

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

ФАТЄЄВ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 621.05

ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТІВ  
ЗА РАХУНОК СИНТЕЗУ РАЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Черкашенко Михайло Володимирович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,  
завідувач кафедри гідравлічних машин

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Гнесін Віталій Ісайович,**  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,  
завідувач відділу нестационарної газодинаміки та  
аеропружності

кандидат технічних наук  
**Соловйов Володимир Михайлович,**  
Казенне підприємство Харківське конструкторське бюро з  
машинобудування ім. О.О. Морозова,  
інженер-конструктор 1 категорії

Захист відбудеться «16» лютого 2012 р. о 14<sup>30</sup> годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «13» січня 2012 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Активному впровадженню пневмоагрегатів в промисловість сприяють: відносна простота конструкції і експлуатації; великий термін служби; надійність роботи у низькому діапазоні температур в умовах великої вологості, запиленості і радіації навколишнього середовища; пожежо- і вибухобезпечність та ін. Гідроагрегати, у свою чергу, дозволяють збільшити точність позиціонування виконавчих пристроїв.

У практиці побудови схем гідропневмоагрегатів розрізняють структурний і динамічний аналіз і синтез. На етапі структурного синтезу вирішуються проблеми, пов'язані з проектуванням, причому на цьому етапі забезпечуються наступні характеристики: надійність, мінімальність по числу апаратів, швидке введення в експлуатацію та інші. На етапі динамічного синтезу гідропневмоагрегатів вирішуються завдання, пов'язані з динамічними характеристиками: швидкодією, точністю позиціонування, вибором раціональних фаз руху та інші. Відмінність структурних схем і вибір, як правило, в даний час здійснюється у кожному конкретному випадку в результаті аналізу технологічного процесу, виходячи з конкретних вимог замовника. Для вирішення завдань, пов'язаних з позиціонуванням гідропневмоагрегатів, потрібно вибрати або розробити структуру, конструктивні параметри, контрольно-вимірні прилади і алгоритми управління.

Тому актуальною задачею є подальше підвищення ефективності і якості проектування гідропневмоагрегатів. Доцільною є розробка узагальненої позиційної структурної організації схем, що дозволяє, маючи мінімальний набір структурних блоків, реалізувати будь-який процес управління гідропневмоагрегатів, та на її базі методів проектування з врахуванням особливостей гідропневмоапаратури, а саме розподільників з одnobічним управлінням. Вирішення вказаних задач визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі гідравлічних машин НТУ «ХП». Тема роботи відповідає науковому напрямку кафедри в області підвищення технічного рівня гідропневмоагрегатів. У дисертаційній роботі використовуються результати, отримані за участю здобувача при виконанні держбюджетної теми МОН України «Розробка комплексу математичних моделей, проточних частин гідропневмоагрегатів і визначення характерних особливостей робочого процесу» (ДР №0106U001481), та госпдоговір НДР «Проведення досліджень гідророзподільників» (Договір №70032 від 07.04.2010 р., ОП Корпорація «Гідроелекс», м. Харків).

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – підвищення технічного рівня гідропневмоагрегатів шляхом удосконалення методу структурного синтезу, математичного моделювання динамічних характеристик схем з розподільниками з одnobічним управлінням.

Для досягнення поставленої мети сформульовані й вирішені наступні задачі:

- розробити структуру схем гідропневмоагрегатів дискретно-аналогового управління з розподільниками з однобічним управлінням;

- для гідропневмоагрегатів дискретно-аналогового управління удосконалити метод проектування та на його базі розробити математичні моделі і алгоритм структурного синтезу схем гідропневмоагрегатів з використанням розподільників з однобічним управлінням;

- розробити математичну модель роботи пневмоагрегатів запропонованої позиційної структури, яка враховує динамічні особливості пневмоагрегатів;

- провести дослідження та розробити методика оцінки функціональних можливостей гідропневмоагрегатів, що включає регулювання параметрів руху окремих виконавчих механізмів гідропневмоагрегатів;

- для комплексного дослідження позиційних гідропневмоагрегатів розробити математичні моделі й алгоритми динамічного аналізу з врахуванням регулювання параметрів руху виконавчих пристроїв та реальної швидкодії розподільної апаратури.

*Об'єктом дослідження* є робочі процеси гідропневмоагрегатів технологічного устаткування.

*Предметом дослідження* є удосконалення параметрів гідропневмоагрегатів на основі структурного та динамічного синтезу і аналізу конструкції, що дозволяє синтезувати раціональні структурні схеми.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи залучали фундаментальні положення теорії механіки рідини та газу, термодинаміки та структурного синтезу. Метод та алгоритм проектування гідропневмоагрегатів з розподільниками з однобічним управлінням розроблено на базі методу повної мінімізації стандартної позиційної структури. Динамічні параметри позиційних пневмоагрегатів визначали за допомогою математичних моделей термодинамічних процесів, розроблених з використанням теорії термодинаміки та структурного аналізу пневмоагрегатів. Реальну швидкість типових ланок позиційного пневмоагрегата визначали експериментально на дослідних зразках.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- вперше розроблені математичні моделі і алгоритми проектування схем гідропневмоагрегатів з використанням розподільників з однобічним управлінням на основі методу повної мінімізації стандартної позиційної структури проф. М. В. Черкашенка;

- вперше розроблена позиційна структура схем гідропневмоагрегатів з використанням дискретних розподільників з однобічним управлінням, що дозволяє враховувати регулювання параметрів руху окремих виконавчих пристроїв;

- дістала подальший розвиток теорія динамічного синтезу і аналізу гідропневмоагрегатів в напрямку дослідження позиційних гідропневмоагрегатів, що дозволило підвищити точність позиціонування та синтезувати раціональні за структурою схеми.

**Практичне значення одержаних результатів** для машинобудівної галузі пов'язано з розробкою структури схем гідропневмоагрегатів дискретно-аналогового управління з розподільниками з однобічним управлінням, що дозволяє звести до мінімуму число елементів блоку пам'яті, а також число логічних елементів необхідних для реалізації схеми.

Результати дисертаційної роботи використовуються в практиці інженерних розрахунків ОП Корпорації «Гидроелекс», м. Харків (акт впровадження від 10. 01. 2011 р.).

Основні результати досліджень використовуються в навчальному процесі НТУ «ХПІ» кафедри гідравлічних машин в дисциплінах «Гідропневмоавтоматика», «Пневматичні та гідравлічні системи управління», «Гідропневмоавтоматика нафтового устаткування» (акт впровадження від 20. 09. 2011 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто, серед них: розробка позиційної структури гідропневмоагрегатів з врахуванням регулювання параметрів руху; розробка математичних моделей і алгоритмів структурного синтезу схем гідропневмоагрегатів з використанням розподільників з однобічним управлінням. Для динамічного аналізу розроблена математична модель позиційного пневмоагрегата, реалізованого на дискретній апаратурі; проведено дослідження запропонованої математичної моделі позиційного пневмоагрегата, реалізованої в пакеті MATLAB, що дозволило врахувати його фізичні параметри і використовувати при подальшому проектуванні різних схем позиційних пневмоагрегатів; проведено експериментальні дослідження часу спрацьовування ланок позиційних пневмоагрегатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати дисертаційної роботи докладалися й обговорювалися на: XIII, XIV, XVI÷XIX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2005 р., 2006 р., 2008÷2011 рр.); VI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2010 р.)

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць у наукових фахових виданнях України.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Повний обсяг дисертації становить 165 сторінок; з них 43 рисунки по тексту; 5 рисунків на 5 окремих сторінках; 17 таблиць по тексту; 3 додатка на 8 сторінках; список використаних літературних джерел з 158 найменувань на 16 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, приведені мета і основні задачі досліджень, охарактеризовані новизна, теоретична й практична цінність отриманих результатів, приведені дані про апробацію і публікацію основних наукових положень, які вміщує дисертація.

У **першому розділі** проведено аналітичний аналіз схемних рішень позиційних гідропневмоагрегатів та методів їх проектування. Відзначено що вибір тієї або іншої структурної схеми та її практичного використання може бути здійснений в результаті аналізу технологічного процесу, виходячи з конкретних вимог замовника. В допомогу проектувальникові, при виборі оптимального методу проектування і схемного рішення, проведено детальну структурування існуючих методів синтезу

схем позиційних гідропневмоагрегатів, розглянуто способи регулювання параметрів руху гідропневмоагрегатів, а також методи їх синтезу.

Проаналізовано сучасні методи синтезу схем і методи синтезу позиційних гідропневмоагрегатів, на підставі аналізу сформульовано задачі досліджень та напрямки їх вирішення.

У другому розділі приведено математичні моделі і алгоритми структурного синтезу схем гідропневмоагрегатів з використанням розподільників з однобічним управлінням. Розглянуто позиційну структуру з врахуванням регулювання параметрів руху гідропневмоагрегатів. Приведені вимоги, що пред'являють до систем позиційних гідропневмоагрегатів, а також способи регулювання параметрів руху гідропневмоагрегатів і методи їх синтезу.

Розроблено структуру схем гідропневмоагрегатів дискретно-аналогового управління з використанням дискретної апаратури, а зокрема розподільників з однобічним управлінням (рис. 1). Розроблено метод проектування многотактних схем дискретно-аналогового управління з використанням розподільників з однобічним управлінням, який включає: опис роботи системи гідропневмоагрегата; структурний синтез гідропневмоагрегата; синтез многотактної схеми управління; синтез схеми для окремого позиційного гідропневмоагрегата. Структурна організація системи гідропневмоагрегатів базується на дискретній та аналоговій складових.

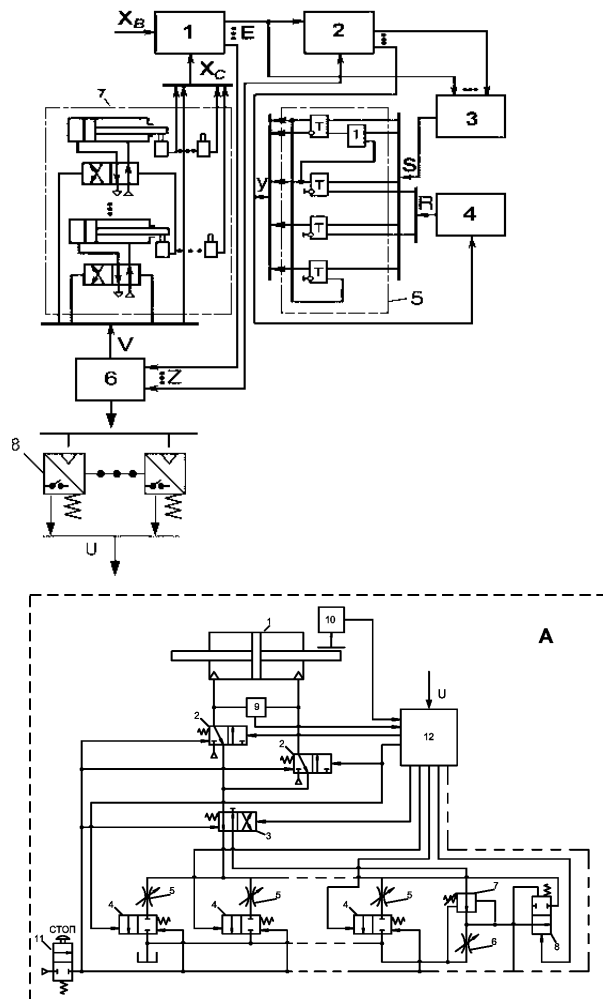


Рис. 1. Структурна організація гідропневмоагрегатів

Наведена структура дозволяє звести до мінімуму число елементів блоку пам'яті, а також число логічних елементів, необхідних для реалізації схеми.

Для здійснення цифрового регулювання провідності зливної лінії, ефективні площі дроселів блоку позиціонування (рис.1 поз. А) обираються так, щоб забезпечити співвідношення витрат в паралельних гілках за формулою

$$f_j = \frac{f_p f_k}{\sqrt{(f_p^2 + f_k^2)(2^{2(n-j)} - 1)}},$$

де  $f_p$  та  $f_k$  – відповідно ефективні площі розподільників і клапанів;  $n$  – число клапанів;  $j$  – порядковий номер клапана і сполученого з його входом дроселя.

Конструктивне удосконалення гідропневмоагрегата дозволяє здійснювати цифрове регулювання провідності зливної лінії в її широкому діапазоні й тим самим поліпшити динамічні характеристики.

Запропонований підхід проектування схем гідропневмоагрегатів засновано на методі професора М. В. Черкашенка – повній мінімізації стандартної позиційної структури. Запропоновано мінімізувати число стовпців матриці відповідностей за алгоритмом:

1. Проведення розбиття послідовності вхідних наборів на блоки так, щоб в кожному з них не було однакових вхідних наборів і останні набори сусідніх блоків не були однаковими.
2. Побудова матриці відповідностей.
3. Для однакових наборів проведення подовження піднаборів відповідними сигналами.
4. Заповнення матриці відповідностей одиницями, якщо піднабір стовпця входить в набір рядка, й нулями якщо інакше.
5. Вибір функції для синтезу рівнянь.
6. Перевірка часового інтервалу дії вибраного виходу за стовпцем з метою усунення «0», проведенням відповідних подовжень піднаборів. Якщо усунення неможливе, використовується елемент пам'яті у вихідній ланці.
7. Побудова мінімізованої матриці відповідностей.

Визначено рівняння для функцій перемикання «пам'яті» і функцій виходів. Функція  $z_{\zeta}(\bar{z}_{\zeta})$  формується як диз'юнкція вхідних наборів для переходів часового інтервалу їх дії. При подовженні враховано можливості елементів внутрішньої пам'яті. Розглядається вибір синтезованих функцій. У загальному випадку функція виходів –  $\tilde{Z} = f(X, Y)$ , де  $\tilde{Z}$  – функція включення (відключення) виходів;  $X$  – множина вхідних сигналів,  $Y$  – множина сигналів з виходів елементів пам'яті. Функція перемикання елементів пам'яті –  $S = f(X, Y)$ ,  $R = f(Y)$ . У разі двох внутрішніх станів –  $S, R = f(X)$ .

На рис. 2 представлено схему включення каналів розподільників з однобічним управлінням для гідропневмоагрегатів. Для скорочення числа рівнянь достатньо синтезувати  $z_{\zeta}$  або  $\bar{z}_{\zeta}$ . Основним критерієм при виборі функції ( $z_{\zeta}$  або  $\bar{z}_{\zeta}$ ) є число мінімізованих стовпців матриці відповідностей (невикористаних стовпців), а також тих, які мають найбільше число подовжень.

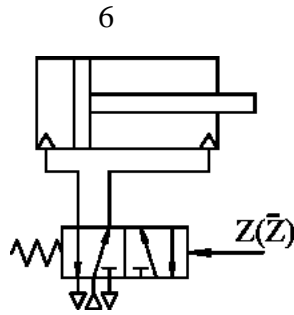


Рис. 2. Схема підключення виконавчих пристроїв

Наступний критерій, нерозривно пов'язаний з основним, – число переходів, які складають часовий інтервал дії. Якщо тимчасові інтервали для обох інверсних функцій однакові, то доцільно виписати обидві функції і вибрати оптимальне рішення на основі вказаних критеріїв.

Побудову схеми показано на прикладі синтезу пневмоагрегата промислового робота, умова роботи системи управління якого представлена у вигляді графа операцій (рис. 3). Таблицю взаємодії вхідних та виконавчих пристроїв дано нижче (табл. 1).

Таблиця 1

**Взаємодія вхідних сигналів та виконавчих пристроїв**

Виконавчі пристрої		Вхідні сигнали	
Позначення	Найменування	Вихідне положення	Кінцеве положення
Ц1	Захват	–	$x_3$
Ц2	Висунення руки	$x_4$	$x_5$
Ц3	Поворот руки	$x_6$	$x_7$
$x_1$ – кнопка пуску			

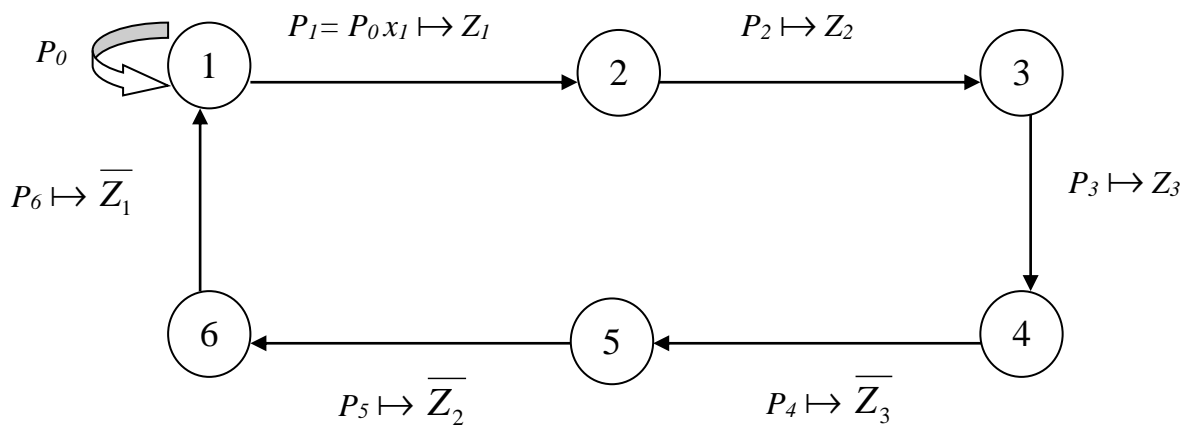


Рис. 3. Граф операцій

Тут  $P_0 = \emptyset$ ,  $x_4x_6y$ ;  $P_1 = x_1$ ,  $x_4x_6$ ;  $P_2 = x_3$ ,  $x_4x_6$ ;  $P_3 = x_5$ ,  $x_3x_6$ ;  $P_4 = x_5$ ,  $x_3x_6$ ;  $P_5 = x_7$ ,  $x_5$ ;  $P_6 = x_6$ ,  $x_3x_5$ ;  $P_7 = x_4$ ,  $x_3x_6$ .



Проведено розбиття послідовності вхідних наборів на блоки і побудовано матрицю відповідностей.

Матриця відповідностей має вигляд:

	$x_1$	$x_3y$	$x_5y$	$x_7$	$x_6\bar{y}$	$x_4\bar{y}$	
$\emptyset, x_4x_6 \mapsto \emptyset$	0	0	0	0	1	1	$\bar{y}$
$x_1, x_4x_6 \mapsto z_1 S$	1	0	0	0	1	0	
$*x_3, x_4x_6 \mapsto z_2$	0	1	0	0	0	0	у
$**x_5, x_3x_6 \mapsto z_3$	0	1	1	0	0	0	
$x_7, x_5 \mapsto \bar{z}_3 R$	0	0	0	1	0	0	
$**x_6, x_3x_5 \mapsto \bar{z}_2$	0	0	0	0	1	0	$\bar{y}$
$*x_4, x_3x_6 \mapsto \bar{z}_1$	0	0	0	0	1	1	

Відмінністю запропонованого методу є те, що мінімізація рівнянь відбувається за часовими інтервалами відключення виконавчого пристрою. Після проведення відповідного подовження перевіряється часовий інтервал дії вибраного виходу за стовпцем з метою усунення «0». Якщо усунення неможливе, використовується елемент пам'яті у вихідній ланці.

Побудована мінімізована матриця відповідностей має вигляд:

	$x_3y$	$x_5y$	$x_6\bar{y}$	$x_4\bar{y}$	
$\emptyset, x_4x_6 \mapsto \emptyset$	0	0	1	1	$\bar{y}$
$x_1, x_4x_6 \mapsto z_1 S$	0	0	1	0	
$*x_3, x_4x_6 \mapsto z_2$	1	0	0	0	у
$**x_5, x_3x_6 \mapsto z_3$	1	1	0	0	
$x_7, x_5 \mapsto \bar{z}_3 R$	0	0	0	0	
$**x_6, x_3x_5 \mapsto \bar{z}_2$	0	0	1	0	$\bar{y}$
$*x_4, x_3x_6 \mapsto \bar{z}_1$	0	0	1	1	

Після синтезу рівнянь, отримано:

$$S = x_1; \quad R = x_7; \quad \bar{z}_1 = \bar{y}x_4; \quad z_2 = x_3y; \quad \bar{z}_2 = x_6\bar{y}; \quad z_3 = x_5y.$$

Рівняння для цього випадку значно простіші, ніж для вихідного блоку, який містить елемент пам'яті. Це свідчить про те, що використання запропонованого алгоритму приводить до значного спрощення рівнянь. Пневмосхема управління промислового робота, яка синтезована з врахуванням

типа

пневморозподільників

вихідного блоку, а саме розподільників з однобічним управлінням, наведена на рис. 4.

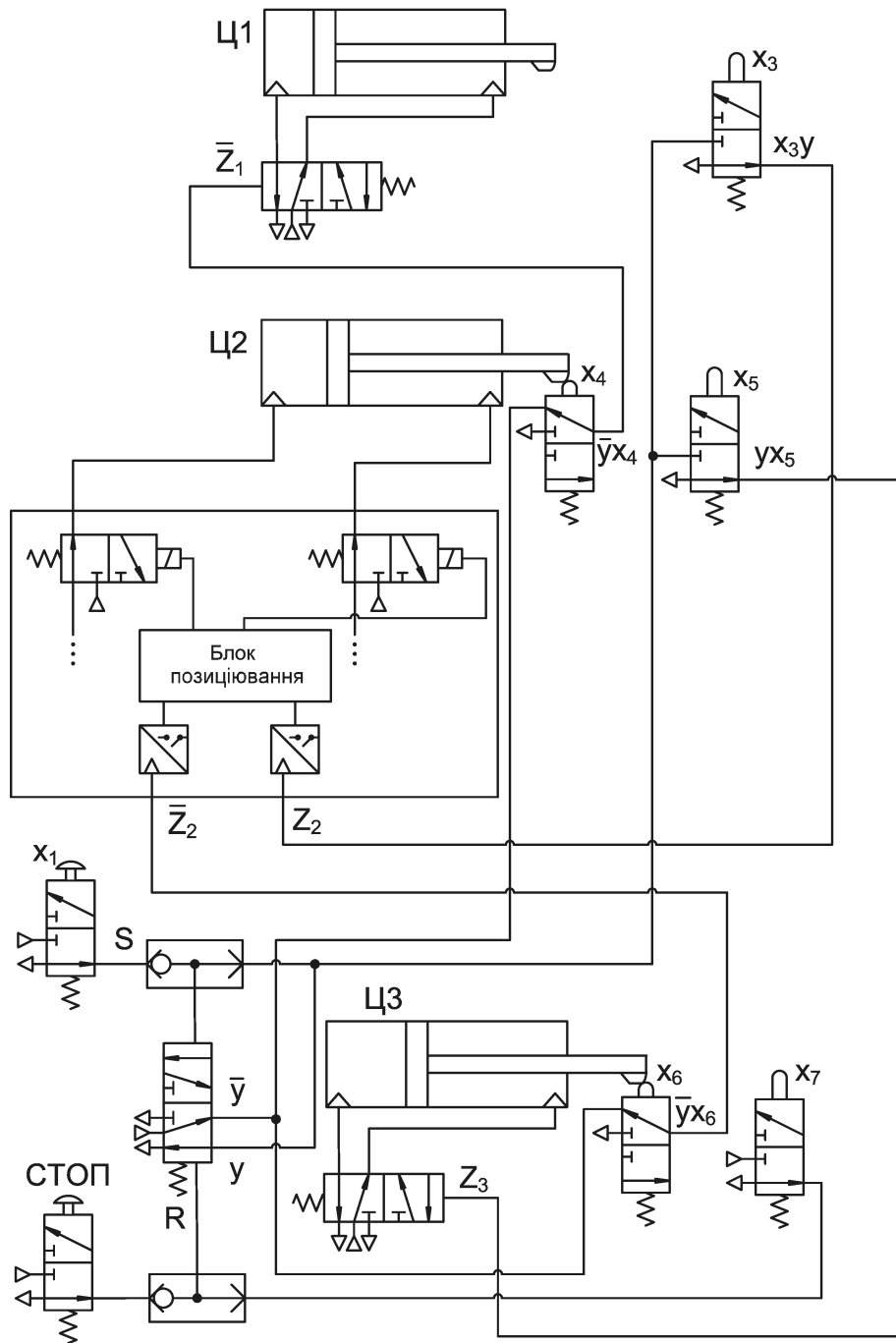


Рис. 4. Схема пневмоагрегата промислового робота

Для синтезу частини схеми управління позиційного пневмоагрегата «висунення руки робота» розроблені спеціальні алгоритми програмного управління для мікропроцесорного контролера.

Таким чином, запропонована структура і метод проектування, побудований на принципах дискретного управління, мають безперечні переваги, оскільки синтезовані схеми містять просту дискретну гідропневмоапаратуру і не вимагають використання складних пропорційних гідропневмоапаратів, що стежать.

**Третій розділ** присвячено аналізу динаміки позиційного пневмоагрегата, реалізованого на дискретній апаратурі. Для цього розроблено математичну модель роботи системи позиційних пневмоагрегатів, яка враховує особливості системи як об'єкта програмного управління та включає математичні моделі виконавчого механізму, модель ліній управління, а також модель системи управління з врахуванням реального масштабу часу. Розроблено алгоритми й методи управління позиційними пневмоагрегатами.

Спрощена структура системи пневмоагрегатів включає: виконавчий механізм, що складається з пневмодвигуна з інерційним навантаженням; систему управління, побудовану на базі мікропроцесорного контролера з пристроями сполучення, а також лінії управління з розподільною апаратурою і комунікаційними каналами.

*Математична модель динаміки виконавчого механізму*, а саме пневмодвигуна з інерційним навантаженням, базується на рівняннях термодинаміки і рівнянні управління рухом. Для пневмодвигуна лінійної дії з двома робочими порожнинами, розрахункова схема якого показана на рис. 5, рівняння термодинаміки мають вигляд:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{k}{V_1} \left( RTG_1 - p_1 \frac{dV_1}{dt} \right);$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{k}{V_2} \left( RTG_2 - p_2 \frac{dV_2}{dt} \right),$$

де  $p_1, p_2$  – величини тиску в робочих порожнинах пневмодвигуна;  $V_1, V_2$  – об'єми робочих порожнин;  $T$  – температура довкілля (згідно з допущенням, зміну температури при визначенні параметрів руху можна ігнорувати);  $G_1, G_2$  – витрати робочого середовища в порожнинах;  $R$  – універсальна газова постійна;  $k$  – показник адіабати.

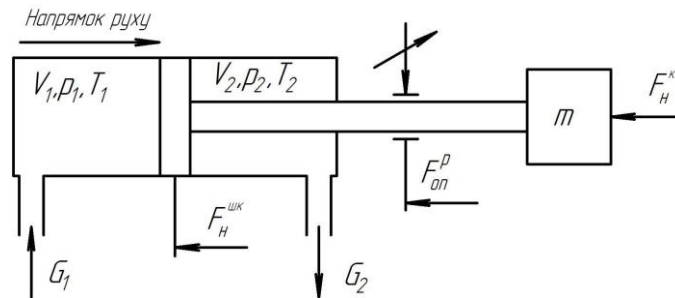


Рис. 5. Розрахункова схема пневмодвигуна з двома робочими порожнинами

Рівняння руху виконавчого механізму має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - F_{on}^p - F_H^{шк} - F_H^к$$

де  $m$  – маса інерційного навантаження;  $F_1, F_2$  – площі поршня в робочих порожнинах;  $F_H^к, F_H^{шк}$  – корисне і шкідливе навантаження;  $F_{on}^p$  – програмно регульована сила опору (якщо це передбачено за принципом роботи агрегату).

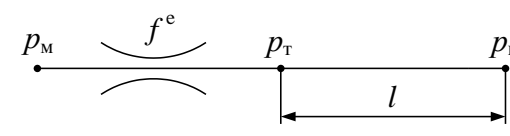
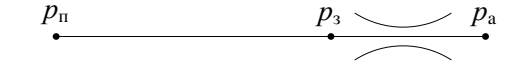
У загальному випадку для даної моделі виконавчого механізму програмно-керованими, залежно від вибору способу регулювання, можуть бути величини

витрат  $G_1$  та  $G_2$ , а також сила опору  $F_{on}^p$ . Величини витрат  $G_1$  та  $G_2$  визначаються з моделі ліній управління, а сила опору  $F_{on}^p$  – з моделі гальмівного пристрою (якщо таке є).

*Модель ліній управління*, які у загальному випадку, складаються з комунікаційних каналів й розподільної апаратури. Дослідження теорії термодинаміки показують, що витрата повітря через складну пневматичну систему, до якої часто можна віднести лінії управління, залежить від багатьох чинників, серед яких важливими є: перепад тиску, а також їх абсолютні значення на вході й виході в лінію управління; витратні характеристики окремих елементів, що входять в лінію управління, а також співвідношення між їх пропускними здатностями. З урахуванням цього, для визначення витрати робочого середовища у двох випадках напряму руху, отримано систему рівнянь (табл. 2).

Таблиця 2

Звідна таблиця результатів

I.		$y = \frac{p_n}{p_m}; y_3 = \frac{p_t}{p_m}; y_T = \frac{p_n}{p_T};$ $\zeta = \frac{0,5\lambda \cdot l_T}{D_T}; \lambda \approx 0,03.$
1.	$y \geq 0,5, B - \text{будь-який}; y < 0,5 \text{ й } B \geq \sqrt{1 - 4y^2}, \text{ де } B = \frac{2f^e \sqrt{\zeta}}{F_T};$ $G = p_m f^e \sqrt{\frac{2}{RT}} y_3 (1 - y_3), \text{ де } y_3 = \left( \sqrt{B^4 + 4y^2(1 + B^2)} + B^2 \right) / [2(1 + B^2)].$	
2.	$y < 0,5 \text{ и } B < \sqrt{1 - 4y^2}; G = \frac{1}{2} p_m \sqrt{\frac{2}{RT}}.$	
II.		$y = \frac{p_a}{p_n}; y_3 = \frac{p_a}{p_3}; y_T = \frac{p_a}{p_n}.$
1.	$y \geq 0,5, B - \text{будь-який}; y < 0,5 \text{ и } B > \sqrt{\frac{1}{y^2} - 4};$ $G = p_m f^e \sqrt{\frac{2}{RT}} y_3 (1 - y_3), \text{ де } y_3 = \frac{y(yB^2 + \sqrt{y^2 B^4 + 4y^2 B^2 + 4})}{2(1 + y^2 B^2)}.$	
2.	$y < 0,5 \text{ и } B < \sqrt{\frac{1}{y^2} - 4}; G = \frac{1}{2} p_m y_3 f^e \sqrt{\frac{2}{RT}}, \text{ где } y_3 = \frac{1}{2} y \sqrt{B^2 + 4}.$	
<p>Примітка: <math>y_3, y_T, y</math> – відносний перепад тиску на зосередженому опорі, трубопроводі і лінії управління; <math>p_m, p_t, p_n</math> – абсолютний тиск повітря на вході зосередженого опору, трубопроводу і робочої порожнини; <math>p_a</math> – атмосферний тиск; <math>f^e</math> – ефективна площа; <math>B</math> – конструктивний параметр лінії управління; <math>\zeta</math> – коефіцієнт опору трубопроводу; <math>\lambda</math> – коефіцієнт тертя повітря в трубі; <math>D_T, F_T, l_T</math> – відповідно внутрішній діаметр, площа прохідного перетину і довжина труби; <math>G</math> – витрати через лінію управління.</p>		

I варіант – робоче середовище поступає з магістралі в порожнину пневмодвигуна. II варіант – робоче середовище поступає з порожнини пневмодвигуна в магістраль.

На основі розглянутої моделі ліній управління знайдено значення витрат, які входять до рівнянь термодинаміки.

Оцінка функціональних можливостей позиційних пневмоагрегатів з точки зору їх динаміки є одною з основних задач, що виникають перед проектувальником пневмоагрегатів. Ця задача вирішена на базі зворотної задачі динамічного розрахунку пневмоагрегата, а саме, за відомими конструктивними параметрами пневмоагрегата й заданому закону руху його вихідної ланки, визначається закон зміни ефективних площ розподільної апаратури. Аналіз рівнянь термодинаміки для чисельного вирішення показує, що для пневмодвигуна з двома робочими порожнинами, система може бути представлена у вигляді:

$$\dot{p}_1 = \frac{k}{F_1 x + V_{10}} (f_1^e K_G^1 - p_1 F_1 \dot{x}),$$

$$\dot{p}_2 = \frac{k}{F_2 (S - x) + V_{20}} (f_2^e K_G^2 + p_2 F_2 \dot{x}),$$

де  $S$  – хід поршня;  $f_1^e$  та  $f_2^e$  – ефективні площі зосереджених опорів, значення яких змінюються програмним шляхом;  $K_G^1$  та  $K_G^2$  – коефіцієнти що враховують схему підключення до порожнин пневмодвигуна;  $V_{10}$  та  $V_{20}$  – шкідливі об'єми робочих порожнин пневмодвигуна;  $x$  – координата переміщення вихідної ланки;  $\dot{x}$  – швидкість вихідної ланки.

При чисельному методі Ейлера  $p_1$  та  $p_2$  визначаються таким чином:

$$p_{1(i+1)} = p_{1(i)} + \dot{p}_{1(i)} h \quad \text{та} \quad p_{2(i+1)} = p_{2(i)} + \dot{p}_{2(i)} h,$$

де  $h$  – середній крок,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Після підстановки останніх двох умов в рівняння руху, отримано

$$m\ddot{x} = \left[ p_{1(i)} + \frac{k \cdot h \cdot (f_1^e K_G^1 - p_{1(i)} F_1 \dot{x})}{F_1 x + V_{10}} \right] \cdot F_1 -$$

$$- \left[ p_{2(i)} + \frac{k \cdot h \cdot (f_2^e K_G^2 + p_{2(i)} F_2 \dot{x})}{F_2 (S - x) + V_{20}} \right] \cdot F_2 - p_a \cdot (F_1 - F_2) - F_{on}.$$

Отримане рівняння є початковим для вирішення зворотної задачі. Вигляд рішення залежатиме від того, яка з площ  $f_1^e$  або  $f_2^e$  визначається за програмою:

1-й випадок:  $f_1^e = f_2^e = f^e$ , що має місце, наприклад, при симетричному розподільному пристрої:

$$f^e = \frac{m\ddot{x} - p_{1(i)}F_1 + p_{2(i)}F_2 + p_a \cdot (F_1 - F_2) + F_{on}}{\left\{ \frac{k \cdot h \cdot F_1 \cdot K_G^1}{(F_1 \cdot x + V_{10})} - \frac{k \cdot h \cdot F_2 \cdot K_G^2}{[F_2 \cdot (S - x) + V_{20}]} \right\}} +$$

$$+ \frac{k \cdot h \cdot p_{1(i)} \cdot \dot{x} \cdot F_1^2}{(F_1 \cdot x + V_{10})} + \frac{k \cdot h \cdot p_{2(i)} \cdot \dot{x} \cdot F_2^2}{[F_2 \cdot (S - x) + V_{20}]} \cdot$$

$$\left\{ \frac{k \cdot h \cdot F_1 \cdot K_G^1}{(F_1 \cdot x + V_{10})} - \frac{k \cdot h \cdot F_2 \cdot K_G^2}{[F_2 \cdot (S - x) + V_{20}]} \right\}.$$

2-й випадок: відомий закон зміни  $f_2^e$ . Необхідно визначити закон зміни  $f_1^e$ :

$$f_1^e = \left\{ m\ddot{x} - p_{1(i)}F_1 + p_{2(i)}F_2 + p_a \cdot (F_1 - F_2) + F_{on} + \frac{k \cdot h \cdot p_{1(i)} \cdot \dot{x} \cdot F_1^2}{(F_1 \cdot x + V_{10})} + \right.$$

$$\left. + \frac{k \cdot h \cdot F_2 (p_{2(i)} \cdot F_2 \cdot \dot{x} + f_2^e \cdot K_G^2)}{[F_2 \cdot (S - x) + V_{20}]} \right\} \cdot \frac{(F_1 \cdot x + V_{10})}{(k \cdot h \cdot K_G^1 \cdot F_1)}.$$

3-й випадок: відомий закон зміни  $f_1^e$ . Необхідно визначити  $f_2^e$ :

$$f_2^e = \left\{ -m\ddot{x} + p_{1(i)}F_1 + p_{2(i)}F_2 - p_a \cdot (F_1 - F_2) - F_{on} + \right.$$

$$\left. + \frac{k \cdot h \cdot F_1 \cdot (K_G^1 \cdot f_1^e - p_{1(i)} \cdot \dot{x} \cdot F_1)}{(F_1 \cdot x + V_{10})} - \frac{k \cdot h \cdot p_{2(i)} \cdot F_2 \cdot \dot{x}}{[F_2 \cdot (S - x) + V_{20}]} \right\} \cdot \frac{(F_2 \cdot (S - x) + V_{20})}{(k \cdot h \cdot K_G^2 \cdot F_2)}.$$

При використанні гальмівного пристрою з програмним управлінням зворотня задача полягає у визначенні закону зміни  $F_{on}$ , який забезпечує задані технічні характеристики агрегату, а саме:

$$F_{on} = \left[ \frac{p_{1(i)} + k \cdot h \cdot (K_G^1 \cdot f_1^e - p_{1(i)} \cdot \dot{x} \cdot F_1)}{(F_1 \cdot x + V_{10})} \right] \cdot F_1 -$$

$$- \left[ \frac{p_{2(i)} + k \cdot h \cdot (f_2^e \cdot K_G^2 + p_{2(i)} \cdot F_2 \cdot \dot{x})}{(F_2 \cdot (S - x) + V_{20})} \right] \cdot F_2 - p_a \cdot (F_1 - F_2) - m\ddot{x}.$$

Параметрами руху вихідної ланки пневмоагрегата є значення переміщення і похідних від нього за часом – швидкості, прискорення і т.п. Очевидно, що всі вони задані залежністю переміщення від часу – функцією позиціонування. Враховуючи, що позиційний пневмоагрегат вирішує транспортну задачу переміщення робочого органу об'єкту механізації з однієї точки в іншу, ця функція повинна відповідати наступним основним вимогам:

1. Вимога нерозривності значень основних параметрів руху – переміщення, швидкості, прискорення.
2. Вимога стійкості розгону й гальмування, що полягає в рівності нулю значень швидкості й прискорення в початковий та кінцевий моменти руху.
3. Вимога мінімальності перевантажень, що полягає в забезпеченні мінімальності значень прискорення протягом всього періоду руху пневмоагрегата.
4. Вимога найбільшої продуктивності, що полягає в забезпеченні мінімальності часу руху.

Вказаним вище вимогам відповідає функція позиціонування, що описується для семи інтервалів руху. Кожен інтервал описується двома значеннями параметрів руху, відповідних початку періоду руху і всьому періоду руху. Функція позиціонування, що описується математичними залежностями на семи інтервалах, визначається п'ятьма параметрами, два з яких жорстко задані, це  $x_0$  й  $x_K$  – початкова і кінцева координати переміщення вихідної ланки виконавчого механізму, а три  $\dot{x}_{\max}$ ,  $\ddot{x}_{\max}$  й  $U$  – швидкість постійного руху, максимальне прискорення й значення швидкості зміни прискорення обираються проектувальником.

Для вирішення даної задачі розроблено програму в обчислювальній системі MATLAB (trial version) й побудовано графіки зміни основних параметрів руху для двох функцій позиціонування, що мають загальні початкову і кінцеву координати переміщення  $x_0 = 0,1$  й  $x_K = 0,4$  м, але відрізняються максимальними значеннями параметрів руху. Для кривої 1 –  $\dot{x}_{\max} = 0,533$  м/с;  $\ddot{x}_{\max} = 6$  м/с<sup>2</sup>,  $U = 135$  м/с<sup>3</sup>; для кривої 2 –  $\dot{x}_{\max} = 1,065$  м/с;  $\ddot{x}_{\max} = 8$  м/с<sup>2</sup>,  $U = 120$  м/с<sup>3</sup> (рис. 6).

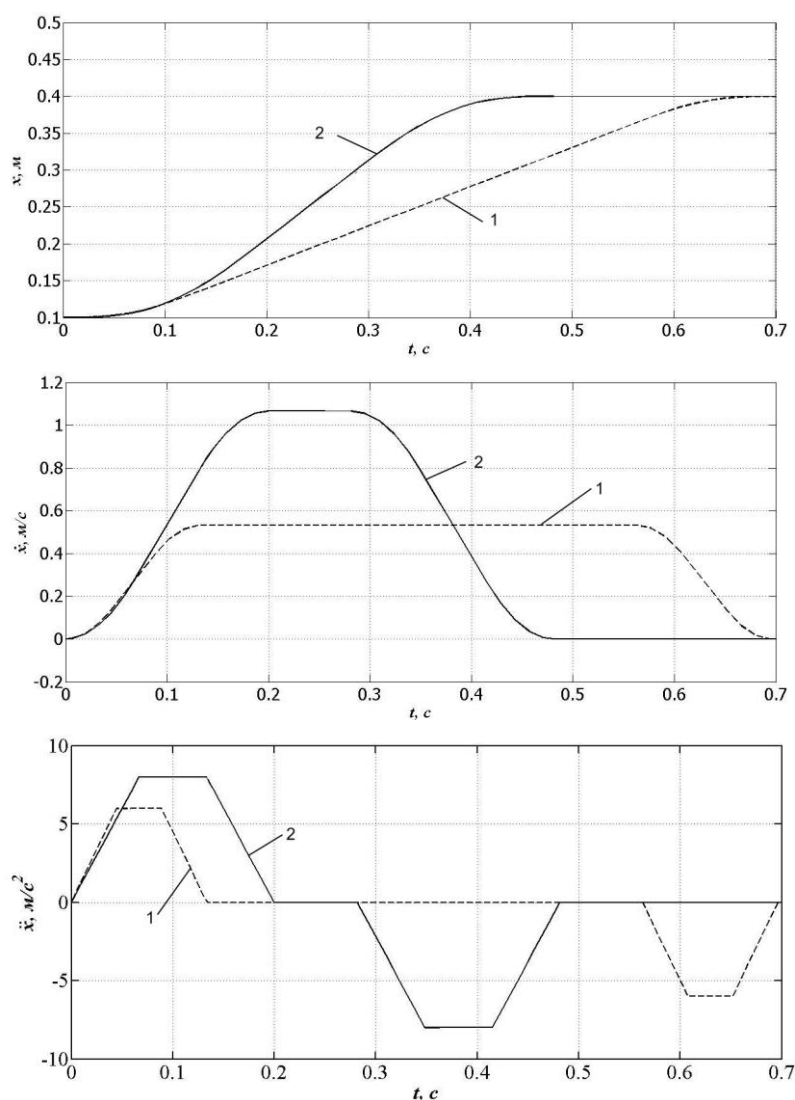


Рис. 6 Графіки зміни основних параметрів руху для двох функцій позиціонування, що мають загальні початкову і кінцеву координати переміщення

Розглянута функція позиціонування забезпечує плавний розгін вихідної ланки пневмоагрегата, потім його рух із постійною швидкістю і плавне гальмування із зупинкою в точці позиціонування.

Для поліпшення динамічних характеристик функцію позиціонування скоректовано таким чином, що вона описується не на семи інтервалах руху, а на одинадцяти. Це дає можливість забезпечити плавну зміну прискорення, усуваючи злами.

У четвертому розділі приводиться аналіз запропонованих раціональних схемних рішень позиційних пневмоагрегатів, які дозволяють здійснити практичну реалізацію

отриманих алгоритмів управління. Проведено моделювання позиційного пневмоагрегата, схемне рішення якого створено з використанням дискретних розподільних пристроїв. Схема пневмоагрегата представлена на рис.7.

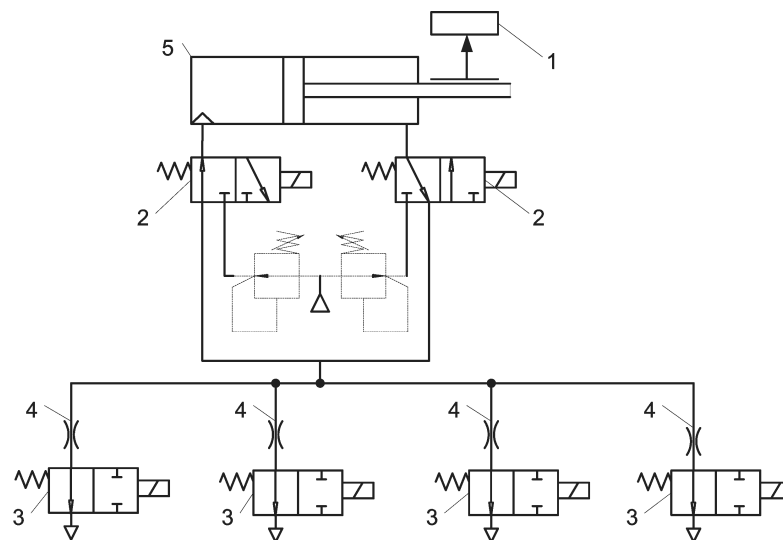


Рис. 7. Схема позиційного пневмоагрегата

Пневмоагрегат складається з наступних елементів: 1 – датчик положення ПС-3; 2 – пневморозподільник П-РЕ 3/2,5; 3 – пневморозподільник П-РЕ 3/1; 4 – пневмодросель П-ДК-С; 5 – пневмоциліндр 32-400.

На підставі диференціальних рівнянь, що описують динамічні характеристики пневмоагрегата в процесі роботи та теоретичний розрахунок яких приведено у другому розділі, складено Simulink-модель позиційного пневмоагрегата (рис. 8). Основними елементами моделі є: блок завдання функції позиціонування; блок, який описує поршневу порожнину пневмодвигуна; блок знаходження ефективної площі зливної лінії.

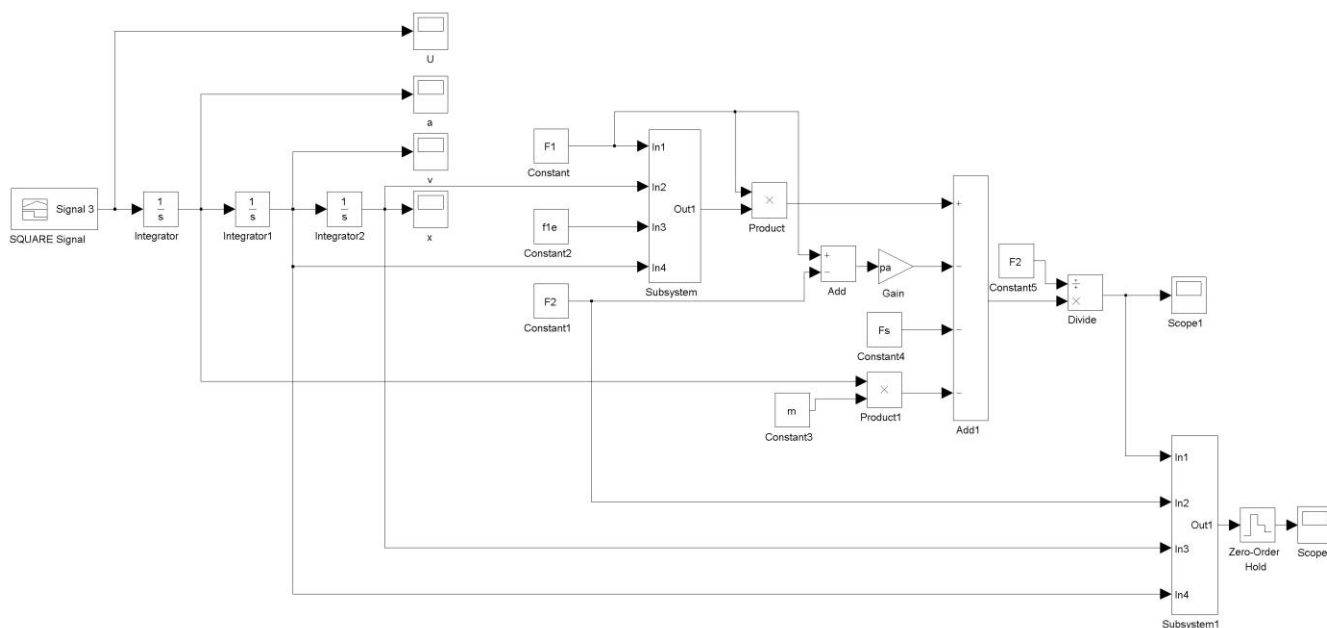


Рис. 8. Simulink-модель для вирішення зворотної задачі динаміки позиційного пневмоагрегата



Для знаходження реальної швидкодії ланок позиційних пневмоагрегатів проведено дослідження для визначення їх часу спрацьовування. Отримано графіки процесів включення й відключення ланок позиційного пневмоагрегата. Наприклад, на рис. 9 представлено графіки перемикання ланок, що реалізують функцію  $Y = X_3 X_4 + \overline{X_1} X_3 + X_1 X_2 \overline{X_4}$  (ланка №8 – табл. 3).

Таблиця 3

Типова ланка №8 – функція  $Y = X_3 X_4 + \overline{X_1} X_3 + X_1 X_2 \overline{X_4}$ 

№ ланки	Логічна функція на виході ланки	Схема реалізації	Схема випробувань
8	$Y = X_3 X_4 + \overline{X_1} X_3 + X_1 X_2 \overline{X_4}$		

На рис. 9 криві 1 й 2 відповідають включенню й відключенню ланки, яка реалізована за схемою 8а відповідно; криві 3 й 4 відповідають включенню і відключенню ланки, яка реалізована за схемою 8б відповідно; криві 5 й 6 відповідають включенню й відключенню ланки, яка реалізована за схемою 8в; криві 7 й 8 відповідають включенню і відключенню ланки, яка реалізована за схемою 8г.

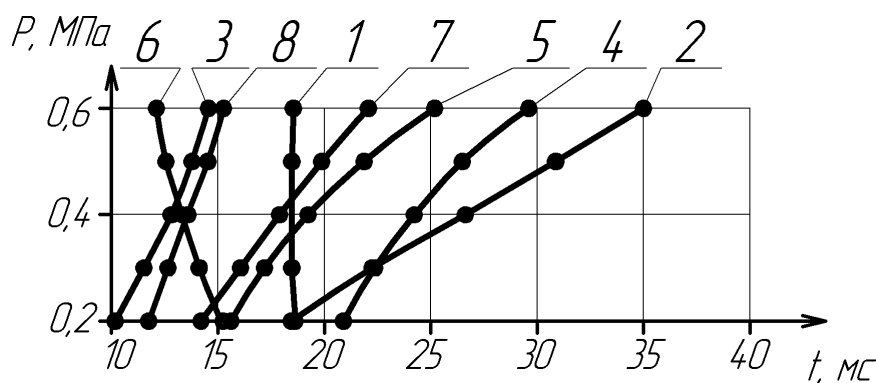


Рис. 9. Динамічні характеристики типової ланки №8

Результатом є експериментально визначений час спрацьовування ланок позиційних пневмоагрегатів, реалізованих на дискретній апаратурі високого тиску, що дозволяє найточніше підібрати потрібні за технологічним процесом динамічні характеристики вихідного пневмоагрегата, що характерно як для технологічного устаткування, так й для машинобудівної галузі в цілому.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена підвищенню технічного рівня гідропневмоагрегатів за рахунок структурного синтезу і динамічного аналізу раціональних схем. Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Розроблено структуру схем гідропневмоагрегатів дискретно-аналогового управління з розподільниками з однобічним управлінням, що дозволяє звести до мінімуму число елементів блоку пам'яті, а також число логічних елементів, необхідних для реалізації схеми.

2. Розроблено метод проектування многотактних схем дискретно-аналогового управління з використанням розподільників з однобічним управлінням, заснований на повній мінімізації стандартної позиційної структури, який включає: опис роботи системи гідропневмоагрегата; структурний синтез гідропневмоагрегата; синтез многотактної схеми управління; синтез схеми для окремого позиційного гідропневмоагрегата. Даний метод дозволяє отримувати схеми, що містять просту дискретну гідропневмоапаратуру, й не вимагає використання складних пропорційних гідропневмоапаратів, що стежать.

3. Розроблено математичну модель роботи системи позиційних пневмоагрегатів з програмованими електронними блоками управління, що дозволяє враховувати особливості системи пневмоагрегатів, й включає математичні моделі виконавчого механізму, модель ліній управління й модель системи управління з врахуванням реального масштабу часу.

4. В результаті досліджень розроблено методику оцінки функціональних можливостей пневмоагрегата, з точки зору його динаміки, що дозволяє оцінити в якій мірі даний пневмоагрегат може забезпечити виконання потрібних за технологічним процесом характеристик, таких як: швидкодія, вантажопідйомність, точність відпрацювання задаючого сигналу та ін. Ця задача була вирішена на базі зворотної задачі динамічного розрахунку пневмоагрегата, яка полягала в знаходженні конструктивних параметрів за заданими технічними характеристиками, для цього була визначена функція позиціонування, що описується для семи та одинадцяти інтервалів руху.

5. На підставі функції позиціонування отримано закони руху вихідної ланки позиційного пневмоагрегата, що дозволяє забезпечити задані технічні характеристики, та забезпечує плавний розгін вихідної ланки пневмоагрегата, потім його рух із постійною швидкістю та плавне гальмування із зупинкою в точці позиціонування. Для використання отриманих результатів при проектуванні розроблена програма в середовищі MATLAB (trial version).

6. Проведено динамічний аналіз раціональних схемних рішень позиційних пневмоагрегатів, шляхом чисельних і експериментальних досліджень, що дозволяє отримати необхідні закони руху вихідної ланки пневмоагрегата з врахуванням реальної швидкодії розподільної апаратури.

7. Результати дисертаційної роботи використовуються в практиці інженерних розрахунків ОП Корпорації «Гидроелекс», (м. Харків), а також в навчальному процесі кафедри «Гідравлічні машини» НТУ «ХП» в дисциплінах:

«Гідропневмоавтоматика», «Пневматичні та гідравлічні системи управління», «Гідропневмоавтоматика нафтового устаткування».

### СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фатеев А. Н. К вопросу синтеза схем гидропневмоагрегатов / М. В. Черкашенко, Н. Н. Фатеева, А. Н. Фатеев // Интегрированные технологии та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ», 2007. – №4. – С. 57–63.

Здобувачем проведено порівняльну оцінку схем, побудованих з використанням формалізованих алгоритмів синтезу схем гідропневмоагрегатів, заснованих на використанні агрегатного підходу й підходу, заснованого на симбіозі елементного і агрегатного підходів до їх побудови.

2. Фатеев А. Н. Синтез схем гидропневмоагрегатов / М. В. Черкашенко, А. Н. Фатеев // Интегрированные технологии та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – №4. – С. 43–50.

Здобувачем приведена структурна організація схем гідропневмоагрегатів дискретно-аналогового управління.

3. Фатеев А. Н. Синтез гидроагрегатов с параллельными алгоритмами условиями работы / А. Н. Фатеев, Н. Н. Фатеева // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – №6. – С. 173–176.

Здобувачем проведено синтез гідроагрегатів з паралельними алгоритмами роботи, що веде до скорочення кількості апаратури, необхідної для побудови схеми.

4. Фатеев А. Н. Оценка количественных показателей надежности гидропневмоагрегатов на этапе их синтеза / А. Н. Фатеев, Н. Н. Фатеева // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – №29. – С. 95–98.

Здобувачем проведено синтез гідропневмоагрегатів, які реалізовані методом стандартної позиційної структури або методом мінімізації.

5. Фатеев А. Н. Распределение нормируемых показателей надежности в системах гидропневмоагрегатов на этапе их синтеза / А. Н. Фатеев, Н. Н. Фатеева // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – №27. – С. 108–113.

Здобувачем проведено синтез гідропневмоагрегата завантажувального пристрою до токарного верстата.

6. Фатеев А. Н. До питання динамічного розрахунку пневмоциліндрів з двостороннім управлінням / А. Н. Фатеев, Н. Н. Фатеева // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – №13. – С. 171–176.

Здобувачем проведені динамічні дослідження пневмоагрегатів з метою одержання часу спрацьовування виконавчих пристроїв.

## АНОТАЦІЇ

Фатєєв О.М. Підвищення технічного рівня гідропневмоагрегатів за рахунок синтезу раціональних схем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2011.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню технічного рівня гідропневмоагрегатів за рахунок удосконалення метода структурного синтезу і динамічного аналізу раціональних схем. Розроблена нова структура схем гідропневмоагрегатів й метод проектування многотактних схем дискретно-аналогового управління з використанням розподільників з однобічним управлінням, що дозволяє отримувати схеми, які містять просту дискретну гідропневмоапаратуру, та звести до мінімуму число логічних елементів, необхідних для реалізації схеми. Розроблено математичну модель системи позиційних пневмоагрегатів, що враховує особливості системи пневмоагрегатів і включає математичні моделі виконавчого механізму, модель ліній управління й модель системи управління з врахуванням реального масштабу часу. Розроблено алгоритми і методи управління позиційними пневмоагрегатами. Проведено динамічний аналіз раціональних схемних рішень позиційних пневмоагрегатів, шляхом експериментальних досліджень, що дозволяє отримати необхідні закони руху вихідної ланки пневмоагрегата з урахуванням реальної швидкодії розподільної апаратури. Час спрацьовування ланок позиційних пневмоагрегатів, реалізованих на дискретній апаратурі високого тиску, визначено експериментально, що дозволяє провести всебічний порівняльний аналіз та скоротити строки проектування пневмоагрегатів нового технологічного устаткування.

Результати роботи використовуються в практиці інженерних розрахунків ОП Корпорації «Гідроелекс» (м. Харків), а також в навчальному процесі НТУ «ХПІ» у дисциплінах «Гідропневмоавтоматика», «Пневматичні та гідравлічні системи управління», «Гідропневмоавтоматика нафтового устаткування».

*Ключові слова:* гідропневмоагрегат, позиційна структура, елементи схем, розподільник з однобічним управлінням, пневмодвигун лінійної дії.

Фатеев А.Н. Повышение технического уровня гидропневмоагрегатов за счет синтеза рациональных схем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2011.

Диссертационная работа посвящена повышению технического уровня гидропневмоагрегатов за счет усовершенствования метода структурного синтеза и динамического анализа рациональных схем. Разработана новая структура схем гидропневмоагрегатов и метод проектирования многотактных схем дискретно-аналогового управления с использованием распределителей

с

односторонним

управлением, что позволяет получать схемы, которые содержат простую дискретную гидропневмоаппаратуру, и свести к минимуму число логических элементов, необходимых для реализации схемы. Разработана математическая модель системы позиционных пневмоагрегатов с программируемыми электронными блоками управления, учитывающая особенности системы пневмоагрегатов и включающая в себя математические модели исполнительного механизма, модель линий управления и модель системы управления с учетом реального масштаба времени. Разработана методика оценки функциональных возможностей позиционного пневмоагрегата, с точки зрения его динамики, что позволяет оценить в какой мере данный пневмоагрегат может обеспечить выполнение нужных по технологическому процессу характеристик, таких как: быстродействие, грузоподъемность, точность отработки задающего сигнала и др. Данная задача решена на базе обратной задачи динамического расчета пневмоагрегата, которая заключалась в нахождении конструктивных параметров по заданным техническим характеристикам. Для этого были разработаны законы движения выходного звена позиционного пневмоагрегата, выраженные аналитическими зависимостями и определена функция позиционирования, которая описывается на семи и одиннадцати интервалах движения. Определены критерии программной управляемости пневмоагрегатов. Для удобства практического применения этих законов была разработана программа в среде MATLAB (trial version), что позволяет обеспечить заданные технические характеристики, а именно: плавный разгон выходного звена пневмоагрегата, затем его движение с установившейся скоростью и плавное торможение с остановкой в точке позиционирования. Разработаны алгоритмы и методы управления позиционными пневмоагрегатами.

Проведен динамический анализ рациональных схемных решений позиционных пневмоагрегатов путем экспериментальных исследований, что позволяет получить необходимые законы движения исходного звена пневмоагрегата с учетом реального быстродействия распределительной аппаратуры. Время срабатывания звеньев позиционных пневмоагрегатов, реализованных на дискретной аппаратуре высокого давления, определено экспериментально, что позволяет провести всесторонний сравнительный анализ и сократить сроки проектирования пневмоагрегатов нового технологического оборудования.

Результаты работы используются в практике инженерных расчетов ОП Корпорации «Гидроэлекс» (г. Харьков), а также в учебном процессе НТУ «ХПИ» в дисциплинах «Гидропневмоавтоматика», «Пневматические и гидравлические системы управления», «Гидропневмоавтоматика нефтяного оборудования».

*Ключевые слова:* гидропневмоагрегат, позиционная структура, элементы схем, распределитель с односторонним управлением, пневмодвигатель линейного действия.

Fatyeyev A.N. Increase of a technological level of hydropneumatic units at the expense of synthesis of rational schemes. – As the manuscript.



Підписано до друку 10. 01. 2012 р. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. №030356

---

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво № 2 480 017 0000 040432 від 21.03.2001 р.  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16.