

Хлопенко І.М.

Херсонська державна морська академія

РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ СУДНОВОГО ДВОСТУПІНЧАСТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА ПРИ ВЕКТОРНОМУ КЕРУВАННІ З РОБАСТНИМ РЕГУЛЯТОРОМ В КАНАЛІ ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ

Метою роботи є розрахунок перехідних процесів в асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого компресора з прямим кутом розвалу при векторному керуванні з робастним регулятором в каналі потокозчеплення. Для проведення досліджень розроблено методологію наукового дослідження перехідних процесів в асинхронному електроприводі поршневої повітряної компресорної установки при векторному керуванні. Запропоновано структурну схему системи векторного керування з робастним регулятором у контурі потоку асинхронного електроприводу такої установки. За створеною раніше математичною моделлю розрахована передавальна функція H_{∞} -субоптимального робастного регулятора за методом мішаної чутливості. Визначено статичний момент сил тертя, діючих на електродвигун, за індикаторними діаграмами та заданим механічним ККД. Наведені формули моментів приведені до кривошипну діючих тисків повітря на поршні компресора. Проведено розкладання цих моментів за гармоніками до рядів Фур'є до п'ятнадцятого порядку включно в пакеті MathCAD. Побудовані графічні залежності приведені до кривошипну моментів сил тиску повітря на поршні компресора від кута повороту жорсткого валу, обчисленими за частковими сумами рядів Фур'є та без їх розкладання в ряди Фур'є. Отримано добрий збіг результатів розрахунку за обома формулами, крім кількох точок, при заданому числі членів ряду, рівному п'ятнадцяти. Побудовано схему моделювання перехідних процесів в асинхронному електроприводі компресорної установки з урахуванням приведені до кривошипну моментів діючих сил тертя, періодичних газових сил і сил тяжіння поступово рухомих мас кривошипно-шатунного механізму в пакеті Simulink. Моменти вказаних сил тяжіння визначалися за формулами, запропонованими раніше. На конкретному прикладі досліджено перехідні процеси в електроприводі суднової V-подібної компресорної установки з жорстким валом, що складається з ротора асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, колінчастого валу компресора та маховика. Показано, що розмахи усталених параметричних коливань кутової швидкості жорсткого валу знаходяться в межах допусків при високоточній стабілізації потокозчеплення робастним регулятором, зміні знака циклічно повторювального навантаження і коливаннях електромагнітного моменту в робочій області роботи електричної машини. Бібл. 11, рис. 4.

Ключові слова: двоступінчастий поршневий компресор, асинхронний електродвигун, система векторного керування, робастний регулятор в контурі потоку, перехідні процеси.

Постановка проблеми. У суднових системах стисненого повітря для пуску та реверсування головних двигунів широко використовуються двоступінчасті поршневі компресори V-подібного типу з прямим кутом розвалу і загальним для нижніх головок шатунів коліном колінчастого валу (КВ) кривошипно-шатунного механізму (КШМ), що приводяться в дію асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором. Забезпечення ефективної та надійної роботи таких установок є важливою проблемою. Окремі аспекти цієї проблеми вивчалися аналітично багатьма дослідниками, огляд робіт яких викладено у працях [1, 2]. Як показали теоретичні та експериментальні дослідження та практика експлуатації

компресорних установок, основною причиною їх відмов є крутильні коливання жорсткої механічної системи, що складається з ротора електродвигуна, КВ компресора та маховика [2, 3]. Ці коливання носять циклічний характер внаслідок періодичності процесу навантаження жорсткого валу крутильної системи та протікають із суттєвими витратами енергії на керування. Ефективним способом зниження цих витрат енергії на крутильні коливання є автоматичне регулювання швидкості електроприводу (ЕП) на перехідних та усталених режимах. У роботі [4] таке регулювання швидкості асинхронної машини здійснюється системою частотного керування. Однак система частотного керування [4] асинхронним ЕП компресорної

установки поступається, як відомо, за низкою показників системі векторного керування з робастним регулятором у контурі потокозчеплення [5]. Тому дослідження перехідних процесів в асинхронному ЕП компресорних установок при векторному керуванні [5] є важливим та актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Створення математичних моделей і методик різного рівня складності, що описують перехідні процеси в нерегульованих ЕП двоступінчастих поршневих компресорів з поршнями, що протилежно рухаються, викладено в роботах [3, 6]. В них питання про зниження рівня вимушених крутильних коливань жорсткого валу, що складається з ротора двигуна, колінчастого валу компресора і маховика, за рахунок регулювання ЕП не розглядалося. Однак добре відомо, що заміна нерегульованого електроприводу на регульований дозволяє суттєво знизити споживання енергії, збільшити термін служби механічної частини електроприводу та підвищити якість регулювання кутової швидкості асинхронної машини. У зв'язку з цим нами у роботі [4] було використано принцип скалярного керування асинхронного ЕП суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу. Дослідження проводилися за запропонованою в ній оригінальною методикою, яка враховує багато факторів, які раніше іншими дослідниками не враховувалися або враховувалися не повною мірою. Проте скалярний принцип керування поступається за низкою показників векторному керуванню з робастним регулятором в контурі потокозчеплення [5]. Найважливішими з цих показників є швидка реакція на зміну навантаження, завдяки якій при зміні навантаження прак-

тично не відбувається зміна швидкості; збільшений діапазон та висока точність регулювання швидкості; знижуються втрати на нагрівання та намагнічування, підвищується ККД електродвигуна. Тому застосування векторного принципу керування асинхронних ЕП компресорів є доцільним.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є розрахунок перехідних процесів в асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого компресора з прямим кутом розвалу при векторному керуванні з робастним регулятором в каналі потокозчеплення.

Для досягнення цієї мети необхідно на основі існуючих теоретичних досліджень розробити методологію наукового дослідження, структурну схему системи векторного керування ЕП компресора, схему моделювання перехідних процесів кутової швидкості вимушених параметричних коливань жорсткого валу при регулярних коливаннях електромагнітного моменту і навантаження в пакеті Simulink, а також виконати розрахунки та провести аналіз отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1 представлена структурна схема системи векторного керування асинхронного ЕП компресора. Вона побудована із залученням робіт [5, 7, 8].

Схема містить керований за модулем вектора потокозчеплення ротора двигуна контур потоку з робастним регулятором [8, 9] і двоконтурний канал підпорядкованого регулювання швидкості з П-регулятором у зовнішньому контурі та ПІ-регулятором струму у внутрішньому контурі [7, 11].

Канал контуру потоку включає в себе передавальні функції коригуючого фільтра у вигляді аперіодичної ланки з постійною часу T_{pr} , робастного

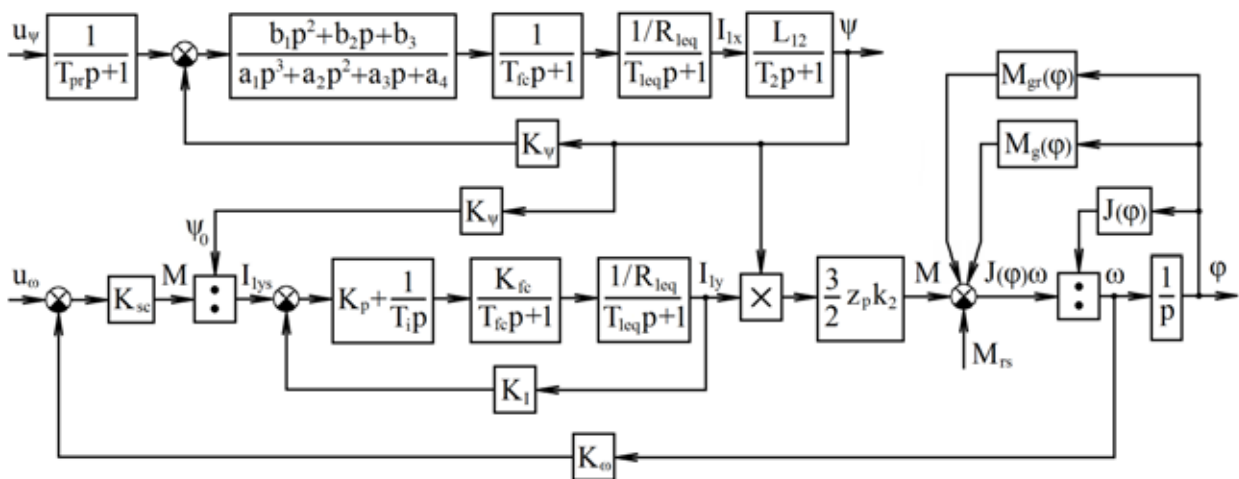


Рис. 1. Структурна схема векторного керування електропривода компресора

регулятора третього порядку з коефіцієнтами b_1, b_2, b_3 полінома чисельника і коефіцієнтами a_1, \dots, a_4 полінома знаменника, перетворювача частоти з безрозмірним одиничним передавальним коефіцієнтом [8] та постійної часу T_{fc} , аперіодичної ланки обмотки статора з еквівалентним опором R_{1eq} та еквівалентної електромагнітної постійної часу T_{1eq} кіл статора та ротора, а також аперіодичної ланки ротора з взаємною індуктивністю статора та ротора L_{12} та постійною часу T_2 . Контур потоку замкнений неединичним зворотним зв'язком з коефіцієнтом підсилення $K_\psi = u_\psi / \psi_b$ (індекс b позначає базове значення) за модулем ψ вектора потокозчеплення ротора.

Канал підпорядкованого регулювання швидкості містить передавальні функції пропорційного регулятора з коефіцієнтом передачі K_{sc} , ПІ-регулятора струму з передавальним коефіцієнтом K_p і постійною часу T_i , перетворювача частоти з передавальним коефіцієнтом K_{fc} і постійною часу T_{fc} , аперіодичної ланки обмотки статора, електромагнітного моменту M електричної машини з короткозамкненим ротором, жорстко пов'язаним з колінчастим валом, і приведеним до осі обертання КВ моментом інерції $J(\varphi)$ поступово рухомих і обертових мас КШМ, що залежать від кута повороту φ кривошипа першого ступеня компресора [4]. На структурній схемі момент інерції $J(\varphi)$ зображений окремим блоком. Значення коефіцієнта підсилення пропорційної ланки, що зв'язує вхід модуля ψ вектора потокозчеплення та вихід сигналу потокозчеплення ψ_0 , що надходить на дільник, збігається зі значенням коефіцієнта підсилення K_ψ контуру потоку. Тому коефіцієнт підсилення цієї ланки має таке саме позначення, як і коефіцієнт підсилення потоку, проте відрізняється від нього тим, що не має розмірності.

Навантаження на двигун $M_i(\varphi)$, що залежить від кута повороту φ , представлено на схемі двома блоками та блоком ступінчастого сигналу з постійним моментом сил тертя M_{rs} . Перший блок $M_{gr}(\varphi)$ позначає приведений до кривошипу рівнодіючий момент $M_{gr}(\varphi)$ сил тяжіння поршнів з приведеною до кожного з них 1/3 маси шатуна. Другий блок $M_g(\varphi)$ зображує сумарний момент $M_g(\varphi)$ діючих на поршні компресора газових сил, приведених до кривошипу. Підсумовування моментів здійснюється суматором.

Внутрішній контур струму каналу підпорядкованого регулювання замкнений за струмом неединичним зворотним зв'язком з коефіцієнтом підсилення $K_I = u_\omega / I_{1yb}$, а зовнішній контур швидкості – неединичним зворотним зв'язком за

кутовою швидкістю ω з коефіцієнтом підсилення $K_\omega = U_\omega / \omega_b$. Напруги датчиків U_ψ і U_ω відповідають стандартним значенням 10 В.

Структурна схема також містить ланку затримки сигналу часу, необхідного для продування компресора, і пропорційну ланку тиску повітря в ємності для його зберігання. Ці елементи на рисунку не показані.

Момент інерції $J(\varphi)$ компресорної установки розраховується за формулою:

$$J(\varphi) = J_0 + m_1 r^2 f_1(\varphi) + m_2 r^2 f_1(\varphi + \gamma), \quad (1)$$

де

$$f_1(\varphi) = \sin^2 \varphi + \lambda \sin \varphi \cdot \sin 2\varphi; \quad (2)$$

J_0 – приведений до нерухомої осі обертання кривошипа постійний момент інерції, що дорівнює сумі моментів інерції ротора електродвигуна, маховика колінчастого валу та приведеної до осі шатунної шийки колена колінчастого валу 2/3 маси обох шатунів; g – прискорення вільного падіння; r – радіус кривошипу; m_1, m_2 – відповідно сумарна маса поршня, поршневих кілець, пальця верхньої головки шатуна та 1/3 маси шатуна, приведеної до поршня першої (індекс 1) та другої (індекс 2) ступені; $\lambda = r/l$ – відношення радіуса r кривошипу до довжини l шатуна; $\gamma = 3\pi/2$ рад.

Вираз (2), як показано в роботі [4], є наближеним. Він відрізняється від точного значення не більше, ніж на 2,25 % при значеннях $\lambda \leq 0,15$.

Формула приведенного до кривошипу моменту сил тяжіння поступально рухомих мас поршнів з кільцями, пальцями та 1/3 маси шатунів має вигляд:

$$M_{gr}(\varphi) = gr \cos \frac{\pi}{4} [m_1 f_2(\varphi) + m_2 f_2(\varphi + \gamma)], \quad (3)$$

де

$$f_2(\varphi) = \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi.$$

Рівнодіючий момент приведених до кривошипу моментів періодично діючих тисків повітря на поршні компресора описується виразом [4]:

$$M_g(\varphi) = M_{g1}(\varphi) + M_{g2}(\varphi + \gamma), \quad (4)$$

де

$$M_{gs} = r \frac{\pi d_s^2}{4} \left[\sin \varphi + 0,5\lambda \frac{\sin 2\varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right] p_s(\varphi)$$

$$(s = 1, 2); \quad (5)$$

d_s – діаметр поршня s -го циліндру, а тиск $p_s(\varphi)$ розраховується за формулами, наведеними в роботі [4].

Вирази (5) є нелінійними. Вони не піддаються моделюванню у пакеті Simulink. Тому проводять їх гармонійну лінеаризацію із залученням рядів Фур'є. У роботі [4] така лінеаризація проводилася лише для тисків $p_s(\varphi)$. У цій роботі вона проводиться для всього виразу (5). Отримані при цьому часткові суми гармонік рядів Фур'є m -го порядку включно мають вигляд:

$$M_{gs}(\varphi, m) = \frac{a_{0s}}{2} + \sum_{n=1}^{n=m} A_{ns} \sin(n\varphi + \psi_{ns}) \quad (s = 1, 2), \quad (6)$$

де; a_{0s} – постійний коефіцієнт; A_{ns} – амплітуда гармоніки; ψ_{ns} – початкова фаза; n – порядок гармоніки. Індекс $s=1$ відноситься до першої ступені, а $s=2$ – до другої ступені компресора.

Нижче на конкретному прикладі розрахунковим шляхом буде встановлено, що формула (6) має добру збіжність при порівняно невеликій кількості m членів ряду. Тому її застосування для розрахунку моменту (4) періодично діючих тисків повітря на поршні компресора є переважним.

Момент тертя, що перешкоджає обертанню електродвигуна, визначається за формулою [10]:

$$M_{rs} = \frac{N_i}{\omega_n} \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right), \quad (7)$$

де $N_i = N_{i1} + N_{i2}$ – сума індикаторних потужностей компресора, причому для ступені з індексом s

$$N_{is} = \frac{k}{k-1} p_{0s} V_{hs} \frac{\omega_n}{2\pi} \left[1 - a_s \left(\frac{1}{\varepsilon_s^k} - 1 \right) \right] \left(\frac{k-1}{\varepsilon_s^k} - 1 \right) \quad (s = 1, 2); \quad (8)$$

$k = 1,4$ – показник адиабати; p_{0s} – тиск повітря на вході в циліндр s -ої ступені; $V_{hs} = 0,5\pi d_s^2 r$ – робочий об'єм s -ого циліндра; ε_s – ступінь стиснення повітря в s -му циліндрі, причому $\varepsilon_1 = V_{h1} (1 + a_1) / V_{h2} (1 + a_2)$ при охолодженні повітря після першої ступені до рівних значень температур на вході в циліндри, а ступінь стиснення у другому циліндрі $\varepsilon_2 = p_{\max} / \varepsilon_1$ (p_{\max} – заданий максимальний тиск); a_s – відносний мертвий об'єм s -ого циліндра; ω_n – номінальна кутова швидкість електродвигуна; η_m – механічний ККД.

Сумарне навантаження на двигун від дії на жорсткий вал компресорної установки моментів сили тяжіння (3), газових сил (4) та сил тертя (7) розраховувалося за формулою (9):

$$M_r(\varphi) = M_{rs} - M_{gr}(\varphi) - M_g(\varphi). \quad (9)$$

Зауважимо, що у цій формулі два останні доданки, взяті з протилежним знаком, відповідають початковому переміщенню кривошипа

проти ходу годинникової стрілки з положення, що займається поршнем першого циліндра компресора у верхній мертвій точці.

Передавальна функція робастного регулятора розраховувалася за методикою [8]. Приведений до осі ротора електродвигуна момент інерції компресора $J(\varphi)$ і навантаження $M_r(\varphi)$ на асинхронний двигун визначалися за формулами (1) і (9), а інші параметри структурної схеми – за методикою, запропонованою в роботах [7; 11].

Розрахунок перехідних процесів в асинхронному ЕП при векторному керуванні з робастним регулятором в контурі потоку здійснювався для компресорної установки WP 22L фірми Sauer. Ця установка складається з V-подібного дво-ступінчастого поршневого компресора з прямим кутом розвалу та асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Нижні головки шатунів КШМ компресора посаджені на загальне коліно колінчастого валу. Характеристики компресора відповідають даним, наведеним у роботі [4]. Асинхронним двигуном установки є електрична машина НМА2 1328-4 з такими даними: потужність $P_n = 5,3$ кВт; номінальна частота обертання 1460 об/хв; напруга 400 В; номінальний момент $M_n = 34,67$ Н·м; пусковий момент 83,2 Н·м; номінальний струм статора 10,63 А; момент інерції 0,033 кг·м²; частота мережі $f = 50$ Гц. Двигун нерегульований.

Вихідними даними для розрахунку служили наступні величини: $T_{pr} = 2,5$ с; $b_1 = 1,594 \cdot 10^5$; $b_2 = 1,252 \cdot 10^6$; $b_3 = 2,219 \cdot 10^7$; $a_1 = 1$; $a_2 = 3,854 \cdot 10^3$; $a_3 = 2,811 \cdot 10^5$; $a_4 = 1,471 \cdot 10^5$; $K_{fc} = 32,66$; $T_{fc} = 0,001$ с; $R_{1eq} = 1,5956$ Ом; $T_{1eq} = 0,00591$ с; $k_2 = 0,968$; $L_{12} = 0,1684$ Гн; $T_2 = 0,2611$ с; $K_{sc} = 75,93$ Н·м/В; $K_p = 0,6426$ В/А; $T_i = 0,009195$ с; $K_1 = 0,2246$; $K_{\omega} = 0,06366$ В·с/рад; $z_p = 2$; $k_2 = 0,9680$; $J_0 = 1,35$ кг·м²; $\eta_m = 0,8$. Момент тертя, розрахований за формулами (7, 8), $M_{rs} = 4,31$ Н·м. Тиск повітря в ємності в процесі її заповнення змінювався від 25 до 28 МПа. Інші параметри такі самі, як і в роботі [4]. Втрати енергії в самодіючих клапанах не враховувалися.

На рис. 2 представлені графічні залежності приведених до кривошипу моментів сил тиску повітря на поршні циліндрів першої (а) та другої (б) ступені компресора від кута повороту φ жорсткого валу, обчислені за формулами (6) часткового ряду Фур'є (суцільна лінія) і виразами (5) (точкова лінія) без їх розкладання в ряди Фур'є.

Отримано добрий збіг цих залежностей, крім кількох точок, при заданому числі $m=15$ членів гармонійного ряду Фур'є.

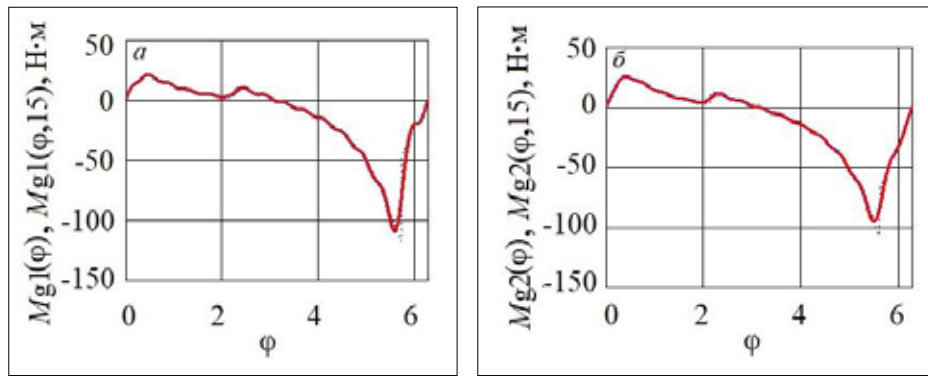


Рис. 2. Приведені до кривошипу моменти сил тисків повітря на поршні циліндрів першої (а) та другої (б) ступені компресора: $Mg1(\varphi)$, $Mg2(\varphi)Mg1(\varphi,15)$, $Mg2(\varphi,15)$

В табл.1 представлені базисні величини, розраховані за формулами роботи [11].

Таблиця 1

Базисні величини для побудови графіків

Фізичний параметр	Базисна величина	Формула	Значення
Струм в каналі потоку	Амплітудне значення	$I_{1xb} = I_{1ab}$	5,758 А
Струм в каналі швидкості	Амплітудне значення	$I_{1yb} = I_{1\beta b}$	44,524 А
Потокозчеплення	Номінальне значення потокозчеплення ротора	$\Psi_b = L_{12} I_{1xb}$	0,9698 Вб
Кутова швидкість	Синхронна кутова швидкість поля статора	$\omega_b = \frac{2\pi f}{z_p}$	157,08 рад/с
Кратність пускового моменту	Відношення критичного моменту до номінального моменту	$k_{kr} = \frac{M_{kr}}{M_n}$	3,4
Електромагнітний момент	Відношення критичної потужності до базисної кутової швидкості поля	$M_b = k_{kr} \frac{P_n}{\omega_b}$	114,7 Н·м

Вони використовувалися при побудові графіків безрозмірних перехідних процесів в асинхронному ЕП компресора. Ці графіки для безрозмірних величин потокозчеплення ψ/ψ_b , кутової швидкості жорсткого валу ω/ω_b та електромагнітного моменту M/M_b двигуна компресорної установки із спільним коліном КВ при подачі безрозмірного одиничного завдання за швидкістю і за моментом тертя через 4 с після включення завдання за потокозчепленням представлені на рис. 3.

Із цих графіків видно, що на початковій ділянці пускової характеристики потокозчеплення ротора ψ/ψ_b плавно зростає за рахунок коригувальної аперіодичної ланки і форсованого зростання електромагнітного моменту M/M_b двигуна, а потім з моменту часу близько 12,5 с підтримується робастним регулятором незмінним при зниженні електромагнітного моменту до усталеного коливального режиму з відносним розмахом близько

2%. При цьому забезпечується стабілізація безрозмірної кутової швидкості ω/ω_b жорсткого валу при параметричних коливаннях з розмахом, що не перевищує 0,26%.

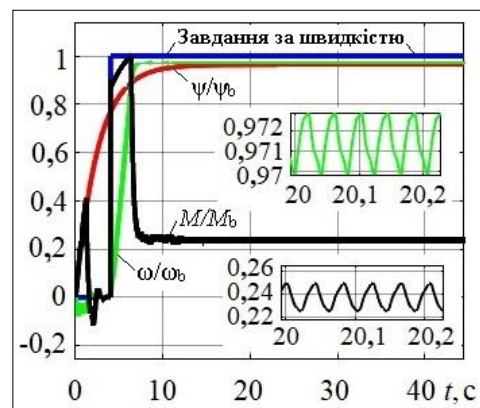


Рис. 3. Перехідні процеси в асинхронному електроприводі компресора

На рис. 4 показані результати розрахунків приведенного до кривошипну безрозмірного циклічно навантажувального моменту M_r/M_b на двигун при пуску компресора, рівного алгебраїчній сумі безрозмірних моментів періодичних газових сил, сил тяжіння поступально рухомих мас КШМ з приведеними масами шатунів і безрозмірного моменту сил тертя.

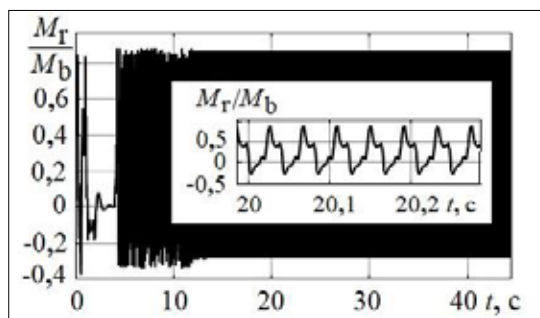


Рис. 4. Залежність безрозмірного моменту M_r/M_b від часу t при пуску компресора з одним коліном колінчастого валу

З рис. 4 видно, що на усталеному режимі безрозмірне навантаження, що діє на жорсткий вал компресорної установки, носить регулярний коливальний характер з розмахом, що не перевищує базового значення, і перетинає вісь абсцис. Однак його від'ємні значення не впливають на роботу асинхронної електричної машини в режимі електродвигуна.

Слід також зазначити, що при розрахунках перехідних процесів і навантаженнях на жор-

сткий вал компресора найбільші амплітудні значення безрозмірних струмів I_{1x}/I_{1xb} і I_{1y}/I_{1yb} виявилися рівними одиниці.

Таким чином, аналіз проведених розрахунків показує, що застосування системи векторного керування з робастним регулятором в каналі потоку для регулювання ЕП у компресорних установах є доцільним.

Висновки

Розроблено методологію наукового дослідження перехідних процесів в асинхронному електроприводі V-подібної двоступінчастої поршневої повітряної компресорної установки з прямим кутом розвалу при векторному керуванні. Запропоновано структурну схему системи векторного керування з робастним регулятором у контурі потоку асинхронного електроприводу такої установки. Побудовано схему моделювання перехідних процесів в асинхронному електроприводі компресорної установки з урахуванням дії сил тертя, періодичних газових сил і сил тяжіння поступово рухомих мас КШМ в пакеті Simulink. Результати аналізу проведених розрахунків перехідних процесів в електроприводі суднового V-подібного компресора показують, що при векторному керуванні з робастним регулятором в каналі потоку забезпечується стабілізація електромагнітного моменту та кутової швидкості жорсткої системи, що складається з ротора асинхронного двигуна і колінчастого валу КШМ, у межах допусків при високій точності регулювання поточкозчеплення робастним регулятором.

Список літератури:

1. Столярчук В.Ф., Рачинец Н.Ф., Гладько Б.М. Исследование движения и динамики машин, оборудованных электроприводом. Львов : изд-во Львовского ун-та, 1972. 171 с.
2. Wachel J.C., Tison J.D. Vibration in reciprocating machinery and piping systems. *Proceedings of the twenty-third turbo machinery symposium*. Texas : Texas A&M University, 1994. P. 243–272. DOI: <https://doi.org/10.21423/R1808S>.
3. Morillo A.H.V., Kurka P.R.G., Bittencourt M. L. Dynamics analysis of reciprocating compressor crankshafts. *Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics*. (21 August 2018) / eds K.L. Cavalca, H.I. Weber : Springer Nature Switzerland, 2019. Vol. 1. P. 489–501. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_34.
4. Хлопенко М.Я., Хлопенко І.М. Моделювання перехідних процесів у частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного двохступінчастого поршневого компресора. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2022. Т. 33(72). № 3. С. 73–80. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/12>.
5. Хлопенко М.Я., Рожков С.О. Хлопенко І.М. Патент України на корисну модель № 137157. Система векторного керування швидкістю асинхронного електродвигуна. Заявл. 18.03.2019 ; опубл. 10.10.2019. Бюл. 19.
6. Chernyi S.G., Erofeev P., Novak B., Emelianov V. Investigation of the mechanical and electromechanical starting characteristics of an asynchronous electric drive of two-piston marine compressor. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. № 9, 207. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9020207>.

7. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений. Москва : Академия, 2006. 304 с.
8. Хлопенко Н.Я., Хлопенко И.Н. Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 1. С. 21–25. DOI: 10.20998/2074-272X/2017.1.04.
9. Khlopenko I.N., N.J. Khlopenko, Rozhkov S.A. Analysis and verification of operation of the stabilizing robust controller's electrical circuit of the rotor flux-linkage control system. *Electrical engineering & electromechanics*. 2020. № 6. С. 18–23. DOI: 10.20998/2074-272X/2020.6.03.
10. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Теория и расчет. Изд. 3-е, доп. Москва : КолосС, 2006. Т. 1. 456 с.
11. Кириллов Р.С. Моделирование векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора : учебное пособие по курсовому проектированию. Екатеринбург : Уральский государственный горный ун-т, 2010. 30 с.

Khlopenko I.M. CALCULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A MARINE TWO-STAGE RECIPROCATING COMPRESSOR UNDER VECTOR CONTROL WITH A ROBUST CONTROLLER IN THE FLUX-LINKAGE CHANNEL

The aim of the work is the calculation of transient processes in the asynchronous electric drive of the marine V-type two-stage reciprocating compressor with a right angle camber under vector control with a robust controller in the flux-linkage channel. To conduct research, a methodology for the scientific study of transient processes in an asynchronous electric drive of a reciprocating air compressor unit under vector control has been developed. A block diagram of a vector control system with a robust controller in the flux-linkage loop of an asynchronous electric drive of such an unit is proposed. Based on the previously created mathematical model, the transfer function of the H_∞ -suboptimal robust controller was calculated using the mixed sensitivity method. The static moment of the friction forces acting on the electric motor was determined according to the indicator diagrams and the specified mechanical efficiency ratio. Formulas for the moments of the acting air pressure reduced to the crank on the compressor pistons are given. The expansion of these moments by harmonics to Fourier series up to and including the fifteenth order was carried out in the MathCAD package. Graphical dependences of moments of air pressure resultant forces on compressor pistons reduced to the crank on the angle of rotation of the rigid shaft, calculated by partial sums of Fourier series and without their expansion into Fourier series, are constructed. A good match was obtained between the results of the calculation according to both formulas, except for a few points, with the given number of members of the series equal to fifteen. A scheme for transient processes modeling in an asynchronous electric drive of a compressor unit was built in the Simulink package, taking into account reduced to the crank torques of the acting frictional forces, periodic gas forces and gravity forces of translationally moving masses of the crank mechanism. Moments of the specified gravity forces were determined by the formulas proposed earlier. On a specific example, transient processes in the electric drive of a marine V-type compressor unit with a rigid shaft, consisting of a rotor of an asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor, a compressor crankshaft and a flywheel, are investigated. It is shown that the ranges of steady parametric oscillations of the rigid shaft angular velocity are within tolerances with high-precision stabilization of the flux-linkage by a robust controller, a change in the sign of a cyclically repetitive load and oscillations of the electromagnetic torque in the working area of the electric machine. References 11, figures 4.

Key words: two-stage reciprocating compressor; asynchronous electric motor; vector control system, robust controller in the flow circuit, transient processes.