

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЬОВАНОГО 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.

Розглянуто особливості роботи замкнених систем регульованих електроприводів одноциліндрових поршневих компресорів, обумовлені наявністю нелінійної залежності між моментом навантаження двигуна та кутовим переміщенням його ротору. Запропоновано методику синтезу регулятора амплітуди напруги живлення асинхронного двигуна такого електроприводу за фіксованого значення частоти живлення. За результатами досліджень встановлено, що ефект збільшення енергоефективності (зменшення різниці ККД для сталого та періодичного навантажень) за рахунок застосування регулятора напруги збільшується у разі зниження частоти живлення. Показано, що оптимізацію коефіцієнту передачі регулятора напруги електроприводів з нелінійною залежністю між моментом навантаження двигуна та кутовим переміщенням доцільно проводити за критерієм максимуму ККД. Бібл. 25, рис. 10, табл.1.

Ключові слова: поршневий компресор, асинхронний електропривод, регулятор напруги, періодичне навантаження, нелінійна ланка.

Вступ. Поршневі компресори (ПК) з електричним приводом знаходять широке застосування у промисловості, сільському господарстві, енергетиці, зокрема як джерела напору у системі циркуляції холодоагенту холодильників та теплових насосів. У побуті використовуються (до 90 %) герметичні одноциліндрові поршневі компресори (ГПК), де потужність двигунів невисока (до 500 Вт) порівняно з електродвигунами промислових ПК. Однак агрегати ГПК традиційно споживають великі обсяги енергії завдяки наявності холодильників практично у кожній оселі. Останнім часом енергетичні ресурси, які споживаються поршневими компресорами, збільшуються внаслідок тенденції активного використання джерел низькопотенційної теплової енергії за допомогою теплових насосів.

Великі обсяги споживання енергії електроприводами ПК визначають актуальність розробки та впровадження заходів підвищення їхньої енергетичної ефективності. Зокрема, застосування електроприводу з плавним регулюванням швидкості на заміну дискретного регулювання знижує споживання енергії до 40% [1–3]. Робота таких регульованих приводів характеризується значним діапазоном регулювання частоти обертання і значною часткою низьких швидкостей. Останнє притаманне режимам малих потужностей теплопереносу, що має місце за тривалого зберігання продуктів у холодильниках або у разі роботи теплових насосів без пікових навантажень.

Режими роботи електроприводу поршневих компресорів мають специфічні особливості, неврахування яких може призводити до зниження енергетичної ефективності до 10 ... 15%. Причина полягає у зміні моменту навантаження на валу двигуна та сумарного моменту інерції компресора внаслідок залежності у ПК величини сил опору від кута повороту вала, що може призводити до значних коливань швидкості обертання ротора [4, 5]. Даний негативний вплив нівелюється за близьких до номінальної частот живлення завдяки особливостям вибору конструктивних параметрів асинхронного електроприводу (зокрема традиційно величини моменту інерції) під час проектування. З даною метою задля підвищення ефективності режимів роботи поршневих компресорів у роботі [6] обґрунтовано використання критерію оцінки інтенсивних квазісталіх режимів асинхронних двигунів (АД), який розраховується як відношення електромеханічної сталої двигунів до електромагнітної сталої. Завдяки узгодженню величин числа пар полюсів, критичного моменту АД, ковзання і

© Шуруб Ю.В., Попович О.М., Бібік О.В., 2024

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

*** <https://www.orcid.org/0000-0002-2735-4613>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



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

сумарного моменту інерції приводу можна забезпечити мінімізацію коливань швидкості роботи нерегульованих АД.

У випадку регульованих АД (з перетворювачем частоти) за зниження швидкості пропорційно її квадрату знижується кінетична енергія, збільшується діапазон коливань швидкості та зростають вказані негативні наслідки [6]. Тобто, енергетична ефективність регульованого електроприводу компресорів може значно погіршуватися, якщо не застосовувати додаткові технічні заходи. Подібними нелінійними періодичними режимами роботи характеризується ще ряд електромеханічних систем, наприклад, електроприводи верстатів-гойдалок, кривошипних пресів, штангових нафтовидобувних установок [7, 8]. Циклічний характер навантаження асинхронних двигунів електроприводів таких механізмів, обумовлений за квазіусталених режимів роботи [9] залежністю моменту навантаження від кута повороту, призводить до недовикористання їхньої встановленої потужності та вимагає удосконалення систем керування задля підвищення ефективності експлуатації вказаних електромеханічних систем.

Регулювання швидкості асинхронних двигунів електроприводів поршневих компресорів здійснюється за зовнішніми до цієї системи технологічними чинниками. Із зміною швидкості змінюється потужність теплопереносу системою циркуляції холодоагенту, що є засобом регулювання температури у робочому просторі холодильної машини. Системи векторного або скалярного регулювання швидкості із використанням перетворювачів частоти, які побудовано за загальними принципами, керуються за відхиленням температури від заданого рівня, забезпечують потрібну зміну швидкості у динамічних режимах та її стабілізацію в усталених режимах. В роботі [10] обґрунтовано вибір скалярного принципу керування трифазним асинхронним електродвигуном одноциліндрового холодильного компресора та введено в структурну схему корекцію для бездатчикового визначення швидкості обертання та моменту опору. Але енергетична ефективність регульованого приводу у випадку систем, що розглядаються, залежить від вказаних вище особливостей їхньої роботи.

Одним із засобів отримання максимальної ефективності системи є комплексне проектування [6, 11], що забезпечує визначення оптимальних значень конструктивних і режимних параметрів об'єкту проектування за комплексним критерієм ефективності завдяки врахування взаємного впливу складових системи. У випадку регульованого електроприводу поршневого компресора досягнення максимуму енергетичної ефективності потребує визначення структури та параметрів регулятора із врахуванням особливостей процесів у разі зміни моменту у функції кута повороту ротора. Дані особливості впливають на можливість застосування поширених методів визначення структури та параметрів регуляторів на випадок об'єкту із кореляцією періодів зміни керуемого параметру (напруга живлення) і збурення (момент навантаження).

У загальному випадку електроприводів із змінним моментом навантаження, що не залежить від координат електроприводу, підвищити ефективність їхньої роботи можливо за рахунок створення *замкнених систем* із оптимальними за статичними [12, 13] та динамічними [14, 15] показниками якості регуляторами. Це дає можливість збільшити цикловий ККД таких асинхронних електроприводів до 5-7% [16]. Проте особливістю поршневого компресора є суттєво нелінійна залежність моменту навантаження двигуна від кута повороту ротора. У таких системах можуть бути застосовані *векторний та скалярний методи керування*.

Переваги векторного методу досягаються за рахунок розв'язки процесів керування моментом і модулем вектора потокозчеплення [17, 18]. У разі живлення від джерела напруги за динамічних навантажень з'являється електромагнітний зв'язок між контурами регулювання моменту та потокозчеплення на відміну від живлення від джерела струму завдяки наявності перехресних зв'язків між цими контурами. Періодичність змінного моменту навантаження призводить до вимушених коливань швидкості, що згідно з рівняннями динаміки АД у разі керування за вектором потокозчеплення ротора призведе до зміни модуля потокозчеплення, що у свою чергу призведе до зміни активної складової струму статора. Таким чином, зміна активної складової струму статора визначається не тільки зміною моменту навантаження, а й зміною модуля потокозчеплення внаслідок зміни швидкості, що не дає змоги проводити синтез енергозберігаючих алгоритмів регулювання амплітудою вектора потокозчеплення, що визначаються динамічними властивостями збурення (моменту навантаження) за відсутності інших збурень без застосування додаткових засобів стабілізації швидкості таких як релейне [15], інваріантне [16], робастне [18] керування.

Більш прості та дешеві системи скалярного керування базуються на наперед визначеному співвідношенні між напругою та частотою живлення. Таке співвідношення відповідає режиму

оптимізації енергоспоживання за сталого навантаження та може зменшити втрати енергії за змінних динамічних навантаженнях, що не залежать від вихідних координат електроприводу – кутових швидкості та переміщення. Момент навантаження АД компресора залежить від кута повороту вала, тобто від інтегралу регульованої величини – кутової швидкості двигуна. Кутова швидкість, у свою чергу, визначається частотою напруги живлення двигуна. У цьому випадку будь-яка зміна частоти живлення внаслідок процесів стабілізації швидкості призведе до зміни періоду кутової швидкості, а, відповідно, і до зміни параметрів об'єкту керування, для компенсації якої знову необхідно змінювати частоту живлення за невідомим наперед законом. Ця обставина позбавляє сенсу регулювання частоти засобами скалярного керування за змінного навантаження, яке залежить від кутового переміщення.

Відповідно до сказаного, для приводу компресора доцільно використовувати не класичний підхід до частотного керування, а фіксацію необхідного за технологічними вимогами до кутової швидкості обертання ротора двигуна значення частоти. При цьому задля мінімізації коливань кутової швидкості та збільшення енергоефективності для кожного фіксованого значення частоти напруги живлення система регулювання буде динамічно змінювати параметри живлення (наприклад, амплітуду напруги [19]) за визначеним для кожного значення частоти живлення алгоритмом регулювання. Звернемо увагу, що розроблена у даній статті методика орієнтована на двополюсні АД приводу однопоршневих ГПК (де має місце найбільша нерівномірність моменту навантаження із максимальною кореляцією його періоду зміни із періодом живлення) і базується на припущенні, що на виході перетворювача у сталому режимі присутня тільки перша гармонічна складова напруги.

Метою даної роботи є дослідження закономірностей взаємного впливу алгоритмів регулювання параметрів живлення та пульсацій моменту навантаження на енергетичну ефективність, розробка ефективних підходів до синтезу регуляторів та аналіз можливостей отримання енергозберігаючих режимів роботи асинхронних електроприводів з періодичним навантаженням, що залежить від кутового переміщення ротора виконавчого механізму, на прикладі електроприводу одноциліндрового поршневого компресора.

Матеріали досліджень. Дослідження у даній роботі проводилися на прикладі електроприводу одноциліндрового компресору з асинхронним двигуном 4А63В2У3 потужністю 550 Вт. Характерною особливістю приводу компресора є періодична зміна моменту опору M_o в залежності від кута повороту ротора φ , причому ця залежність $M_o=f(\varphi)$ є суттєво нелінійною [20] (рис. 1).

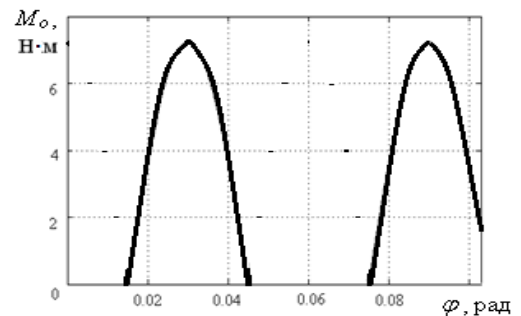


Рис. 1

Криві зміни у часі змінної складової моменту навантаження (крива 1), електромагнітного моменту (крива 2), його середнього значення (крива 3) (верхній графік) та кутової швидкості обертання (нижній графік) нерегульованого приводу компресора за частоти 20 Гц за заданого моменту інерції $J = 0,00135 \text{ Нм}^2$, отримані за допомогою моделі у системі імітаційного моделювання [6], показані на рис. 2.

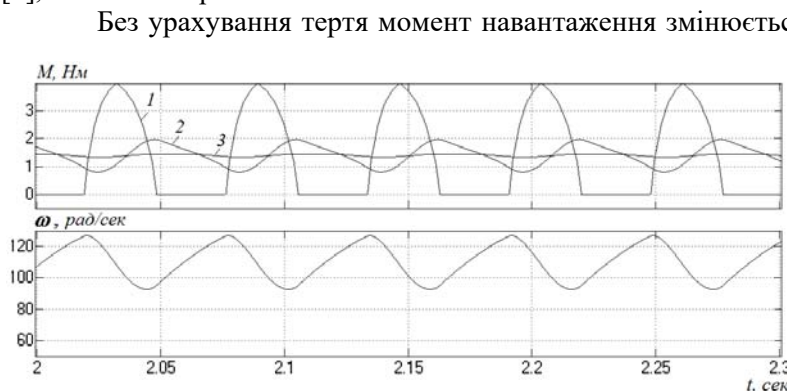


Рис. 2

Без урахування тертя момент навантаження змінюється в залежності від кута переміщення у діапазоні від 0 Нм до 4 Нм. Нерегульований режим роботи характеризується коливаннями швидкості у межах від 93 рад/с до 127 рад/с. Діапазон зміни швидкості складає 34 рад/с.

На рис. 3 наведено також фрагмент часової залежності зміни фазних струмів електродвигуна у нерегульованому режимі за тієї ж частоти живлення. Відзначимо, що часові залежності зміни струмів статора не відповідають

синусоїдним симетричним процесам: має місце спотворення форми у межах періоду основної частоти і коливання максимуму із періодом субгармонійної частоти. У такому квазісталому режимі величина параметрів робочого режиму оцінюється на періоді повторюваності, який суттєво більший за період зміни струмів внаслідок накладання процесів коливань швидкості, струмів і потужностей. Інтегральна величина струмів фаз на періоді повторюваності однакова. Внаслідок цього показники робочого режиму визначаються інтегруванням диференціальних рівнянь електричної та механічної рівноваги до усталеного значення на періоді повторюваності, а ККД – за кінцевою корисною дією як відношення інтегралів механічної та електричної потужностей на періоді повторюваності [6]. Такий підхід забезпечує дослідження в умовах несинусоїдного режиму за наявності субгармонік з частотами, що є нижчими за частоти живлення, які ускладнюють кількісну оцінку традиційними засобами, наприклад, THD (*Total Harmonic Distortion*).

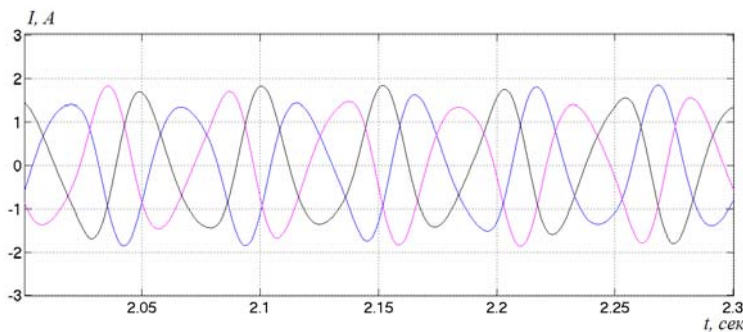


Рис. 3

напруги для фіксованого значення частоти живлення. Структурну схему замкнутої системи регулювання швидкості приводу компресора наведено на рис. 4.

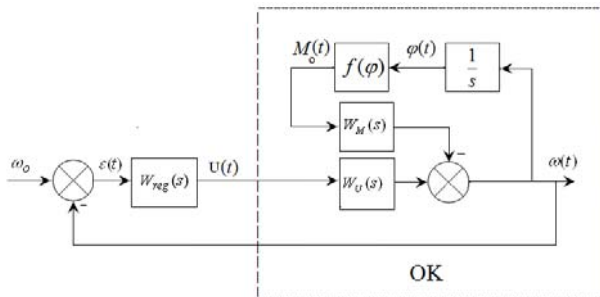


Рис. 4

Відзначимо, що за принципом роботи компресора вихідна величина – швидкість обертання $\omega(t)$ – знаходиться у режимі автоколивань, амплітуда та частота яких залежать від частоти напруги живлення та обумовлені нелінійною залежністю $M_o=f(\varphi)$ моменту опору M_o від кута повороту ротора φ , що створює внутрішній нелінійний зворотний зв'язок у об'єкті керування (ОК) (рис. 4). При цьому замикання системи зовнішнім зворотним зв'язком за швидкістю (початок роботи системи регулювання) може викликати додаткові субгармонічні автоколивання з частотою, що залежить від структури та параметрів системи, а не від частоти напруги живлення. Тому для їхнього уникнення слід застосовувати статичний регулятор швидкості, що не містить інтегруючих ланок [20].

До об'єкту керування системи регулювання швидкості на рис. 4 відносяться передатна функція АД за керуванням та нелінійний контур внутрішнього зворотного зв'язку. Таким чином, об'єкт керування є суттєво нелінійним та до нього не можуть бути безпосередньо застосовані аналітичні методи синтезу регуляторів лінійних систем [21–23]. Але для кожної частоти живлення, базуючись на положеннях методу гармонічної лінеаризації [24], можемо апроксимувати об'єкт лінійною ланкою, параметри якої визначаються частотою автоколивань регульованої величини (кутової швидкості двигуна).

Оскільки завдяки нелінійним властивостям внутрішнього зворотного зв'язку кутова швидкість знаходиться у режимі автоколивань, об'єкту у такому режимі буде відповідати лінійна коливальна ланка другого порядку з передатною функцією

При цьому ККД двигуна за частоти 20 Гц у нерегульованому режимі складає 0,564. Тоді як ККД двигуна за тій ж частоти у разі сталого навантаження, що дорівнює середньому значенню моменту навантаження (1,406 Нм), складає 0,588. Тобто різниця ККД для сталого та періодичного навантажень складає 2,4 %. Зменшити цю різницю спробуємо за рахунок створення замкнутої за швидкістю системи з відповідним регулятором

На рис. 4 позначено: $W_U(s)$ – передатна функція лінеаризованого АД за керуванням (при скалярних методах керування) [19]; $W_M(s)$ – передатна функція лінеаризованого АД за збуренням (моментом опору) [19]; $1/s$ – інтегруюча ланка, що пов'язує кутове переміщення двигуна та його швидкість обертання; $f(\varphi)$ – суттєво нелінійна ланка, що пов'язує момент опору та кутове переміщення двигуна φ (рис. 1); $W_{reg}(s)$ – передатна функція регулятора напруги.

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o^2 s^2 + 2\zeta T_o s + 1} \quad (1)$$

за ступеню затухання $\zeta = 0$. Така лінійна ланка має назву консервативної та її наявність у лінійній системі відповідає режиму незгасаючих коливань за відсутності втрат енергії. Отже, як окремий елемент лінійна консервативна ланка існувати не може. Але завдяки внутрішнім нелінійним властивостям об'єкту керування у ньому відбуваються несинусоїдні автоколивання регульованої величини, які у разі нехтування вищими гармонічними складовими функції зміни швидкості у часі можуть бути апроксимовані синусоїдними незгасаючими коливаннями з частотою ω_0 . Тоді даний нелінійний об'єкт може бути апроксимований лінійною консервативною ланкою з передатною функцією

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o^2 s^2 + 1}, \quad (2)$$

де $T_o = 1/\omega_0$ – стала часу консервативної ланки, що визначається як величина, обернено пропорційна до частоти автоколивань швидкості об'єкту ω_0 , і дорівнює періоду автоколивань; $K_o = (\omega_{\max} + \omega_{\min})/2U$ – коефіцієнт передачі консервативної ланки, що визначається як відношення середнього значення кутової швидкості до вхідного керуючого сигналу об'єкта керування, яким, у даному випадку, є напруга живлення. З рис. 2 визначаємо, що за частоти живлення 20 Гц період коливань швидкості становить $T_o = 0,06$ с.

Оцінимо ефективність застосування синтезу регулятора швидкості за критерієм мінімуму відхилень швидкості, що для систем з моментом навантаження, незалежним від координат електроприводу, призводить до збільшення циклового ККД двигуна, наприклад, для електроприводів дробарок гірничого [15] та аграрного [19] призначення.

Серед існуючих методів синтезу регуляторів виділяються методи компенсації великих сталих часу, наприклад, методи налаштування на технічний та симетричний оптимуми [24]. Суть методів компенсації полягає у формуванні передатної функції регулятора, що є обернено пропорційною до передатної функції об'єкта керування. За аналогією до цих методів отримаємо передатну функцію регулятора

$$W_{\text{per}}(s) = K_{\text{per}}(T_{\text{per}}^2 s^2 + 1), \quad (3)$$

де $T_{\text{per}} = T_o = 0,06$.

Відзначимо, що регулятор у вигляді (3) не може бути реалізований в аналоговому вигляді через перевищення порядком чисельника ($n=2$) порядку знаменника ($n=0$). Тому для технічної реалізації він повинен бути реалізований у цифровому вигляді [25].

Статичний регулятор (3) характеризується невідомим заздалегідь коефіцієнтом K_{per} , що враховує змінність коефіцієнту K_o у процесі регулювання напруги. Задля визначення коефіцієнту K_{per} спочатку за допомогою математичної моделі приводу компресора [6], яка доповнена моделлю (3) засобів системи МАТЛАБ (вхід $\varepsilon(t)$, вихід – амплітудне значення у виразі миттєвої напруги U_m , рис. 4), отримаємо за результатами серії розрахунків із варіюванням величини $K_{\text{per}}=K$ залежність діапазону зміни коливань швидкості Δ від цього коефіцієнту передачі (рис. 5). Це дало змогу визначити за критерієм мінімуму відхилень швидкості АД оптимальне значення коефіцієнту передачі регулятора $K_{\text{per}}=101$.

Регулятор з такими параметрами надав змогу значно зменшити коливання кутової швидкості. Діапазон зміни швидкості став дорівнювати 2 рад/с. Процес регулювання швидкості за $K_{\text{per}}=101$ показаний на рис. 6. Замикання системи відбувається у момент часу 4 с.

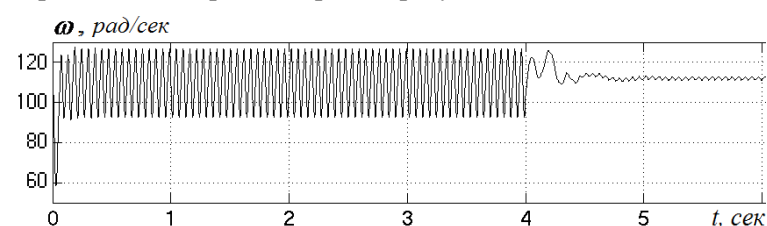


Рис. 5

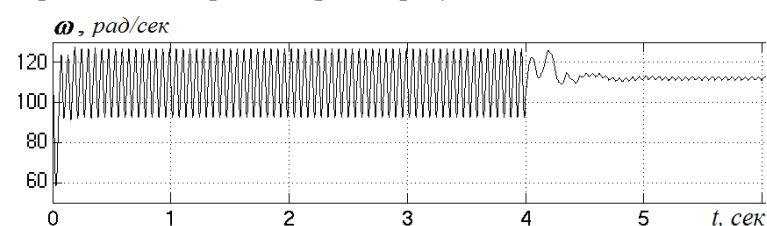


Рис. 6

Але при цьому збільшується несинусоїдність струмів порівняно з нерегульованим приводом. Часові залежності струмів статора у нерегульованому режимі (до 4 с) та

після включення регулятора (після 4 с) наведено на рис. 7.

При цьому ККД асинхронного двигуна зменшується з 0,564 у нерегульованому режимі до 0,388 при дії оптимального за критерієм мінімуму відхилень швидкості регулятора.

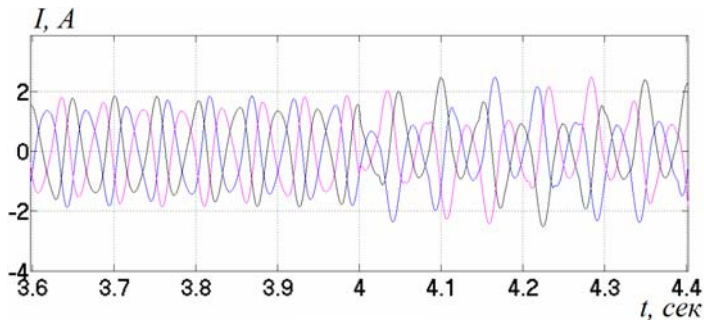


Рис. 7

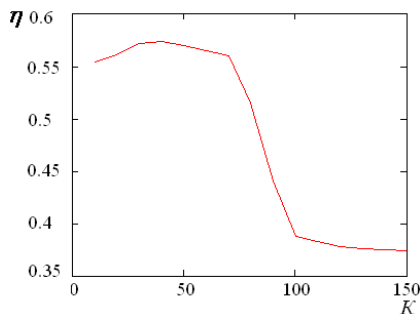


Рис. 8

Задля оптимізації регулятора за критерієм максимуму ККД асинхронного двигуна, аналогічно попередньому випадку, проведемо дослідження залежності ККД двигуна η від коефіцієнту передачі регулятора $K_{\text{per}}=K$ (рис. 8). З неї отримаємо, що оптимальним за критерієм максимуму ККД значенням коефіцієнту передачі регулятора буде $K_{\text{per}}=41$.

Таким чином, стабілізація швидкості у одноконтурній системі регулювання швидкості у випадку моменту навантаження, що залежить від кутового переміщення валу АД, відбувається за рахунок збільшення несинусоїдності струмів, що призводить до збільшення втрат, на відміну від систем із зовнішнім джерелом моменту навантаження, що не залежить від координат електроприводу [15, 19]. Тому мінімум відхилень швидкості такої системи не може бути критерієм оптимізації енергоспоживання. Альтернативою до нього розглянемо критерій максимуму ККД.

Процес регулювання швидкості за $K_{\text{per}}=41$ показаний на рис. 9. Замикання системи, як і раніше, відбувається у момент часу 4 с. Діапазон зміни швидкості за умови максимуму ККД АД став дорівнювати 23 рад/с, що менше за значення у разі нерегульованого приводу (34 рад/с, до часу 4 с.), але значно більше, ніж за умови мінімізації відхилень швидкості (2 рад/с, рис. 6).

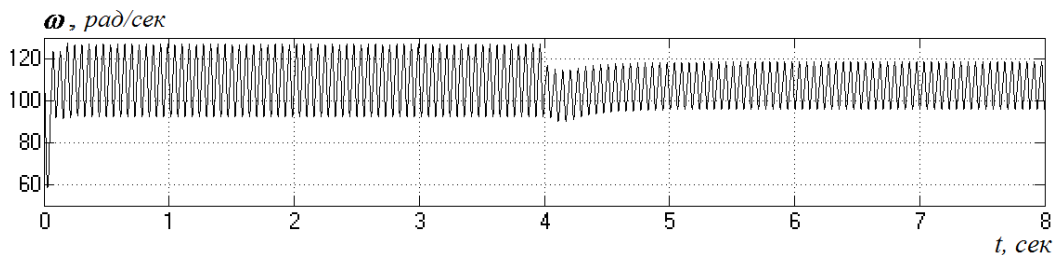


Рис. 9

Але при цьому синусоїдність струму за умови максимізації ККД значно краща, ніж за умови мінімізації відхилень швидкості

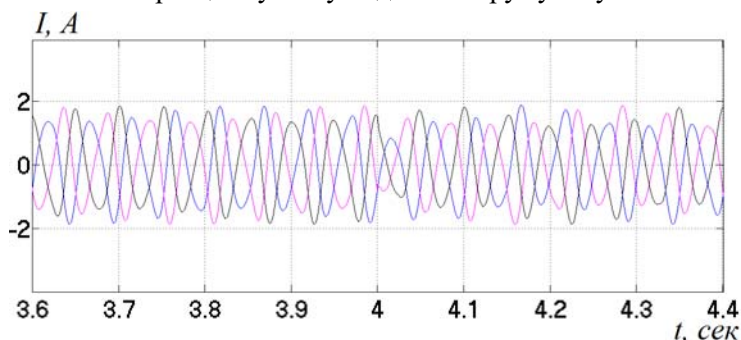


Рис. 10

у середнену величину THD на періоді повторюваності за основної частоти 20 Гц змінюється від 25 до 17,3%). Часові залежності струмів статора АД у нерегульованому режимі (до 4 с) та після включення регулятора (після 4 с), оптимального за критерієм максимуму ККД, наведено на рис. 10.

При цьому ККД двигуна за заданого моменту інерції $J=0,00135 \text{ Нм}^2$ за частоти живлення 20 Гц збільшується з 0,564 у нерегульованому режимі до 0,574 у разі дії оптимального за критерієм максимуму ККД регулятора. Максимально можливий ККД у нерегульованому приводі даного компресора за частоти живлення 20 Гц при моменті інерції $J \rightarrow \infty$ складає 0,588. Тобто, завдяки застосуванню

регульованого електроприводу вдалося зменшити різницю ККД для сталого та періодичного навантажень $\Delta\eta$ з 2,4% до 1,4%.

За аналогічною методикою було проведено синтез регулятора напруги та дослідження можливостей зменшення $\Delta\eta$ за різних значень частоти живлення (таблиця). Значення уставок напруги (усереднених значень напруги регулятора) наведені у [6]. Наприклад, для частоти 15 Гц це значення дорівнює 79,2 В.

f , Гц	ККД, в.о.			$\Delta\eta$	
	Нерегульований привод		Регульований привод	Нерегульований привод	Регульований привод
	$J \rightarrow \infty$	$J=0,00135 \text{ Нм}^2$	$J=0,00135 \text{ Нм}^2$		
50	0,750	0,749	0,749	0,1%	0,1%
40	0,720	0,719	0,719	0,1%	0,1%
30	0,671	0,666	0,669	0,5%	0,2%
20	0,588	0,564	0,574	2,4%	1,4%
15	0,510	0,416	0,456	9,4%	5,4%

З таблиці видно, що на частотах живлення, близьких до номінальних, ефект зменшення різниці ККД асинхронного двигуна для сталого та періодичного навантажень ГПК за рахунок застосування регулятора напруги не спостерігається, тоді як під час зниження частоти живлення цей ефект збільшується. Так за частоти 15 Гц за рахунок застосування регульованого приводу ця різниця може бути зменшена на 4%.

Висновки.

Негативний вплив на енергетичну ефективність (за малих швидкостях обертання) коливань швидкості АД частоторегульованого приводу поршневих компресорів (внаслідок періодичної зміни моменту навантаження від кута повороту ротора) можливо зменшити шляхом використання запропонованого засобу, що забезпечує регулювання амплітуди напруги живлення за визначеного за технологічними вимогами фіксованого значення частоти живлення, що дає можливість покращити енергетичні характеристики системи.

Розроблено засоби порівняльної оцінки ефективності синтезу і застосування регулятора швидкості за критерієм мінімуму відхилень швидкості та максимізації циклового ККД асинхронного двигуна за умови, що момент навантаження поршневого компресору залежний від координат електроприводу.

За результатами проведеного синтезу регулятора напруги із використанням чисельних досліджень квазіусталених режимів *асинхронного двигуна герметичного поршневого компресора* встановлено, що регулювання режимів електроприводів ГПК за критерієм мінімізації коливань швидкості є недоцільним, тому що цей підхід призводить до зменшення ККД внаслідок збільшення несинусоїдності струмів на відміну від електроприводів із зовнішнім джерелом моменту навантаження [15, 16, 19], що не залежить від координат електроприводу. Для даних систем доцільною є оптимізація коефіцієнту передачі регулятора швидкості за критерієм максимуму ККД, що дає можливість на прикладі дослідженого варіанту системи за частоти живлення 15 Гц у 1,74 рази зменшити зниження ККД за періодичного навантаження порівняно із сталим.

1. Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators. *International Appliance Manufacturing*. 1998. Vol. 1. No 2. Pp. 105–109.
2. 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: <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/615> (date accessed at 15.04.2024).
3. 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://doi.org/docs.lib.purdue.edu/icecc/2576> (date accessed at 15.04.2024).
4. 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*. 2019. Vol. 1. Pp. 489–501. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_34.

5. 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). 207. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9020207>.
6. Bibik O.V., Golovan I.V., Popovych O.M., Shurub Y.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>.
7. Маляр А.В., Калюжний Б.С., Андрєйшин А.С. Система автоматичного керування роботою штангової глибинно помпової установки з врахуванням дебіту пласта. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2011. № 11 (186). С. 267–270.
8. Маляр А.В. Динаміка електроприводу штангової нафтовидобувної установки. *Технічна електродинаміка*. 2007. № 2. С. 50–54.
9. Huang P. PD Compression: A Quasi-Static or Dynamic Process? *Purdue International Compressor Engineering Conference*, July 14-17, USA. 2014. Pp. 1-11. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/2259> (date accessed at 15.04.2024).
10. Букарос А.Ю., Ромчук Н.О., Букарос В.Н. Адаптивна система управління електроприводом компресора. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. № 6. Вип 4. С. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.15673/2312-3125>.
11. Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>.
12. Xue X.D., Cheng K.W.E. An Energy-Saving Scheme of Variable Voltage Control for Three-Phase Induction Motor Drive Systems. 2006 2nd International Conference on *Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, China, 12–14 November 2006. Pp. 241–243. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESA.2006.343106>.
13. Eltamaly A.M., Alolah A.I., Hamouda R., Abdulghany M.Y. A novel digital implementation of AC voltage controller for speed control of induction motor. *International Journal of Power and Energy Conversion*. 2010. Vol. 2. No 1. Pp. 78–94. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPEC.2010.030862>.
14. Deur J., Koledić T., Perić N. Optimization of speed control system for electric drives with elastic coupling. *Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications*. Trieste, Italy, 04–04 September 1998. Pp. 319–325. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCA.1998.728434>.
15. Зеленов А.Б., Шевченко І.С., Морозов Д.І. Синтез алгоритмів релейних керувань електроприводами механізмів з випадковим характером навантаження. *Електроінформ*. 2007. № 2. С. 9–11.
16. Шуруб Ю.В., Дудник А.О., Лавінський Д.С. Оптимізація регуляторів частотно керованих асинхронних електроприводів при стохастичних навантаженнях. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 53–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.053>.
17. Leonard W. Control of electric drives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. 460 p.
18. Peresada S., Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2000. Vol. 14. Pp. 177–200. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1115\(200003/05\)14:2/3<177::AID-ACS579>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1115(200003/05)14:2/3<177::AID-ACS579>3.0.CO;2-2).
19. Шуруб Ю.В. Статистична оптимізація регульованих за напругою асинхронних електроприводів. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 116–118.
20. Шуруб Ю.В., Попович О.М., Головань І.В., Бібик О.В. Обгунтування вибору регулятора швидкості електроприводу одноциліндрового поршневого компресора. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2023. Вип. 65. С. 133–138. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.133>.
21. Jakovljević B.B., Rapačić 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>.
22. 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>.
23. Romasevych Y., Loveikin V., Dudnyk A., Loveikin Y. Optimal constrained PI-controllers tuning for real-world plants. 2020 *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>.
24. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. К.: Либідь, 2007. 656 с.
25. Kuo B. Digital control systems. New York: Oxford University Press, 1995. 751 p.

INCREASE OF POWER EFFICIENCY OF THE SINGLE-CYLINDER PISTON COMPRESSOR REGULATED ELECTRIC DRIVE

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

The peculiarities of the operation of closed systems of adjustable electric drives of single-cylinder reciprocating compressors due to the presence of a non-linear dependence between the motor load torque and the angular movement of its rotor are considered. The method of synthesis of the regulator of the amplitude of the supply voltage of an induction motor of such an electric drive at a fixed value of the supply frequency is proposed. According to the results of research, it was found that the effect of increasing energy efficiency (reducing the difference in efficiency for constant and periodic loads) due to the use of a voltage regulator increases with a decrease in the power supply frequency. It is shown that the optimization of the transmission coefficient of the voltage regulator of electric drives with a non-linear dependence between the motor load torque and the angular movement is expedient to be carried out according to the criterion of maximum efficiency. References 25, figures 10, table 1.

Key words: piston compressor, induction electric drive, voltage regulator, periodic load, nonlinear link.

1. Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators. *International Appliance Manufacturing*. 1998. Vol. 1. No 2. Pp. 105-109.
2. 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: <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/615> (date accessed at 15.04.2024).
3. 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://doi.org/docs.lib.purdue.edu/icec/2576> (date accessed at 15.04.2024).
4. 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*. 2019. Vol. 1. Pp. 489–501. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_34.
5. 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). 207. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9020207>.
6. Bibik O.V., Golovan I.V., Popovych O.M., Shurub Y.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>
7. Maliar A.V., Kaluzhnyi B.S., Andreyishyn A.S. System of automatic control of bar deep pump installation with the layer debit account. *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo technichnogo universitetu*. 2011. No 11 (186). Pp. 267–270. (Ukr)
8. Maliar A.V. Dynamics of electric drive of bar oil-extracting installation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2007. No 2. Pp. 50–54. (Ukr)
9. Huang P. PD Compression: A Quasi-Static or Dynamic Process? *Purdue International Compressor Engineering Conference*, July 14-17, USA. 2014. Pp. 1-11. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/2259> (date accessed at 15.04.2024).
10. Bukaros A.Yu., Romchuk N.O., Bukaros V.N. Adaptive compressor electric drive control system. *Avtomatyzatsiia tekhnologichnyh i biznes-protsesiv*. 2014. Vol. 6. No 4. Pp. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.15673/2312-3125>. (Rus)
11. Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>.
12. Xue X.D., Cheng K.W.E. An Energy-Saving Scheme of Variable Voltage Control for Three-Phase Induction Motor Drive Systems. 2006 2nd International Conference on *Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, China, 12–14 November 2006. Pp. 241–243. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESA.2006.343106>.
13. Eltamaly A.M., Alolah A.I., Hamouda R., Abdulghany M.Y. A novel digital implementation of AC voltage controller for speed control of induction motor. *International Journal of Power and Energy Conversion*. 2010. Vol. 2. No 1. Pp. 78–94. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPEC.2010.030862>.

14. Deur J., Koledić T., Perić N. Optimization of speed control system for electric drives with elastic coupling. Proceedings of IEEE International Conference on *Control Applications*. Trieste, Italy, 04–04 September 1998. Pp. 319–325. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCA.1998.728434>.
15. Zelenov A.B., Shevchenko I.S., Morozov D.I. Synthesis of algorithms of relay-type regulation of electrical drives of mechanisms with random load. *Electroinform.* 2007. No 2. Pp. 9–11. (Ukr)
16. Shurub Y.V., Dudnyk A.O., Lavinskiy D.S. Optimization of regulators of frequency controlled induction electric drives under the stochastic loadings. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2016. No 4. Pp. 53–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.053>. (Ukr)
17. Leonard W. Control of electric drives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. 460 p.
18. Peresada S., Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing.* 2000. Vol. 14. Pp. 177–200. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1115\(200003/05\)14:2/3<177::AID-ACS579>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1115(200003/05)14:2/3<177::AID-ACS579>3.0.CO;2-2).
19. Shurub Yu.V. Statistical optimisation of voltage regulated induction electric drives. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2014. No 5. Pp. 116–118. (Ukr)
20. Shurub Y.V., Popovych O.M., Golovan I.V., Bibik O.V. Substantiation of the selection of the speed controller of the single-cylinder piston compressor electric drive. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* 2023. Vyp. 65. Pp. 133–138. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.133>. (Ukr)
21. 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>.
22. 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>.
23. Romasevych Y., Loveikin V., Dudnyk A., Loveikin Y. Optimal constrained PI-controllers tuning for real-world plants. *2020 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>.
24. Popovych M.G., Kovalchuk O.V. Theory of automatic control: textbook. Kyiv: Lybid, 2007. 656 p. (Ukr)
25. Kuo B. Digital control systems. New York: Oxford University Press, 1995. 751 p.

Надійшла 22.04.2024
Остаточний варіант 23.05.2024