

Хлопенко М.Я.

Херсонська державна морська академія

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ СУДНОВОЇ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ПРИ ЧАСТОТНОМУ КЕРУВАННІ З РОБАСТНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Метою роботи являється моделювання та оптимальний вибір пускових характеристик в електроприводі суднової компресорної установки при частотному керуванні з робастним регулятором. Для проведення досліджень розроблено методологію наукового дослідження комп'ютерного моделювання таких характеристик. Удосконалено структурну схему системи частотного керування електроприводу за рахунок включення в основний контур робастного регулятора, коригувальної аперіодичної ланки на вході системи за задатчиком та блоків навантаження на двигун. Побудовано в пакеті Simulink схему моделювання пускових характеристик в асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу. Вона містить в основному контурі робастний регулятор швидкості та навантаження на жорсткий вал, що складається з ротора електродвигуна, колінчастого валу компресорної установки та маховика. Навантаження включає два блоки для знаходження дії на вал приведених до кривошипну моментів сил тяжіння і тиску повітря на поршні, а також розрахований момент тертя за індикаторною потужністю і механічним ККД компресора, причому моменти тиску повітря на поршні розкладені по гармоніках в ряди Фур'є. Приведений до кривошипну змінний момент інерції рухомих мас КШМ має постійний доданок. Цій доданок містить момент інерції жорсткого валу з зосередженими масами частин шатунів на осі шатунної шийки колінчастого валу. На конкретному прикладі розраховані криві перехідних процесів вимушених параметричних коливань кутової швидкості жорсткого валу, крутного моменту і навантаження на двигун при пуску компресора. Вони розраховувалися при різних значеннях постійної часу коригувальної ланки і постійного доданку змінного осьового моменту інерції жорсткого валу при дії на вал сил тертя, тиску повітря на поршні і сил тяжіння поршнів з приєднаними частинами мас шатунів. Побудовані таблиці впливу цих параметрів на крутний момент електродвигуна і таким шляхом отримані їх оптимальні значення, що відповідають критичному моменту у допустимих межах. Ці оптимальні значення параметрів враховувалися при розрахунку та побудові кривих перехідних процесів кутової швидкості жорсткого валу, крутного моменту і навантаження на жорсткий вал при пуску компресора. Їх розкид знаходиться в межах допусків. Удосконалено методологію розрахунку, моделювання та оптимального вибору пускових характеристик в електроприводі суднової V-подібної двоступінчастої компресорної установки стиснутого повітря при частотному керуванні з робастним регулятором. Використання розробленої методології дозволяє розрахунковим шляхом визначити допустимі значення пускових характеристик асинхронного електродвигуна при настройці системи керування компресорної установки на оптимальний режим роботи. Бібл. 10, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: моделювання пускових характеристик, асинхронний електродвигун, двоступінчастий поршковий компресор, частотне керування, робастний регулятор.

Постановка проблеми. Вивчення пускових характеристик перехідних процесів у асинхронних електроприводах судових поршневих компресорних установок при автоматичному регулюванні представляється доцільним. Це продиктовано необхідністю зниження витрат електроенергії на вимушені параметричні коливання кутової швидкості жорсткого валу, які пропорційні моменту інерції цього валу та степені нерівномірності швидкості на усталеному режимі. Ці коливання кутової швидкості при роботі компресора

збуджуються спільною дією на жорсткий вал крутного моменту двигуна, сил тертя, газових сил і сил тяжіння, що періодично повторюються з частотою обертання валу. Їх степінь нерівномірності швидкості знижується до допустимих значень потужним маховиком. Однак через велику інертність маховика витрати електроенергії та крутний момент електродвигуна при пуску компресора помітно зростають, причому цій момент може перевищувати критичне значення. Вони також можуть зрости на сталому режимі і при зміні

робочих параметрів двигуна в процесі нагріву його обмоток. Застосування системи автоматичного керування, у тому числі з робастним регулятором, для керування пусковими та усталеними режимами роботи електродвигуна дозволяє знизити гостроту цієї проблеми. Це підтверджується проведеними теоретичними дослідженнями, наведеними у працях [1-3]. Однак в роботі [3] залишилося ще ряд не вирішених питань теоретичного та практичного характеру, потребуючих вирішення в процесі комп'ютерного моделювання. Важливим серед них є актуальне питання забезпечення стабілізації кутової швидкості жорсткого валу при високій точності її регулювання та допустимому значенні критичного моменту електродвигуна при найменшому значенні моменту інерції маховика на пускових та усталених режимах роботи компресорної установки.

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Відомо декілька методів, що дозволяють стабілізувати кутову швидкість жорсткого валу компресорної установки. До них відносяться класичні методи теорії керування електроприводів [4], методи робастного, нейро-нечіткого та адаптивного керування [5] та метод ідентифікації [6]. Також можуть бути використані інші методи, огляд яких наводиться в роботі [7]. З них найбільше застосування знаходить метод синтезу стабілізуючого H_∞ -субоптимального робастного регулятора [5] та його додатки [8]. У роботі [9] на базі цього методу розроблено методологію наукового дослідження, запропоновано математичну модель та методіку для розрахунку та проектування принципової електричної схеми H_∞ -регулятора для системи частотного керування швидкістю асинхронного електроприводу.

У даній роботі вказана методологія застосовується для моделювання та оптимального вибору пускових характеристик перехідних процесів

в електроприводі суднового двоступінчастого поршневого компресора V-подібного типу з прямим кутом розвалу, що знаходиться в експлуатації, за моделлю, запропонованою в роботі [1], але із заміною в ній ПІ-регулятора швидкості на H_∞ -субоптимальний робастний регулятор [9], а також заміною формули для визначення моменту тертя на вираз [3, 10]. Така заміна для даної компресорної установки є доцільною.

Постановка завдання. Метою роботи є моделювання та оптимальний вибір пускових характеристик перехідних процесів в асинхронному електроприводі суднової V-подібної компресорної установки стиснутого повітря з прямим кутом розвалу при частотному керуванні з робастним регулятором. Для досягнення цієї мети необхідно виконати розрахунок передавальної функції робастного регулятора за методикою [3]. Провести моделювання і оптимальний вибір пускових характеристик перехідних процесів вимушених параметричних коливань кутової швидкості жорсткого валу, крутного моменту і моменту навантаження на двигун, викликаного дією сил тертя, тиску повітря на поршні компресора і сил тяжіння поступово рухомих мас поршнів з приєднаною до кожного з них частиною маси шатуна, посадженого верхньою головкою на пальці поршнів. Виконати аналіз одержаних результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

На рис. 1 представлена структурна схема системи частотного керування асинхронного електроприводу з робастним регулятором компресорної установки. Вона замкнена по кутовій швидкості електродвигуна неоднорічним зворотним зв'язком з коефіцієнтом підсилення $K_\omega = U/\omega$ (U – напруга задатчика; ω – кутова швидкість ротора машини).

Схема побудована із залученням робіт [1-3]. Вона містить коригуючу аперіодичну ланку з постійною часу T_{pr} , передавальну функцію робастного

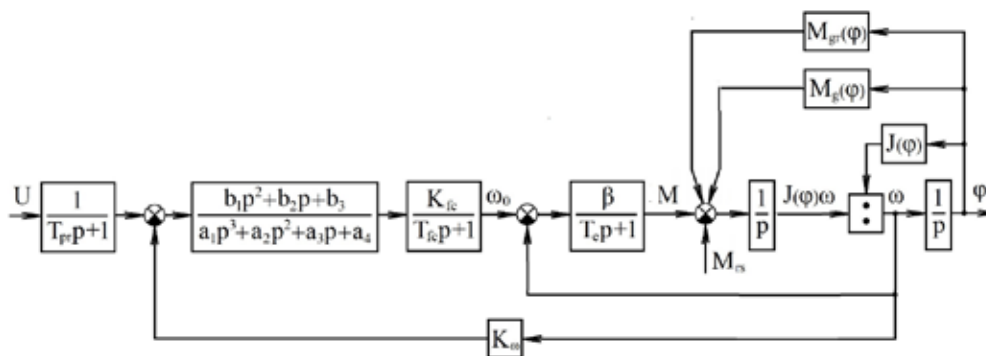


Рис. 1. Структурна схема частотного керування асинхронного електропривода

регулятора швидкості третього порядку з коефіцієнтами b_1, b_2, b_3 полінома чисельника та коефіцієнтами a_1, \dots, a_4 полінома знаменника, перетворювача частоти та асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. Перетворювач частоти представлений на схемі аперіодичною ланкою з коефіцієнтом передачі K_{fc} та постійною часу T_{fc} . Електродвигун зображений двома ланками та дільником, охопленими одиничним зворотним зв'язком. Його перша ланка описує електромагнітну частину, а друга – механічну частину. Електромагнітна частина двигуна представлена аперіодичною ланкою, а механічна – інтегруючою ланкою та дільником. Аперіодична ланка містить у чисельнику модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики β , а у знаменнику – електромагнітну постійну часу T_e кіл статора та ротора асинхронного електродвигуна. Після дільника розташована інтегруюча ланка, призначена для визначення кута повороту кривошипу φ . Вираз $J(\varphi)$ позначає приведенний до кривошипу момент інерції кожного поршня з приєднаною 1/3 частиною маси шатуна та жорсткого валу з приєднаною 2/3 частиною маси шатунів до загальної шийки коліна [1]. Величина M на схемі вказує на крутний момент асинхронного двигуна. Навантаження на двигун $M_r(\varphi) = M_{rs} - M_g(\varphi) - M_{gr}(\varphi)$ зображено двома блоками $M_g(\varphi)$ і $M_{gr}(\varphi)$ та моментом тертя M_{rs} . Блок $M_{gr}(\varphi)$ призначений для обчислення приведенного до кривошипу сумарного моменту діючих на поршні компресора тисків повітря при розкладанні кожного з доданків сумарного моменту по гармоніках в ряд Фур'є [2], а блок $M_g(\varphi)$ – для обчислення рівнодіючого моменту сил тяжіння поршнів з приєднаною до кожного з них 1/3 маси шатуна [1]. Складання діючих на вал сигналів крутного моменту $M = M(\varphi)$ і навантаження $M_r(\varphi)$, взятого з протилежним знаком, здійснюється суматором. Структурна схема містить також зворотні зв'язки моменту інерції $J(\varphi)$ і навантажень блоків $M_g(\varphi)$ і $M_{gr}(\varphi)$ по куту повороту кривошипа φ , ланку затримки сигналу часу, необхідного для продувки компресора, та пропорційну ланку тиску повітря в ємності для його збереження. Ланки затримки сигналу та тиску повітря в ємності на рис.1 не показані.

Передавальна функція робастного регулятора розраховувалася за методикою [9]. Залежності моменту інерції $J(\varphi)$ і навантаження $M_r(\varphi)$ від кута повороту φ жорсткого валу визначалися за формулами [1], інші параметри структурної схеми – за методикою, запропонованою у роботі [4].

Розрахунок перехідних процесів в асинхронному електроприводі при частотному керуванні

з робастним регулятором швидкості здійснювався для двоступінчастого компресора [1]. Колінчастий вал цього компресора має одне коліно. На шийку коліна посаджені по вільній посадці нижні головки шатунів першої та другої ступенів компресора. Різниця кутів повороту кривошипа ступенів становить $3\pi/2$ рад при відліку кожного кута кривошипа від своєї лінії, що з'єднує у верхній мертвій точці центр пальця поршня з центром нерухомої осі обертання кривошипа [1].

В якості асинхронного двигуна використовувався електродвигун HOYER HMA2 132S-4 з наступними даними: потужність 5,3 кВт; номінальна частота обертання 1460 об/хв; напруга 400 В; номінальний момент 34,67 Н·м; пусковий момент 83,2 Н·м; критичний момент $M_{cr} = 117,86$ Н·м; номінальний струм 10,63 А; критичне ковзання 0,21024; момент інерції ротора 0,033 кг·м²; частота мережі $f = 50$ Гц.

Вихідними даними до розрахунку служили такі величини: $U = 10$ В; $b_1 = 1,879 \cdot 10^6$; $b_2 = 8,772 \cdot 10^7$; $b_3 = 1,285 \cdot 10^{10}$; $a_1 = 1$; $a_2 = 4,629 \cdot 10^4$; $a_3 = 4,281 \cdot 10^7$; $a_4 = 8,282 \cdot 10^7$; $K_{fc} = 15,708$ рад/(В·с); $T_{fc} = 0,001$ с; $T_e = 0,0151$ с; $\beta = 7,138$ Н·м/(рад·с); $K_{\omega} = 0,0654$ В·с/рад; $M_{rs} = 4,31$ Н·м. Постійна часу T_{pr} змінювалася в діапазоні від 0 до 1 с, а постійний доданок J_0 приведенного до кривошипу змінного моменту інерції $J(\varphi)$ – від 0,1 до 0,25 кг·м², причому найменше значення цього доданку набагато більше осьового моменту інерції колінчастого валу з приєднаною 2/3 частиною маси шатунів до шийки коліна. Тиск повітря в ємності на початку та в кінці процесу заповнення її об'єму змінювався від 25 до 28 МПа, як і в роботі [1]. Опорами, що перешкоджають переміщенню повітря у всмоктувальних, нагнітальних та незворотному клапанах нехтували, що суттєво спрощувало розрахунки.

У табл. 1 наведено результати розрахунку безрозмірних значень пускового крутного моменту M/M_{cr} (M_{cr} – критичний момент двигуна) та його розмаху на усталеному режимі за графіками перехідних процесів при різних значеннях постійної часу T_{pr} коригувальної ланки і постійному значенні величини $J_0 = 0,1$ кг·м².

Таблиця 1
Вплив постійної часу T_{pr} на M/M_{cr} при пуску компресора

№ з/п	T_{pr} , с	Пусковий крутний момент M/M_{cr}	Розмах M/M_{cr} на усталеному режимі
1	0	22,5	0,4
2	0,25	2,1	0,4
3	0,5	1,7	0,4
4	0,75	1,7	0,4
5	1,0	1,7	0,4

З цієї таблиці видно, що з ростом постійної часу T_{pr} пусковий крутний момент знижується приблизно на порядок. На розмах крутного моменту ця постійна часу не впливає, оскільки навантаження на жорсткий вал при розрахунках не змінювалося.

У табл.2 представлені результати розрахунків безрозмірних значень пускового крутного моменту M/M_{cr} і його розмахів на усталеному режимі при різних значеннях моменту інерції J_0 . Вони отримані, як і в табл.1, за кривими перехідних процесів при постійному значенні $T_{pr}=0,55$ с.

Таблиця 2

Вплив моменту інерції J_0 на M/M_{cr} при пуску компресора

№ з/п	J_0 , кг·м ²	Пусковий крутний момент M/M_{cr}	Розмах коливань M/M_{cr} на усталеному режимі
1	0,1	1,2	0,8
2	0,15	1,3	0,6
3	0,2	1,4	0,4
4	0,25	1,5	0,3

Як і слід було очікувати, пусковий момент M/M_{cr} з ростом моменту інерції J_0 також зростає, так як при цьому зростає динамічне навантаження на жорсткий вал, а розмахи коливань моменту на режимах, що встановилися, падають внаслідок гальмівного ефекту динамічного моменту при розгоні та прискореному при спаданні кутової швидкості жорсткого валу.

Вибір оптимальних значень параметрів T_{pr} і J_0 , необхідних для розрахунку і побудови графіків перехідних процесів при пуску компресорної установки, проводився по табл.1, 2 при мінімальному значенні безрозмірного крутного моменту. Вони виявилися рівними $T_{pr}=0,55$ с та $J_0=0,1$ кг·м². При цих значеннях T_{pr} і J_0 безрозмірне значення крутного моменту всього лише на 20 % перевищує критичне значення. Тому слід очікувати, що стрибок цього моменту за дуже малий проміжок часу не викликає перегріву та пошкодження ізоляції обмоток двигуна.

На рис. 2 наведені графіки зміни безрозмірної кутової швидкості жорсткого валу (індекс n позначає номінальне значення) в залежності від часу t при пуску (а) і на усталеному режимі (б) роботи компресорної установки. Вони побудовані за обраними з табл. 1, 2 значеннями постійної часу $T_{pr}=0,55$ с і моменту інерції $J_0=0,1$ кг·м².

З цих графіків видно плавне зростання безрозмірної кутової швидкості жорсткого валу з подальшою її стабілізацією при пуску комп-

ресора, а також негармонічний характер її параметричних коливань, що протікають з розмахом близько 4% щодо середнього значення.

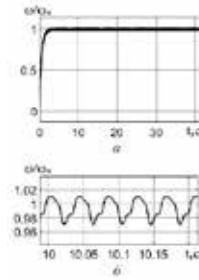


Рис. 2. Перехідні процеси безрозмірної кутової швидкості жорсткого валу при пуску (а) та на усталеному режимі (б)

На рис. 3 представлена залежність коливань безрозмірного крутного моменту двигуна M/M_{cr} від часу t при пуску (а) і на усталеному режимі (б) його роботи. Вони отримані при тих же значеннях величин T_{pr} і J_0 , що і в попередньому випадку.

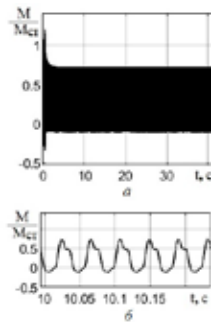


Рис. 3. Перехідні процеси безрозмірного крутного моменту при пуску (а) та на усталеному режимі (б)

За рис. 3 чітко видно, що коливання крутного моменту є негармонійними при параметричних коливаннях жорсткого валу. Їхній розмах знаходиться в області допустимих режимів роботи асинхронного двигуна.

Зміна безрозмірного навантаження M_t/M_{cr} на жорсткій вал з часом t показана на рис. 4.

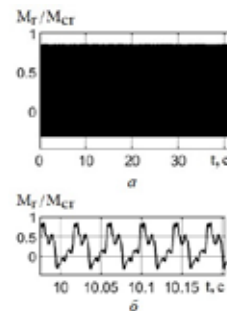


Рис. 4. Графіки зміни безрозмірного навантаження з плином часу t при пуску (а) і на усталеному режимі (б)

Як і слід було очікувати, періодичні коливання навантаження є негармонічними і відбуваються з великим розмахом у допустимій робочій області роботи електричного двигуна.

Висновки. Удосконалено методологію розрахунку, моделювання та оптимального вибору пускових характеристик в електроприводі суднової V-подібної двоступінчастої компресорної установки стиснутого повітря при частотному керуванні з робастним регулятором. Запропоновано структурну схему системи частотного керування асинхронного електроприводу компресорної установки, що містить робастний регулятор.

Розроблено в пакеті Simulink схему моделювання перехідних процесів в електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу. Результати аналізу проведених розрахунків показали, що при оптимальному виборі пускових характеристик компресорної установки система частотного керування з робастним регулятором забезпечує високу точність стабілізації параметричних коливань жорсткого валу компресорної установки (ступінь нерівномірності обертання не перевищує 4%) при допустимому значенні пускового критичного моменту.

Список літератури:

1. Хлопенко М.Я., Хлопенко І.М. Моделювання перехідних процесів у частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого 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>.
2. Хлопенко І.М. Розрахунок перехідних процесів у асинхронному електроприводі суднового двоступінчастого поршневого компресора при векторному керуванні з робастним регулятором. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки.* 2022. Т. 33(72). № 3. С. 129-135. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/20>.
3. Хлопенко М.Я. Робастне частотне керування суднової компресорної установки: матеріали 13-ї Міжнародної науково-практичної конференції (07-09 вересня 2022, Херсон). Херсон: ХДМУ, 2022. С. 52-53.
4. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
5. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / К.А. Пупков, М.Д. Егупов, А.И. Гаврилов и др.; под ред. Н.Д. Егупова. Изд. 2-е. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
6. Krakowski P. Analysis of selected simulated failure of a reciprocating compressor using computer diagnostic system. *Journal of KONES Powertrain and Transport.* 2018. Vol. 25. № 2. P. 191–198. DOI: 10.5604/01.3001.0012.2800.
7. Хлопенко Н.Я., Рожков С.А., Хлопенко И.Н. Фильтрация помех робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора. *Научовий вісник Херсонської державної морської академії.* 2019. № 1(20). С. 122-131. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.122-131.
8. MATLAB: Robust Control Toolbox™ 3. User's Guide. / Y. Balas, R. Chiang, A. Packard, M. Safonov, 2009. 230 p. Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.219.2489&rep=rep1&type=pdf>.
9. Хлопенко Н.Я. Расчет и проектирование робастного регулятора скорости системы частотного управления асинхронного электропривода. *Електротехніка і електромеханіка.* 2020. № 3. С. 31-36. doi: 10.20998/2074-272X.2020.3.05.
10. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Теория и расчет. Изд. 3-е, доп. М.: КолосС, 2006. Т. 1. 456 с.

Khlopenko M.Ya. MODELING AND OPTIMAL CHOICE OF STARTING CHARACTERISTICS IN THE ELECTRIC DRIVE OF A SHIP COMPRESSED AIR COMPRESSOR UNIT UNDER FREQUENCY CONTROL WITH A ROBUST CONTROLLER

Purpose. The aim of the work is modeling and optimal choice of starting characteristics in the electric drive of a ship compressor unit under the frequency control with a robust controller. *Methodology.* To conduct research, a methodology for the scientific study of starting characteristics in an asynchronous electric drive of a compressor plant has been developed. The block diagram of the frequency control system of the electric drive has been improved by including a robust controller in the main circuit, a corrective aperiodic link at the system input behind the setter and the engine load. A scheme for modeling of starting characteristics in an asynchronous electric drive of a marine V-shaped two-stage reciprocating air compressor was built in the Simulink package. It contains in the main circuit a robust speed controller and a load on a rigid shaft, consisting of an electric motor rotor, a crankshaft of a compressor unit and a flywheel. The load includes two

blocks for finding the action on the shaft of the moments of gravity and air pressures on the pistons reduced to the crank, as well as the friction moment calculated from the indicator diagram and the mechanical efficiency, and the moments of air pressure on the pistons were expanded in harmonics to Fourier series. The variable moment of inertia of the moving masses of the crankshaft, reduced to the crank, contains a constant term. This term contains the moment of inertia of the rigid shaft with concentrated parts masses of the connecting rods on the axis of the connecting rod journal of the crankshaft. Results. On a specific example, the curves of transient processes of forced parametric oscillations of a rigid shaft angular velocity, torque and load on the motor during compressor start-up were calculated. They were calculated for different values of the time constant of the correcting filter and the constant term of the rigid shaft axial moment of inertia under the action of friction forces on the shaft, air pressure on the pistons, and gravity forces of pistons with reduced masses of connecting rods. Tables of the influence of these parameters on the torque of the electric motor are built and thus their optimal values are determined, corresponding to the critical moment within acceptable boundaries. These optimal values of the parameters were taken into account when curves of transient processes of a rigid shaft angular velocity, torque and load on the rigid shaft during compressor start-up were calculated and constructed. Their spread is within tolerances. Originality. The methodology for calculating, modeling and optimal selection of starting characteristics in the electric drive of a ship V-shaped two-stage compressed air compressor unit under the frequency control with a robust controller has been improved. Practical value. The use of the developed methodology makes it possible to provide, by calculation, the permissible values of the starting characteristics of an asynchronous electric motor when setting the control system of the compressor unit for the optimal operating mode. References 10, tables 2, figures 4.

Key words: modeling of starting characteristics, asynchronous electric motor, two-stage reciprocating compressor, frequency control, robust controller.