МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНИВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ПОЛУШКІН КОСТЯНТИН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.05

СИНТЕЗ СИСТЕМ ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ АЛГОРИТМАМИ РОБОТИ

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.
Роботу виконано на кафедрі гідравлічних машин Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Черкашенко Михайло Володимирович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри гідравлічних машин

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Русанов Андрій Вікторович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
заступник директора з наукової роботи

кандидат технічних наук, доцент
Роговий Андрій Сергійович,
Харківський національний
автомобільно-дорожній університет,
доцент кафедри теоретичної механіки і гідравліки

Захист відбудеться 14 квітня 2016 р. о $14^{\underline{30}}$ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 10 березня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом відбувається широке впровадження в промисловість гідропневмоагрегатів, промислових роботів, автоматичних ліній, підйомно-транспортних машин та інших машин-автоматів.

Сучасні системи гідропневмоагрегатів об'єктів автоматизації (металорізальні верстати, ковальсько-пресове обладнання, ливарні машини, автоматичні маніпулятори тощо) вимагають розробки нових засобів управління технологічним обладнанням для виконання складних операцій, що включають паралельні алгоритми роботи. У теперішній час перспективним є проектування таких систем при повній мінімізації стандартної позиційної структури. У результаті вдосконалення синтезу гідропневмоагрегатів поліпшуються якісні (зниження енергетичних втрат, автоматизація процесів тощо) та кількісні (зростання продуктивності, зниження процента браку) показники проектування.

Отже, синтез гідропневмоагрегатів, які реалізують паралельні алгоритми роботи, і вдосконалення методів проектування систем технологічного обладнання є актуальними завданнями, що визначило напрям дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі гідравлічних машин НТУ "ХПІ" відповідно до наукового напрямку в галузі підвищення технічного рівня гідропневмоагрегатів. У дисертаційній роботі використовуються результати, отримані за участю здобувача при виконанні держбюджетних тем МОН України "Розробка математичних моделей і методів проектування гідроагрегатів з широким діапазоном експлуатації на пікових навантаженнях і оптимізація енергокавітаційних характеристик" (ДР № 0112U000406), "Отримання суттєвого ефекту в народному господарстві за рахунок підвищення ККД, поліпшення надійності і довговічності експлуатації гідромашин шляхом їхнього аналізу, синтезу, технічної діагностики" (ДР № 0115U000513) та госпдоговірних НДР "Дослідження динамічних характеристик гідророзподільника з пропорційним управлінням" (ОП Корпорація "Гідроелєкс", м. Харків), "Дослідження та розробка методів синтезу схем гідропневмоагрегатів" (ОП Корпорація "Гідроелєкс").

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – підвищення технічного рівня гідропневмоагрегатів шляхом створення методів синтезу систем з паралельними алгоритмами роботи, безроздільної декомпозиції схем, математичного моделювання роботи об'єктів автоматизації.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

– синтезувати позиційну структуру гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи;

– розробити методи синтезу систем гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи;

– створити методи проектування схем з використанням безроздільної декомпозиції рівнянь;

– розробити математичну модель робочого процесу позиційного пневмоагрегата з урахуванням реальної швидкодії пневматичних пристроїв;

– експериментально визначити швидкодію складових частин позиційного пневмоагрегата для найбільш точного підбору його динамічних характеристик, що вимагаються згідно з технологічним процесом.

Об'єктом дослідження є робочі процеси в гідропневмоагрегатах об'єктів автоматизації.

Предмет дослідження – структурний синтез і динамічний аналіз гідропневмоагрегатів об'єктів автоматизації.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися положення теорії механіки рідини і газу, термодинаміки та структурного синтезу й аналізу. Алгоритми та методи синтезу схем гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи розроблені на основі повної мінімізації стандартної позиційної структури. Динамічні параметри позиційних пневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи визначалися за допомогою математичних моделей термодинамічних процесів, розроблених з використанням теорії термодинаміки і структурного аналізу пневмоагрегатів. Швидкодія складових частин позиційного пневмоагрегата визначалася експериментально на дослідних зразках.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– вперше розроблено методи синтезу схем та математичні моделі робочого процесу гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи на основі повної мінімізації стандартної позиційної структури проф. Черкашенка М. В.;

– вперше розроблено алгоритми проектування систем гідропневмоагрегатів з використанням безроздільної декомпозиції рівнянь проф. Черкашенка М. В., що дозволяють отримати раціональну схему без перебору можливих варіантів реалізації;

– вперше розроблена позиційна структурна організація гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи, що дозволяє значно зменшити кількість логічних елементів при проектуванні схем;

– отримала подальший розвиток теорія динамічного аналізу позиційних пневмоагрегатів, що дозволило значно скоротити час проектування.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудівної галузі пов'язане з розробкою позиційної структури гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи, що дозволяє комплексно вирішувати задачі синтезу раціональних схем.

Результати дисертаційного дослідження використовуються при розробці та модернізації гідропневмоагрегатів у ОП Корпорації "Гідроелєкс".

Основні результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри гідравлічних машин НТУ "ХПІ" у дисциплінах "Гідропневмоавтоматика", "Пневматичні й гідравлічні системи управління", "Гідропневмоавтоматика нафтового устаткування".

Особистий внесок здобувача. Усі положення дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Серед них: розробка позиційної структури гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи; ство-

рення математичних моделей робочого процесу та алгоритмів проектування схем гідропневмоагрегатів з використанням безроздільної декомпозиції рівнянь; розробка комплексних математичних моделей роботи позиційного пневмоагрегата для динамічного аналізу; дослідження запропонованої математичної моделі роботи позиційного пневмоагрегата для використання при подальшому проектуванні пневмоагрегатів; експериментальні дослідження з визначення часу спрацьовування складових частин позиційних пневмоагрегатів, що дозволило дати оцінку працездатності схеми.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на XIX, XX, XXII, XXIII Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2011 р., 2012 р., 2014 р., 2015 р.); XIX Міжнародної науково-технічної конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці" (м. Кіровоград, 2014 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, серед них: 5 статей у наукових фахових виданнях України (4 – у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних, а саме: Google Scholar, SIS, Ulrich's Periodicals Directory), 4 – у матеріалах конференцій, 1 патент України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 188 сторінок; з них 54 рисунки за текстом; 5 рисунків на 5 окремих сторінках; 13 таблиць за текстом; 1 таблиця на 1 окремій сторінці; список використаних джерел інформації з 129 найменувань на 15 сторінках, 4 додатки на 34 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовані актуальність теми, вибір напрямку дослідження, наведені мета і задачі дослідження, охарактеризовані наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведені дані про апробацію й публікації основних наукових положень, які містить дисертація.

У **першому розділі** проаналізовані існуючі методи проектування позиційних гідропневмоагрегатів. Зазначено, що в теперішній час при синтезі систем гідропневмоагрегатів використовується стандартна позиційна структура, яка характеризується великою кількістю елементів. Часткова мінімізація стандартної позиційної структури була запропонована в працях Юдицького С. А., Goedecke W., Belforte G., Рейдзо Я. та ін. Метод повної мінімізації стандартної позиційної структури, запропонований Черкашенком М. В., дозволив отримати мінімальну структуру схем. Також при синтезі схем гідропневмоагрегатів раніше використовувалися методи роздільної декомпозиції рівнянь, які описані в працях Юдицького С. А., Bettini A., Middlton F., Gauthier D., Eng B., Rohner P. та ін. Запропоновані Черкашенком М. В. методи безроздільної декомпозиції рівнянь дозволили синтезувати мінімальні схеми. У галузі проектування схем відомі також роботи Струтинського В. Б., Губарева О. П., Федор-

ця В. О., Педченка М. Н. та ін. Визначена доцільність розробки нової організації гідропневмоагрегатів, що дозволяє синтезувати системи з паралельними алгоритмами роботи при повній мінімізації стандартної позиційної структури.

У **другому розділі** запропоновано метод проектування систем гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи з використанням повної мінімізації стандартної позиційної структури та алгоритм синтезу схем, що дозволяє вибрати раціональну схему без перебору можливих варіантів реалізації в рамках безроздільної декомпозиції рівнянь.

На рис. 1 представлена узагальнена структура управління гідропневмоагрегатів, яка відрізняється тим, що містить додатковий пристрій мікрокоманд для систем пневмо- і гідроприводів.

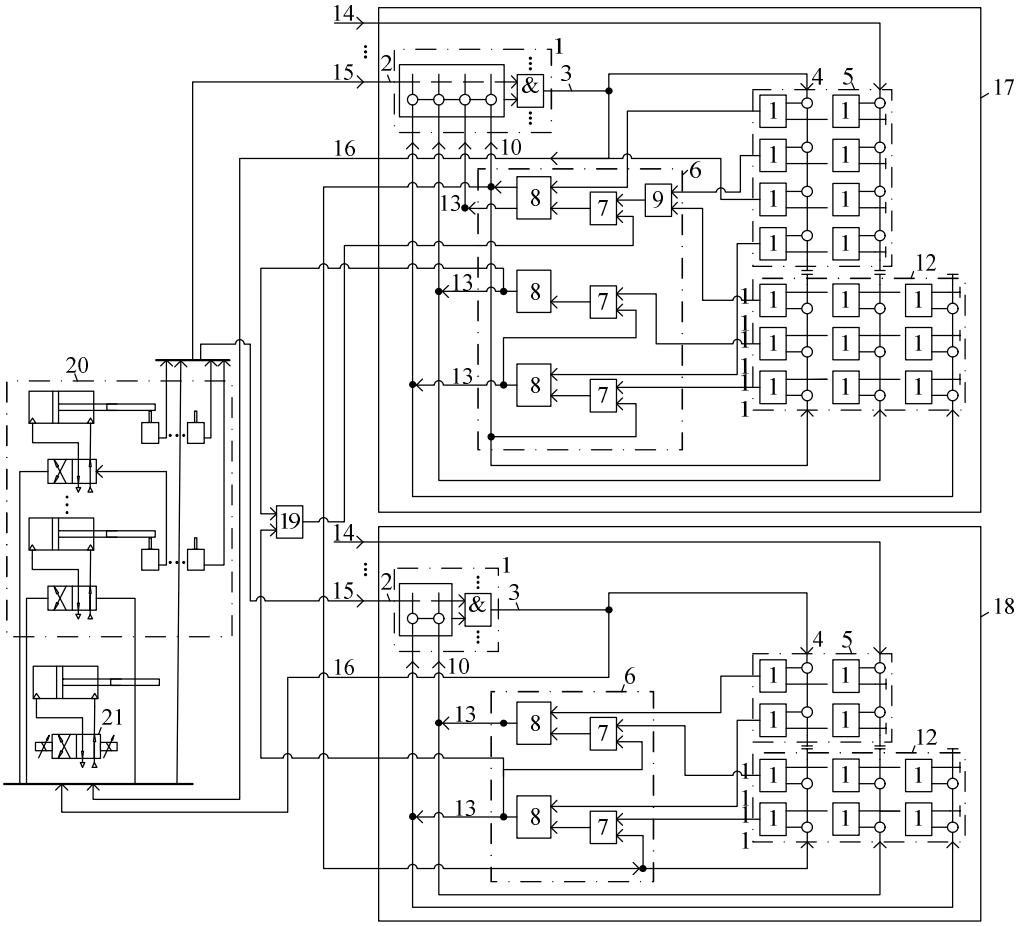


Рисунок 1 – Позиційна структура управління гідропневмоагрегатів: *1* – матриця збігів; *2* – вхід, *3* – вихід матриці збігів; *4* – вхід матриці поділу вмикань мікрокоманд; *5* – матриця поділу вмикань; *6* – регістр; *7* – елементи АБО; *8* – тригери; *9* – елемент АБО; *10* – входи матриці збігів; *11* – виходи матриці вмикань; *12* – матриця вмикань; *13* – виходи регістра; *14*, *15* – входи, *16* – вихід основного та додаткового пристроїв мікрокоманд для систем пневмо- і гідроприводів; *17* – основний пристрій мікрокоманд; *18* – додатковий пристрій мікрокоманд; *19* – елемент АБО; *20* – виконавчі пристрої; *21* – пневморозподільник з пропорційним управлінням, що використовується для позиціонування гідропневмоагрегата

Така організація гідропневмоагрегатів дозволяє синтезувати схеми за допомогою методів повної мінімізаціі стандартної позиційної структури. На їхній основі у дисертації розроблений метод проектування схем гідропневмоагрегатів

з паралельними алгоритмами роботи. Для цього проведено синтез близько 40 систем технологічного обладнання об'єктів автоматизації для знаходження гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи. Тими, що відповідають даному критерію, виявилися пневмоагрегати формувального напівавтомата та автоматичного маніпулятора.

Призначення виконавчих пристроїв формувального напівавтомата, а також їхню взаємодію із вхідними сигналами показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Взаємодія вхідних сигналів та виконавчих пристроїв формувального напівавтомата

Вихідні сигнали		Вхідні сигнали	
Найменування операції	Позначення	Вихідне положення	Кінцеве положення
Переміщення опоки	Z_1	x_7	x_8
Підпресовування	Z_2	x_5	$\tau(Z_2)$
Протягання	Z_3	–	–
Переміщення шибера	Z_4	x_9	x_{10}
Переміщення траверси	Z_5	–	x_{11}
Струшування опоки	Z_6	–	–
Струшування бункера	Z_7	–	–
Обдув форми	Z_8	–	–

Формалізований опис роботи формувального напівавтомата представляється у вигляді графа операцій (рис. 2), де початок паралельних ділянок позначений жирною лінією.

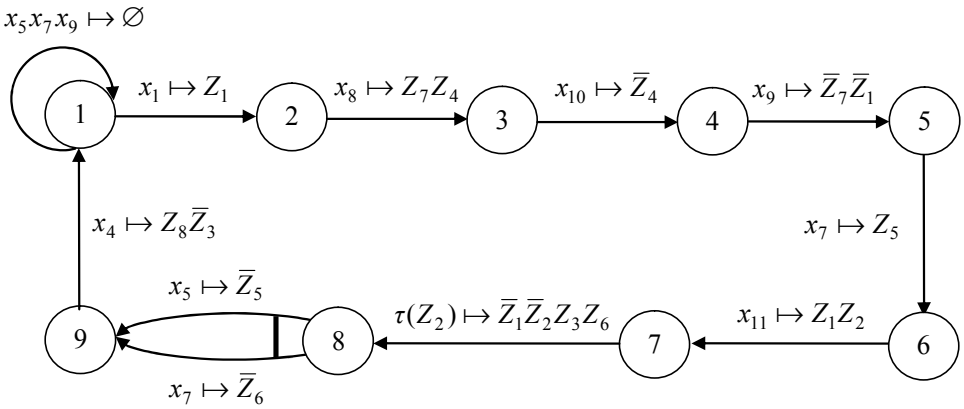


Рисунок 2 – Граф операцій пневмоагрегата формувального напівавтомата

Вхідна послідовність сигналів згідно з наведеним графом операцій виглядає таким чином: $\{x_5\ x_7\ x_9^*,\ x_1\ x_5\ x_7\ x_9,\ x_5\ x_8\ x_9^{**},\ x_5\ x_8\ x_{10},\ x_5\ x_8\ x_9^{**},\ x_5\ x_7\ x_9^*,\ x_5\ x_7\ x_9\ x_{11}^{***},\ \tau(Z_2)\ x_8\ x_9\ x_{11},\ x_5\ x_7\ x_9\ x_{11}^{***},\ x_4\ x_5\ x_7\ x_9\}$, де x_1 – кнопка пуск; x_4 – кнопка обдування форми; однакові вхідні набори відмічені рівною кількістю зірочок (*, **, ***). Застосовується розбивка $\pi=\{\{x_5 x_8 x_9^{**}, x_5 x_7 x_9^*, x_5 x_7 x_9 x_{11}^{***}, \tau(Z_2)\ x_8\ x_9\ x_{11}\},\ \{x_5\ x_7\ x_9\ x_{11}^{***},\ x_4\ x_5\ x_7\ x_9,\ x_5\ x_7\ x_9^*,\ x_1\ x_5\ x_7\ x_9,\ x_5\ x_8\ x_9^{**},\ x_5 x_8 x_{10}\}\}$, де використовується один елемент пам'яті (ЕП) з двома виходами – прямим та інверсним $(y, \overline{y})$.

Матриця відповідностей, що складається для мінімізації логічних рівнянь, має вигляд

	x_1	$\boldsymbol{x_5} x_8 \bar{y}$	x_{10}	$\boldsymbol{x_8} x_9 y$	$x_7 y$	$x_{11} y$	$\tau(Z_2)$	$x_5 \bar{y}$	$x_7 \bar{y}$	x_4	
$x_5 x_7 x_9{}^* \bar{y}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	$\varnothing$
$x_1 x_5 x_7 x_9 \bar{y}$	**1**	0	0	0	0	0	0	1	1	0	Z_1
$x_5 x_8 x_9{}^{**} \bar{y}$	0	**1**	0	0	0	0	0	1	0	0	$Z_4 Z_7$
$x_5 x_8 x_{10} \bar{y} y$	0	❶	**1**	0	0	0	0	1	0	0	$\bar{Z}_4$ ***S***
$x_5 x_8 x_9{}^{**} y$	0	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0	$\bar{Z}_7 \bar{Z}_1$
$x_5 x_7 x_9{}^* y$	0	0	0	1	**1**	0	0	0	0	0	Z_5
$x_5 x_7 x_9 x_{11}{}^{***} y$	0	0	0	①	1	**1**	0	0	0	0	$Z_1 Z_2$
$\tau(Z_2) x_8 x_9 x_{11} y \bar{y}$	0	①	0	1	0	❶	**1**	0	0	0	$\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 Z_3 Z_6$ ***R***
$x_5 x_7 x_9 x_{11}{}^{***} \bar{y}$	0	0	0	0	0	0	0	**1**	1	0	$\bar{Z}_5$
$x_5 x_7 x_9 x_{11}{}^{***} \bar{y}$	0	0	0	0	0	0	0	1	**1**	0	$\bar{Z}_6$
$x_4 x_5 x_7 x_9 \bar{y}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	**1**	$Z_8 \bar{Z}_3$

З наведеної матриці, де S і R – включення та відключення ЕП відповідно, отримані співвідношення, які описують роботу системи напівавтомата: $S = x_{10}$; $R = \tau(Z_2)$; $Z_1 = x_1 + x_{11} y$; $\bar{Z}_1 = x_8 x_9 y + \tau(Z_2)$; $Z_2 = x_{11} y$; $\bar{Z}_2 = \tau(Z_2)$; $Z_3 = \tau(Z_2)$; $\bar{Z}_3 = x_4$; $Z_4 = x_5\, x_8 \bar{y}$; $\bar{Z}_4 = x_{10}$; $Z_5 = x_7\, y$; $\bar{Z}_5 = x_5 \bar{y}$; $Z_6 = \tau(Z_2)$; $\bar{Z}_6 = x_7 \bar{y}$; $Z_7 = x_5\, x_8 \bar{y}$; $\bar{Z}_7 = x_8 x_9 y$; $Z_8 = x_4$.

Таким чином, проведений синтез продемонстрував наявність у пневмоагрегаті формувального напівавтомата паралельних алгоритмів роботи, проте їхня тривалість виявилася незначною. Достатня довжина паралельних ділянок графа операцій знайдена при синтезі пневмоагрегата автоматичного маніпулятора (табл. 2).

Таблиця 2 – Взаємодія вхідних сигналів та виконавчих пристроїв автоматичного маніпулятора

Вихідні сигнали		Вхідні сигнали	
Найменування операції	Позначення	Вихідне положення	Кінцеве положення
Захват заготівки	Z_1	x_2	x_3
Висунення руки	Z_2	x_4	x_5
Поворот руки	Z_3	x_6	x_7
Поворот корпусу	Z_4	x_8	x_9
Включення рольганга	Z_5	–	x_{10}

Граф операцій, що описує роботу пневмоагрегата автоматичного маніпулятора, представлений на рис. 3.

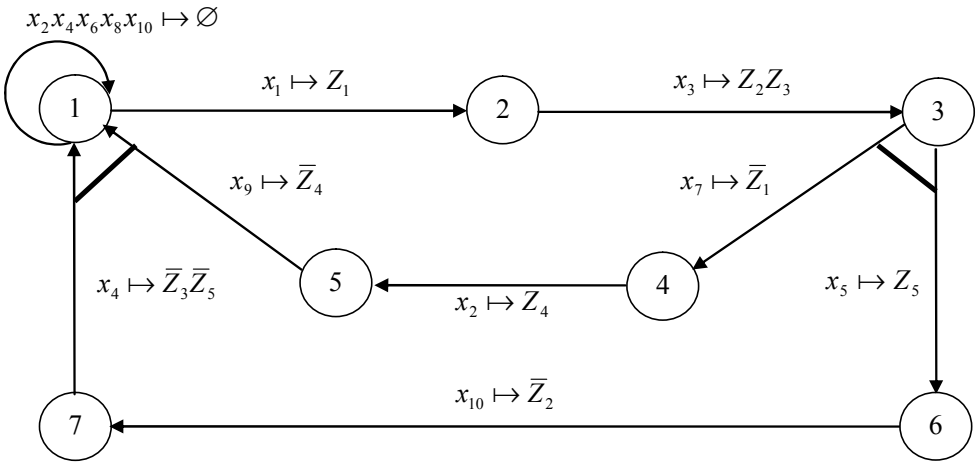


Рисунок 3 – Граф операцій пневмоагрегата автоматичного маніпулятора

Матриця відповідностей, на основі якої виконується мінімізація рівнянь, для спільних контурів наведеного графа операцій має вигляд

	x_1	x_3	
$x_2x_4x_6x_8$	0	0	$\varnothing$
$x_1x_2x_4x_6x_8$	**1**	0	Z_1
$x_3x_4x_6x_8$	0	**1**	Z_2Z_3

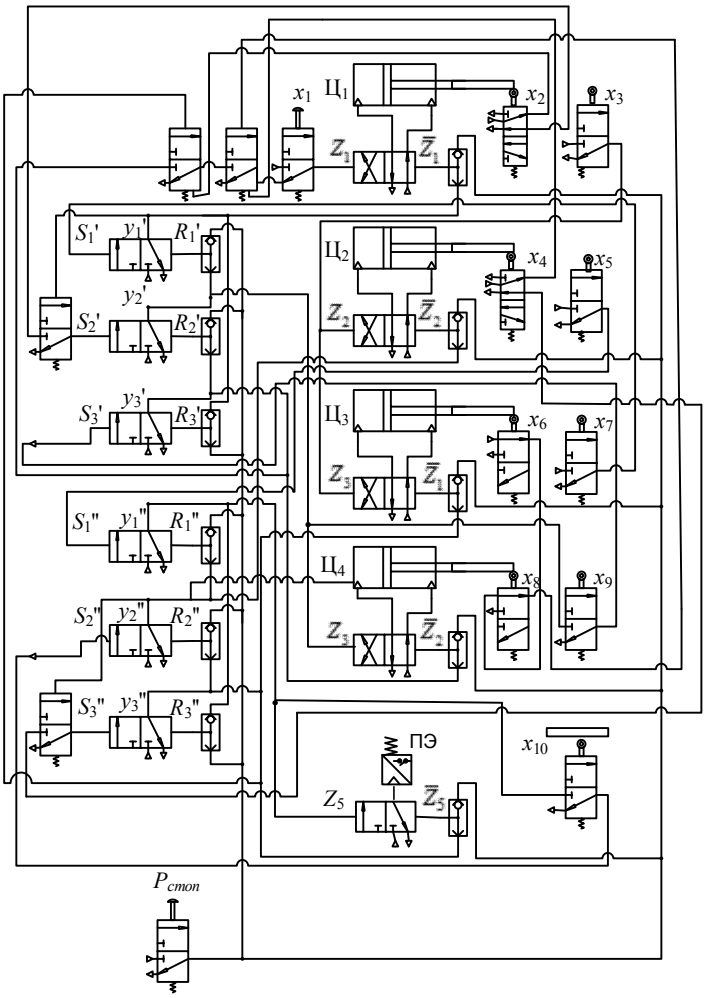


Рисунок 4 – Схема позиційного пневмоагрегата автоматичного маніпулятора

Кожна з двох паралельних ділянок, початок і кінець яких позначені жирними лініями на рис. 3, потребує по командоапарату. З урахуванням відсутності сигналів x_7 і x_5 першого та другого командоапаратів відповідно у вхідних наборах спільного контуру графа операцій, система логічних рівнянь включення виконавчих пристроїв та елементів пам'яті виглядає таким чином: $S_1' = x_7$; $S_2' = y_1' x_2$; $S_3' = y_2' x_9$; $R_1' = y_2'$; $R_2' = y_3'$; $R_3' = y_1'$; $S_1'' = x_5$; $S_2'' = y_1'' x_{10}$; $S_3'' = y_2'' x_4$; $R_1'' = y_2''$; $R_2'' = y_3''$; $R_3'' = y_1''$; $Z_1 = y_3' y_3'' x_2 x_4 x_6 x_8 + x_1$; $\bar{Z}_1 = y_1'$; $Z_2 = x_3$; $\bar{Z}_2 = y_2''$; $Z_3 = x_3$; $\bar{Z}_3 = y_3''$; $Z_4 = y_2'$; $\bar{Z}_4 = y_3'$; $Z_5 = y_1''$; $\bar{Z}_5 = y_3''$.

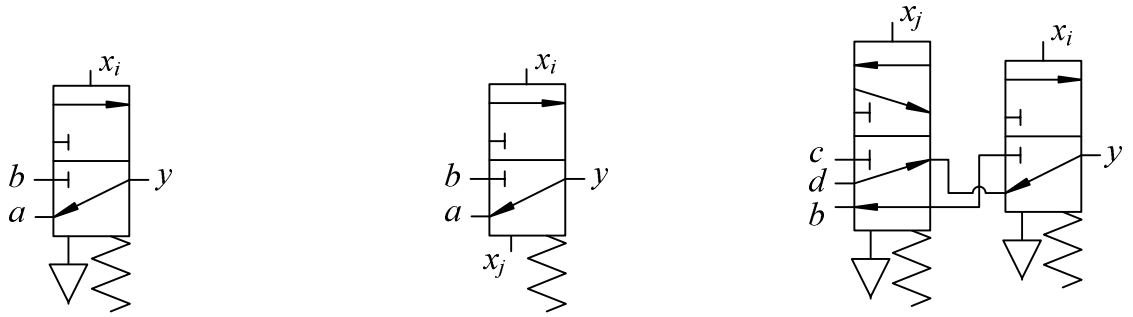
Розрахункова схема пневмоагрегата автоматичного маніпулятора, складена за даною системою рівнянь, показана на рис. 4.

Отримана схема, що синтезована методом мінімізації, замість 26 логічних елементів, які були б необхідні при використанні стандартної позиційної структури, містить лише 16, тому економія апаратурних витрат дорівнює

$$(27 - 16) / 27 = 0{,}407,$$

або близько 41%.

Станом на сьогодні існують рекомендації, що забезпечують реалізацію схем гідропневмоавтоматики не з найменшою, а лише з наближеною до мінімальної кількістю логічних елементів. У зв'язку з цим розроблений алгоритм синтезу систем гідропневмоагрегатів, що дозволяє отримати раціональну схему без перебору можливих варіантів реалізації, у рамках методу безроздільної декомпозиції рівнянь на основі наступних трьох логічних модулів (рис. 5) з функціями входів та залишковими функціями, наведеними в табл. 3.



а б в

Рисунок 5 – Схеми розкладання функцій: *а* – логічний модуль для розкладання функції за однією змінною; *б* – логічний модуль для розкладання функції за двома змінними; *в* – логічний модуль, що включає два розподільники

Таблиця 3 – Функція входів та залишкові функції для схем розкладання функцій

Функція входов	Залишкові функції
$y = \bar{x}_i a + x_i b$ (рис. 5, *а*)	$a = f_0'(0)$; $b = f_1'(1)$
$y = (\bar{x}_i + x_j)a + x_i \bar{x}_j b$ (рис. 5, *б*)	$b = f_2(1{,}0)$; $a = \bar{x}_j f_0(0{,}0) + x_i f_3(1{,}1) + \bar{x}_i x_j f_1(0{,}1)$
$y = (\bar{x}_i \bar{x}_j + x_i x_j)d + \bar{x}_i x_j c + x_i \bar{x}_j b$ (рис. 5, *в*)	$b = f_2(1{,}0)$; $c = f_1(0{,}1)$; $d = \bar{x}_i f_0(0{,}0) + x_i f_3(1{,}1)$

На рис. 6 наведена мінімальна схема пневмоагрегата формувального напівавтомата, що побудована за допомогою запропонованого алгоритму завдяки спрощенню рівняння, отриманого для одного з виконавчих пристроїв

$$f = \bar{x}_i \bar{x}_j f_0(0,0) + \bar{x}_i x_j f_1(0,1) + x_i \bar{x}_j f_2(1,0) + x_i x_j f_3(1,1).$$

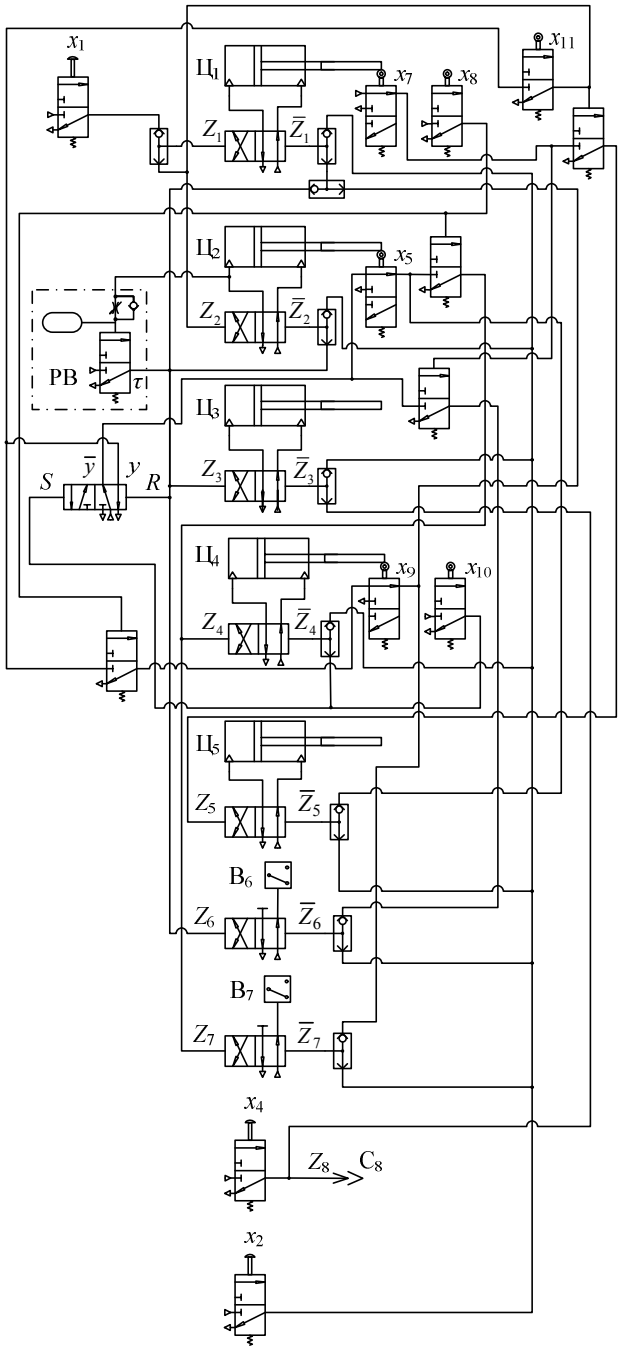


Рисунок 6 – Схема пневмоагрегата формувального напівавтомата

Розроблений алгоритм (рис. 7) дозволив одразу застосувати логічний модуль для розкладання функції за двома змінними (рис. 5, б), а не за однією (рис. 5, а), унаслідок чого час проектування скоротився на 50%.

Третій розділ присвячено побудові математичної моделі робочого процесу позиційного пневмоагрегата автоматичного маніпулятора з урахуванням реальної швидкодії пневматичних пристроїв.

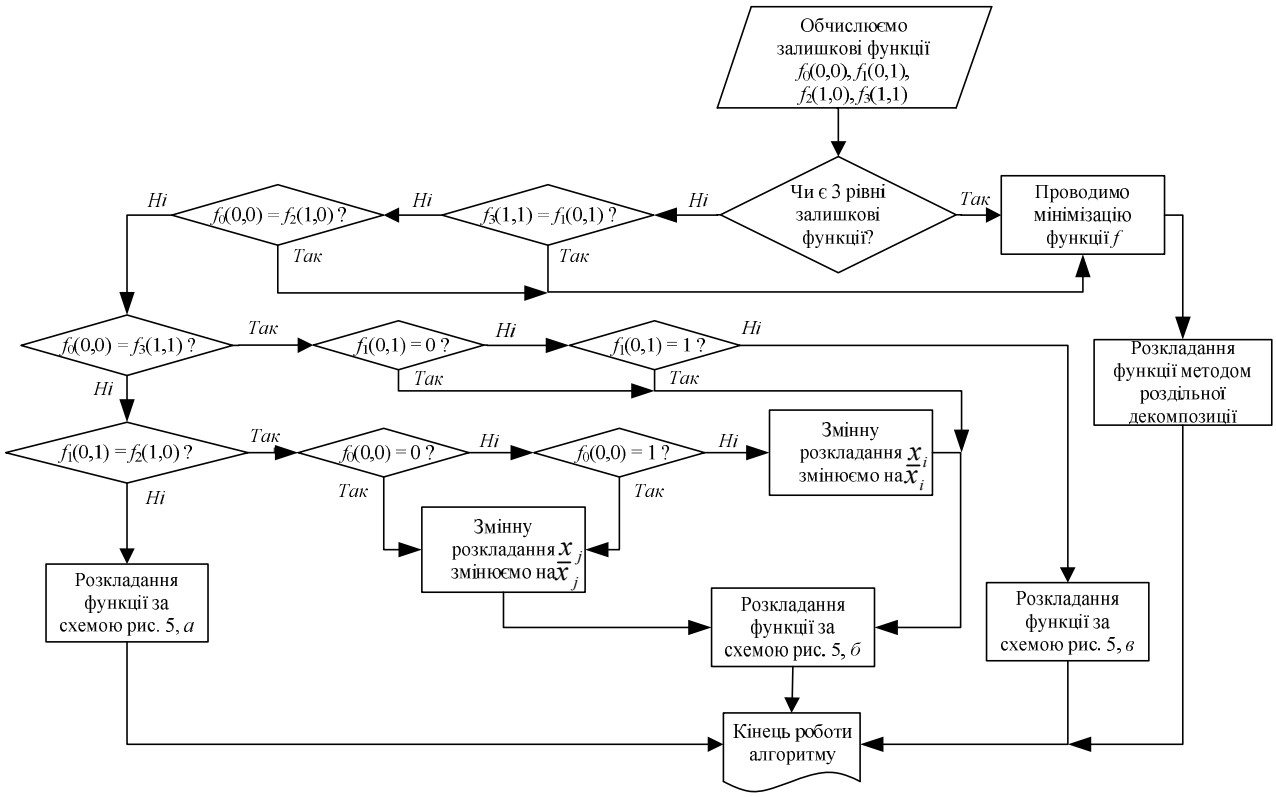


Рисунок 7 – Алгоритм синтезу мінімальних схем гідропневмоагрегатів

На рис. 8 представлена схема прийнятої конструкції пневмоагрегата, заснованої на використанні дискретних розподільних пристроїв.

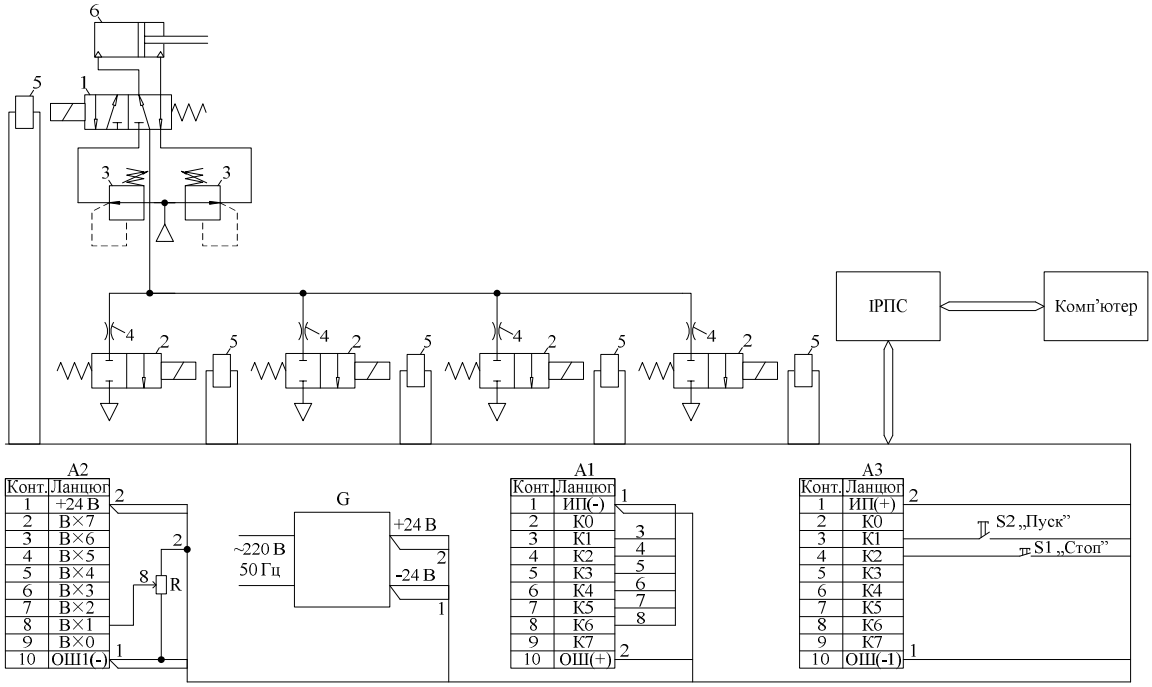


Рисунок 8 – Схема позиційного пневмоагрегата автоматичного маніпулятора

На схемі: 1 – пневморозподільник П-Р515; 2 – пневморозподільник П-РЕ 3/1; 3 – регулювальник тиску; 4 – пневмодросель П-ДК-С; 5 – електромагніт пневмозолотника на 24 В; 6 – пневмоциліндр 32-400; А1 – модуль виводу дискретних сигналів постійного струму МС 35.18; А2 – модуль вводу безперервних

сигналів постійного струму МС 31.14 (АЦП); G – джерело живлення постійного струму на 24 В; R – датчик положення ПС-3; А3 – модуль вводу дискретних сигналів постійного струму МС 34-08; S1, S2 – кнопки управління.

Складено розрахункову схему пневмоциліндра висунення руки автоматичного маніпулятора (рис. 9), на якій прийняті такі позначення: m – маса інерційного навантаження, кг; D, d – діаметри поршня та штока пневмоциліндра відповідно, м; F_1, F_2 – площі поршня у робочій та вихлопній порожнинах пневмоциліндра відповідно, м^2; S – робочий хід поршня, м; $F_{спр}$ – сила корисного спротиву, Н; p_M – тиск повітря в магістралі, Па; p_1, p_2 – тиски повітря у робочій та вихлопній порожнинах пневмоциліндра відповідно, Па; p_a – тиск повітря навколишнього середовища, Па; V_{10}, V_{20} – початкові об'єми робочої та вихлопної порожнин пневмоциліндра відповідно, м^3; R – газова незмінна, Дж/(кг·К); T_M – температура повітря в магістралі, К; T_1, T_2 – температури повітря у робочій та вихлопній порожнинах пневмоциліндра відповідно, К; k – показник адіабати; f_1^e, f_2^e – ефективні площі підвідної й вихлопної ліній пневмоагрегата відповідно, м^2; x – координата переміщення поршня, м; $\dot{x}$ – швидкість переміщення поршня, м/с; $\ddot{x}$ – прискорення поршня, м/с^2; $K = \sqrt{2gk/(k-1)}$ – коефіцієнт пропорційності; $\sigma = p_{вых} / p_{вх}$ – відношення тисків; φ (σ) – витратна функція, що визначається наступним чином

$$\varphi(\sigma) = \begin{cases} \sqrt{\sigma^{\frac{2}{k}} - \sigma^{\frac{k+1}{k}}} \; при \; 0{,}528 < \sigma < 1; \\ 0{,}2588 \; при \; 0 < \sigma < 0{,}528. \end{cases}$$

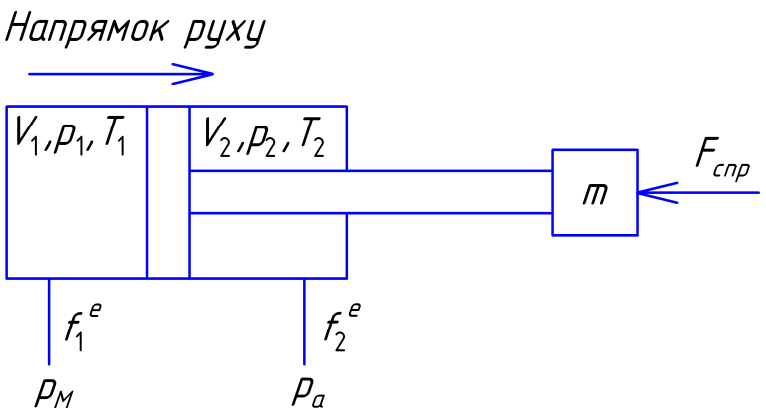


Рисунок 9 – Розрахункова схема пневмоциліндра висунення руки автоматичного маніпулятора

Рівняння руху виконавчого механізму має вигляд

$$m\ddot{x} = p_1F_1 - p_2F_2 - p_a(F_1 - F_2) - F_{спр},$$

звідки тиск повітря у вихлопній порожнині пневмоциліндра

$$p_2 = \frac{p_1F_1 - m\ddot{x} - p_a(F_1 - F_2) - F_{спр}}{F_2}. \quad (1)$$

Температура в робочій порожнині пневмоциліндра

$$\dot{T}_1 = \frac{T_1F_1\dot{x}}{F_1x + V_{10}} + \frac{T_1}{p_1}\dot{p}_1 - \frac{f_1^e KT_1\sqrt{RT_M}}{p_1F_1x + p_1V_{10}}\left(p_M\frac{T_1}{T_M}\varphi\left(\frac{p_1}{p_M}\right) - p_1\Omega_a\sqrt{\frac{T_1}{T_M}}\varphi\left(\frac{p_a}{p_1}\right) - p_1\Omega_{1,2}\sqrt{\frac{T_1}{T_M}}\varphi\left(\frac{p_2}{p_1}\right)\right) \quad (2)$$

де $\Omega_a = f_a^e / f_1^e$, $\Omega_{1,2} = f_y^e / f_1^e$ – коефіцієнти пропорційності; f_a^e и f_y^e – ефективні площі отворів для зовнішніх та внутрішніх витоків.

Рівняння для визначення тиску в робочій порожнині з урахуванням витоків

$$\dot{p}_1 = \frac{kf_1^э K\sqrt{RT_M}}{F_1 x + V_{10}}\left(p_M\varphi\left(\frac{p_1}{p_M}\right) - p_1\Omega_a\sqrt{\frac{T_1}{T_M}}\varphi\left(\frac{p_a}{p_1}\right) - p_1\Omega_{1,2}\sqrt{\frac{T_1}{T_M}}\varphi\left(\frac{p_2}{p_1}\right)\right) - \frac{kp_1F_1\dot{x}}{F_1x + V_{10}}. \quad (3)$$

Аналогічне рівняння для вихлопної порожнини

$$\dot{p}_2 = -\frac{kf_2^э K\sqrt{RT_2}}{F_2(S-x)+V_{20}}\left(p_2\varphi\left(\frac{p_a}{p_2}\right) - p_1\Omega_a\sqrt{\frac{T_1}{T_M}}\varphi\left(\frac{p_a}{p_1}\right) + p_1\Omega_{1,2}\sqrt{\frac{T_1}{T_M}}\varphi\left(\frac{p_2}{p_1}\right)\right) + \frac{kp_2F_2\dot{x}}{F_2(S-x)+V_{20}}. \quad (4)$$

Температура T_2 виражається через тиск p_2, оскільки у вихлопній порожнині при відсутності теплообміну з навколишнім середовищем протікає адіабатичний процес

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5)$$

Рівняння (1–5) утворять математичну модель роботи позиційного пневмоагрегата автоматичного маніпулятора, яка використана для розв’язання зворотної задачі динамічного розрахунку пневмоагрегата, що полягає в знаходженні конструктивних параметрів за заданими технічними характеристиками. У даному випадку, знаючи закон руху вихідної ланки пневмоагрегата (рис. 10), тобто задаючи функцію позиціонування $U(t)$, необхідно визначити закон зміни ефективних площ підвідної й вихлопної ліній при початкових умовах $x(0)=0$, $\dot{x}(0)=0$, $p_1(0)=p_M$, $p_2(0)=p_a$, $T_1(0)=T_M$.

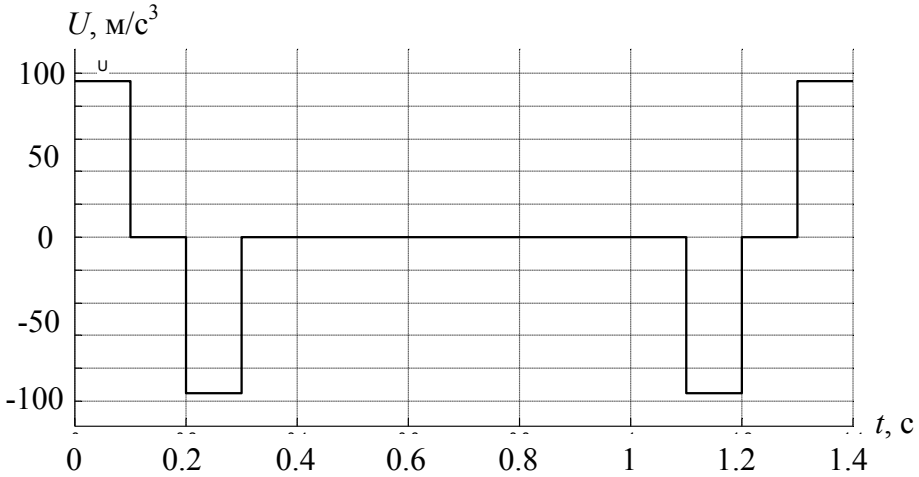


Рисунок 10 – Функція позиціонування

Оскільки при висуненні виконавчого пристрою f_1^e є заданою та незмінною, треба знайти тільки закон зміни ефективної площі вихлопної лінії позиційного пневмоагрегата $f_2^e(t)$. Для вирішення цієї задачі складено блок-схему, що реалізована за допомогою пакету Simulink системи імітаційного моделювання MATLAB (trial version) і представлена на рис. 11.

Отриманий закон зміни $f_2^e(t)$ показаний на рис. 12.

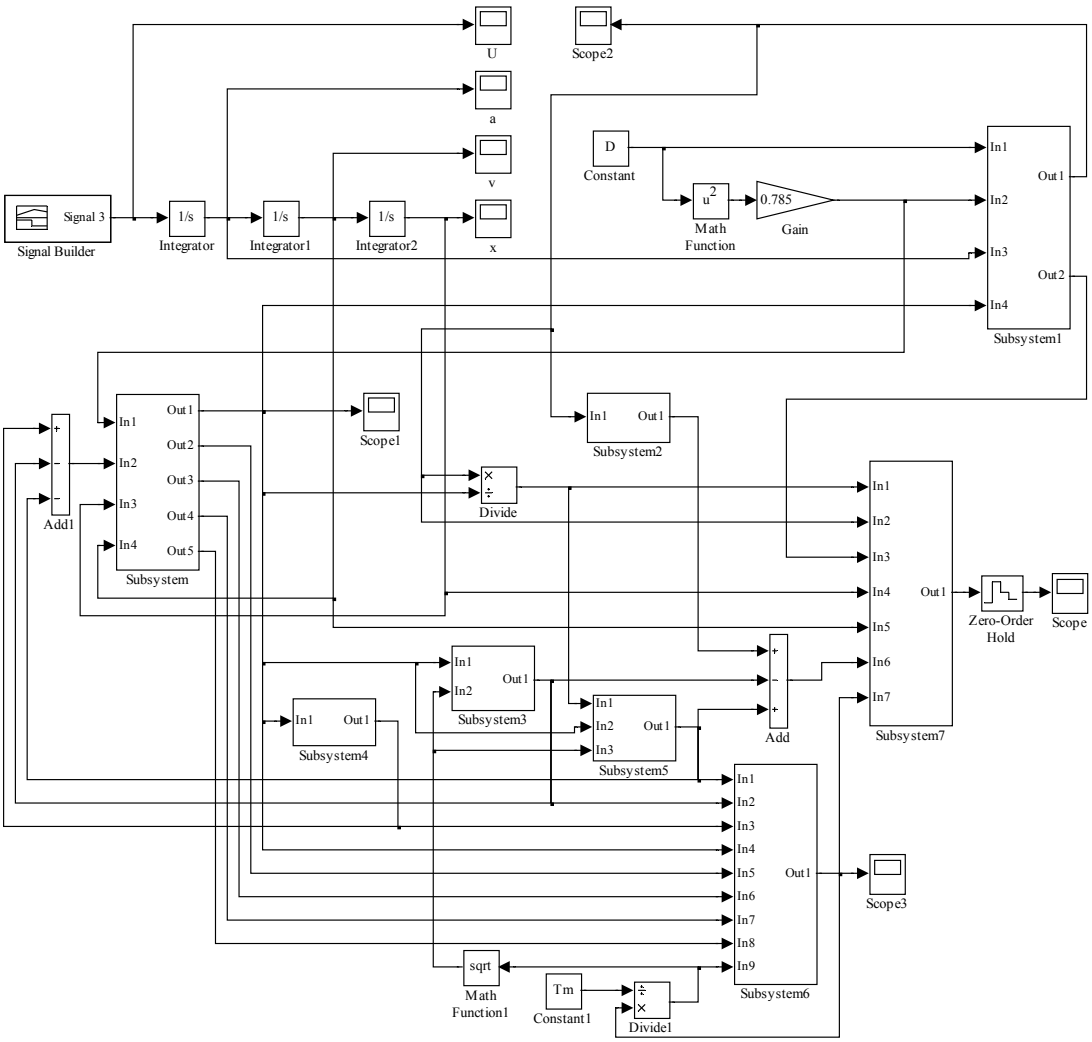


Рисунок 11 – Блок-схема для вирішення зворотної задачі динаміки пневмоагрегата

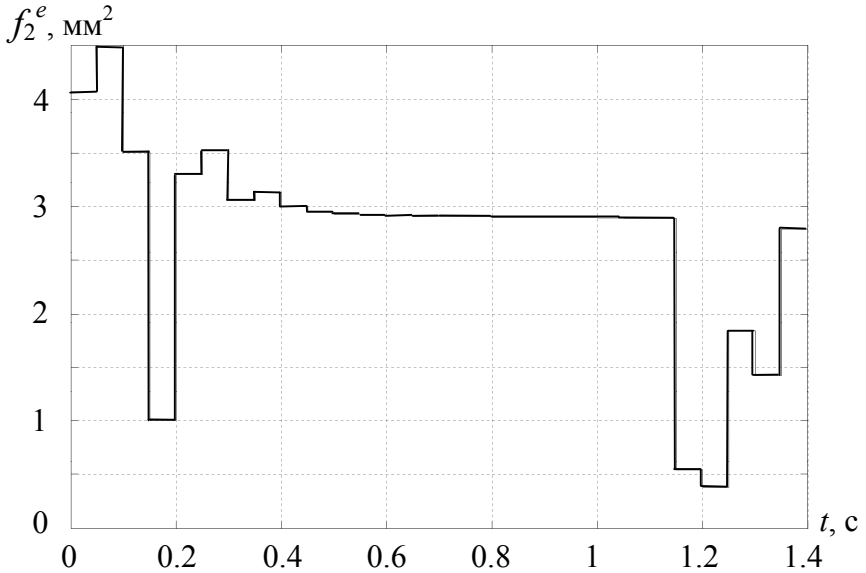
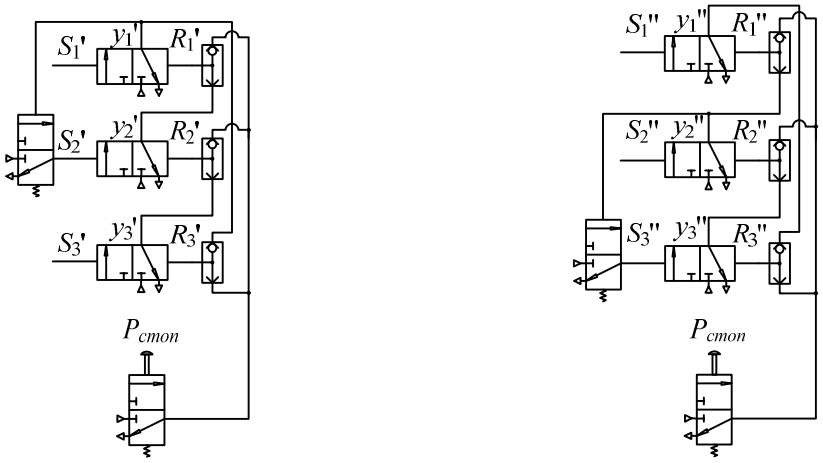


Рисунок 12 – Закон зміни ефективної площі вихлопної лінії пневмоагрегата маніпулятора

Наведений графік свідчить про високі динамічні показники математичної моделі робочого процесу позиційного пневмоагрегата автоматичного маніпулятора та підтверджує її адекватність.

За рахунок того, що конструкція позиційного пневмоагрегата заснована на використанні дискретних розподільних пристроїв, які в сумі коштують у 20 разів менше, ніж один пропорційний розподільник, апаратурні витрати в даному випадку відповідно зменшилися також у 20 разів у порівнянні із застосуванням аналогового способу регулювання динамічних характеристик пневмоагрегата.

У **четвертому розділі** експериментально визначений час спрацьовування командоапаратів, які використані для паралельних ділянок графа операцій (рис. 3) позиційного пневмоагрегата автоматичного маніпулятора (рис. 4) та побудовані на дискретній пневмоапаратурі (рис. 13).



а б

Рисунок 13 – Схеми реалізації командоапаратів першої (*а*) та другої (*б*) паралельних гілок, отриманих при проектуванні пневмоагрегата автоматичного маніпулятора

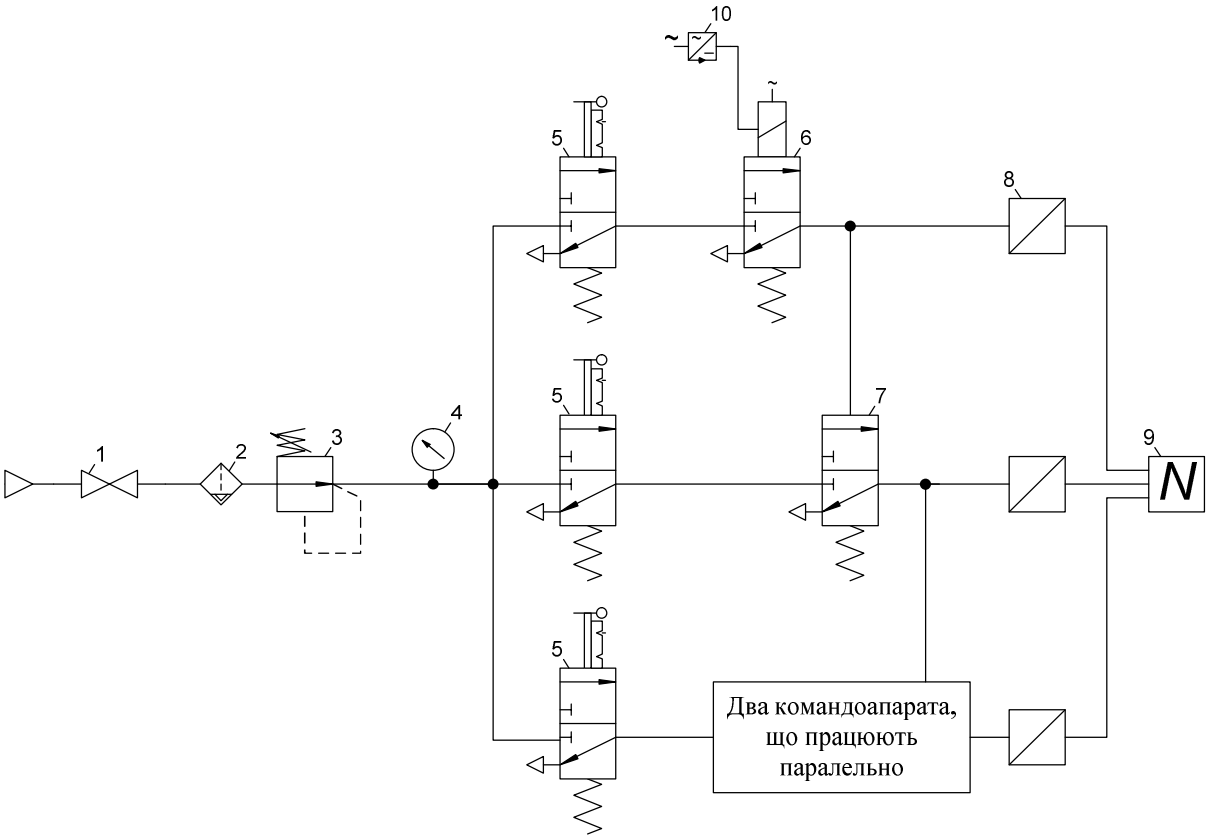


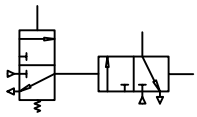
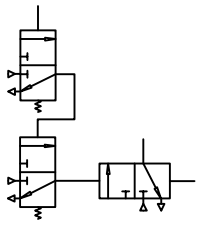
Рисунок 14 – Схема експериментального стенда для визначення швидкодії командоапаратів

На рис. 14 наведена схема експериментального стенда ОПК “Гідроелєкс” для визначення швидкодії даних командоапаратів. Експериментальний стенд складається з наступних приладів та апаратів: 1 –вентиль запірний муфтовий 1.15 (ГОСТ 9086-74); 2 – фільтр-вологовідділювач 22-12х40 (ДСТУ 2276-1-2003); 3 – пневмоклапан редукційний 12-1 (ГОСТ 18468-73); 4 – манометр зразковий (ГОСТ 6521-60, клас точності 0,4); 5 – пневморозподільник ДВ76-21; 6 – клапан електропневматичний 4152550179; 7 – пневморозподільник П-РОЗП1-С; 8 – датчик надлишкового тиску (межі вимірювань 0 – 0,1 МПа) ДД-1,0 (ОПК “Гідроелєкс”); 9 – індикатор динамічних параметрів ІДП (ОПК “Гідроелєкс”); 10 – випрямляч ВСА-5А-К; 11 – генератор сигналів ГЗ-18.

Випробування здійснювалися при наступних величинах тиску живлення: 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2 МПа (тиск управління збігається з тиском живлення).

У табл. 4 представлені схеми випробувань командоапаратів.

Таблиця 4 – Схеми випробувань командоапаратів

Логічна функція на виході елемента пам’яті	y_1', y_3', y_1'', y_2''	y_2', y_3''
Схема випробувань		

Отримано графіки процесів включення (рис. 15, а) та відключення (рис. 15, б) командоапаратів при тиску 0,6 МПа. Криві 1 відповідають сигналу P' виходів y_1', y_3', y_1'', y_2'' елементів пам’яті командоапаратів; криві 2 – сигналу P'' виходів y_2', y_3'' елементів пам’яті командоапаратів.

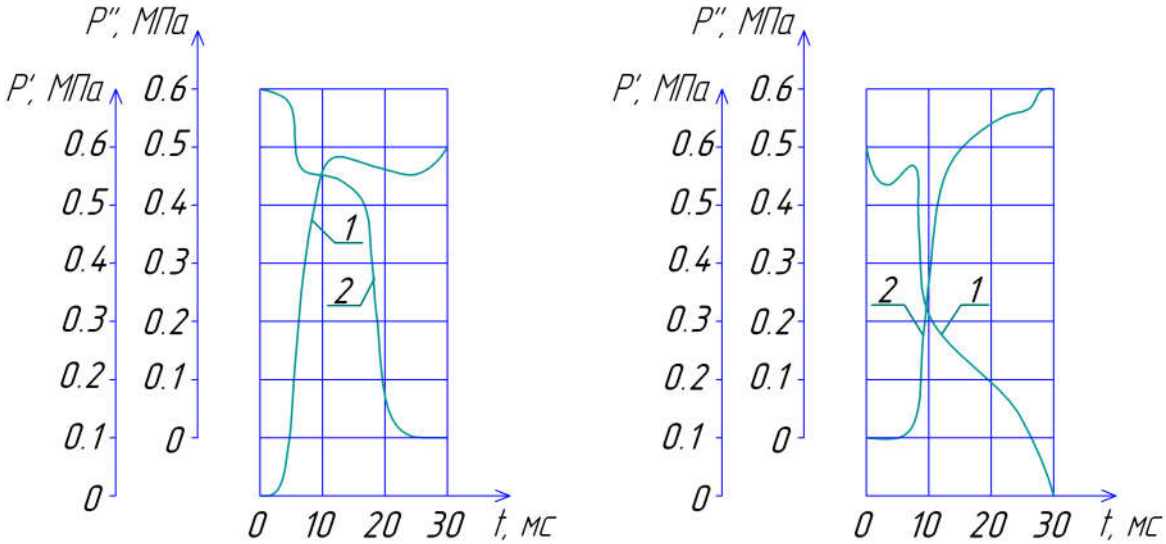


Рисунок 15 – Графіки процесів включення (*а*) та відключення (*б*) командоапаратів при тиску 0,6 МПа

Як показав експеримент, сумарний час перемикання кожного командоапарата значно менше за час переміщення штока виконавчого пристрою, що свідчить про працездатність запропонованої схеми.

У **додатках** наведені фрагмент програми синтезу схем гідропневмоагрегатів на ПЕОМ, програма-транслятор “комп’ютер – контролер”, приклад керуючої програми для контролера типу МБ 57.0, акти впровадження результатів дисертаційного дослідження при розробці та модернізації гідропневмоагрегатів в ОП Корпорації “Гідроелєкс” і в навчальний процес кафедри гідравлічних машин НТУ “ХПІ”.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена підвищенню технічного рівня гідропневмоагрегатів за допомогою розробки методів структурного синтезу схем і безроздільної декомпозиції рівнянь, що описують схеми з паралельними алгоритмами роботи. Основні результати та висновки дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Розроблено нову структурну організацію та на її основі метод проектування схем гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи з використанням повної мінімізації стандартної позиційної структури, що дозволило зменшити кількість логічних елементів приблизно на 41%.

2. Створено алгоритм синтезу гідропневмоагрегатів, що дозволяє вибрати раціональну схему без перебору можливих варіантів реалізації в рамках безроздільної декомпозиції рівнянь та скоротити час проектування на 50%.

3. Розроблено математичну модель роботи позиційного пневмоагрегата, яка включає моделі виконавчого механізму, ліній управління, а також модель системи управління, що працює в реальному часі, та застосовується при проектуванні промислових роботів.

4. Складено математичну модель робочого процесу позиційного пневмоагрегата автоматичного маніпулятора, що дозволяє отримати необхідний закон руху його вихідної ланки шляхом зміни ефективних площ ліній управління з урахуванням реальної швидкодії пневматичних пристроїв. Використання дискретних розподільників призвело до зниження апаратурних витрат у 20 разів у порівнянні із застосуванням аналогового способу регулювання характеристик динаміки пневмоагрегата.

5. Експериментально визначено швидкодію паралельно працюючих командоапаратів позиційного пневмоагрегата для найбільш точного підбору його динамічних характеристик, які вимагаються відповідно до технологічного процесу.

6. Результати дисертаційного дослідження використовуються при розробці й модернізації гідропневмоагрегатів у ОП Корпорації “Гідроелєкс” (м. Харків), а також у навчальному процесі кафедри “Гідравлічні машини” НТУ “ХПІ” у дисциплінах “Гідропневмоавтоматика”, “Пневматичні й гідравлічні системи управління”, “Гідропневмоавтоматика нафтового устаткування”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Полушкин К. А. К вопросу синтеза схем гидропневмоагрегатов / К. А. Полушкин // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2012. – № 7. – С. 181-184.

2. Полушкін К. О. Алгоритм реалізації схем гідропневмоавтоматики / К. О. Полушкін // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 14 (988). – С. 113-117.

3. Полушкин К. А. Алгоритм синтеза схем гидропневмоагрегатов / К. А. Полушкин // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2014. – № 1 (1044). – С. 164-169.

4. Полушкин К. А. Синтез пневмоагрегата формовочного полуавтомата / М. В. Черкашенко, К. А. Полушкин // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2015. – № 1. – С. 42-46.

Здобувачем проведено синтез системи управління пневмоагрегата формувального напівавтомата з використанням методу мінімізації.

5. Полушкин К. А. Синтез гидропневмоагрегатов с параллельными алгоритмами работы / М. В. Черкашенко, К. А. Полушкин // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2015. – № 3 (1112). – С. 3-7.

Здобувачем запропоновано метод проектування гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи на основі повної мінімізації стандартної позиційної структури.

6. Пат. 94979 Україна, МПК G 05 B 19/045. Пристрій для управління гідропневмоагрегатів / Черкашенко М. В., Полушкін К. О. ; заявник та патентовласник НТУ “ХПІ”. – № u201406052 ; заявл. 02.06.14 ; опубл. 10.12.14, Бюл. № 23.

Здобувачем виконано розробку позиційної структури гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи.

7. Полушкин К. А. Проектирование пневматической системы управления станком для электрохимического маркирования / М. В. Черкашенко, К. А. Полушкин // Високі технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2014. – Вип. 1 (24). – С. 175-182.

Здобувачем виконано формалізований опис роботи пневматичної системи управління верстатом для електрохімічної маркіровки виробів.

8. Полушкин К. А. Синтез схем гидропневмоагрегатов технологического оборудования / М. В. Черкашенко, К. А. Полушкин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я : матеріали XX міжнар. наук.-практ. конф., 14–16 трав. 2012 р., Харків, Ч. I / за ред. проф. Л. Л. Товажнянського. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2012. – С. 288.

Здобувачем виконано оптимізацію пневматичної схеми пневмоагрегата.

9. Полушкин К. А. Синтез управляющего устройства гидропневмоагрегатов / М. В. Черкашенко, К. А. Полушкин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: матеріали XXII міжнар. наук.-практ. конф., 15–17 жовт. 2014 р., Харків, Ч. I / за ред. проф. Л. Л. Товажнянського. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2014. – С. 306.

Здобувачем проведено синтез гідропневмоагрегата з використанням методу повної мінімізації стандартної позиційної структури.

10. Полушкин К. А. К вопросу синтеза систем гидропневмоагрегатов с параллельными алгоритмами работы / М. В. Черкашенко, К. А. Полушкин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XXIII міжнар. наук.-практ. конф., 20–22 трав. 2015 р., Харків, Ч. I / за ред. проф. Є. І. Сокола. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – С. 298.

Здобувачем запропоновано метод синтезу схем, який дозволяє вибрати раціональну схему розкладання функцій без перебору схемних розв'язань, з використанням безроздільної декомпозиції рівнянь.

11. Полушкин К. А. Об одном алгоритме синтеза схем гидропневмоагрегатов / К. А. Полушкин // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці : матеріали XIX міжнар. наук.-техн. конф., 21–24 травня 2014 р. – Кіровоград. – 2014. – С. 141-143.

АНОТАЦІЇ

Полушкін К.О. Синтез систем гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи. – 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, 2016.

Дисертація присвячена підвищенню технічного рівня гідропневмоагрегатів шляхом розробки методів структурного синтезу схем і безроздільної декомпозиції рівнянь, що описують схеми з паралельними алгоритмами роботи. Розроблено нову позиційну структуру схем гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи при повній мінімізації стандартної позиційної структури та метод проектування схем гідропневмоагрегатів з паралельними алгоритмами роботи з використанням повної мінімізації стандартної позиційної структури. Розроблено метод проектування пневмоагрегатів, який дозволяє вибрати раціональну схему без перебору схемних розв'язань у рамках безроздільної декомпозиції рівнянь. Складені математичні моделі роботи позиційного пневмоагрегата автоматичного маніпулятора, реалізованого на дискретних розподільних пристроях, що дозволяє отримати необхідні закони руху вихідної ланки пневмоагрегата, враховуючи реальну швидкодію пневматичної апаратури.

Результати дисертаційної роботи використовуються при розробці та модернізації гідропневмоагрегатів у ОП Корпорації "Гідроелєкс" (м. Харків), а також у навчальному процесі кафедри "Гідравлічні машини" НТУ "ХПІ" у дисциплінах: "Гідропневмоавтоматика", "Пневматичні й гідравлічні системи управління", "Гідропневмоавтоматика нафтового устаткування".

Ключові слова: позиційний гідропневмоагрегат, структурний синтез, паралельні алгоритми роботи гідропневмоагрегатів, повна мінімізація

стандартної позиційної структури, безроздільна декомпозиція рівнянь, автоматичний маніпулятор.

Полушкин К.А. Синтез систем гидропневмоагрегатов с параллельными алгоритмами работы. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена повышению технического уровня гидропневмоагрегатов за счет разработки методов структурного синтеза схем и безраздельной декомпозиции уравнений для систем с параллельными алгоритмами работы.

Большинство гидропневмоагрегатов в промышленности составляют системы с дискретным управлением, скорость, качество и стоимость проектирования которых значительно влияют на эффективность комплексной автоматизации в стране. Среди систем гидропневмоагрегатов различают пневматические, гидравлические, пневмогидравлические и т.д. В последнее время происходит широкое внедрение в промышленность гидропневмоагрегатов с пневматическим управлением, промышленных роботов, подъемно-транспортных машин, автоматических линий и других сложных машин-автоматов.

В настоящее время при структурном синтезе систем гидропневмоагрегатов используется стандартная позиционная структура с ее дальнейшей полной минимизацией. Схема позиционного гидропневмоагрегата выбирается на основе конкретных требований заказчика. Рассматриваются существующие методы проектирования позиционных гидропневмоагрегатов. Делается вывод о необходимости разработки новой позиционной структуры, позволяющей синтезировать системы гидропневмоагрегатов с параллельными алгоритмами работы при полной минимизации стандартной позиционной структуры.

Для решения поставленных в работе задач разработана новая позиционная структура схем гидропневмоагрегатов с параллельными алгоритмами работы при полной минимизации стандартной позиционной структуры, а также метод проектирования схем гидропневмоагрегатов с параллельными алгоритмами работы с использованием полной минимизации стандартной позиционной структуры. Разработан метод проектирования пневмоагрегатов, который дает возможность выбрать рациональную схему без перебора схемных решений в рамках безраздельной декомпозиции уравнений, что позволило сократить время проектирования. Для динамического анализа разработаны комплексные математические модели работы позиционного пневмоагрегата, реализованного на дискретной аппаратуре. Проведено исследование предложенной модели работы позиционного пневмоагрегата, реализованной в пакете MATLAB (триал-версия) и использованной при проектировании пневмоагрегата автоматического манипулятора с улучшенными характеристиками позиционирования. Разработана математическая модель позиционного пневмоагрегата манипуля-

тора, которая позволяет получить необходимые законы движения выходного звена пневмоагрегата с учетом реального быстродействия пневмоаппаратуры.

Результаты диссертационной работы используются при разработке и модернизации гидропневмоагрегатов в ОП Корпорации “Гидроэлекс” (г. Харьков) и в учебном процессе кафедры “Гидравлические машины” НТУ “ХПИ” в дисциплинах: “Гидропневмоавтоматика”, “Пневматические и гидравлические системы управления”, “Гидропневмоавтоматика нефтяного оборудования”.

Ключевые слова: позиционный гидропневмоагрегат, структурный синтез, параллельные алгоритмы работы гидропневмоагрегатов, полная минимизация стандартной позиционной структуры, безраздельная декомпозиция уравнений, автоматический манипулятор.

Polushkin K.A. Synthesis of systems of hydropneumatic units with parallel operating algorithms. – Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.05.17 – Hydraulic Machines and Hydropneumatic Units. – National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”, Kharkov, 2016.

Thesis is devoted to rise of technical level of hydropneumatic units by development of methods of structure synthesis of schemes and undivided decomposition of equations which describe the schemes with parallel operating algorithms. The new position structure of schemes of the hydropneumatic units with parallel operating algorithms by complete minimization of the standard position structure and circuit design style of the hydropneumatic units with parallel operating algorithms with use of complete minimization of the standard position structure is developed. Procedure of schematic synthesis which makes it possible to choose the rational scheme of decomposition of functions without search of circuitry within the bounds of procedure of schematic synthesis with undivided decomposition of equations is developed. Mathematical models of the positioning pneumatic unit realized with discrete equipment are made. The dynamic analysis of circuitry of the positioning pneumatic unit of the industrial robot is carried out by experimental researches and application of numeral methods that makes it possible to get the necessary laws of motion of output link of the pneumatic unit in consideration of the real speed of pneumatic equipment.

Thesis data are used for development and modernization of hydropneumatic units in OP of Gidroeleks Corporation (Kharkov) and also in educational process of the hydraulic machines department of the NTU “KhPI” in the disciplines: “Hydropneumatic automation”, “Pneumatic and hydraulic control systems”, “Hydropneumatic automation of oil equipment”.

Keywords: positioning hydropneumatic unit, structure synthesis, parallel operating algorithms of hydropneumatic units, complete minimization of standard position structure, undivided decomposition of equations, industrial robot.