначення	Чисельне значення
Електрична стала, с	$T_e$	0,01
Коефіцієнт жорсткості лінеаризованої механічної характеристики $\frac{H \cdot m \cdot c}{рад}$	$\beta$	7,065
Момент статичного опору повороту, приведений до валу двигуна, Н·м	$M_{ст}$	1,562
Сумарний момент інерції механізму, приведений до валу електродвигуна, кг·м <sup>2</sup>	$J_{\Sigma}$	1,193
Кількість пар полюсів електродвигуна	$p$	2
Тривалість розгону, с	$t_{розг}$	3,17
Номінальна частота струму (коли здійснюється рух механізму з номінальною швидкістю), Гц	$f_{max}$	50
Початкові умови: - крутний момент електродвигуна в початковий момент часу - кутова швидкість в початковий момент часу	$M(0)$ $\omega(0)$	0 0

Процес розгону здійснюється за зміни частоти живлення приводного двигуна. Зміна частоти живлення може відбуватися за різними законами:

- 1) лінійний закон зміни частоти струму живлення приводного двигуна:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{f_{max}}{t_{розг}} \cdot t; & t \leq t_{розг} \\ f_{max}; & t > t_{розг} \end{cases}$$

Графіки зміни динамічних характеристик приводу за лінійного розгону приведені на рис. 3

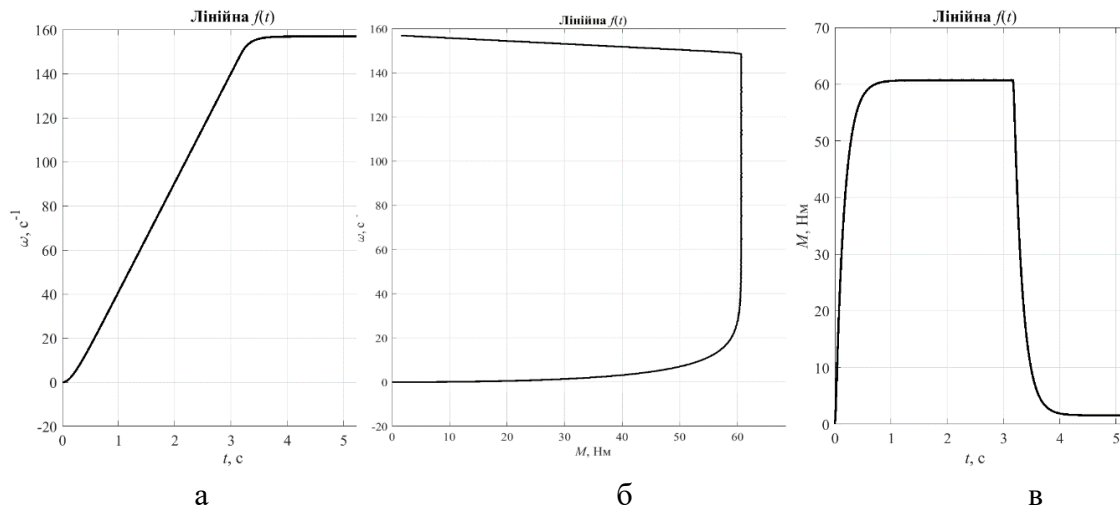


Рис. 3. Графіки зміни динамічних характеристик руху механізму повороту крану на колоні впродовж розгону:

а – зміна кутової швидкості в часі  $\omega(t)$ ; б – залежність кутової швидкості від крутного моменту  $\omega(M)$ ; в – зміна крутного моменту в часі  $M(t)$

2) параболічний закон зміни частоти струму живлення приводного двигуна:

$$f(t) = \begin{cases} f_{\max} - \frac{f_{\max} (t - t_{\text{розг}})^2}{t_{\text{розг}}^2} \cdot t; & t \leq t_{\text{розг}} \\ f_{\max}; & t > t_{\text{розг}} \end{cases}$$

Графіки зміни динамічних характеристик привода за параболічного розгону приведені на рис. 4.

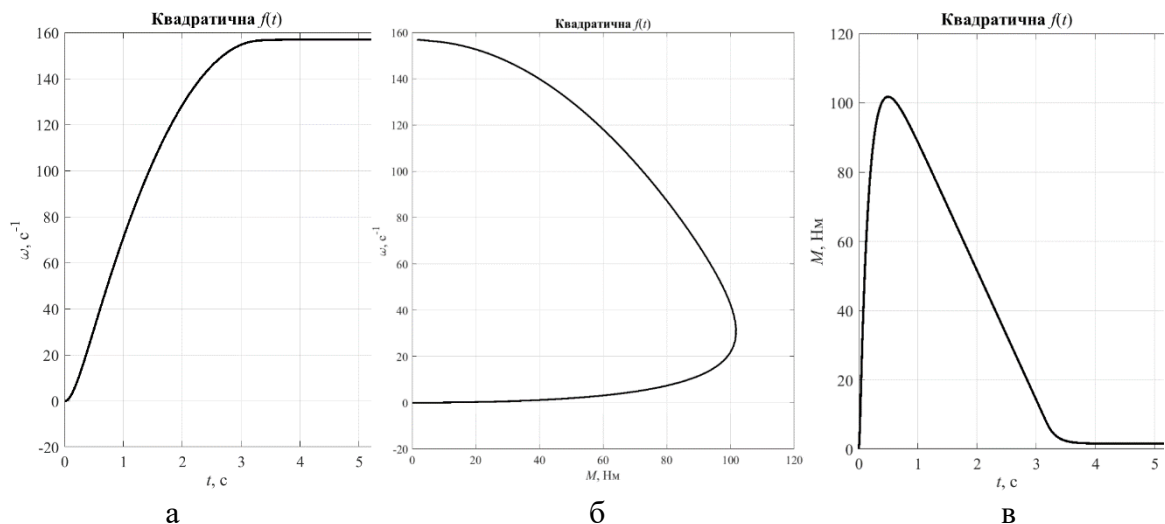


Рис. 4. Графіки зміни динамічних характеристик руху механізму повороту крану на колоні впродовж розгону

а – зміна кутової швидкості в часі  $\omega(t)$ ; б – залежність кутової швидкості від крутного моменту  $\omega(M)$ ; в – зміна крутного моменту в часі  $M(t)$

3) S-подібний

Даний закон зміни частоти живлення може мати різні форми. Тому розглянемо два найбільш часто застосовуваних варіанта:

– кубічна крива

$$f(t) = \begin{cases} \frac{f_{\max} \cdot t^2}{t_{\text{розг}}^3} (3t_{\text{розг}} - 2t); & t \leq t_{\text{розг}} \\ f_{\max}; & t > t_{\text{розг}} \end{cases}$$

– тригонометрична крива

$$f(t) = \begin{cases} \frac{f_{\max} \cdot t}{t_{\text{розг}}} - \frac{f_{\max}}{2\pi} \sin \frac{2\pi \cdot t}{t_{\text{розг}}}; & t \leq t_{\text{розг}} \\ f_{\max}; & t > t_{\text{розг}} \end{cases}$$

Графіки зміни частоти живлення в часі при різних типах S-подібного закону зміни частоти живлення представлені на рис. 5.

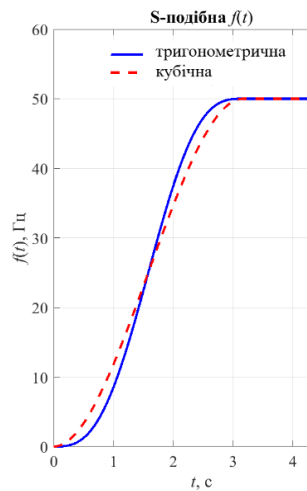


Рис. 5. Графік зміни частоти живлення в часі  $f(t)$  за тригонометричним і кубічним S-подібним законом

Графіки зміни динамічних характеристик привода за S-подібного розгону приведені на рис. 6.

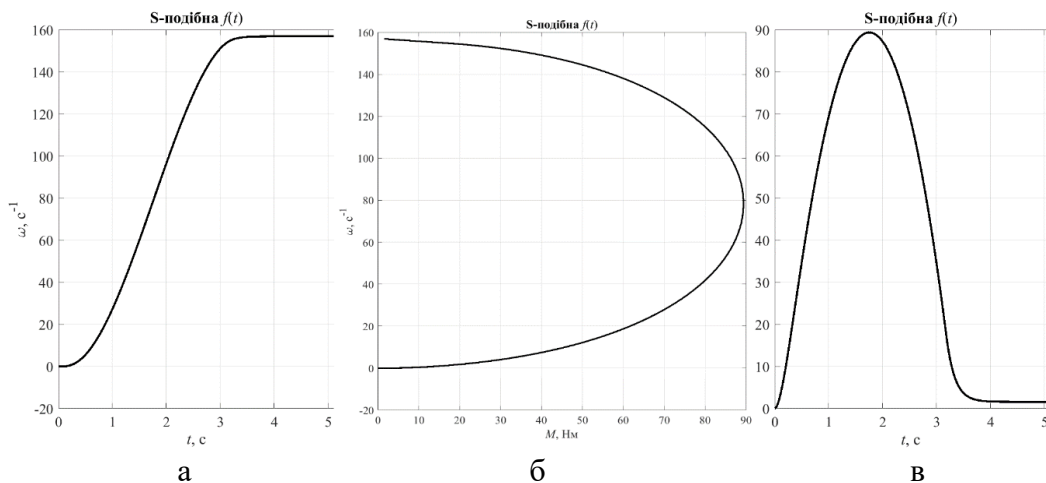


Рис. 6. Графіки зміни динамічних характеристик руху механізму повороту крану на колоні впродовж розгону:

а – зміна кутової швидкості в часі  $\omega(t)$ ; б – залежність кутової швидкості від крутного моменту  $\omega(M)$ ; в – зміна крутного моменту в часі  $M(t)$

Усі представлені вище закономірності зміни динамічних характеристик отримані чисельним розрахунком. Проведені також чисельні експерименти з отримання аналітичних розв'язків рівнянь (1), за допомогою системи комп'ютерної алгебри, що є в пакеті прикладних програм MATLAB. Порядок розв'язання всіх трьох задач однаковий. Спочатку знаходиться аналітичний розв'язок на етапі розгону при нульових початкових умовах. Далі функції цього розв'язку обчислюються в останній момент розгону, і це будуть початкові умови для другого етапу: роботи крану після розгону. На цьому етапі розв'язується система диференціальних рівнянь за сталим керуванням. У командне вікно MATLAB виводяться для кожного типу керування:

- диференціальні рівняння на етапі розгону;
- їхній аналітичний розв'язок;
- значення функцій  $M(t)$  та  $\omega(t)$  в останній момент розгону;
- диференціальні рівняння на етапі після розгону;
- їхній розв'язок.

Аналітичні залежності дуже масивні і не приведені з міркувань компактності викладення матеріалу. Однак необхідно зауважити, що графіки побудовані за допомогою цих рівнянь співпадають з графіками, отриманими після чисельного розв'язку.

### Висновки

Отримані закономірності зміни динамічних характеристик роботи привода механізму повороту крану на колоні з частотним регулюванням швидкості двигуна за різних режимів розгону. Розглянуто тип зміни частоти від нуля до номінального значення за лінійним законом, параболічним та двома типами S-подібного закону. Складено математичну модель кранового механізму, встановлено закономірності зміни параметра регулювання – частоти живлення приводного двигуна, визначені закономірності зміни впродовж розгону кутової швидкості і крутного моменту. Для всіх типів розгону забезпечується безударне прикладення навантаження, що позитивно впливає на термін служби механізмів і металоконструкцій кранів.

### Список використаних джерел

1. Певзнер Є.М. Электрооборудование грузоподъемных кранов / Є.М. Певзнер, Є.В. Попов, М.І. Аксьонов 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 бюлетьень. – 2005. – №5. – С.230-232
3. Ласточкін В.М. Методика по силовому расчету частотно-регулируемых электроприводов крановых механизмов / В.М. Ласточкін, Ф.А. Шамрай // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2007. – №7. – 20 с.
4. Браславський І.Я. Об эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в подъемно-транспортных машинах / І.Я. Браславський, З.Ш. Ішматов, Ю.В. Плотников // Проблемы автоматизации электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2003. – №10. – Т.1. – С.144-145
5. Попов Є.В. Проектирование электроприводов крановых механизмов / Є.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. Ovsyannikov S., Kalinin E., Koliesnik I. (2020) Oscillation Process of Multi-support Machines When Driving Over Irregularities. In: Murgul V., Pasetti M. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. EMMFT-2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 982. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_28)
10. Migal, V., Lebedev, A., Shuliak, M., Kalinin, E., Arhun, S., & Korohodskyi, V. (2020). Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors. Journal of Vibration and Control. <https://doi.org/10.1177/1077546320937634>
11. Браславський І.Я. Енергосберегаючий асинхронний електропривод / І.Я. Браславський, З.Ш. Ішматов, В.Н. Поляков. – М.: «Академия», 2004. – 256 с.
12. Ключев В.І. Теорія електропривода. / В.І. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
13. Радіонов А.Г. Повышение качественных характеристик лифтов: возможные решения / А.Г. Радіонов // Подъёмные сооружения. Специальная техника. – 2007. – №7. – С. 40-41
14. Григоров О.В. Енергозбереження шляхом застосування раціонального керування асинхронних електроприводів ВПМ / О.В. Григоров, В.П. Свіргун, В.В. Стрижак та ін. // Вісник НТУ "ХПІ" "Технології в машинобудуванні". – №49/2010.

### References

1. Pevzner E.M. Electrical equipment for cranes / E.M. Pevzner, E.V. Popov, M.I. Aksionov et al. - М.: Rosselkhozakademiya, 2009. -- 360 p.
2. Reshetnyak S.N. On the question of the use of a frequency-controlled drive of mine hoisting installations / S.N. Reshetnyak // Mining information and analytical bulletin. - 2005. - No. 5. - S.230-232
3. Lastochkin V.M. Methodology for power calculation of frequency-controlled electric drives of crane mechanisms / V.M. Lastochkin, F.A. Shamray // Schneider Electric Technical Collection. - 2007. - No. 7. –20 s.
4. Braslavsky I.Ya. On the effectiveness of the use of a frequency-controlled electric drive in hoisting-and-transport machines / I.Ya. Braslavsky, Z.Sh. Ishmatov, Yu.V. Plotnikov // Problems of automation of an electric drive. Theory and practice. Bulletin of NTU "KhPI". - Kharkov, 2003. - No. 10. - T.1. - S. 144-145
5. Popov E.V. Design of electric drives for crane mechanisms / E.V. Popov // Schneider Electric Technical Collection. - 2009. - No. 12. - 42 p.
6. Radimov S.N. Frequency electric drive of crane mechanisms with floor control / S.N. Radimov, K.A. Anichenko, A.V. Goryachev et al. // Lifting structures. Special equipment. - 2007. - No. 7. - S. 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. Ovsyannikov S., Kalinin E., Koliesnik I. (2020) Oscillation Process of Multi-support Machines When Driving Over Irregularities. In: Murgul V., Pasetti M. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. EMMFT-2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 982. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_28)
10. Migal, V., Lebedev, A., Shuliak, M., Kalinin, E., Arhun, S., & Korohodskyi, V. (2020). Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors. Journal of Vibration and Control. <https://doi.org/10.1177/1077546320937634>

11. Braslavsky I.Ya. Energy-saving asynchronous electric drive / I.Ya. Braslavsky, Z.Sh. Ishmatov, V.N. Polyakov. - М.: "Academy", 2004. - 256 p.
12. Klyuchev V.I. The theory of an electric drive. / V.I. Klyuchev. - М.: Energoatomizdat, 2001. - 704 p.
13. Radionov A.G. Improving the quality characteristics of lifts: possible solutions / A.G. Radionov // Lifting structures. Special equipment. - 2007. - No. 7. - S. 40-41
14. Grigorov OV Energy saving by application of rational control of asynchronous VPM electric drives / О.В. Григоров, В.П. Svirgun, VV Haircut and. etc. // Bulletin of NTU "KhPI" "Technologies in Mechanical Engineering". - №49 / 2010.