

УДК: 621.3.078.4: 621.512

**ДЕТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
«ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА - ПРИВІД - КОМПРЕССОР - ПНЕВМОМЕРЕЖА»
РІЗНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ**

О.В. Бобров¹, М.Н. Переходник¹, І.В. Григоренко¹

¹ Коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

**DETAILED ANALYSIS OF THE RESULTS OF OPTIMAL PARAMETERS
MODE OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS
"ELECTRICAL NETWORK - DRIVE - COMPRESSOR - PNEUMATIC NETWORK"
DIFFERENT PERFORMANCE**

O. Bobrov¹, M. Perekhodnyk¹, I. Hryhorenko¹

¹ Rocket-and-Space Engineering College of Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

Мета. Оцінка результатів параметричної оптимізації, яка зводиться до аналізу отриманих в результаті рішення задачі оптимальних значень верхнього максимального рівня тиску в пневмосистемі при різних заданих значеннях витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачами з точки зору їх практичної можливості бути реалізованими.

Методика дослідження. Для досліджень застосовується розроблена цифрова математична модель електромеханічної системи "електрична мережа - компресор - пневмомережа" розроблена на кафедрі систем електропостачання НТУ "ДП", яка побудована на основі ККД енергетичного циклу.

Результати дослідження. Проведений аналіз показав, що запропонований варіант регулювання з «плаваючим» верхнім рівнем тиску, для систем різної продуктивності, забезпечує скорочення витрат електричної енергії, що споживаються розглянутими електромеханічними системами. Економія може досягати 13,5% і залежить від значень витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачів, продуктивності компресора і параметрів електромеханічної системи.

Наукова новизна. Вирішена задача параметричної оптимізації режиму роботи електромеханічної системи, при введенні обмеження на допустиму кількість включень електродвигуна в заданий проміжок часу та на значення тиску повітря в пневмомережі.

Практичне значення. За оцінкою результатів параметричної оптимізації режимів роботи електромеханічних систем з погляду їх практичної реалізації обґрунтований спосіб реалізації управління, двопозиційний з «плаваючим» верхнім рівнем тиску.

Ключові слова: електропривод, регулювання, компресор, електромеханічна система.

Вступ. Система двохпозиційного регулювання тиску широко застосовується в поршневих компресорних установках. Нормальна робота споживачів стислого повітря забезпечується завдяки підтримці в системі тиску в заданому інтервалі ($P_{min} \dots P_{max}$).

Підвищення енергоефективності системи "електрична мережа - компресор - пневмосети" в цілому можна досягти, виконавши "плаваючим" верхній рівень тиску. В роботі [1] введено критерій економічності для системи управління і визначення значення верхнього рівня тиску на одному циклі накачування спуску тиску - ККД. Обґрунтування цього енергетичного показника базується на з'ясуванні залежностей між різними показниками елементів всієї системи, визначенні найбільш вагомих, з точки зору втрат енергії, елементів електромеханічної системи, а також взаємозв'язку між ними.

Для вирішення раніше [2] сформульованої задачі оптимізації розроблена цифрова математична модель. При створенні моделі були прийняті допущення, описані в [3], що враховують мету моделювання - отримання оптимального значення максимального верхнього рівня тиску в пневмосистемі, відповідного максимуму цільової функції (ККД) при різних фіксованих витратах стислого повітря пневмоприймачів. Отримані значення можуть бути реалізовані в системі регулювання виробництва стислого повітря з певною точністю (до 10% від розрахункових значень). Порівняльний аналіз отриманих результатів моделю-

вання для електромеханічних систем з номінальним рядом продуктивностей повітряних поршневих компресорів з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором - 2,5; 5; 10; 11; 12; 20; 24; 27, м³/хв виконаний в роботі [5]. Проведемо оцінку результатів параметричної оптимізації, яка зводиться до аналізу отриманих в результаті рішення задачі оптимальних значень верхнього максимального рівня тиску в пневмосистемі $P_{\text{махопт}}$ при різних заданих значеннях витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачами $Q_{\text{потр}}$ з точки зору їх практичної можливості бути реалізованими. Важливий зв'язок оптимальних параметрів режиму роботи електромеханічної системи зі змінними, що характеризують умови експлуатації електромеханічної системи. При виконанні аналізу важливо оцінити їх вплив на показники електроспоживання (ГЕН) і визначити ефективність запропонованого рішення.

Постановка задачі. При порівнянні значень кількості енергії, споживаної електромеханічною системою за одну годину з класичним двохпозиційним управлінням і двохпозиційним управлінням з оптимальним верхнім рівнем тиску встановлено, що економія електроенергії становить від 0,76% до 13,50% для різної витрати стислого повітря.

При порівнянні значень кількості енергії, спожитої при класичному двопозиційний управлінні і двопозиційний з оптимальним верхнім рівнем тиску і обмеженнями за кількістю пусків, встановлено, що при малих витратах стислого повітря в силу вступає обмеження, а при великих - збільшується економія електроенергії. Пояснюється це тим, що час циклу "збільшення - зниження" тиску змінний. Чим вище витрата стислого повітря, тим більше час циклу і менше кількість пусків приводного двигуна в годину. Відповідно справедливо і зворотне твердження. Слід зазначити, що система управління при використанні оптимального верхнього рівня тиску виходить за межі встановлених обмежень. Вона визначає таке значення верхньої межі тиску, при якому найбільш повно використовується допустима кількість пусків поршневої компресорної установки за годину.

Завдання оптимізації параметрів режиму роботи комплексу у викладеній редакції може вирішуватися як на стадії проектування системи вироблення і розподілу стислого повітря, так і в процесі її експлуатації. Цифрова математична модель вимагає використання певної інформації. Ця інформація може бути отримана в результаті експлуатації системи вироблення і розподілу стислого повітря. Основні параметри електромеханічної системи, такі як довжина і питомий опір лінії, яка живить електропривод компресора, його номінальна потужність, номінальна продуктивність повітряного поршневого компресора, обсяг ресивера і пневмосистеми залишаються незмінними. Вони можуть змінюватися тільки в процесі реконструкції або модернізації електромеханічної системи. Однак в моделі використовуються параметри, які можуть змінюватися з часом - реальна продуктивність повітряного поршневого компресора і втрати стислого повітря в пневмосистемі. Пов'язано це з погіршенням параметрів повітряного компресора протягом строку його експлуатації та корозією пневмопроводів. Також має місце вплив зміни параметрів повітря, пов'язане з чергуванням пів року. Тому для нівелювання цих впливів необхідно проводити випробування для уточнення розрахункових регресійних коефіцієнтів, не рідше ніж два рази на рік (червень, грудень), тобто при зміні сезону року.

Рішення задачі. При моделюванні параметрів режимів електромеханічних систем з повітряними поршневими компресорами різної номінальної продуктивності виявлено, що під час відсутності обмеження за кількістю запусків на годину (його збільшенні до 30 ... 40 шт.) приводного асинхронного двигуна економія споживаної електричної енергії досягається і при мінімальних витратах стислого повітря, споживаного пневмоприймачами. У разі обмеження кількості пусків (що встановлюється паспортними даними двигуна) економія електроенергії може бути досягнута лише при великих витратах стислого повітря. Останнє підтверджується результатами моделювання, показаними в табл. 1. Цей факт доцільно враховувати на стадії проектування системи для підвищення її енергетичного показника - ККД.

Висновки. При вирішенні оптимізаційної задачі задавалися дискретні значення витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачами $Q_{\text{потр}}$, і розраховувалося споживання електричної енергії комплексом за одну годину. Обумовлено це тим, що зазначений параметр є незалежним і не контролюється системою управління поршневої компресорної установки. Існують комплекси, які працюють на один пневмоприймач, проте в загальному випадку системи вироблення і розподілу стислого повітря працюють на кілька пневмоприймачів, що, в свою чергу, передбачає зміну витрати стислого повітря в продовж роботи зміни. Тому система управління повітряним поршневим компресором повинна відслідковувати зміну витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачами. Виходячи з особливостей математичної моделі можливі два варіанти вирішення. Перший варіант полягає у відстеженні витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачами, на ділянці зниження тиску, і відповідно до цього значення встановлення верхнього максимального оптимального рівня тиску для наступного циклу «накачування - спуску» тиску, виходячи з заздалегідь розрахованих табличних масивів даних.

Тобто після проведення випробувань, описаних в [4], можливо розрахувати двовимірний масив, в якому певній витраті стислого повітря буде відповідати значення максимального оптимального рівня тиску за цикл. Основною перевагою такого варіанту рішення є можливість застосування керуючої системи

Електропостачання та електроустаткування

Таблиця 1. Результати моделювання параметрів режиму роботи електромеханічних систем

Витрати, у.о.	Класичне двопозиційне управління, кВт·год	Двопозиційне управління з оптимальним верхнім рівнем, кВт·год	Різниця в %	Класичне двопозиційне управління, кВт·год	Двопозиційне управління з оптимальним верхнім рівнем і обмеженнями за кількістю пусків, кВт·год	Різниця в %	Продуктивність компресора, м ³ /хв
1	2	3	4	5	6	7	8
0,05	14,5	12,8	11,72	14,5	14,5	0,00	2,5
0,10	14,5	12,8	11,72	14,5	14,5	0,00	
0,15	14,7	12,7	13,61	14,7	14,7	0,00	
0,20	14,8	13,6	8,11	14,8	14,8	0,00	
0,25	14,9	13,6	8,72	14,9	14,9	0,00	
0,30	15	13,7	8,67	15	15	0,00	
0,35	15,1	13,8	8,61	15,1	15,1	0,00	
0,40	15,2	13,9	8,55	15,2	15,2	0,00	
0,45	15,3	13,9	9,15	15,3	15,3	0,00	
0,50	15,4	14,2	7,79	15,4	15,4	0,00	
0,55	15,5	14,3	7,74	15,5	15,5	0,00	
0,05	29,1	26,5	8,93	29,1	29,1	0,00	5
0,10	29,4	26	11,56	29,4	29,4	0,00	
0,15	29,8	26,6	10,74	29,8	29,8	0,00	
0,20	30,2	26,8	11,26	30,2	30,2	0,00	
0,25	30,6	27,4	10,46	30,6	30,3	0,98	
0,30	31,2	27,9	10,58	31,2	30,7	1,60	
0,35	31,5	28,8	8,57	31,5	31,1	1,27	
0,40	31,9	29,2	8,46	31,9	31,5	1,25	
0,45	32,3	29,4	8,98	32,3	32,1	0,62	
0,50	32,6	30,6	6,13	32,6	32,3	0,92	
0,55	33,1	31	6,34	33,1	32,8	0,91	
0,05	55,4	50,7	8,48	55,4	55,4	0,00	10
0,10	58,9	54,7	7,13	58,9	57,9	1,70	
0,15	60,5	56,6	6,45	60,5	59,6	1,49	
0,20	62,2	56,4	9,32	62,2	61,5	1,13	
0,25	63,6	58	8,81	63,6	63,2	0,63	
0,30	65,4	59,2	9,48	65,4	63,7	2,60	
0,35	67,1	60,7	9,54	67,1	65,7	2,09	
0,40	68,7	61	11,21	68,7	67	2,47	
0,45	70,6	63,9	9,49	70,6	67,9	3,82	
0,50	72,2	65,5	9,28	72,2	69,7	3,46	
0,55	74,2	67,1	9,57	74,2	70,7	4,72	
0,05	56,2	51,1	9,07	56,2	56,2	0,00	11
0,10	57,7	52,9	8,32	57,7	57,1	1,04	
0,15	59,4	54,1	8,92	59,4	58,9	0,84	
0,20	61,3	55,7	9,14	61,3	60,7	0,98	
0,25	63,1	57,7	8,56	63,1	61,7	2,22	
0,30	64,8	59,2	8,64	64,8	63,1	2,62	
0,35	66,5	62,2	6,47	66,5	65,1	2,11	
0,40	68,5	63,8	6,86	68,5	65,9	3,80	
0,45	70	63,8	8,86	70	67,9	3,00	
0,50	72	65,5	9,03	72	68,8	4,44	
0,55	73,9	67,1	9,20	73,9	70,4	4,74	

Електропостачання та електроустаткування

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8
0,05	54,8	51,4	6,20	54,8	54,8	0,00	12
0,10	56,9	53,2	6,50	56,9	56	1,58	
0,15	58,6	53,3	9,04	58,6	57,8	1,37	
0,20	60,4	55,3	8,44	60,4	59,7	1,16	
0,25	62,3	56,8	8,83	62,3	61	2,09	
0,30	64,2	58,6	8,72	64,2	62,9	2,02	
0,35	66,3	60,3	9,05	66,3	63,9	3,62	
0,40	68,3	63,3	7,32	68,3	65,8	3,66	
0,45	70,1	65,4	6,70	70,1	67,5	3,71	
0,50	72,2	67,1	7,06	72,2	68,5	5,12	
0,55	74,1	66,9	9,72	74,1	69,6	6,07	
0,05	94,7	86,5	8,66	94,7	94,7	0,00	20
0,10	100,3	95,9	4,39	100,3	100,3	0,00	
0,15	105	96,4	8,19	105	104,2	0,76	
0,20	111,2	101,2	8,99	111,2	109,8	1,26	
0,25	116,8	108,7	6,93	116,8	113,5	2,83	
0,30	122,1	113,5	7,04	122,1	117,5	3,77	
0,35	128,1	118,2	7,73	128,1	121,5	5,15	
0,40	134,1	123,6	7,83	134,1	125,5	6,41	
0,45	140,5	129,2	8,04	140,5	129,2	8,04	
0,50	147,7	130,7	11,51	147,7	132,8	10,09	
0,55	157	135,8	13,50	157	135,8	13,50	
0,05	90,4	86,9	3,87	90,4	91,9	0,00	24
0,10	96,7	92,8	4,03	96,7	96,7	0,00	
0,15	102,5	97,2	5,17	102,5	102,5	0,00	
0,20	107,7	103,1	4,27	107,7	106,7	0,93	
0,25	114,1	108,9	4,56	114,1	111,4	2,37	
0,30	119,4	114,5	4,10	119,4	115,4	3,35	
0,35	125,9	120	4,69	125,9	120	4,69	
0,40	132,6	125,7	5,20	132,6	125,7	5,20	
0,45	139,2	131,7	5,39	139,2	131,7	5,39	
0,50	146,6	138	5,87	146,6	138	5,87	
0,55	156,4	140,5	10,17	156,4	140,5	10,17	
0,05	107	104,9	1,96	107	107	0,00	27
0,10	115	112,9	1,83	115	115	0,00	
0,15	123,3	121,4	1,54	123,3	123,3	0,00	
0,20	131,5	128,4	2,36	131,5	131,5	0,00	
0,25	139,2	137,4	1,29	139,2	139,2	0,00	
0,30	148,4	145,5	1,95	148,4	146,6	1,21	
0,35	156,8	153,1	2,36	156,8	153,1	2,36	
0,40	165,3	162	2,00	165,3	162	2,00	
0,45	174,9	170,8	2,34	174,9	170,8	2,34	
0,50	184,9	180,2	2,54	184,9	180,2	2,54	
0,55	197,9	191,1	3,44	197,9	191,1	3,44	

на базі мікропроцесорної техніки низької обчислювальної потужності. До недоліків відноситься неможливість коригування рівня максимального оптимального верхнього рівня тиску на ділянці накачування, тому що в такому випадку необхідно відстежувати витрату стислого повітря, споживаного пневмоприймачами, і на цій ділянці, а це зажадає додаткової обчислювальної потужності. Другий варіант вирішення

позбавлений недоліку попереднього і полягає в безперервному відстеженні витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачами, на ділянці накачування тиску при роботі електромеханічної систем за цикл. При цьому потрібно проводити досить ресурсомісткі обчислення в режимі реального часу. На сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки з точки зору управління енергетичними процесами в подібних електромеханічних системах питання про обчислювальну потужність мікроконтролерів практично вирішене. На даний момент широкого поширення набули програмовані логічні контролери і програмовані електронні реле управління. Вони володіють великою обчислювальною потужністю, малими габаритами, випускаються в промисловому виконанні і можуть експлуатуватися персоналом середнього технічного рівня.

Перелік посилань

1. Бобров, А.В. (2004). *Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров*. Технічна електродинаміка. 3. 70-71.
2. Бобров, О.В. (2011). *Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса*. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 4. (16). – 124.
3. Бобров, А.В., Безкровний, В.О. (2016). *Допущения и ограничения в расчете кпд электромеханической системы «электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть»* Молодь: наука та інновації 2016: 4-та Всеукраїнська науково-практична конференція. (6-7 грудня 2016 р., Дніпро). 11-8 - 11-10.
4. Бобров, О.В. (2014). *Результаты исследований энергоэффективного режима работы электромеханической системы виробництва та розподілу стислого повітря* Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2. (26). 85-90.
5. Бобров, А.В., Колб А.А., Цыпленков Д.В. *Сравнительный анализ результатов моделирования электромеханических систем «электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть» различной производительности*. Гірнична електромеханіка та автоматика. №101. 75-78.

Рекомендовано до друку к-том техн. наук, доц. Ципленковим Д.В.

АННОТАЦИЯ

Цель. Оценка результатов параметрической оптимизации, которая сводится к анализу полученных в результате решения задачи оптимальных значений верхнего максимального уровня давления в пневмосистеме при различных заданных значениях расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками с точки зрения их практической реализуемости.

Методика исследования. Для исследований применяется разработанная цифровая математическая модель электромеханической системы "электрическая сеть - компрессор - пневмосеть" разработана на кафедре систем электроснабжения НТУ "ДП", которая построена на основе КПД энергетического цикла.

Результаты исследования. Проведенный анализ показал, что предлагаемый вариант регулирования с «плавающим» верхним уровнем давления, для систем различной производительности, обеспечивает сокращение затрат электроэнергии, потребляемых рассмотренными электромеханическими системами. Экономия может достигать 13,5% и зависит от значений расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками, производительности компрессора и параметров электромеханической системы.

Научная новизна. Решена задача параметрической оптимизации режима работы электромеханической системы, при введении ограничения на допустимое количество включений электродвигателя в заданный промежуток времени и на значение давления воздуха в пневмосети.

Практическое значение. По оценке результатов параметрической оптимизации режимов работы электромеханических систем с точки зрения их практической реализации обоснованный способ реализации управления, двухпозиционный с «плавающим» верхним уровнем давления.

Ключевые слова: электропривод, регулирования, компрессор, электромеханическая система.

ABSTRACT

Objective. Evaluation of the results of parametric optimization, which is reduced to the analysis of the optimal values of the upper maximum pressure level in the pneumatic system at different set values of compressed air flow consumed by pneumatic receivers in terms of their practical feasibility.

Research methodology. The developed digital mathematical model of the electromechanical system "electric network - compressor - pneumatic network" developed at the department of power supply systems, which is based on the efficiency of the energy cycle, is used for research.

Research results. The analysis showed that the proposed control option with a "floating" upper pressure level, for systems of different performance, provides a reduction in electricity consumption consumed by the considered electromechanical systems. The savings can reach 13.5% and depend on the values of compressed air consumption, air intake, compressor performance and parameters of the electromechanical system.

Scientific novelty. The problem of parametric optimization of the mode of operation of the electromechanical system is solved, with restrictions on the allowable number of motor inclusions in a given period of time and the value of air pressure in the pneumatic network.

Practical meaning. According to the evaluation of the results of parametric optimization of the modes of operation of electromechanical systems in terms of their practical implementation, a method of implementing control, two-position with a "floating" upper pressure level is justified.

Keywords: electric motor, regulation, compressor, electromechanical system.