

Міністерство освіти і науки України
ДВНЗ «Національний гірничий університет»

Бобров Олексій Володимирович

УДК 621.3.078.4:621.512

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ
СИСТЕМИ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ СТИСЛОГО ПОВІТРЯ**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі систем електропостачання ДВНЗ «Національного гірничого університету» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Випанасенко Станіслав Іванович,

професор кафедри систем електропостачання ДВНЗ

«Національний гірничий університет»

(м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Дубинець Леонід Вікторович,

професор кафедри електротехніки та електромеханіки

Дніпропетровського національного університету

залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна

Міністерства освіти і науки України

кандидат технічних наук, доцент

Алексієвський Дмитро Геннадійович

доцент кафедри електронних систем Запорізької

державної інженерної академії Міністерства освіти і науки

України

Захист відбудеться ” ___ ” _____ 2015 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному ВНЗ „Національний гірничий університет” (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного ВНЗ „Національний гірничий університет” Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

Автореферат розіслано ” ___ ” _____ 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.080.07

О.В. Остапчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення споживачів стислим повітрям відноситься до енергоємних процесів, при цьому коефіцієнт корисної дії (ККД) компресорних установок у системах розподілу стислого повітря залишається достатньо низьким, що визначає високу вартість виробництва стислого повітря.

Особливе місце посідають системи забезпечення стислим повітрям, побудовані на базі компресорних установок поршневого типу. Це, як правило, широко поширені системи невеликої продуктивності, що містять одну компресорну установку і мало розгалужену розподільну мережу. Регулювання продуктивності компресора здійснюється шляхом управління його електроспоживанням. Ці установки, як і інші аналогічного призначення, мають низьку енергоефективність, що обумовлена істотними втратами енергії, тому виникає необхідність зниження рівня втрат з урахуванням всіх стадій процесу. Застосування системного підходу до вирішення завдання підвищення енергоефективності процесу виробництва та розподілу стислого повітря передбачає використання як критерій енергоефективності – ККД електромеханічної системи в цілому. Ураховуючи те, що режими роботи елементів системи (мережа живлення, електропривод, компресор, пневмомережа) взаємообумовлені, необхідно дослідити зв'язки між параметрами режиму і параметрами системи, які безпосередньо впливають на показник енергоефективності. Встановлення існуючих зв'язків дозволить визначити оптимальні режими роботи системи і забезпечити їх реалізацію застосуванням нового підходу до управління електроспоживанням компресора. Реалізація такого підходу і визначає актуальність дисертації.

Таким чином, **наукова задача** дослідження полягає у встановленні залежності, що існує між параметрами режиму роботи електромеханічної системи та її ККД, визначенні оптимального режиму та умов його реалізації шляхом управління електроспоживанням компресора.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, проведених автором протягом 2008-2013р.р. Робота відповідає закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», особливо п.6 ст.7 «Новітні технології і ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і агропромисловому комплексі» і спрямованості тематики науково – дослідницьких робіт є частиною держбюджетної НДР.

Дослідження за темою дисертації виконані автором відповідно планів науково-дослідних робіт ДВНЗ «Національний гірничий університет»: «Обґрунтування енергоресурсозберігаючих режимів і принципів керування електроенергетичними комплексами гірничо-металургійних підприємств» (№ держреєстрації 0108U000539).

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності електромеханічної системи виробництва і розподілу стислого повітря шляхом удосконалення методу управління електроспоживанням компресорної установки.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- встановити залежності, які пов'язують параметри режиму окремих елементів системи та дозволяють оцінити рівні втрат енергії;
- визначити перелік регульованих параметрів, що мають істотний вплив на ККД системи в цілому;
- сформулювати задачу параметричної оптимізації режиму роботи системи і створити математичну модель для її вирішення;
- визначити оптимальні параметри і розробити спосіб управління електроспоживанням компресора, що забезпечує їх реалізацію;
- виконати аналіз графіка електричного навантаження, визначити умови компенсації реактивної потужності;
- виконати експериментальні дослідження.

Об'єкт досліджень – процеси в електромеханічній системі виробництва і розподілу стислого повітря.

Предмет досліджень – залежність ККД електромеханічної системи від параметрів режиму роботи, способу управління електроспоживанням компресорної установки поршневого типу.

Методи досліджень : метод параметричної оптимізації (сканування)– для вирішення задачі умовної оптимізації тривалості увімкненого стану компресора на кожному циклі управління, при різних витратах стислого повітря Q ; метод апроксимації початкових даних електромеханічної системи; регресійний аналіз – при побудові нелінійної залежності продуктивності компресора та втрат стислого повітря.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Залежність коефіцієнта корисної дії електромеханічного комплексу виробництва і розподілу стислого повітря від верхнього рівня тиску у ресивері компресора має екстремум, що дозволяє здійснювати управління електроспоживанням компресорної установки, яке забезпечить підвищення енергоефективності процесу.

2. Максимальне значення коефіцієнта корисної дії електромеханічної системи забезпечується зміною верхнього рівня тиску в ресивері компресора на кожному циклі управління його електроспоживанням, що досягається регулюванням тривалості увімкненого стану компресора.

Наукові результати дослідження:

1. Взаємна зумовленість режимів роботи окремих елементів електромеханічної системи (електричної мережі живлення, електропривода, компресора, системи розподілу стислого повітря) є передумовою вибору параметрів режиму, що значною мірою впливають на рівень втрат енергії в системі в цілому. Встановлено, що такими параметрами є витрати стислого повітря пневмоприймачами та верхній рівень тиску в ресивері компресора.

2. Отримана математична модель для розрахунку ККД електромеханічної системи за відомими значеннями параметрів режиму, яка відрізняється від відомих моделей тим, що враховує втрати енергії у всіх її елементах і орієнтована на визначення ККД за цикл управління

електроспоживанням компресора. Математична модель є основою для визначення оптимальних параметрів режиму роботи системи.

3. Вперше сформульована і вирішена задача параметричної оптимізації режиму роботи електромеханічної системи. За цільової функції запропоновано значення ККД системи, розраховане у кожному циклі управління електроспоживанням компресора. Введено обмеження за допустимою кількістю увімкнень електродвигуна за заданий проміжок часу та значення тиску повітря в пневмережі.

4. Доведено, що із зростанням витрат пневмоприймачами стислого повітря ступінь зростання ККД системи в порівнянні з традиційним методом управління електроспоживанням компресора збільшується, що забезпечує високу енергоефективність системи в режимі номінального навантаження.

Практичні результати дослідження:

1. Створено спосіб управління електроспоживанням компресорної установки, що дозволяє на основі мінімальної кількості контрольованих параметрів (рівень тиску в ресивері компресора та швидкість його зміни) визначати моменти увімкнення та вимикання компресора, реалізація яких приводить до зміни графіка електричного навантаження та підвищення ККД системи в цілому.

2. Розроблено алгоритм управління електроспоживанням компресора, який відтворює принцип визначення витрат стислого повітря на основі вимірювання швидкості зміни тиску в його ресивері, та дозволяє прогнозувати тривалість циклу управління.

Впровадження способу та алгоритму управління дозволило реалізувати систему з мінімальною кількістю контрольованих параметрів, що здатна ефективно реагувати на зміну витрат стислого повітря та забезпечувати суттєве підвищення енергетичної ефективності.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій зумовлена відповідністю припущень, прийнятих у математичних моделях, завданням моделювання та умовам експлуатації повітряних поршневих компресорних установок; вибором прийнятних методів моделювання електромеханічних процесів і підтверджується результатами співставлення теоретичних і експериментальних досліджень, де похибка розрахунку параметрів режиму не перевищує 3 %.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні матеріали і результати, одержані в дисертаційній роботі, доповідались і були схвалені на науково-технічних конференціях: п'ята Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2007 р.); Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Энергосистема и активные адаптивные электрические сети: проектирование, эксплуатация, образование» (м. Самара, 2011 р.); третя Міжнародна науково-практична конференція «Энергоэффективность и энергосберегающие технологии ГВУЗ «НГУ» (м. Днепропетровськ, 2011 р.); четверта Всеукраїнська науково-практична конференція «Наукова весна» (м. Днепропетровськ, 2011 р.).

Публікації. Основні положення й результати роботи опубліковано в 14 друкованих працях, з них 9 – статей у фахових виданнях (з них 1 у виданні, що входить до міжнародних науко метричних баз), 5 – матеріали наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Повний обсяг дисертації становить 166 сторінки друкованого тексту, до складу яких входять 156 сторінок основної частини, що складається зі вступу, 5 розділів і 9 висновків роботи; списку використаних джерел з 73 найменувань на 7 сторінках, 3 додатків на 10 сторінках, 51 рисуноків, 15 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і наукову задачу, визначено об'єкт та предмет дослідження, наукову новизну та практичну цінність, наведено відомості щодо апробацій роботи і публікацій.

У **першому розділі** розглянуто особливості режимів роботи елементів електромеханічної системи. Проаналізовані способи регулювання параметрів режиму комплексу виробництва та розподілу стислого повітря, а також втрати енергії в його елементах.

Висока енергоємність процесу перетворення електричної енергії в енергію стислого повітря зумовлена рядом важливих факторів. Рівень втрат енергії в елементах системи, який залежить, перш за все, від особливостей їх конструктивного виконання та режиму роботи. Також слід зазначити, що конструктивні рішення існуючих компресорних установок, які використовуються для побудування систем розподілу стислого повітря, не забезпечують високе значення ККД системи і потребують удосконалення. Крім того, необхідно удосконалювати існуючі способи управління електроспоживанням компресорних установок з метою підвищення енергоефективності протікаючих процесів.

Виходячи з аналізу наукових робіт, що присвячені визначенню рівня втрат енергії в окремих елементах системи, можна зробити висновок, що вони в своїй більшості стосуються визначення втрат, пов'язаних зі зміною механічних параметрів. Режими роботи електричної частини системи або не аналізуються, або цей аналіз здійснюється у спрощеному вигляді з введенням низки суттєвих припущень. Інша особливість відомих у цій області робіт полягає у тому, що визначення енергоефективних режимів здійснюється без урахування режимних зв'язків окремих ланок достатньо складної системи (електричної мережі живлення, компресора, системи розподілу стислого повітря). Тому оптимальні режими роботи, визначені для окремих ланок, не можуть вважатися оптимальними для системи в цілому. Існує необхідність оптимізації режимів роботи цієї системи з метою забезпечення максимальної енергоефективності. Виходячи з того, що енергетична ефективність процесу значною мірою залежить від способу регулювання продуктивності компресора, розглянуті переваги та недоліки найбільш поширених способів регулювання, пов'язаних

як із застосуванням механічних пристроїв, так і способів управління електроспоживанням компресора.

В дисертаційній роботі розглядаються системи виробництва стислого повітря, що побудовані на основі повітряних компресорів поршневого типу. Ці компресори широко використовуються в промисловості та сільському господарстві завдяки своїй здатності вирішувати значне коло існуючих завдань, простоті конструкції та високій надійності. Як правило для них застосовують двопозиційне регулювання продуктивності компресора, що передбачає періодичне увімкнення компресора з метою підвищення тиску в ресивері. У процесі споживання стислого повітря тиск змінюється в межах між максимальним P_{\max} та мінімальним P_{\min} значеннями. Прийнятні межі тиску P_{\min} та P_{\max} визначаються, виходячи із технічних характеристик споживачів стислого повітря. Зрозуміло, що такий спосіб регулювання продуктивності компресора зумовлений необхідністю забезпечення експлуатаційних характеристик споживачів і не спрямований на підвищення енергоефективності процесу, тому удосконаленням традиційного способу управління електроспоживанням компресора є використання нових технічних рішень, що спрямовані на зменшення втрат енергії.

У **другому розділі** здійснюється аналіз рівня втрат енергії в елементах електромеханічної системи з метою:

- визначення переліку параметрів режиму, що мають істотний вплив на ККД системи в цілому;
- встановлення аналітичних залежностей, між рівнями втрат енергії в окремих ланках системи з визначеними параметрами режиму.
- кількісної оцінки втрат в окремих елементах системи, яка дозволить визначити найбільш енергоємні складові загальних втрат енергії.

Аналіз свідчить: основними параметрами, що суттєво впливають на рівні втрат енергії у всіх елементах системи є значення тиску в ресивері компресора P_2 та рівень споживання стислого повітря пневмоприймачами Q . Значення Q залежить від рівня навантаження пневмережі і тому може розглядатися як параметр, що не підлягає регулюванню. Рівень P_2 може бути змінним в процесі управління електроспоживанням компресора і тому може вважатися регульованим параметром.

В роботі встановлені аналітичні залежності, що пов'язують рівні втрат енергії в окремих елементах системи з параметрами режиму при двопозиційному (увімкнено, вимкнено) регулюванні продуктивності компресора. При визначенні залежностей використані наступні припущення:

- напруга живлення асинхронного двигуна незмінна $U = \text{const}$;
- ККД асинхронного двигуна приводу компресорів в процесі роботи залишається практично незмінним;
- вплив температур всмоктування повітря на споживану потужність вважається неістотним;

- розрахунок параметрів режиму проводиться при температурі $T_1 = 20^{\circ}\text{C}$.

Визначені наступні складові втрат:

- втрати активної енергії в електричній мережі:

$$\Delta \dot{A}_{y.i.} = t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 3 \cdot r_0 \cdot l \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(\frac{n}{n-1} \right) \cdot P_1 \cdot Q_{\text{компл}} \cdot \left(\left(\frac{P_{2i+1}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пол}} \cdot \eta_{\text{мех}}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \right]^2, \quad (1)$$

де r_0 - питомий опір провідника Ом/км; l - довжина лінії, км; t_1 - тривалість увімкненого стану компресора, год; P_1 - атмосферний тиск, Па; $Q_{\text{компл}}$ - об'ємна продуктивність за умов всмоктування, м³/с; n - показник політропи, для поршневих компресорів; $\eta_{\text{дв}}$ - ККД двигуна; $\eta_{\text{пол}}$ - індикаторний ККД, політропного процесу стиснення; $\eta_{\text{мех}}$ - механічний ККД, що враховує втрати тертя кривошипно-шатунного механізму і поршня компресора; U - напруга мережі живлення; P_2 - тиск в пневмережі, Па; m - кількість ітерацій при збільшенні тиску.

- втрати енергії в асинхронному двигуні і компресорній установці:

$$\Delta \dot{A}_{\text{д.а.д.}} = t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1} \right) \cdot P_1 \cdot Q_{\text{компл}} \cdot \left(\left(\frac{P_{2i+1}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пол}} \cdot \eta_{\text{мех}}} - t_1 \cdot \sum_{i=0}^m P_{2i+1} \cdot \left(B_0 + B_1 \cdot e^{\frac{-P_{2i+1}}{B_2}} \right), \quad (2)$$

де B_0, B_1, B_2 - розрахункові коефіцієнти продуктивності компресора;

- втрати енергії в системі трубопроводів стислого повітря, за час накачування стислого повітря:

$$\Delta \dot{A}_{\text{т.п.}} = t_1 \cdot \sum_{i=0}^m P_{2i+1} \cdot \left(C_0 + C_1 \cdot e^{\frac{-P_{2i+1}}{C_2}} \right), \quad (3)$$

де C_0, C_1, C_2 - розрахункові коефіцієнти втрат стислого повітря в пневмережі;

- втрати енергії в системі трубопроводів стислого повітря, за час спуску стислого повітря:

$$\Delta \dot{A}_{\text{т.п.}} = t_2 \cdot \sum_{i=m}^k P_{2i+1} \cdot \left(C_0 + C_1 \cdot e^{\frac{-P_{2i+1}}{C_2}} \right), \quad (4)$$

де t_2 - тривалість вимкненого стану компресора, год; k - загальна кількість ітерацій.

Проаналізовані рівні втрат енергії в елементах системи (рис. 1). З наведеного графіку можна зробити висновок, що в умовах експлуатації електромеханічної системи з короткою електричною мережею найбільші значення втрат спостерігаються в пневмережі (відносно загальних втрат у

системі %), дещо менші втрати є в системі «привод-компресор» і незначні втрати існують в електричній мережі.

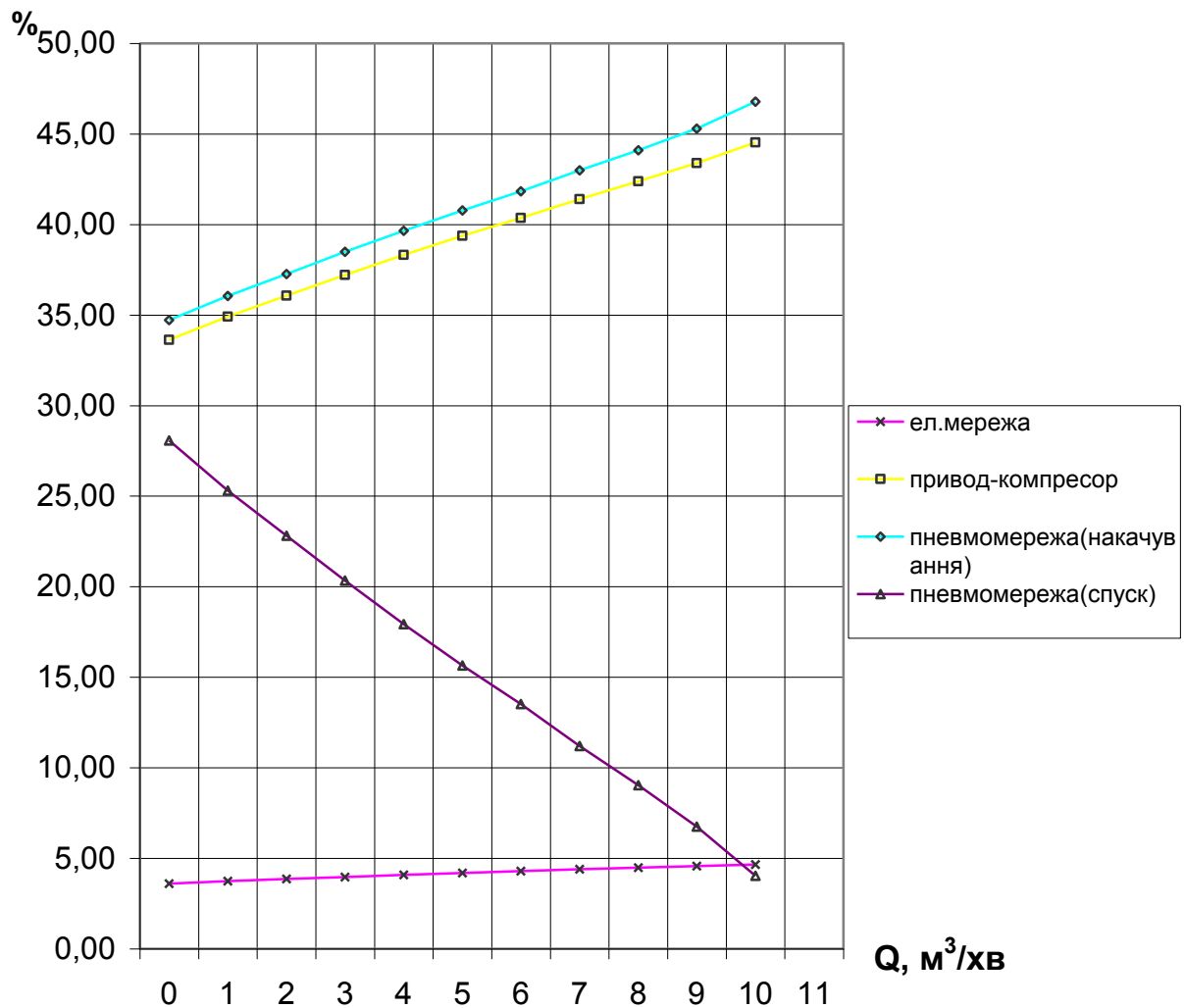


Рис. 1. Графік залежності відносних втрат енергії в елементах електромеханічної системи від рівню споживання стислого повітря Q

В процесі зміни рівня споживання стислого повітря Q існує можливість зміни верхньої межі тиску P_{\max} в ресивері компресора в кожному циклі управління електроспоживанням з метою зниження рівня втрат енергії в системі. Для визначення оптимального рівня P_{\max} необхідно сформулювати та вирішити задачу параметричної оптимізації.

У третьому розділі розроблена математична модель для розрахунку ККД електромеханічної системи, сформульована та вирішена задача оптимізації параметрів режиму при двопозиційному управлінні електроспоживанням компресора.

В роботі створена математична модель, що пов'язує значення ККД (η) електромеханічної системи з регульованим параметром P_{\max} та рівнем споживання стислого повітря Q і підлягає зміні в процесі експлуатації системи. Залежність $\eta(P_{\max}, Q)$ наведена нижче.

$$\begin{aligned}
\eta = & \frac{t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{\text{еїїі}} \cdot \left[\left(\frac{P_{2i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_{\text{іііі}} \cdot \eta_{\text{іііі}} \cdot \eta_{\text{іііі}}}}{t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{\text{еїїі}} \cdot \left[\left(\frac{P_{2i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_{\text{іііі}} \cdot \eta_{\text{іііі}} \cdot \eta_{\text{іііі}}} +} \\
& - t_1 \cdot \left(\sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{\text{еїїі}} \cdot \left[\left(\frac{P_{2i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_{\text{іііі}} \cdot \eta_{\text{іііі}} \cdot \eta_{\text{іііі}}} - \sum_{i=0}^m P_{2i+1} \cdot \left(B_0 + B_1 \cdot e^{\frac{-P_{2i+1}}{B_2}} \right) \right) - \\
& + t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 3 \cdot r_0 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{\text{еїїі}} \cdot \left[\left(\frac{P_{2i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_{\text{іііі}} \cdot \eta_{\text{іііі}} \cdot \eta_{\text{іііі}}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \right)^2 + \\
& - t_1 \cdot \sum_{i=0}^m P_{2i+1} \cdot \left(C_0 + C_1 \cdot e^{\frac{-P_{2i+1}}{C_2}} \right) - t_2 \cdot \sum_{i=m}^k P_{2i+1} \cdot \left(C_0 + C_1 \cdot e^{\frac{-P_{2i+1}}{C_2}} \right) \\
& + \frac{1}{t_{\text{іііі}}} 3r_0 l \int_0^{t_{\text{іііі}}} I_i^2(t) dt
\end{aligned} \tag{5}$$

Максимальне значення тиску в ресивері:

$$P_{\max} = P_{\min} + \sum_{i=0}^m \Delta P_{2i}, \tag{6}$$

де ΔP_{2i} – приріст тиску в ресивері на i -ому кроці ітераційного процесу, Па.

$$m = \frac{t_1}{\Delta t}; k = \frac{t_1 + t_2}{\Delta t}; T_{\text{іііі}} = t_1 + t_2, \tag{7}$$

де Δt – крок ітерації, год; $T_{\text{іііі}}$ – тривалість циклу управління, год.

$$Q = \frac{V}{RT} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta P_{2i}}{\Delta t}, \tag{8}$$

де T – температура повітря, К; R – газова постійна для повітря, Дж/(кг·К); ρ – густина повітря за нормальних умов, кг/м³; V – об'єм пневмопримачів у мережі, м³.

Запропонована модель відрізняється від існуючих можливістю урахування режиму роботи всіх елементів електромеханічної системи для визначення її енергетичного показника – ККД. Таким чином визначено залежність зміни ККД електромеханічної системи від рівня тиску в пневматичній системі P_{\max} в інтервалі його зміни від P_{\min} до $P_{\max \text{ доп}}$, при різних значеннях рівня споживання стислого повітря Q (від 1...11 м³/хв.), рис. 2.

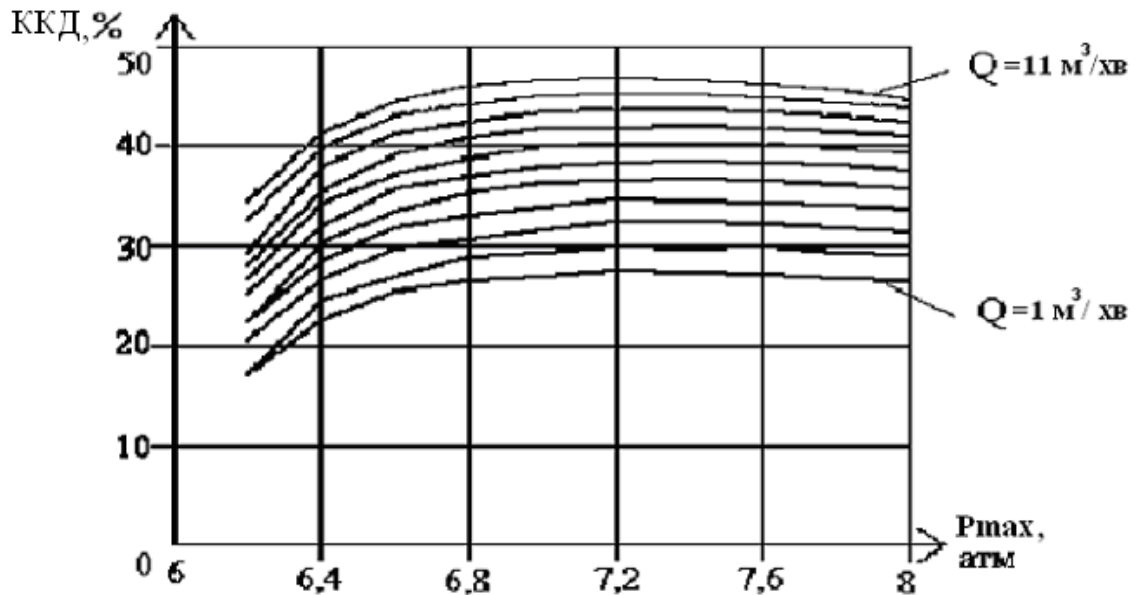


Рис. 2. Залежність ККД електромеханічної системи від рівня тиску в пневматичній системі за різної витраті стислого повітря

З огляду рис. 2. можна зробити висновок, що при значеннях верхньої межі тиску P_{\max} близьких до P_{\min} ККД електромеханічної системи низький через вплив втрат енергії при пуску електродвигуна $\Delta E_{\text{пуск}}(P_2)$. Надалі, із зростанням значення P_{\max} ККД збільшується; це пов'язано із зменшенням втрат енергії в пневматичній мережі $\Delta E_{\text{т.с.}}(P_2)$ в режимі зменшення тиску P_2 . Так продовжується до тих пір, доки ККД не досягне максимуму свого значення. Потім ККД знижується внаслідок збільшення втрат енергії в пневматичній мережі в режимі накачування стислого повітря $\Delta E_{\text{т.н.}}(P_2)$ і в такому елементі, як «привод – компресор».

З побудованої залежності $\eta(P_{\max}, Q)$ видно, що вона має екстремум, а це є передумовою для застосування способу управління електроспоживанням компресора, який забезпечить максимальне значення ККД в кожному циклі двопозиційного управління шляхом регулювання значення верхньої межі тиску P_{\max} .

Для визначення оптимального значення верхньої межі тиску $P_{\max \text{ опт}}$ сформульована і вирішена задача параметричної оптимізації. Обґрунтовано критерій оптимізації. Запропоновано як цільову функцію використати аналітичні залежності ККД системи виробництва стислого повітря від верхньої межі тиску в ресивері (P_{\max}) за кожний цикл двопозиційного керування приводом компресора з забезпеченням максимального значення ККД:

$$\eta(P_{\max}) \rightarrow \max. \quad (9)$$

Оптимізаційна задача вирішується за наявності обмежень. Обмеженнями є граничні межі тиску в ресивері.

$$P_{\min} < P_{\max} \leq P_{\max} \quad (10)$$

Обмежена також кількість пусків приводного асинхронного двигуна за годину.

$$M \leq M_{\max} \quad (11)$$

Пошук екстремуму цільової функції при вирішенні задачі оптимізації здійснюється методом сканування. Отримані оптимальні значення верхнього рівня тиску в пневмережі, що відповідає максимуму цільової функції (ККД системи) при різних фіксованих витратах стислого повітря пневмоприймачами і урахувані встановлених обмежень.

Нижче наведені залежності оптимальних значень тиску $P_{\max \text{ опт}}$ від витрат повітря Q ; а також значень ККД, що відповідають $P_{\max \text{ опт}}$ (рис 3, 4).

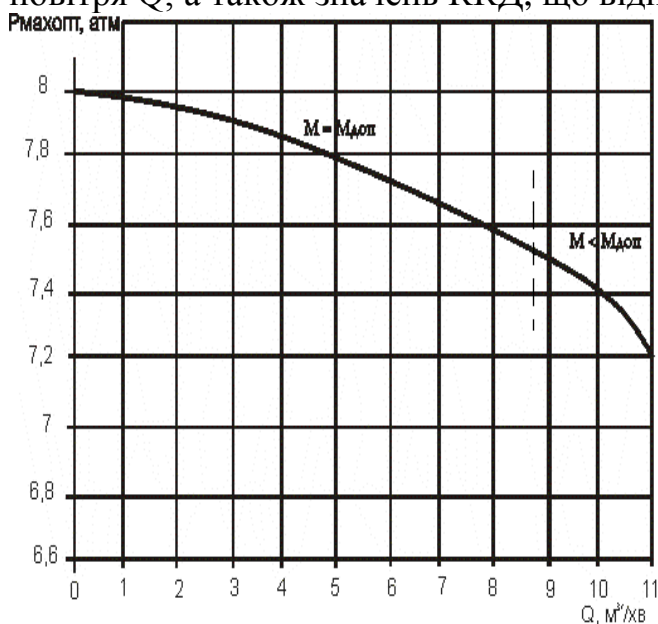


Рис. 3. Залежність оптимального верхнього рівня тиску $P_{\max \text{ опт}}$ від витрат стислого повітря

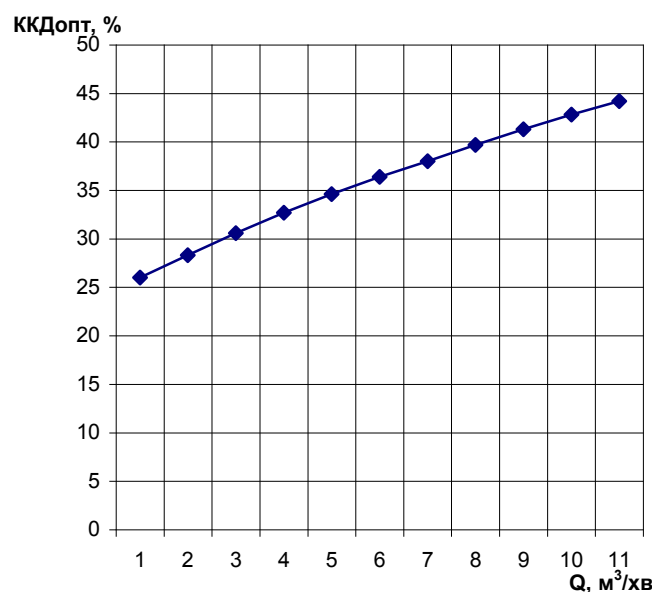


Рис. 4. Залежність ККД системи від витрат стислого повітря Q при оптимальних значеннях $P_{\max \text{ опт}}$

Із залежності на рис. 3 видно, що обмеження за кількістю пусків асинхронного приводу повітряного поршневого компресора є активним при витратах стислого повітря до $9 \text{ м}^3/\text{хв}$. Залежність представлена на рис. 4 показує, що за оптимальних значень тиску ККД системи збільшується при збільшенні витрат стислого повітря Q .

Розв'язання оптимізаційної задачі дозволяє розробити ефективний спосіб управління електроспоживанням компресора.

У **четвертому розділі** запропонований новий спосіб двопозиційного управління електроспоживанням компресора.

Суть запропонованого способу полягає в тому, що в кожному циклі двопозиційного управління електроспоживанням компресора визначають рівень витрат стислого повітря Q і в залежності від його значення

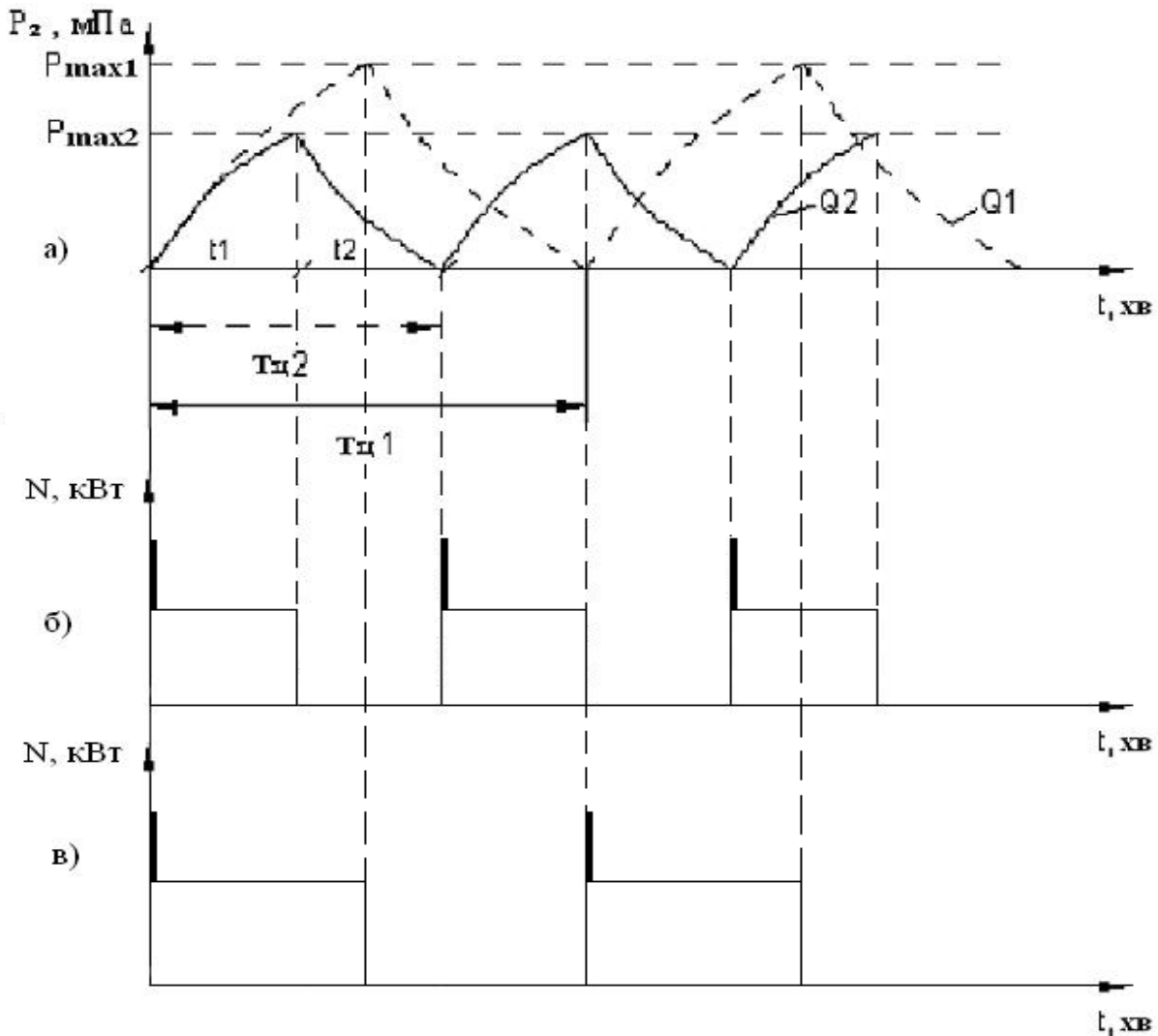


Рис. 5. Залежність тривалості циклу управління електроспоживанням компресора від максимального рівня тиску і витрат стислого повітря, що споживається пневмоприймачами (а), та відповідні графіки електричного навантаження компресора (б) – при $Q = Q_1$, (в) – при $Q = Q_2$.

встановлюється оптимальне значення верхньої межі тиску в ресивері ($P_{\max \text{ опт}}$) і відповідну тривалість увімкненого стану компресора, які забезпечують максимальний рівень ККД (η). Таким чином, відмінність запропонованого способу управління від відомих полягає у тому, що значення тиску P_{\max} для кожного циклу регулювання продуктивності компресора не є постійним, а змінюється, забезпечуючи зміну тривалості увімкненого стану компресора, за рахунок цього досягається максимальне значення ККД. На (рис. 5, а.) наведені

залежності тиску в ресивері P_2 від часу при різних значеннях витрат повітря Q , а на (рис. 5, б, в.) відповідні графіки електричних навантажень.

Із аналізу залежностей (рис. 5, б, в.) можна зробити висновок, що такий спосіб управління супроводжується зміною графіка електричного навантаження компресора.

Зміна значень P_{\max} ($P_{\max 1}$, $P_{\max 2}$) при зміні витрат повітря $Q(Q_1, Q_2)$ призводить до зміни тривалості циклу управління електроспоживанням компресора $T_{\text{ц}}$ ($T_{\text{ц}1}$, $T_{\text{ц}2}$), тому у деяких режимах роботи обмеження за кількістю пусків при розв'язанні оптимізаційної задачі стає активним. Нижче наведені залежності $t_1(Q)$, $t_2(Q)$ при оптимальних значеннях тиску $P_{\max \text{ опт}}$ (рис. 6, 7).

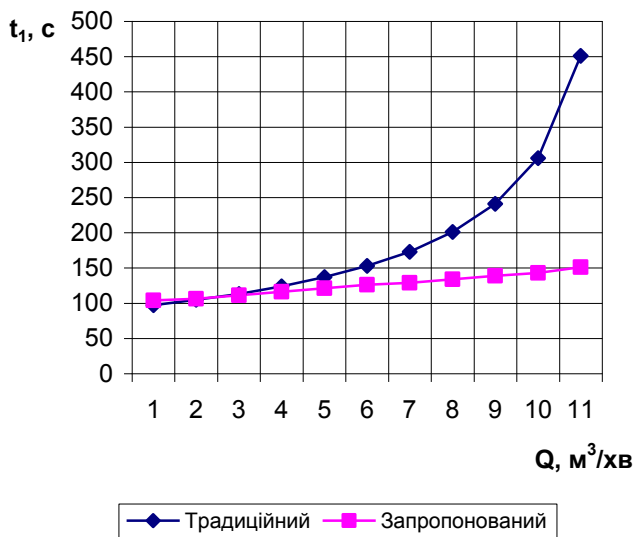


Рис. 6. Залежність тривалості увімкненого стану компресора від витрат стислого повітря

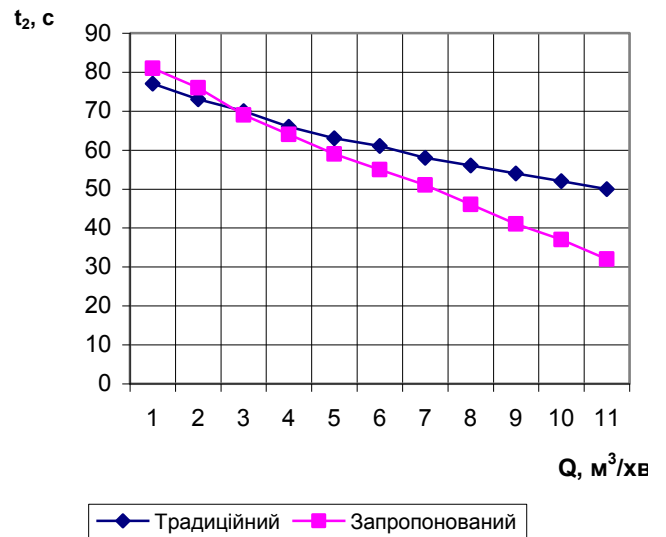


Рис. 7. Залежність тривалості вимкненого стану компресора від витрат стислого повітря

Аналіз залежностей показав, що із зростанням витрати повітря Q , час увімкненого і вимкненого стану компресора в співставленні з традиційним способом зменшуються. Графік електричного навантаження (ГЕН) має нециклічний характер.

Аналіз ГЕН, виконаний у дисертаційній роботі, свідчить про те, що зі зростанням витрат стислого повітря коефіцієнт заповнення графіка за активною потужністю ($K_{з,а}$), зменшується (у співставленні з традиційним способом керування). Відношення цих коефіцієнтів характеризує ступінь зменшення середнього значення активної потужності. При максимальному обсязі витрат стислого повітря (Q) це відношення складає 14 %, що характеризує досягнутий рівень економії електроенергії.

Аналіз реактивної потужності, яку споживає компресор свідчить про те, що її значення продовж тривалості увімкненого стану компресора змінюється незначно. Доцільно забезпечити компенсацію реактивної потужності (КРП) компресорної установки увімкненням батареї статичних конденсаторів (рис.8).

За рахунок її компенсації втрати активної енергії в мережі живлення знижуються на 22 %.

Задача оптимізації параметрів режиму вирішувалась для систем різної продуктивності. При цьому, не зважаючи на відмінність кількісних характеристик, характер отриманих залежностей залишався незмінним, що підтверджувало доцільність застосування розробленого способу.

Встановлено, що за відсутності обмеження за кількістю пусків за годину асинхронного двигуна компресора економія споживаної електричної енергії досягається і при малих витратах стислого повітря, що споживається пневмоприймачами. У разі суттєвого обмеження кількості пусків (що визначається паспортними даними двигуна) економія електроенергії може бути досягнута при значних обсягах витрат стислого повітря Q .

В співставленні з традиційним двопозиційним регулюванням, що передбачає незмінність верхньої межі тиску в ресивері, запропонований спосіб регулювання з «плаваючим» верхнім рівнем тиску дозволяє підвищити значення ККД.

У **п'ятому розділі** розроблено алгоритм управління електроспоживанням компресорної установки та схемну реалізацію запропонованого способу управління.

Особливості запропонованого алгоритму управління наступні:

- забезпечується визначення витрат стислого повітря приймачами, виходячи із швидкості зміни тиску в пневмережі;
- здійснюється прогнозування тривалості циклу управління $T_{\text{ц}}$ і, відповідно, значення верхнього рівня тиску P_{max} , виходячи з обмеження кількості пусків електродвигуна за годину;
- забезпечується визначення втрат енергії в елементах електромеханічної системи і відповідного значення ККД комплексу за цикл при заданому рівні тиску P_{max} ;
- виконує вибір максимального значення ККД ($\eta_{\text{опт}}$) і відповідного йому значення максимального тиску $P_{\text{max опт}}$.

Проведено експериментальну перевірку отриманих на моделі значень параметрів режиму системи. Порівняння експериментально отриманих значень з теоретичними (результатами моделювання) показало, що похибка розрахунку не перевищує 3 %. Цим підтверджується адекватність розробленої математичної моделі поставленій задачі моделювання.

Експериментальні дослідження підтвердили, що для запропонованої електромеханічної системи при малих значеннях витрат стислого повітря економія електричної енергії практично відсутня, а при великих складає до 12 %.

Аналіз існуючих апаратних способів реалізації управління повітряними поршневыми компресорними установками показав, що для розробленого способу доцільно застосувати систему, побудовану на базі промислового програмованого контролера, (рис.8). Останній забезпечує не тільки безперервний контроль параметрів режиму (зокрема рівня тиску), а також забезпечує необхідну швидкість розрахунку оптимального значення тиску.

Різноманіття програмованих логічних контролерів (ПЛК) визначає достатньо складний шлях вибору необхідного контролера, оскільки потрібно врахувати не одну характеристику, а здійснити інтегральну оцінку, що дозволяє вибрати ПЛК за сукупністю характеристик і властивостей. В дисертаційній роботі здійснено обґрунтування такого вибору.

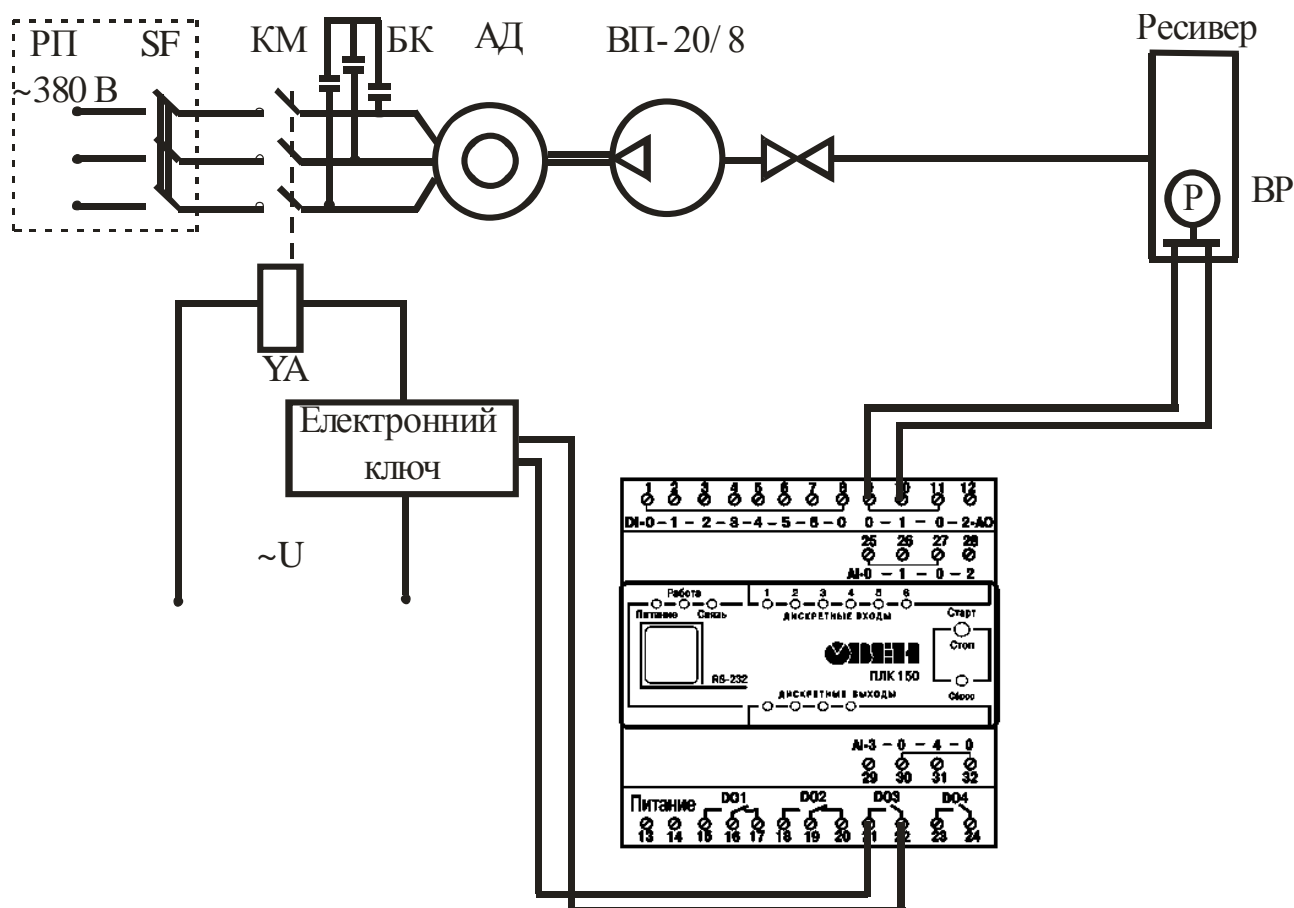


Рис. 8. Функціональна схема запропонованої системи управління повітряним поршневым компресором

Впровадження розробленого способу керування поршневими компресорними установками дозволить економити електроенергію, вартість якої складає: при невеликих витратах стислого повітря (1...8 м³/хв) – в середньому від 3 до 25 тис. грн./рік, а при значних (9...11 м³/хв) – від 40 до 85 тис. грн./рік.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеною науково-дослідною роботою, вирішена наукова задача, що полягає у визначенні закономірностей протікання електромеханічних процесів в системі виробництва і розподілу стислого повітря, встановленні залежності між параметрами режиму роботи системи та її ККД, обґрунтуванні на цій основі оптимального режиму роботи системи та умов його реалізації шляхом управління електроспоживанням компресора.

При вирішенні задачі отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Параметрами режиму роботи системи, що суттєво впливають на рівень втрат енергії в її елементах, є витрати стислого повітря пневмоприймачами та верхній рівень тиску в ресивері компресора. Зміна верхнього рівня тиску в ресивері складає основу запропонованого способу управління електроспоживанням компресора, що забезпечує підвищення ККД електромеханічної системи.

2. Для розрахунку ККД електромеханічної системи за відомими значеннями параметрів режиму роботи створена математична модель. Вона відрізняється від відомих моделей тим, що враховує втрати енергії у всіх елементах системи і орієнтована на визначення ККД за цикл двопозиційного управління електроспоживанням компресора.

3. Сформульована задача параметричної оптимізації режиму роботи електромеханічної системи. Вперше як цільову функцію запропоновано використати значення ККД системи, розраховане в кожному циклі двохпозиційного управління електроспоживанням компресора. Введено обмеження на допустиму кількість пусків електродвигуна в заданий проміжок часу і на значення тиску повітря в пневмережі. В результаті вирішення оптимізаційної задачі отримані оптимальні значення верхнього рівня тиску в ресивері та відповідні значення тривалості увімкненого стану компресора, що відповідають максимуму цільової функції (ККД системи).

4. Створено новий спосіб управління електроспоживанням компресорної установки, що дозволяє на основі мінімальної кількості контрольованих параметрів (рівень тиску в ресивері, швидкість його зміни) визначати моменти вимикання компресора, реалізація яких забезпечить зміну графіку електричних навантажень компресора та підвищить ККД системи.

5. Доведено, що при застосуванні розробленого способу управління ступінь зростання ККД системи підвищується із зростанням рівня споживання стислого повітря, що забезпечує високу енергетичну ефективність системи в режимі номінального навантаження.

6. Доведено, що значення реактивної потужності, яку споживає компресор упродовж тривалості його увімкненого стану змінюється незначно, що дозволяє забезпечити індивідуальну КРП. За рахунок КРП втрати у мережі живлення активної енергії зменшуються на 22 %.

7. Розроблений автором алгоритм управління електроспоживанням компресорної установки передбачає визначення витрат стислого повітря шляхом вимірювання швидкості зміни тиску в ресивері та дозволяє прогнозувати тривалість циклу двохпозиційного керування.

8. Зіставлення результатів експериментальних і теоретичних досліджень свідчить про прийнятну точність розрахунку оптимальних значень параметрів режиму. Похибка розрахунку не перевищує 3 %. Це підтверджує достовірність отриманих в роботі наукових результатів.

9. Результати роботи упродовжені ТОВ «Фактор». Використання запропонованого способу управління електроспоживанням компресором в промислових умовах дозволило знизити втрати енергії в середньому до 12 % (в

залежності від продуктивності компресора). Очікуваний економічний ефект складає 102 тис. грн. на рік.

Основні положення і результати дисертації опубліковані у роботах:

1. Выпанасенко С.И. Основные пути повышения энергоэффективности регулирования производительности поршневых компрессоров / С.И. Выпанасенко, А.В. Бобров // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн.зб. – 2002. Вип 69. – С. 132 – 137.

2. Бобров А.В. Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров / А.В. Бобров // Технічна електродинаміка. Науково-прикладний журнал – 2004. – № 3. – С.18-19.

3. Выпанасенко С.И. Обоснование контролируемых параметров при повышении энергоэффективности поршневых компрессоров / С.И. Выпанасенко, А.В. Бобров // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн.зб.-2004.Вип 72.-С.95-99.

4. Выпанасенко С.И. Определение оптимального уровня давления энергоэффективной системы управления поршневых компрессоров при ограничении количества пусков и учете пусковых потерь. / С.И. Выпанасенко, В.В. Кириченко, А.В. Бобров // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн.зб.-2005.Вип 74.-С.71-75.

5. Пивняк Г.Г. Управление электроприводом компрессорной установки. / Г.Г. Пивняк, С.И. Выпанасенко, А.В. Бобров. // Технічна електродинаміка. Науково-прикладний журнал (частина 7), ІЕД НАН України, 2008 – С.44.

6. Бобров А.В. Нагрузка пневматической сети и её влияние на уровни потерь мощности в элементах электротехнического комплекса поршневой компрессорной установки. / А.В. Бобров // Вісник Приазовського технічного університету, Маріуполь. 2008 р. Енергетика, Ч2, С.68-71.

7. Бобров А.В. Влияние расхода сжатого воздуха на уровни потер энергии в различных элементах электротехнического комплекса / А.В. Бобров, Е.Е. Полякова, Е.В. Котляров // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн.зб. – 2011. Вип 87. – С. 87 – 94.

8. Бобров А.В. Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса. / А.В. Бобров // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Наук.-виробн. журнал. – Кременчук: КНУ, 2011.-Вип. 4/2011 (16) – С.124.

9. Бобров О.В. Результаты исследований энергоэффективного режима работы электромеханической системы производства та розподілу стислого повітря / О.В. Бобров, С.І. Выпанасенко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014 (26). – С. 85 – 90. (Наукометрична база Index Copernicus)

10. Бобров О.В. Определение максимального уровня давления энергоэффективной системы управления поршневых компрессорных установок при ограничении количества пусков / О.В. Бобров // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”; збірник матеріалів конференції, м. Кременчук, 2007р. С.191.

11. Бобров А.В. Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса / А.В. Бобров // Междунар. молодёжная науч.-техн. конф. "Энергосистема и активные адаптивные электрические сети: проектирование, эксплуатация, образование", г. Самара, 2011 г. –С.423.

12. Бобров А.В. Влияние расхода сжатого воздуха на уровни потерь энергии в различных элементах электротехнического комплекса / А.В. Бобров // 3-я международная научно-практическая конференция. «Энергоэффективность и энергосберегающие технологии». ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск, 2011.- С.90-100.

13. Бобров А.В. О влиянии расхода сжатого воздуха на уровни потерь энергии в различных элементах электротехнического комплекса / А.В. Бобров, А.В. Бондаренко // Наукова весна 2013: 4-та Всеукраїнська науково-практична конференція. (28-29 березня 2013 р., Дн-ськ): тез. доп. / М-во освіти і науки України ; Нац. гірн. ун-т.; ПНЦ НАН України – Д., 2013. – С. 377 - 379.

14. Бобров А.В. Постановка математической задачи расчета КПД электромеханической системы «Электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть» / А.В. Бобров, Н.В. Кривошея // Наукова весна 2013: 4-та Всеукраїнська науково-практична конференція. (28-29 березня 2013 р., Дн-ськ): тез. доп. / М-во освіти і науки України ; Нац. гірн. ун-т.; ПНЦ НАН України – Д., 2013. – С. 392 - 393.

Особистий внесок автора. Особистий внесок дисертанта в роботах, опублікованих в співавторстві полягає: робота [1, 3] – постановка задачі та обґрунтування контрольованих параметрів при підвищенні енергоефективності поршневих компресорів, робота [5] – визначення оптимального рівня тиску енергоефективної системи управління поршневим компресором при обмеженні кількості пусків і обліку пускових втрат, робота [7] – аналіз впливу витрат стислого повітря на рівні втрат енергії в різних елементах електромеханічної системи, робота [9] – алгоритм роботи системи управління електроспоживанням компресорної установки.

АНОТАЦІЯ

Бобров О.В. «Оптимізація режиму роботи електромеханічної системи виробництва та розподілу стислого повітря». – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – ДВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2015.

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу, що полягає у встановленні залежності, що існує між параметрами режиму роботи електромеханічної системи та її ККД, визначенні оптимального режиму та умов його реалізації шляхом управління електроспоживанням компресора.

При вирішенні задачі визначені параметри режиму роботи системи, що суттєво впливають на рівень втрат енергії в її елементах.

Розроблена математична модель для визначення оптимального значення верхньої межі рівня тиску в мережі за цикл «спуску – накачування» повітря, що

забезпечує максимум ККД електромеханічної системи. Розв'язана задача параметричної оптимізації режиму роботи електромеханічної системи. В якості цільової функції використано значення ККД системи, розраховане в кожному циклі двохпозиційного управління електроспоживанням компресора.

Запропоновано новий спосіб управління електроспоживанням компресорної установки, що дозволяє на основі мінімальної кількості контрольованих параметрів визначати моменти вимикання компресора, реалізація яких забезпечить оптимальні параметри режиму, підвищить ККД системи.

Експериментально доведено, що при застосуванні розробленого способу управління із зростанням споживання стислого повітря ступінь зростання ККД системи підвищується. Проведені експериментальні дослідження підтверджують достовірність отриманих в роботі наукових результатів.

Ключові слова: управління електроспоживанням, регулювання тиску, поршневий компресор, втрати енергії, стисле повітря, енергетична ефективність, ККД, графік електричних навантажень.

АННОТАЦИЯ

Бобров О.В. «Оптимизация режима работы электромеханической системы производства и распределения сжатого воздуха». – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск, 2015.

В диссертационной работе решена важная научная задача, которая заключается в установлении зависимости, существующей между параметрами режима работы электромеханической системы и ее КПД, определении оптимального режима и условий его реализации путем управления электропотреблением компрессора.

При решении задачи определены параметры режима работы системы, которые существенно влияют на уровень потерь энергии в ее элементах. Таковыми являются расход сжатого воздуха пневмоприемниками и верхний уровень давления в ресивере компрессора. Определен перечень параметров режима, которые имеют существенное влияние на КПД системы в целом. Установлены аналитические зависимости, которые связывают уровни потерь энергии в отдельных звеньях системы с определенными параметрами режима. Произведена количественная оценка потерь в отдельных элементах системы, которая позволит определить наиболее энергоемкие составляющие общих потерь энергии.

Разработана математическая модель для определения оптимального значения верхнего предела уровня давления в ресивере за цикл «спуска - накачки» воздуха, обеспечивающего максимум КПД электромеханической системы. В отличие от известных моделей, она учитывает потери энергии во всех элементах системы и ориентирована на определение КПД за цикл двухпозиционного управления электропотреблением компрессора.

Математическая модель является основой для определения оптимальных параметров режима.

Решена задача параметрической оптимизации режима работы электромеханической системы. В качестве целевой функции использовано значение КПД системы, рассчитанное в каждом цикле двухпозиционного управления электропотреблением компрессора. Введены ограничения на допустимое количество пусков электродвигателя в заданный промежуток времени и на значение давления воздуха в пневмосети. В результате получены оптимальные значения верхнего уровня давления в ресивере и значения продолжительности включенного состояния компрессора, соответствующие максимуму целевой функции. Исследованы графики электрических нагрузок. Расчет значений КПД при оптимальных параметрах режима свидетельствует о том, что рост расхода сжатого воздуха сопровождается повышением КПД системы.

Предложен новый способ управления электропотреблением компрессорной установки. Суть предложенного способа управления заключается в том, что в каждом цикле двухпозиционного управления компрессором определяются уровень расхода сжатого воздуха Q и в зависимости от его значения устанавливается оптимальное значение верхней границы давления в ресивере ($P_{\max \text{ опт}}$), которое обеспечивает максимальный уровень ККД (η). Он позволяет на основе минимального количества контролируемых параметров (уровень давления в ресивере, скорость его изменения) определять моменты выключения компрессора и продолжительность его включенного состояния, реализация которых обеспечит оптимальные параметры режима, повысит КПД системы.

Разработан алгоритм управления электропотреблением компрессорной установки и схемная реализация предложенного способа управления. Экспериментально доказано, что при использовании разработанного способа управления с ростом потребления сжатого воздуха степень роста КПД системы повышается. Это обеспечивает высокую энергетическую эффективность системы в режиме номинальной нагрузки. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают достоверность полученных в работе научных результатов.

Ключевые слова: управление электропотреблением, регулировка давления, поршневой компрессор, потери энергии, сжатый воздух, энергетическая эффективность, КПД, график электрических нагрузок.

SUMMARY

Bobrov A.V. « Optimization of electromechanical system operating mode of compressed air production and distribution ». – Manuscript.

The thesis for getting a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – State higher educational institution «National Mining University», Dnipropetrovsk, 2015.

The thesis is devoted to important scientific task, which is to establish the dependence that exists between the parameters of the electromechanical system operating mode and its efficiency, determining the optimal mode conditions and its implementation by control of the power consumption of the compressor.

In solving a problem the mode settings of the system, which significantly affect the level of energy losses in its elements, are determined.

The mathematical model to determine the optimal value of the upper limit of the pressure in the network for a series of "descent - pump" air ensuring maximum efficiency of the electromechanical system is made. The problem of parametric optimization mode of the electromechanical system is solved. As the objective function value used the efficiency of system, calculated in each cycle of two-position control of compressor power consumption.

It is proposed a new way to control a power consumption of compressor unit, that allows on basis of a minimum number of controlled parameters to define points off the compressor, the implementation of which will provide optimum mode settings, increase the efficiency of the system.

Experimentally proved that the application of the developed method of control with increasing consumption of compressed air system efficiency growth rate increases. Experimental studies confirm the reliability of the research results.

Key words: *power consumption control, pressure control, piston compressor, energy losses, compressed air, energy efficiency, efficiency, electrical loads diagram.*

Бобров Олексій Володимирович

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ
СИСТЕМИ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ СТИСЛОГО ПОВІТРЯ**
(Автореферат)

Підписано до друку 09.01.2015. Формат 60x90/16.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. №

Національний гірничий університет
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19