

**ДВОКОНТУРНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ОДНОЦИЛІНДРОВОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА**

Ю.В. Шуруб*, канд. техн. наук, **О.М. Попович****, докт. техн. наук, **О.В. Бібік*****, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: yvshur@ukr.net.

Розроблено двоконтурну систему регулювання електродвигунів одноциліндрових поршневих компресорів із статичним пропорційно-диференціюючим регулятором у зовнішньому контурі регулювання швидкості та астатичним пропорційно-інтегруючим регулятором у внутрішньому контурі регулювання моменту з урахуванням нелінійної залежності між моментом навантаження двигуна та кутовим переміщенням його ротору. Для синтезу регулятора внутрішнього контуру моменту асинхронного двигуна за фіксованого значення частоти живлення застосовано метод налаштування на технічний оптимум. На прикладі математичного моделювання режимів роботи регульованого електродвигуна одноциліндрового поршневого компресора на базі асинхронного двигуна 4А63В2У3 показано, що застосування двоконтурної системи дає змогу збільшити енергоефективність приводу, покращити ТНД та коефіцієнт потужності, зменшити амплітуди коливань електромагнітного моменту порівняно як з нерегульованим, так і з регульованим за одноконтурною системою приводами. Бібл. 23, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: поршневий компресор, асинхронний електродвигун, періодичне навантаження, нелінійна ланка, ПІ-регулятор.

Вступ. Електродвигуни поршневих компресорів є доволі специфічними об'єктами, що характеризуються нелінійною періодичною залежністю моменту опору від кутового переміщення ротора електродвигуна [1]. Застосування регульованих за частотою електродвигунів з асинхронними двигунами (АД) є ефективним засобом підвищення їхньої енергоефективності, зокрема це показано у роботах [2–6]. Але внаслідок періодичної зміни моменту опору від кута повороту ротора за малих швидкостях обертання спостерігається негативний вплив коливань швидкості ротора АД частотно-регульованого приводу поршневих компресорів на їхню енергетичну ефективність (за високої швидкості ротора її коливання демпфуються значним запасом кінетичної енергії ротора). Зокрема, дослідження квазістатичного режиму роботи двигуна 4А63В2У3 одноциліндрового поршневого компресора за частоти живлення 15 Гц показали, що ККД знижується на 9,4% у порівнянні з режимом роботи із сталим еквівалентним навантаженням [1]. За частоти живлення 20 Гц це зниження складає 2,36%, а за частоти 40 Гц – тільки 0,16%. Крім того, коливання швидкості знижують як енергоефективність, так надійність компресорного агрегату. Тому питання забезпечення необхідного діапазону регулювання швидкості у разі регламентованого ступеня її пульсацій є вкрай важливим для герметичних поршневих компресорів [7, 8].

Підвищити енергетичну ефективність за малих швидкостях обертання двигунів поршневих компресорів можливо завдяки регулюванню амплітуди напруги живлення за визначеним за технологічними вимогами фіксованим значенням частоти живлення [9], що дає змогу покращити енергетичні характеристики системи. Для синтезу регулятора швидкості у цьому випадку було запропоновано метод компенсації сталої часу консервативної ланки за апроксимації суттєво нелінійного об'єкту, що являє собою електродвигун із внутрішнім нелінійним зворотним зв'язком (який формує момент навантаження та є причиною роботи в режимі автоколивань), лінійною

© Шуруб Ю.В., Попович О.М., Бібік О.В., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-2735-4613>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9238-5782>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-6236-6732>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

консервативною ланкою за допомогою використання гармонічної лінеаризації. Розроблена методика синтезу одноконтурної системи регулювання приводу поршневих компресорів [9] забезпечує оптимізацію коефіцієнту передачі регулятора швидкості за критерієм максимуму ККД, що дає змогу підвищити енергоефективність та, наприклад, за частоти 15 Гц на 4 % зменшити відхилення ККД для сталого та періодичного навантажень ($\Delta\eta$), а за частоти 20 Гц зменшити $\Delta\eta$ на 1%. Проте у запропонованій у [9] одноконтурній системі регулювання швидкості струм є несинусоїдним (усереднена величина THD на періоді повторюваності, наприклад, за основної частоти 20 Гц складає 17,3%), як втім і у нерегульованому приводі через нелінійний внутрішній зворотний зв'язок, що пов'язує момент опору та кут повороту ротора. Зменшити несинусоїдність, а відтак й збільшити ККД електроприводу, можливо шляхом застосування двоконтурної системи регулювання приводу поршневого компресора з додаванням внутрішнього контуру регулювання струму або електромагнітного моменту, чий період коливань за періодичного навантаження збігається з періодом коливань струму.

Звернемо увагу, що розроблена методика синтезу двоконтурної системи регулювання базується на припущенні, що на виході перетворювача частоти присутня тільки перша гармонічна складова напруги, а також, що існує засіб вимірювання або оцінювання електромагнітного моменту, давачевий, на основі давачів струму [10] або бездавачевий (на основі спостерегіачів моменту, наприклад, нейромережевих [11], або побудованих за допомогою фільтру Калмана [12]). Також зауважимо, що запропонована методика орієнтована на дво полюсні АД приводу однопоршневих компресорів.

Метою даної роботи є аналіз можливостей збільшення ККД частотно-регульованих асинхронних електроприводів одноциліндрових поршневих компресорів шляхом зменшення несинусоїдності струмів шляхом застосування двоконтурної системи регулювання (зовнішнього контуру – за швидкістю з регулятором швидкості та внутрішнього – за електромагнітним моментом з регулятором моменту) та синтез регуляторів внутрішнього та зовнішнього контурів даної системи з урахуванням періодичності навантаження, що нелінійно залежить від кутового переміщення ротора.

Матеріали досліджень. Дослідження проводилися на прикладі одноциліндрового компресору з частотно-регульованим електроприводом на базі асинхронного двигуна 4А63В2У3 потужністю 550 Вт за частоти живлення на виході перетворювача 20 Гц [1]. Суттєво нелінійні властивості об'єкта керування, обумовлені нелінійною залежністю моменту опору від кутового переміщення, не дають можливості безпосередньо застосовувати до регуляторів таких об'єктів аналітичні методи синтезу регуляторів лінійних систем, наприклад, [13–16]. Одним з варіантів синтезу регулятора швидкості такого об'єкта є апроксимація суттєво нелінійного об'єкта, що працює в режимі автоколивань, лінійною консервативною ланкою, базуючися на положеннях методу гармонічної лінеаризації [17], та застосування для синтезу регулятора у цьому випадку методу компенсації сталої часу консервативної ланки [18]. За такого підходу було визначено передатну функцію регулятора швидкості [9]

$$W_{\text{рег}}(s) = K_{\text{рег}}(T_{\text{рег}}^2 s^2 + 1), \quad (1)$$

де $T_{\text{рег}} = 0,06$, $K_{\text{рег}} = 41$ – параметри регулятора, визначені за критерієм максимуму ККД [9] за частоти живлення 20 Гц.

Задля компенсації коливань амплітуди струму статора, що призводять до збільшення його несинусоїдності та відповідного збільшення втрат, досліджено можливість застосовувати внутрішній контур регулювання струму (оскільки на робочій ділянці механічної характеристики можна вважати, що залежність амплітуди струму статора від електромагнітного моменту близька до лінійної [19] та вони змінюються у часі в динамічних режимах роботи за подібними динамічними законами) замість контуру регулювання моменту, як в класичних системах підпорядкованого керування [20].

Структурну схему двоконтурної системи регулювання наведено на рис. 1.

На цій схемі:

$$\beta = \frac{2M_{\kappa}}{\omega_{\text{ном}} s_{\kappa}} = \frac{2 \cdot 4,42}{314 \cdot 0,545} = 0,0517 \quad - \quad \text{жорсткість лінеаризованої ділянки природної механічної}$$

$$\text{характеристики АД; } T_e = \frac{1}{\omega_{\text{номел}} s_{\kappa}} = \frac{1}{314 \cdot 0,545} = 0,0058 \quad - \quad \text{електромагнітна стала часу;}$$

$$T_{\text{м}} = \frac{J}{\beta} = \frac{0,00135}{0,05168} = 0,0261 \quad - \quad \text{електромеханічна стала часу; } M_{\kappa} = 4,42 \text{ Нм} \quad - \quad \text{критичний момент АД;}$$

$s_k = 0,545$ – критичне ковзання АД; $J = 0,00135 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – зведений до валу ротора момент інерції;

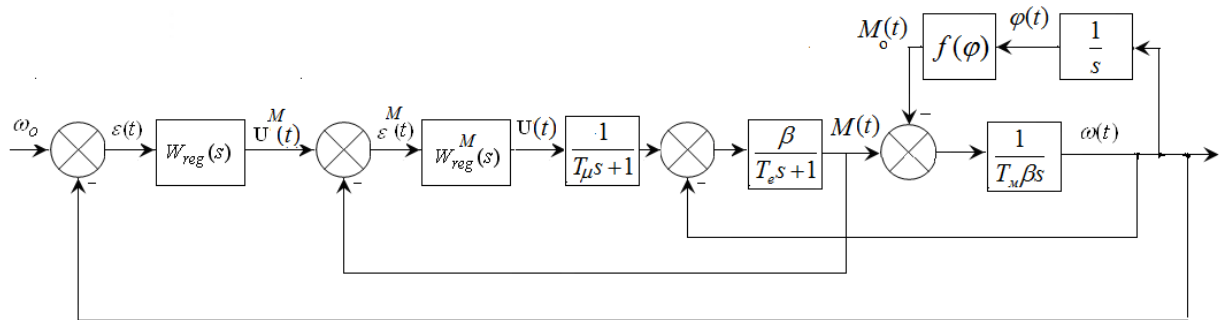


Рис. 1

$T_\mu = 0,001 \text{ с}$ – некомпенсована стала часу контуру регулювання моменту, що враховує швидкодію перетворювача частоти; $f(\varphi)$ – суттєво нелінійна ланка, що пов'язує момент опору та кутове переміщення двигуна φ (рис. 2); $1/s$ – інтегруюча ланка, що пов'язує кутове переміщення ротора двигуна та його швидкість обертання; $\omega_{\text{номел}}$, $\omega_{\text{ном}}$ – номінальні значення кутової частоти живлення АД та кутової швидкості холостого ходу АД відповідно (для двополосного АД $\omega_{\text{номел}} = \omega_{\text{ном}} = 314 \text{ рад/с}$).

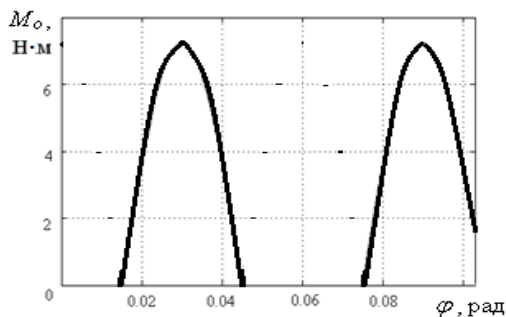


Рис. 2

електромагнітний момент двигуна; $M_0(t)$ – момент опору; $\varphi(t)$ – кутове переміщення ротора двигуна компресора.

Схема має два контури внутрішнього зворотного зв'язку: за кутом переміщення, що формує момент навантаження, та за швидкістю, що створює протиЕРС обертання. Та два контури регулювання: зовнішній за швидкістю з регулятором швидкості $W_{\text{рег}}(s)$, що має передатну функцію (1), отриману у [9], та внутрішній за електромагнітним моментом з регулятором моменту $W_{\text{рег}}^M(s)$, чию передатну функцію необхідно отримати.

При цьому для внутрішнього контуру регулювання моменту збурюючою дією буде внутрішній зворотний зв'язок за швидкістю обертання, обумовлений дією протиЕРС обертання. Сам контур регулювання моменту не містить нелінійних елементів, отже до нього можуть бути застосовані класичні методи синтезу регуляторів лінійних систем. Застосуємо метод налаштування на технічний оптимум. Згідно з цим методом у замкнутий контур вводиться астатизм за допомогою астатичних регуляторів (ПІ, ПІД-регуляторів) та компенсуються великі сталі часу інерційних ланок.

Оскільки внутрішній контур регулювання моменту містить тільки одну велику сталу часу T_e , то для цього контуру доцільно застосовувати пропорційно-інтегруючий (ПІ) регулятор [21] з передатною функцією

$$W_{\text{рег}}(s) = K_p + K_i / s, \quad (2)$$

де K_p , K_i – коефіцієнти передачі пропорційної та інтегруючої складових регулятора відповідно (параметри налаштування ПІ-регулятора).

Для синтезу регулятора контуру регулювання моменту розірвемо внутрішній зворотний зв'язок за швидкістю обертання та вважатимемо для внутрішнього контуру швидкість незалежною збурюючою дією $\omega = f(t)$. При цьому передатна функція незмінної частини системи подається у вигляді

$$W_{\text{нч}}(s) = \frac{K_{\text{роз}}}{(T_\mu s + 1)(T_e s + 1)}, \quad (3)$$

де $K_{\text{роз}}$ – коефіцієнт передачі розімкнутого контуру.

Для внутрішнього контуру $K_{\text{роз}} = \beta$.

Бажана передатна функція розімкненого контуру регулювання моменту у разі налаштування на технічний оптимум шукається у вигляді [18]

$$W_{\text{роз}}(s) = [2T_{\mu}s(T_{\mu}s + 1)]^{-1}. \quad (4)$$

Тоді, знаючи передатну функцію незмінної частини та тип регулятора, можна визначити потрібну передатну функцію регулятора та його параметри налаштування за формулою

$$W_{\text{рег}}^M(s) = W_{\text{роз}}(s) / W_{\text{нч}}(s). \quad (5)$$

З (3) – (5) отримаємо передатну функцію регулятора контуру електромагнітного моменту

$$W_{\text{рег}}^M(s) = \frac{T_e s + 1}{\beta 2T_{\mu} s} = \frac{T_e s}{\beta 2T_{\mu} s} + \frac{1}{\beta 2T_{\mu} s}. \quad (6)$$

Параметри налаштування ПІ-регулятора

$$K_p = \frac{T_e}{\beta 2T_{\mu}} = \frac{0,0058}{0,05168 \cdot 2 \cdot 0,001} = 56,11, \quad (7)$$

$$K_i = \frac{1}{\beta 2T_{\mu}} = \frac{1}{0,05168 \cdot 2 \cdot 0,001} = 9674,9. \quad (8)$$

На рис. 3 наведено часові залежності струмів статора АД у нерегульованому режимі (рис. 3, а) за одноконтурної системи з регулятором швидкості, оптимальним за критерієм максимуму ККД [9] (рис. 3, б), та двоконтурній системі (рис. 3, в), схему якої наведено на рис. 1, отримані засобами системи МАТЛАБ за допомогою математичної моделі приводу компресора [1], яка доповнена моделями регуляторів (1) та (6).

Аналіз досліджень роботи одноконтурної та двоконтурної систем керування АД одноциліндрового поршневого компресора виконано шляхом співставлення результатів розрахунків відхилення ККД квазістатичного режиму з періодичним навантаженням від ККД режиму із постійним еквівалентним моментом опору на валу АД.

При цьому слід зазначити, що ККД η та коефіцієнт потужності α за пульсуючого характеру навантаження слід визначати за період повторюваності T_r [22]. У цьому випадку діючий струм I_{1q} , корисна потужність P_{2q} , швидкість обертання ω_{rq} обчислюються відповідно до наступних виразів:

$$I_{1q} = \sqrt{\frac{1}{mT_r} \sum_{k=1}^m \int_t^{t+T_r} i_k^2(t) dt}; \quad P_{2q} = \frac{1}{T_r} \int_t^{t+T_r} \omega_r(t) \cdot T_2(t) dt; \quad \omega_{rq} = \frac{1}{T_r} \int_t^{t+T_r} \omega_r(t) dt, \quad (9)$$

де m, i_k – кількість фаз та струм k -ї фази системи енергопостачання двигуна.

За наявності інформації про величини фазних напруг двигуна u_k споживана потужність у квазістатичному режимі визначається виразом

$$P_{1q} = \frac{1}{T_r} \int_t^{t+T_r} \sum_{k=1}^m (u_k(t) \cdot i_k(t)) dt. \quad (10)$$

ККД η визначається співвідношенням потужностей на виході та вході двигуна, а коефіцієнт потужності α , відповідно до теорії Фрізе, визначається співвідношенням мінімального можливого струму лінії (здатного передати цю активну потужність за даної напруги) і поточного струму

$$\eta = \frac{P_{2q}}{P_{1q}}; \quad \alpha = \frac{P_{1q}}{3U_f I_{1q}}, \quad (11)$$

де U_f – величина фазної напруги мережі за умови її симетрії. За даного припущення цей вираз коефіцієнта потужності справедливий за будь-якої несиметрії та несинусоїдності процесів.

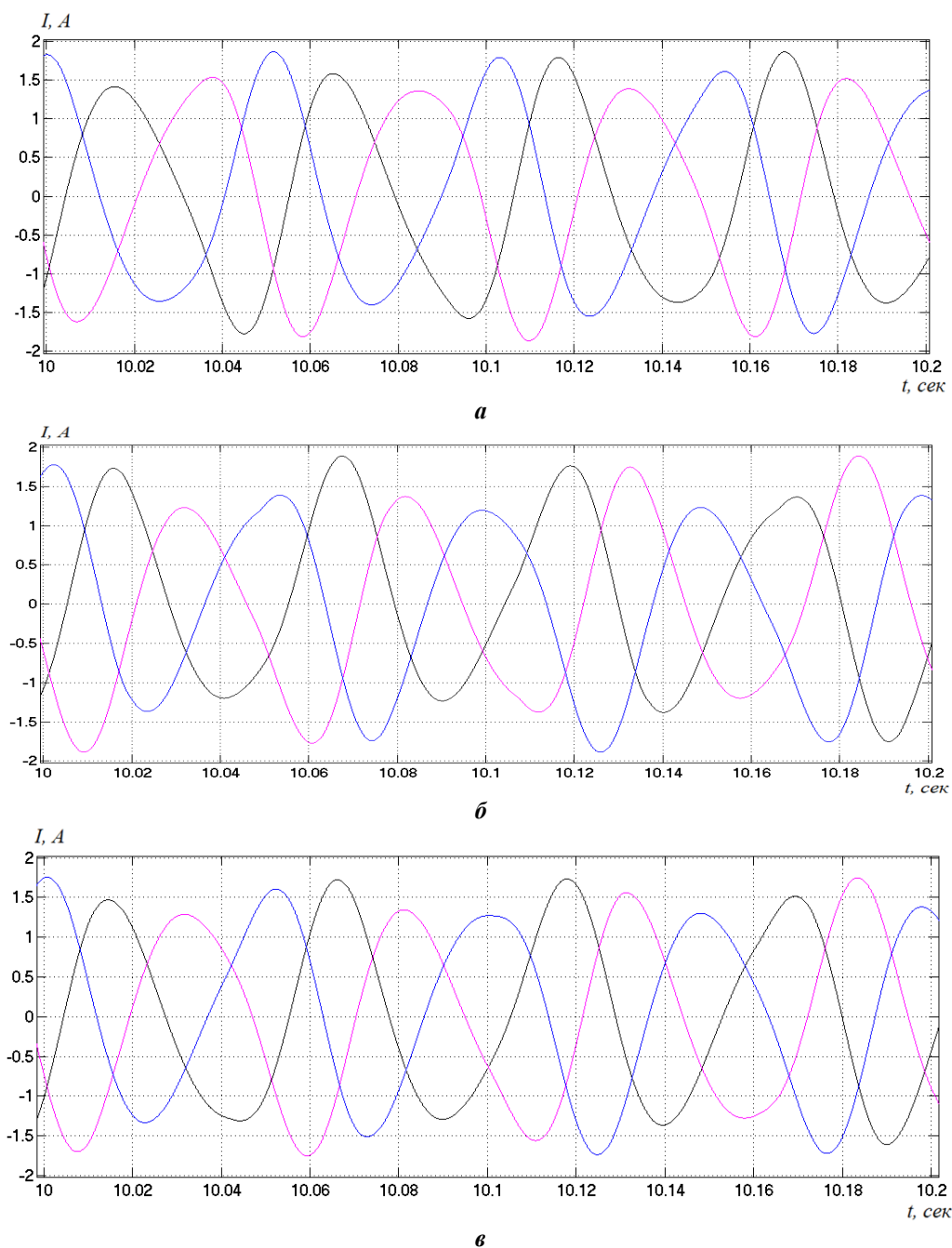


Рис. 3

Моделювання роботи приводу компресора [1] із двоконтурною системою регулювання, яку наведено на рис. 1, за отриманих параметрах ПІ-регулятора внутрішнього контуру моменту (7), (8) та регуляторі (1) зовнішнього контуру регулювання швидкості показало, що за частоти живлення двигуна 20 Гц у разі використання ПІ-регулятора внутрішнього контуру ККД склав 57,9 %, що на 1,5 % більше, ніж ККД у разі нерегульованого приводу (56,4 %) та на 0,5 % більше, ніж за одноконтурної системи регулювання швидкості (57,4 %). Максимально можливий ККД у нерегульованому приводі даного компресора за частоти живлення 20 Гц та моменті інерції $J \rightarrow \infty$ складає 58,8 %. Тобто, завдяки застосуванню двоконтурної системи регулювання електроприводу вдалося підвищити ККД: порівняно з нерегульованим приводом на 1,5 %; з одноконтурною системою регулювання – на 0,5 % (зниження ККД за періодичного навантаження, відносно сталого – $\Delta\eta$ становить: -2,4 % за нерегульованого приводу; -1,4 % за одноконтурної системи регулювання; -0,9 % за двоконтурній).

При цьому синусоїдність струму у двоконтурній системі краща, ніж у одноконтурній, та є співмірною з синусоїдністю струму у нерегульованому приводі. З рис. 3 видно, що розкиди максимальних та мінімальних значень амплітуд струмів складають 0,4 А у двоконтурній системі, 0,64 А – у одноконтурній та 0,43 А – у нерегульованому приводі. Усереднена величина THD на періоді повторюваності електромагнітного моменту за частоти на виході перетворювача 20 Гц дорівнює 11,5 % у двоконтурній системі, 17,3 % – у одноконтурній системі та 11,9 % – у нерегульованому приводі.

Також було визначено величини коефіцієнта потужності згідно з методикою, що одночасно враховує несинусоїдність і несиметрію [23]. Коефіцієнт потужності за нерегульованого приводу та частоти живлення 20 Гц становить 0,753, у разі використання одноконтурної системи регулювання швидкості – 0,815, а двоконтурної системи регулювання – 0,828 за рахунок зменшення несинусоїдності струмів статора. Покращення коефіцієнту потужності (11) регульованого приводу порівняно з нерегульованим пояснюється алгоритмом зміни напруги, що визначається регулятором зовнішнього контура (1). Підвищення коефіцієнту потужності двоконтурної системи порівняно з одноконтурною пов'язане із зменшенням несинусоїдності струмів статора, яке відбулося внаслідок роботи запропонованої системи регулювання із зворотним зв'язком за електромагнітним моментом.

Використання двоконтурної системи регулювання також дає змогу зменшити амплітуду коливань електромагнітного моменту. На рис. 4 наведено криві зміни у часі електромагнітного моменту нерегульованого приводу (рис. 4, а), приводу з одноконтурною системою регулювання (рис. 4, б) та приводу з двоконтурною системою регулювання (рис. 4, в), з яких видно зменшення амплітуди коливань електромагнітного моменту з 1,2 Нм у нерегульованому приводі та 0,95 Нм у приводу з одноконтурною системою до 0,8 Нм – у приводі з двоконтурною системою.

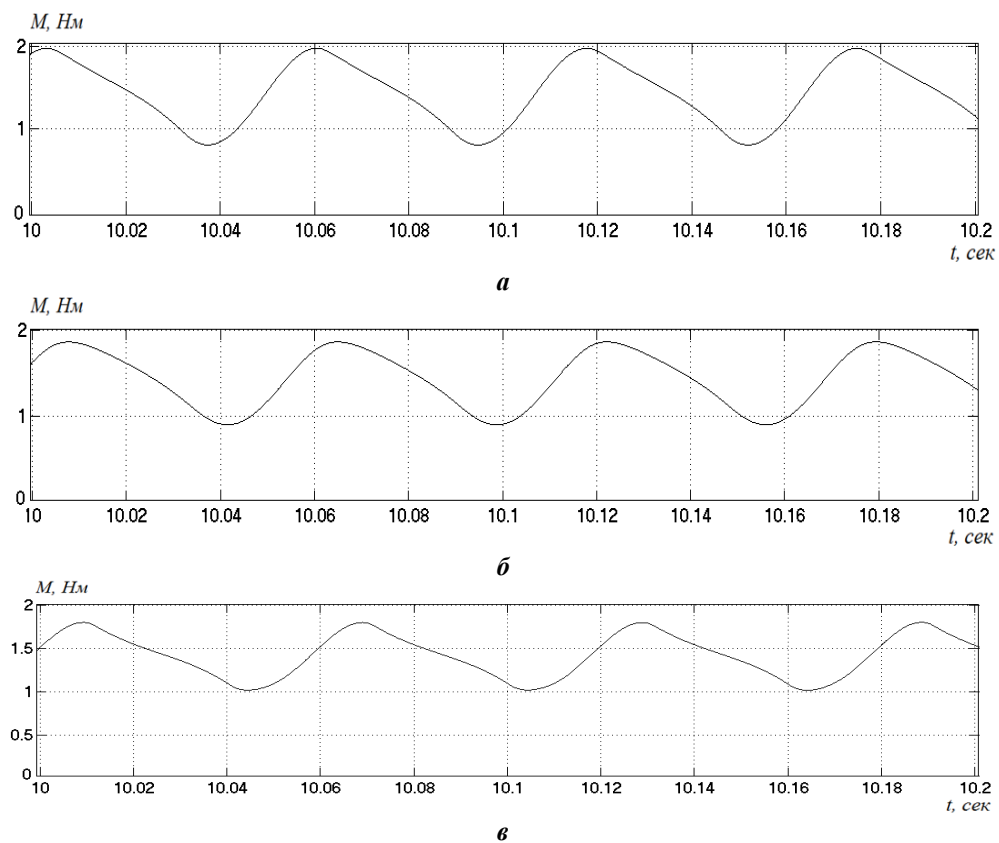


Рис. 4

Дослідження одноконтурної системи регулювання асинхронного електроприводу однопоршневого компресора з пропорційно-диференціальним регулятором швидкості, оптимізованим за критерієм максимуму ККД [9], показало, що на частотах живлення, близьких до номінальних, ефект зменшення різниці ККД асинхронного двигуна для сталого та періодичного навантажень компресора за рахунок застосування регулятора не спостерігається, тоді як у разі зниження частоти живлення цей

ефект збільшується. У таблиці наведено значення ККД з періодичним навантаженням та їхнє відхилення $\Delta\eta$ у порівнянні зі сталим навантаженням у режимах роботи електроприводу однопоршневого компресора ($J=0,00135 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$) за трьох значень частоти живлення для нерегульованого приводу та регульованого за одноконтурної та двоконтурної систем регулювання. У другому стовпчику надані максимально можливі значення ККД за даних частот при моменті інерції $J \rightarrow \infty$, що відповідає режиму сталого навантаження. Також у таблиці наведено середні значення швидкості обертання $\omega_{\text{ср}}$ та діапазони зміни швидкості $\Delta\omega$ нерегульованого та регульованих приводів.

f, Гц	ККД за сталого навантаження ($J \rightarrow \infty$)	ККД, %			$\Delta\eta$, %			$\omega_{\text{ср}}$, рад/с	$\Delta\omega$, рад/с		
		Нерегульований привод	Регульований привод		Нерегульований привод	Регульований привод			Нерегульований привод	Регульований привод	
			Одно-контурний	Дво-контурний		Одно-контурний	Дво-контурний			Одно-контурний	Дво-контурний
30	67,1	66,6	66,9	67,0	-0,5%	-0,2%	-0,1%	173	12	10	10
20	58,8	56,4	57,4	57,9	-2,4%	-1,4%	-0,9%	109	34	23	23
15	51,0	41,6	45,6	47,5	-9,4%	-5,4%	-3,5%	75	50	30	29

З таблиці видно, що найбільший ефект підвищення енергоефективності спостерігається за частоти 15 Гц як у випадку одноконтурної, так і у разі двоконтурної системи регулювання. Зокрема, застосування додаткового внутрішнього контуру регулювання моменту за цієї частоти дало змогу зменшити різницю ККД для сталого та періодичного навантажень з -9,4% у нерегульованому приводі та -5,4% – у регульованому за одноконтурною схемою приводі до -3,5%, тобто у 2,69 разів порівняно з нерегульованим приводом та у 1,54 рази порівняно з регульованим за одноконтурною системою приводом.

Отримані в роботі, а також у [1, 9] результати обґрунтовують доцільність побудови систем регулювання компресорів холодильних агрегатів теплових насосів і холодильників з урахуванням розроблених заходів протидії негативному впливу пульсацій моменту навантаження АД. За наявності системи частотно регульованого приводу компресора, який підвищує енергетичну ефективність завдяки заміні дискретного регулювання плавним, значну частку робочого циклу може складати робота з малими швидкостями. При цьому мають прояв проблеми негативного впливу коливань швидкості, які за великих швидкостей нівелювалися великим запасом кінетичної енергії рухомих частин приводу. Розширення функцій наявної системи регулювання з урахуванням запропонованих заходів потребує розробки удосконалених алгоритмів регулювання, що враховують динамічні властивості об'єкта регулювання (наявність суттєво нелінійної залежності моменту опору від кута переміщення ротора), і не є витратним, а підвищення енергетичної ефективності системи, як показано у даній роботі, є суттєвим.

Висновки.

Розроблено двоконтурну систему регулювання частотно-керованих асинхронних електроприводів поршневих компресорів, що забезпечує регулювання амплітуди напруги живлення за визначеного за технологічними вимогами фіксованого значення частоти живлення, із статичним пропорційно-диференціюючим регулятором у зовнішньому контурі регулювання швидкості, що компенсує нелінійні властивості об'єкта керування, та астатичним пропорційно-інтегруючим регулятором у внутрішньому контурі регулювання моменту, що зменшує несинусоїдність струмів статора. Дане рішення дає змогу підвищити в порівнянні з використанням одноконтурної системи регулювання енергоефективність асинхронних електроприводів герметичних поршневих компресорів.

Аналіз результатів математичного моделювання на основі оцінювання розбіжності ККД асинхронних двигунів за періодичного навантаження і максимально можливого значення ККД за сталого навантаження дав можливість визначити зменшення несинусоїдності струмів та, відповідно, збільшення ККД частотно-регульованих асинхронних електроприводів одноциліндрових поршневих компресорів за рахунок застосування двоконтурної системи.

Чисельні дослідження квазіусталених режимів частотно-регульованого асинхронного електроприводу одноциліндрового герметичного поршневого компресора на прикладі трифазного

асинхронного двигуна 4A63B2УЗ потужністю 550 Вт показали, що застосування двоконтурної системи регулювання дає змогу підвищити енергофактивність електроприводу за малих швидкостей обертання. Зокрема, за частоти живлення 15 Гц: у 2,69 разів зменшити ККД за періодичного навантаження відносно сталого порівняно з нерегульованим приводом, та збільшити ККД на 1,9% порівняно з регульованим за одноконтурною системою за рахунок покращення синусоїдності струмів статора завдяки дії регулятора внутрішнього контуру регулювання моменту (який сформовано за умови оптимізації зовнішнього контуру регулювання швидкості за критерієм максимуму ККД). Також застосування додаткового внутрішнього контуру регулювання моменту дає змогу зменшити THD струмів статора, амплітуду коливань електромагнітного моменту, збільшити коефіцієнт потужності порівняно як з нерегульованим, так і з регульованим за одноконтурною системою приводами.

1. Bibik O.V., Golovan I.V., Popovych O.M., Shurub Yu.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 1. С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.033>.
2. Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators. *International Appliance Manufacturing*. 1998. Vol. 1. No 2. Pp. 105–109.
3. Binneberg P., Kraus E., Quack H. Reduction In Power Consumption Of Household Refrigerators By Using Variable Speed Compressors. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, USA. 2002. Pp. 1–9. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/615> (дата доступу 15.05.2025).
4. Monasry J.F., Hirayama T., Aoki T., Shida S., Hatayama M., Okada M. Development of large capacity and high efficiency rotary compressor. *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. USA. 2018. Pp. 1–10. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2576> (дата доступу 15.05.2025).
5. 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. *Springer*. 2019. Vol. 1. Pp. 489–501. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_34.
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. No 9 (2). Article no 207. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9020207>.
7. Букарос А.Ю., Ромчук Н.О., Букарос В.Н. Адаптивна система управління електроприводом компресора. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. Вип. 4. № 6. С. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.20/2015.36965>.
8. Бібік О.В. Розвиток теорії та розроблення засобів підвищення енергоефективності вентиляно-індукторних і асинхронних двигунів із змінним навантаженням: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01. Ін-тут електродинаміки НАН України, Київ, 2020. 40 с.
9. Шуруб Ю.В., Попович О.М., Бібік О.В. Підвищення енергетичної ефективності регульованого електроприводу одноциліндрового поршневого компресора. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 4. С. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.063>.
10. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974. 328 с.
11. Pechenik M., Kiselychuk O., Buryan S., Petukhova D. Sensorless control of water supply pump based on neural network estimation. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2011. No 3 (79). Pp. 462–466.
12. Kiselychuk O.I., Bodson M. Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter. *Russian Electrical Engineering*. 2011. Vol. 82. No 2. Pp. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371211020088>.
13. Jakovljević B.B., Rapaić M.R., Jelčić Z.D., Šekara T.B. Optimization of fractional PID controller by maximization of the criterion that combines the integral gain and closed-loop system bandwidth. 2014 18th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, October 17–19, 2014. Pp. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2014.6982392>.
14. Åström K.J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*. 2004. Vol. 14. Pp. 635–650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procont.2004.01.002>.
15. Romasevych Y., Loveikin V., Dudnyk A., Loveikin Y. Optimal constrained PI-controllers tuning for real-world plants. IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 05–10 October 2020. Pp. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250108>.
16. Luo X., Ma R., Li G., Zhao D. Parameter Optimization of Multi-mode Vibration Control System. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Zhangjiajie, China, 11–12 April 2009. Vol. 1. Pp. 685–688. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2009.15>.
17. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. К.: Либідь, 2007. 656 с.
18. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

19. Вольдек А.И. Электрические машины. М.: Энергия, 1966. 782 с.
20. Leonard W. Control of electric drives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. 460 p.
21. Shurub Yu., Dudnyk A. Synthesis of the Digital Controllers of the Electric Drives as Actuators of Utility Technological Control Systems. Proc. 6th International Conference on *Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS)*, Kyiv, Ukraine, April 17-19, 2019. Pp. 319–323. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764186>.
22. Bibik O.V., Popovich O.M. Increasing the efficiency of electric drives with periodical loading by using comprehensive mathematical modeling means. Priority areas for development of scientific research: domestic and foreign experience: collective monograph. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2021. 260 p. Pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-049-0-31>.
23. Попович О.М. Визначення та дослідження коефіцієнту потужності електромеханотронних систем з асинхронними двигунами. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 111–113.

DOUBLE-LOOP CONTROL SYSTEM OF INDUCTION ELECTRIC DRIVE OF SINGLE-CYLINDER PISTON COMPRESSOR

Yu.V. Shurub, O.M. Popovych, O.V. Bibik
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: vyshur@ukr.net.

A double-loop system of adjustable electric drives for single-cylinder piston compressors has been developed with a static proportional-differentiating regulator in the external speed control loop and an astatic proportional-integrating regulator in the internal torque control loop, taking into account the nonlinear dependence between the engine load moment and the angular displacement of its rotor. The method of tuning to the technical optimum was used to synthesize the internal torque loop regulator of an asynchronous motor at a fixed supply frequency. The example of mathematical modeling of the operating modes of an adjustable electric drive for a single-cylinder piston compressor based on the 4A63B2V3 induction motor shows that the use of a double-loop system allows for increasing the energy efficiency of the drive, improving THD and power factor, and reducing the amplitude of electromagnetic torque fluctuations compared to both unregulated and regulated drives using a single-loop system. References 23, figures 4, table 1.

Key words: piston compressor, induction electric drive, periodic load, nonlinear link, PI controller.

1. Bibik O.V., Golovan I.V., Popovych O.M., Shurub Yu.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.033>.
2. Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators. *International Appliance Manufacturing*. 1998. Vol. 1. No 2. Pp. 105–109.
3. Binneberg P., Kraus E., Quack H. Reduction In Power Consumption Of Household Refrigerators By Using Variable Speed Compressors. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, USA. 2002. Pp. 1–9. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/615> (accessed at 15.05.2025).
4. Monasry J.F., Hirayama T., Aoki T., Shida S., Hatayama M., Okada M. Development of large capacity and high efficiency rotary compressor. *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. USA. 2018. Pp. 1-10. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icecc/2576> (accessed at 15.05.2025).
5. 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. Springer. 2019. Vol. 1. Pp. 489–501. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_34.
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. No 9 (2). Article no 207. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9020207>.
7. Bukaros A.Yu., Romchuk N.O., Bukaros V.N. Adaptive compressor electric drive control system. *Avtomatyzatsiia tekhnologichnyh i biznes-protsesiv*. 2014. Vyp. 4. No 6. Pp. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.20/2015.36965>. (Rus)
8. Bibik O.V. The development of theory and measures of improve the energy efficiency of switched reluctance and induction motors with variable load: thesis for a doctor of technical sciences degree in specialty 05.09.01. Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2020. 40 p. (Ukr)

9. Shurub Y.V., Popovych O.M., Bibik O.V. Increase of power efficiency of the single-cylinder piston compressor regulated electric drive. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 4. Pp. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.063>. (Ukr)
10. Sandler A.S., Sarbatov R.S. Automatic frequency control of induction motors. Moskva: Energiia, 1974. 328 p. (Rus)
11. Pechenik M., Kiselychnyk O., Buryan S., Petukhova D. Sensorless control of water supply pump based on neural network estimation. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2011. No 3 (79). Pp.462–466.
12. Kiselychnyk O.I., Bodson M. Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter. *Russian Electrical Engineering*. 2011. Vol. 82. No 2. Pp. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371211020088>.
13. Jakovljević B.B., Rapaić M.R., Jelčić Z.D., Šekara T.B. Optimization of fractional PID controller by maximization of the criterion that combines the integral gain and closed-loop system bandwidth. 2014 18th International Conference on *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, Romania, October 17–19, 2014. Pp. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2014.6982392>.
14. Åström K.J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*. 2004. Vol. 14. Pp. 635–650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.01.002>.
15. Romasevych Y., Loveikin V., Dudnyk A., Loveikin Y. Optimal constrained PI-controllers tuning for real-world plants. IEEE KhPI Week on *Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 05–10 October 2020. Pp. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250108>.
16. Luo X., Ma R., Li G., Zhao D. Parameter Optimization of Multi-mode Vibration Control System. International Conference on *Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Zhangjiajie, China, 11–12 April 2009. Vol. 1. Pp. 685–688. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2009.15>.
17. Popovych M.G., Kovalchuk O.V. *Theory of automatic control*. Kyiv: Lybid, 2007. 656 p. (Ukr)
18. Kliuchev V.I. Theory of electric drive: textbook for universities. Moskva: Energoatomizdat, 2001. 704 p. (Rus)
19. Voldek A.I. Electric machines. Moskva: Energiia, 1966. 782 p. (Rus)
20. Leonard W. Control of electric drives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. 460 p.
21. Shurub Yu., Dudnyk A. Synthesis of the Digital Controllers of the Electric Drives as Actuators of Utility Technological Control Systems. Proc. 6th International Conference on *Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS)*, Kyiv, Ukraine, April 17–19, 2019. Pp. 319–323. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764186>.
22. Bibik O.V., Popovich O.M. Increasing the efficiency of electric drives with periodical loading by using comprehensive mathematical modeling means. Priority areas for development of scientific research: domestic and foreign experience: collective monograph. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2021. 260 p. Pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-049-0-31>.
23. Popovych O.M. Determination and study of the power factor of electromechatronic systems with asynchronous motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 4. Pp. 111–113. (Ukr)

Надійшла 11.06.2025
Остаточний варіант 04.08.2025