

эмпирических вероятностных распределений наблюдаемой величины, которые в свою очередь могут быть получены из экспериментального временного ряда.

Выводы. Таким образом, в настоящей работе:

Произведена идентификация стохастической модели энергопотребления очистного комбайна на основе экспериментальных данных. При этом реализована декомпозиция первичного временного ряда энергопотребления добычного комбайна на вторичный, соответствующий непрерывной работе, и моменты простоя. Показана стационарность вторичного временного ряда, проведены его автокорреляционный и статистический анализы, обосновано, что вторичный временной ряд может быть описан AR моделью 3-го порядка. Отличительной особенностью модели является негауссов характер шумовой составляющей с преобладанием положительных значений асимметрии и эксцесса, что по-видимому обусловлено пусковыми бросками тока двигателя. Определены проблемы, возникающие на дальнейших этапах оценивания и диагностики модели, и возможные пути их решения.

Список литературы

1. Федорейко В.С. Методы вейвлет обработки сигналов в электромеханических системах [Текст] / Федорейко В.С., Худoley С.С., Блахонцев А.В. // Гірнична електромеханіка та автоматика: научн.-техн. сб. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – Вып.72 – С. 142 – 148
2. Саблин О.И. Интергармоники тягового тока и напряжения на токоприёмнике электрического транспорта постоянного тока [Текст] / О.И. Саблин // Гірнична електромеханіка та автоматика: научн.-техн. сб. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – Вып.76 – С. 112 – 120
3. Костін М.О. Миттева реактивна потужність у системах електричного транспорту постійного струму [Текст] / М.О. Костін, О.І. Саблін, О.Г. Шейкіна та ін. // Гірнична електромеханіка та автоматика: научн.-техн. сб. – Днепропетровск: НГУ, 2007. – Вып.79 – С. 3 – 8
4. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов [Текст] / Г.Г. Канторович // Экономический журнал ВШЭ: – М.: ВШЭ, 2002. – № 1 – С. 85 – 116
5. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов [Текст] / Г.Г. Канторович // Экономический журнал ВШЭ: – М.: ВШЭ, 2002. – № 2 – С. 251 – 273
6. Носко В. П. Эконометрика: введение в регрессионный анализ временных рядов [Текст] / В. П. Носко – М.: ЛОГОС, 2004. – 312 с.
7. Елисеєва І. І. Економетрика [Текст] / І. І. Елисеєва, С.В. Курьшева, Т.В. Костеева – М.: «Финансы и статистика», 2007. – 575 с.
8. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев – М.: «Наука», 1973. – 312 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, Ткачовим В.В.

УДК: 621.3.078.4: 621.512

О.В. Бобров, Д.В. Ципленков канд-ти техн. наук
(Україна, Дніпро, ДВНЗ "Національний гірничий університет")

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ «ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА – ПРИВІД – КОМПРЕСОР – ПНЕВМОМЕРЕЖА»

Анотація. Обґрунтовано оптимальні параметри математичної моделі, що дозволяє визначити оптимальний режим роботи системи вироблення і розподілу стислого повітря, до складу якої входять наступні елементи "електрична мережа – привід – компресор – пневмомережа". Визначено інтервали циклу «нагнітання – зниження» тиску в пневмосистемі при фіксованому значенні витрат стислого повітря, а також залежність оптимального ККД від витрати стислого повітря, споживаного приймачами стислого повітря. Отримано залежності споживання енергії електромеханічною системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування; при двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску; при двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску і встановленими обмеженнями.

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

Аннотация. Обоснованы оптимальные параметры математической модели, позволяющие определять оптимальный режим работы системы производства и распределения сжатого воздуха, состоящей из следующих элементов "электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть". Определены

интервалы цикла «нагнетание – снижение» давления в пневмосистеме при фиксированном значении расхода сжатого воздуха, а также зависимость оптимального КПД от расхода сжатого воздуха, потребляемого приемниками сжатого воздуха. Получены зависимости потребления энергии электромеханической системой за один час при классическом двухпозиционном методе управления; при двухпозиционном методе управления с оптимальным верхним уровнем давления; при двухпозиционном методе управления с оптимальным верхним уровнем давления и установленными ограничениями.

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

Abstract. The optimal parameters of the mathematical model that allow to determine the optimum operating mode of the compressed air production and distribution system consisting of the following elements "electric network - drive - compressor - pneumatic network" are substantiated in the work. The intervals of the pump pumping-down cycle in the pneumatic system are determined at a fixed value of compressed air consumption, and the dependence of the optimum efficiency on the compressed air consumption consumed by the compressed air receivers is determined. The dependences of energy consumption by an electromechanical system for one hour are obtained for the classical two-position control method; with a two-position control method with an optimum upper pressure level; with a two-position control method with the optimum upper pressure level and the established limitations.

Keywords: electric, control, compressor, electromechanical system.

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

Підвищення енергоефективності системи "електрична мережа – привід – компресор – пневмомережа" в цілому можна досягти, виконавши "плаваючим" верхній рівень тиску. В роботі [1] введено критерій економічності для системи керування і визначення значення верхнього рівня тиску на одному циклі нагнітання, зниження 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. Розглянемо особливості реалізації цієї математичної моделі. При створенні моделі були прийняті допущення, описані в роботі [3], що враховують мету моделювання – отримання оптимального значення максимального верхнього рівня тиску в пневмосистем $P_{max\ opt}$ і відповідного максимуму цільової функції (ККД) при різних фіксованих витратах стислого повітря пневмоприймачами Q_{potr} . Отримані значення можуть бути реалізовані в системі регулювання виробництва стислого повітря з певною точністю (до 10% від розрахункових значень).

Постановка задачі. У сформульованій оптимізаційній задачі цільова функція є нелінійною, а значить має місце задача нелінійного програмування. Найчастіше при розв'язанні задач такого типу часто використовуються чисельні методи пошуку екстремуму. Для цього спочатку задають початкові значення параметрів, що оптимізуються, визначають допустиму область їх існування, використовуючи відомі алгоритми, та знаходять оптимальні значення. Існують методи нульового, першого і другого порядків. Вони відрізняються порядком використовуваної при пошуку екстремуму похідною цільової функції. На практиці широке застосування набули методи, що не враховують похідні від цільової функції, тобто нульового порядку. У цих методах спочатку розраховують значення цільової функції, а вибір напрямку руху в процесі пошуку екстремуму здійснюється за результатами порівняння цих значень на суміжних кроках ітераційного процесу.

Підставами для вибору методів пошуку екстремуму є кількість параметрів, що оптимізуються складність обчислення цільової функції та її похідних, швидкодія використовуваної комп'ютерної техніки, а також наявність відповідного програмного забезпечення.

Розв'язування задачі. Сформульована оптимізаційна задача відноситься до числа складних з великим об'ємом обчислень. Хоча у цільовій функції присутній один параметр, що оптимізується, однак її значення розраховуються за порівняно складними аналітичними залежностями. Слід зазначити також змінний характер збільшення тиску в пневмосистемі на циклі «накачування-спуску». Цей факт значно ускладнює розв'язання поставленої задачі. Крім того, в отриманих аналітичних залежностях відсутні змінні, виражені в неявному вигляді. У такому разі задача ускладнюється через те, що виникає необхідність розв'язання нелінійних трансцендентних і їм подібних рівнянь, що мають складну структуру. Особливістю сформульованої задачі є порівняно вузька область припустимих значень параметра, що оптимізується; це обумовлено наявністю встановлених обмежень. Обмежена область існування параметра, що оптимізується, $P_{max\ opt}$ і порівняно незначні вимоги до точності його визначення (для інженерних розра-

хунків, пов'язаних з проектуванням пристроїв, їх налагодженням, допустима похибка дорівнює 10%) дозволили вибрати варіант пошуку екстремуму цільової функції безпосереднім перебором параметра $P_{\max opt}$ при фіксованому значенні витрати стислого повітря пневмоприймачем Q_{potr} (метод сканування) і обчисленням відповідних значень $F_{opt}(X)$. Оптимальний параметр відповідає максимальному значенню цільової функції. При виборі кроку зміни $P_{\max opt}$ необхідно дотримуватися необхідної точності розрахунку цих параметрів. Особливо важливо, що метод сканування дозволяє здійснити пошук глобального екстремуму цільової функції. Це є досить важливою перевагою в певних випадках, пов'язаних з наявністю декількох екстремумів.

Для обґрунтування параметрів базової моделі пояснимо необхідність її застосування. Оскільки в електромеханічній системі присутні елементи, які використовують різні види енергії: електричну, механічну і енергію стислого повітря, то звести усі їх параметри до єдиного знаменника в загальному вигляді буде важко. І таке рішення не буде адекватно відображати енергетичні процеси, що відбуваються в електромеханічній системі через необхідність введення додаткових обмежень і припущень. Тому пропонується використовувати базову модель з параметрами, описаними в роботі [5]. Надалі це спростить задачу порівняльного аналізу енергетичних показників електромеханічних систем з різними типами повітряних поршневих компресорів, подаючи результати досліджень у відносних одиницях.

Розрахунок параметрів режимів роботи базової моделі електромеханічної системи проводиться при заданих вихідних даних, враховуючи, що раніше були визначені елементи з найбільшими ваговими втратами енергії – «привід – компресор» і пневмомережа. В роботі [5] наведені і описані залежності, покладені в основу базової моделі.

Вираз для ККД залежно від тиску P_2 з урахуванням проведених випробувань і певних припущень має такий вигляд:

$$\eta = \frac{t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{komp1} \cdot \left(\left(\frac{P_{2+i}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{mex} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{priv}} - t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{komp1} \cdot \left(\left(\frac{P_{2+i}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{mex} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{priv}} + \left(-t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{komp1} \cdot \left(\left(\frac{P_{2+i}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{mex} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{priv}} - \sum_{i=0}^m P_{2+i} \cdot \left(B_0 + B_1 \cdot e^{-\frac{P_{2+i}}{B_2}}\right)\right)}{\left(2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{komp1} \cdot \left(\left(\frac{P_{2+i}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{mex} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{priv}}\right)^2 + t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 3 \cdot r_0 \cdot l \cdot \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}} + \frac{-t_1 \cdot \sum_{i=0}^m P_{2+i} \cdot \left(C_0 + C_1 \cdot e^{-\frac{P_{2+i}}{C_2}}\right) - t_2 \cdot \sum_{i=m}^k P_{2+i} \cdot \left(C_0 + C_1 \cdot e^{-\frac{P_{2+i}}{C_2}}\right)}{\frac{1}{t_{pusk}} 3r_0 l \int_0^{t_{pusk}} I_n^2(t) dt}} \quad (1)$$

де r_0 - питомий опір провідника Ом/км; l - довжина лінії, км; t_1 - тривалість увімкненого стану компресора, год; P_1 – атмосферний тиск, Па; Q_{komp1} – об'ємна продуктивність за умов всмоктування, м³/с; n – показник політропи, для поршневих компресорів; η_{priv} – ККД двигуна; η_{pol} – індикаторний ККД, політропного процесу стиснення; η_{mex} – механічний ККД, що враховує втрати тертя кривошипно-шатунного механізму і поршня компресора; U – напруга мережі живлення; P_2 – тиск у пневмомережі, Па; m – кількість ітерацій при збільшенні тиску; B_0, B_1, B_2 – розрахункові коефіцієнти продуктивності компресора; C_0, C_1, C_2 – розрахункові коефіцієнти втрат стислого повітря в пневмомережі; t_2 – тривалість вимкненого стану компресора, год; k – загальна кількість ітерацій.

Наступним етапом розрахунку є визначення часу циклу «нагнітання – зниження» тиску в пневмосистемі при фіксованому значенні витрати стислого повітря. Знати тривалість інтервалу «ниження – нагнітання» тиску T_{hc} необхідно для знаходження значення кількості пусків в годину приводу поршневої компресорної установки, оскільки в математичній моделі введено обмеження за кількістю запусків на годину, виходячи з температурного режиму роботи асинхронного приводу.

Далі визначаються залежності максимального оптимального верхнього рівня тиску від витрати споживаного приймачами стислого повітря $P_{max\ opt} (Q_{potr})$, оптимального ККД від витрати стислого повітря $ККД_{opt} (Q_{potr})$, а також часу циклу і кількості пусків в годину від витрати стислого повітря. Ці залежності наведені на рис. 1, 2. Необхідність таких розрахунків обумовлена тим, що витрата стислого повітря, споживаного пневмоприймачами Q_{potr} , є незалежною змінною величиною.

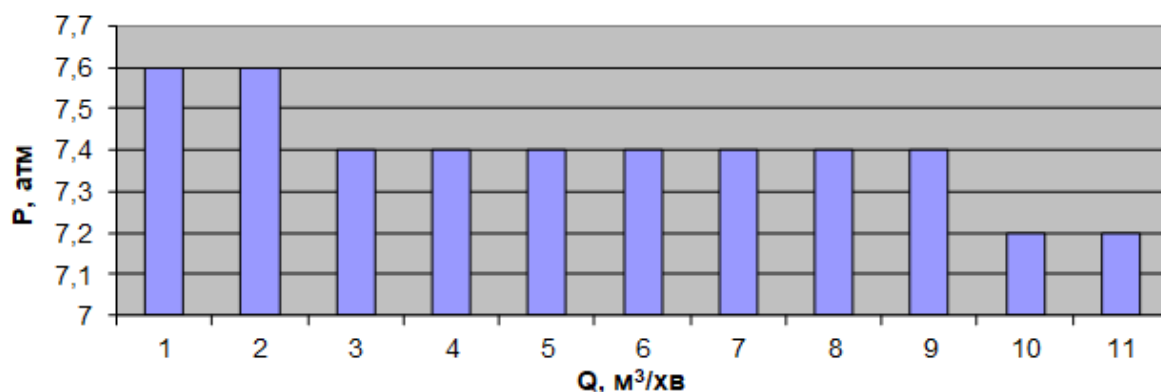


Рис. 1 Залежність оптимального верхнього рівня тиску від витрати стислого повітря, споживаного приймачами стислого повітря

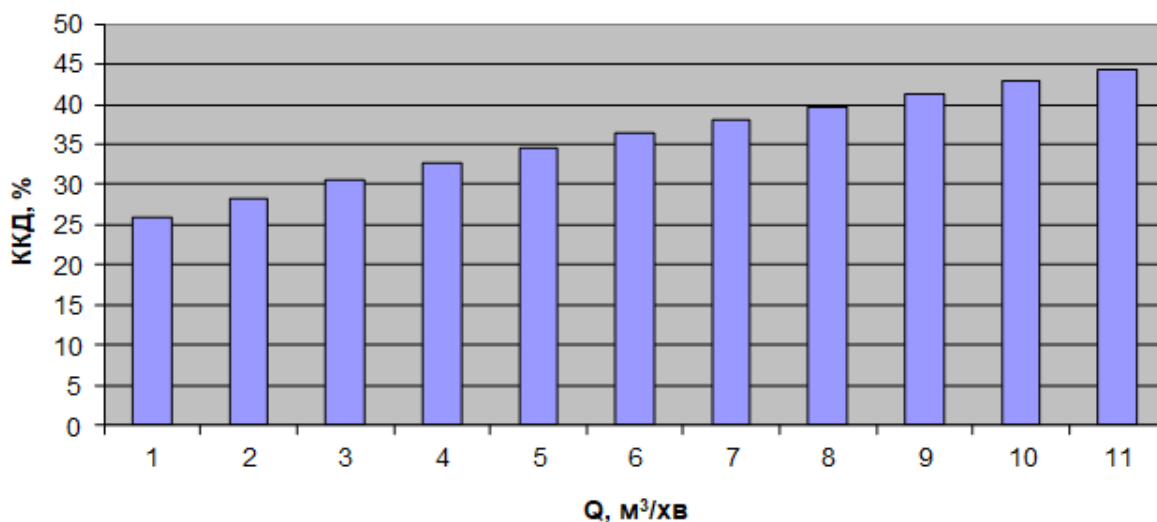


Рис. 2 Залежність оптимального ККД від витрати стислого повітря, споживаного приймачами стислого повітря

У результаті моделювання параметрів режиму роботи електромеханічної системи отримано три залежності: споживання енергії електромеханічної системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування; при двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску; при двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску і встановленими обмеженнями. Ці залежності розглянуті на рис. 3 – 5 для витрати стислого повітря 7 м³/хв. Необхідно підкреслити, що всі залежності побудовані для однієї, спочатку заданої витрати стислого повітря Q_{potr} .

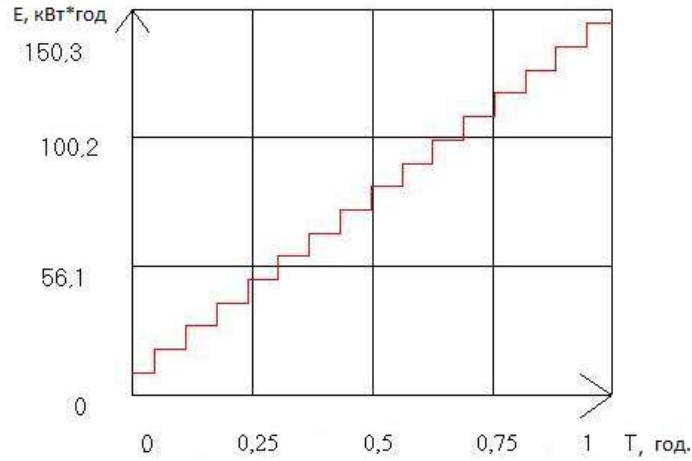


Рис. 3 Залежність споживання електроенергії електромеханічною системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування

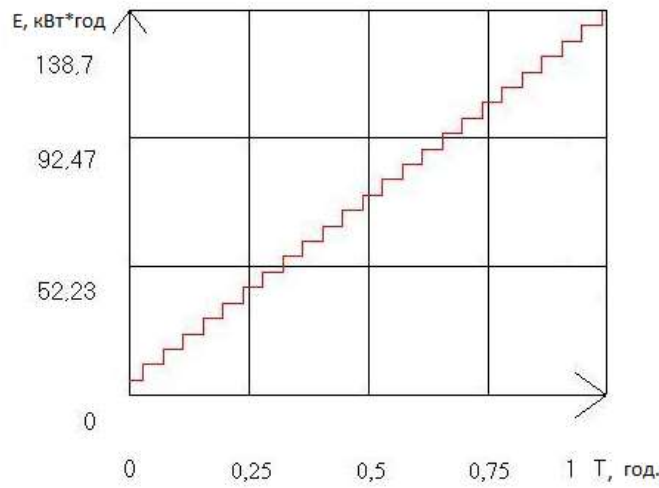


Рис. 4 Залежність споживання електроенергії електромеханічною системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску

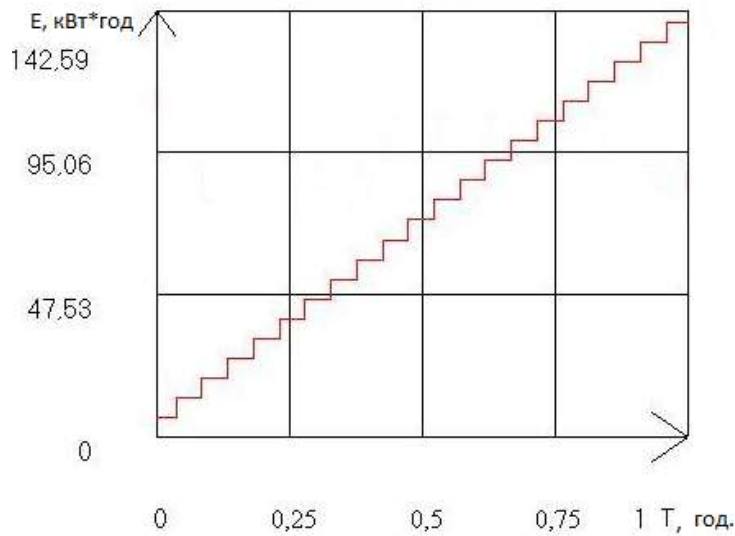


Рис. 5 Залежність споживання електроенергії електромеханічною системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску і встановленими обмеженнями

При порівнянні значень (Таб. 1) кількості електроенергії, споживаною електромеханічною системою за одну годину, з класичним двопозиційним керуванням і двопозиційним керуванням з оптимальним верхнім рівнем тиску бачимо, що економія електроенергії становить від 0,76% до 13,50% для різних витрат стислого повітря. Чітко простежується тенденція: зі збільшенням споживання стислого повітря пневмоприймачами зростає різниця між цими двома методами керування. Це пояснюється тим, що інтервал нагнітання при великих витратах стислого повітря набагато (до 10 разів) більше періоду зниження тиску в пневмосистемі, а тому велика частина втрат енергії в електромеханічній системі відбувається саме на інтервалі нагнітання тиску. Отже, при використанні оптимального верхнього рівня тиску істотно знижуються як тривалість підвищення тиску в пневмосистемі, так і втрати енергії в електромеханічній системі.

Таблиця 1 Залежність споживання електроенергії електромеханічною системою за одну годину, при різних методах керування

Класичне двопозиційне керування, кВт·год	Двопозиційне керування з оптимальним верхнім рівнем тиску, кВт·год	Різниця у відсотках	Класичне двопозиційне керування, кВт·год	Двопозиційне керування з оптимальним верхнім рівнем тиску і обмеженнями за кількістю пусків, кВт·год	Різниця у відсотках
94,7	86,5	8,66%	94,7	94,7	0,00%
100,3	95,9	4,39%	100,3	100,3	0,00%
105	96,4	8,19%	105	104,2	0,76%
111,2	101,2	8,99%	111,2	109,8	1,26%
116,8	108,7	6,93%	116,8	113,5	2,83%
122,1	113,5	7,04%	122,1	117,5	3,77%
128,1	118,2	7,73%	128,1	121,5	5,15%
134,1	123,6	7,83%	134,1	125,5	6,41%
140,5	129,2	8,04%	140,5	129,2	8,04%
147,7	130,7	11,51%	147,7	132,8	10,09%
157	135,8	13,50%	157	135,8	13,50%

При порівнянні значень кількості електроенергії, спожитої при класичному двопозиційному керуванні і двопозиційному з оптимальним верхнім рівнем тиску та обмеженнями за кількістю пусків бачимо, 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 більше витрата стислого повітря, тим більше час циклу і менша кількість пусків привідного двигуна за годину. Відповідно, справедливо і зворотне твердження. Слід зазначити, що система керування електроспоживанням 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.

У результаті реалізації розробленої математичної моделі отримані оптимальні значення максимального верхнього рівня тиску в пневмосистемі $P_{\max opt}$, відповідного максимуму цільової функції (ККД), при різних фіксованих витратах стислого повітря пневмоприймачами Q_{potr} в встановлених обмеженнях.

Висновки. Отримані оптимальні значення максимального верхнього рівня тиску в пневмосистемі $P_{\max opt}$, відповідного максимуму цільової функції (ККД), при різних фіксованих витратах стислого повітря пневмоприймачами Q_{potr} і встановлених обмеженнях. Розрахунок значень ККД при оптимальних параметрах режиму свідчить про те, що зростання витрат стислого повітря супроводжується підвищенням ККД системи "електрична мережа – привід – компресор – пневмомережа" в цілому.

Пропонований варіант регулювання з «плаваючим» верхнім рівнем тиску забезпечує зменшення витрат електричної енергії, споживаної розглянутою електромеханічною системою. У зіставленні з класичним двопозиційним регулюванням економія досягається в межах 1 ... 13% в залежності від значень витрат стислого повітря, споживаного пневмоприймачами.

Список літератури

1. Бобров А.В. Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров. Технічна електродинаміка. -№3.-2004.- с.70-71.
2. Бобров О.В. Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса / О.В. Бобров // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Наук.-виробн. журнал. – Кременчук: КНУ, 2011.-Вип. 4. (16). – С. 124.
3. Бобров А.В., Безкровный В.О. Допущения и ограничения в расчете кпд электромеханической системы «электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть» / Бобров А.В., Безкровный В.О. // Молодь: наука та інновації 2016: 4-та Всеукраїнська науково-практична конференція. (6-7 грудня 2016 р., Дніпро): тез. Доп. / М-во освіти і науки України ; Нац. Гірн. Ун-т.; ПНЦ НАН України – Д., 2016. – С.11-8 – 11-10.
4. Бобров О.В. Оптимізація режиму роботи електромеханічної системи виробництва та розподілу стислого повітря: дис. ... канд. тех. наук : спец. 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи"/ М-во освіти і науки України, ДВНЗ "Нац. гірн. ун-т".- Дніпропетровськ, 2015.- 166 с.
5. Бобров А.В. Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса: Т.1. Материалы междунар. молодёжной науч.-техн. конф. "Энергосистема и активные адаптивные электрические сети: проектирование, эксплуатация, образование", 21–25 ноября 2011 г. – Самара: СамГТУ, 2011. – 423 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК 621.833

Д.О. Федін, канд. техн. наук, Б.В. Виноградов, докт. техн. наук

(Україна, м. Дніпро, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет»)

ПАРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИВОДА БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ

***Анотація.** Приведено літературний огляд математичних моделей динаміки механічних систем приводів барабаних млинів. Запропоновано загальну еквівалентну динамічну модель механічної системи приводу барабанного млина з урахуванням як крутильних, так і поперечних коливань елементів приводу. Встановлено, що загальна динамічна модель механічної системи приводу барабанного млина може бути поділена на дві парціальні моделі: високочастотну та низькочастотну. Показано, що при визначенні власних частот коливань механічної системи приводу барабанного млина необхідно враховувати поперечні коливання приводної шестерні. Показано, що похибка визначення власних частот механічної системи приводу барабанного млина при дослідженні парціальних моделей не перевищує 5%.*

***Ключові слова:** привод, барабанний млин, коливання, власна частота.*

***Аннотация.** Приведен литературный обзор математических моделей динамики механических систем барабанных мельниц. Предложено общую эквивалентную динамическую модель механической системы привода барабанной мельницы с учетом как крутильных, так и поперечных колебаний элементов привода. Установлено, что общая динамическая модель механической системы привода барабанной мельницы может быть разделена на две модели: высокочастотную и низкочастотную. Показано, что при определении собственных частот механической системы привода барабанной мельницы необходимо учитывать поперечные колебания приводной шестерни. Показано, что погрешность определения собственных частот механической системы привода барабанной мельницы при исследовании парциальных моделей не превышает 5%.*

***Ключевые слова:** привод, барабанная мельница, колебания, собственная частота.*

***Abstract.** The critical review of mathematical models of mechanical systems of tumbling mill drives is presented. The general equivalent dynamical model of mechanical systems of tumbling mill drive is suggested. It is found out that general equivalent dynamical model of mechanical systems of tumbling mill drive can be separated into low-frequency and high-frequency models. It is shown that it is necessary to consider transverse oscillations of drive pinion while natural frequencies of mechanical systems of tumbling mill drive are considering. It is shown that when partial systems are determined the error of determination of natural frequency of mechanical system of tumbling mill drive is up to 5%.*

***Keywords:** drive, tumbling mill, vibration, natural frequency.*