

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Крутіков Геннадій Анатолійович



УДК 621.05

**СИНТЕЗ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТІВ**

Спеціальність 05.05.17 - гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Харків 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Гідропневмоавтоматика і гідропривод» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Науковий консультант**

доктор технічних наук, професор  
**Черкашенко Михайло Володимирович,**  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри «Гідравлічні машини»

**Офіційні опоненти**

доктор технічних наук, професор  
**Струтинський Василь Борисович,**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, завідувач кафедри «Конструювання верстатів та машин»

доктор технічних наук, професор  
**Косторной Сергій Дмитрович,**  
Сумський державний університет, м. Суми, професор кафедри «Математичний аналіз і методи оптимізації»

доктор технічних наук, професор  
**Панченко Анатолій Іванович,**  
Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, завідувач кафедри «Мобільні енергетичні засоби»

Захист відбудеться ...14... квітня 2011 р. 14<sup>00</sup>.....на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою : 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий .....4... березня 2011 р

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Процес подальшого вдосконалювання дискретних гідропневмоагрегатів (ГПА), як засобів механізації та автоматизації виробничих процесів, тісно пов'язаний із трьома важливими тенденціями.

Перша тенденція – це необхідність мінімізації непродуктивних енерговитрат при функціонуванні таких агрегатів. Стиснене повітря є одним з найбільш коштовних енергоносіїв, що використовують у промисловості. Один кілоджоуль енергії, реалізований за допомогою пневмодвигунів пневмоагрегатів, коштує в сімдесят разів дорожче, ніж кілоджоуль, отриманий за допомогою електродвигунів. На виробництво стисненого повітря в промислово розвинених країнах припадає близько 10% із загального енергетичного балансу. Тому реалізація програми всілякого зниження непродуктивних енерговитрат у промислових пневмоагрегатах (ПА) дає великий економічний ефект, особливо в тих галузях, де силова пневматика є одним з основних засобів механізації (деревобробна, газовидобувна, гірничо-металургійна і т.д.).

Друга тенденція пов'язана з необхідністю розширення області застосування пневмоагрегатів у бік збільшення інерційних навантажень, що передбачає пошук нових способів гальмування й позиціонування робочих органів (РО) пневмоагрегатів (ПА). Розв'язання цього завдання дозволяє не тільки поширити ПА на нові області технології, але й значно покращити їх масогабаритні характеристики.

Третьою тенденцією є структурна зміна в самій області застосування дискретних ПА. Існуюча до останнього часу практика використання силової пневматики обмежувалася через стисливість повітря другорядними операціями, де ПА працювали від упору до упору. Швидкий розвиток мікропроцесорних засобів керування, їх здешевлення зробили економічно доцільним використання комп'ютерного керування для здійснення високоточних багатопозиційних операцій за допомогою ПА. У зв'язку з цим необхідна розробка нових методів вільнопрограмованого позиціонування ПА, придатних для комп'ютерного керування, і побудованих на інших принципах, ніж аналогові слідкуючі системи.

Досягнення сформульованих у даній дисертаційній роботі цілей і рішення поставлених задач повністю відповідає цим тенденціям. Тому актуальними є розробки нових принципів гальмування й позиціонування робочих органів ПА, що працюють в умовах великих інерційних навантажень, алгоритмів структурного й параметричного синтезу енергозберігаючих ПА, а також розробка нової стратегії дискретного керування багатопозиційними ПА, заснованої на режимі самонавчання і орієнтованої на комп'ютерне керування. Дослідження, проведені в цих напрямках носять системний характер і базуються на єдиній концептуальній і методологічній основі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами.** Тематика роботи тісно пов'язана з науковими програмами, планами й договорами, які виконувались на кафедрі «Гідропневмоавтоматика і гідропривод» НТУ «ХП». Здобувач був виконавцем держбюджетних тем МОН України: «Створення комплексу математичних моделей оптимізації робочого процесу у проточній частині високонапорної гідротурбіни» (ДР № 0109U002390); «Розробка комплексу

математичних моделей проточних частин гідротурбін і визначення характерних особливостей робочого процесу» (ДР № 0106U001481). Очолював виконання госпдоговірних НДР: «Разработка комплекта программ динамического синтеза пневмоприводов промышленных автоманипуляторов» (ВНДГідропривод, м. Харків, ДР № 01.82.0088597); «Разработка и исследование свободнопрограммируемых пневмоприводов с дискретным управлением от микропроцессора» (ГСКТБ «Пневматика», м. Сімферополь, ДР № 01.85.0001192); «Разработка пневматического модуля для многопозиционного пневмоагрегата» (корпорація «Гідроелекс», м. Харків). Був одним із провідних авторів методичних рекомендацій для Мінстанкопрома СРСР (3 методичні рекомендації 1984 - 86 р.р.).

**Мета й завдання дослідження.** *Метою* роботи є поліпшення енергетичних характеристик гідропнемоагрегатів і розширення області їх застосування за рахунок стратегії дискретного керування при синтезі енергозберігаючих гідропнемоагрегатів.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні *завдання*:

- розробка алгоритму синтезу схем ГПА для рішення проблем мінімізації енерговитрат, а також ефективної роботи в умовах великих інерційних навантажень;
- розробка універсальної математичної моделі (ММ) робочих процесів в ПА, що дозволяє однаковим способом, дотримуючись динамічної подоби проаналізувати як динамічні, так і енергетичні характеристики ПА з різними структурами комутаційних зв'язків і різними алгоритмами керування;
- дослідження ПА з гальмуванням шляхом зміни структури комутаційних зв'язків і вибір за допомогою розробленого комплексного показника технічного рівня найбільш перспективних способів гальмування;
- проведення на основі ексергічного методу всебічного аналізу втрат працездатності повітря в ПА й формулювання науково обґрунтованих рекомендацій щодо зниження непродуктивних енерговитрат;
- визначення області раціонального використання енергозберігаючих ПА;
- розробка стратегії дискретного адаптивного керування багатопозиційними ПА, що забезпечує самонавчання й орієнтованої на пропоновані структури ПА з гальмуванням за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків;
- побудова керуючого пневмомодуля для багатопозиційного ПА, що має потрібну функціональну гнучкість при реалізації розробленої стратегії керування;
- проведення чисельного експерименту з метою дослідження впливу структури багатопозиційного ПА, виду функції перемикання і її коефіцієнтів, часових затримок у системі керування, способу самонавчання на форму перехідного процесу та точність позиціонування;
- розробка рекомендацій для практичного впровадження розроблених ПА в системи автоматизації і механізації виробничих процесів.

*Об'єкт дослідження* – газодинамічні й термодинамічні процеси в порожнинах пневмодвигунів і комутаційних трактах ПА з гальмуванням шляхом зміни структури комутаційних зв'язків, а також тепломеханічні процеси, пов'язані з перетворенням працездатності стисненого повітря в зовнішню механічну роботу виконавчих органів ПА.

*Предметом дослідження є динамічні характеристики ПА з гальмуванням і позиціонуванням за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків (час спрацювання, форма перехідних процесів при гальмуванні та позиціонуванні і т.д.), енергетичні характеристики (кількість стисненого повітря, спожитого в процесі одного спрацювання, осереднений за цикл ККД і т.д.).*

*Методи дослідження.* Аналіз на основі математичного моделювання, спираючись на фундаментальні положення термодинаміки тіла змінної маси, внутрішніх перехідних процесів, а також кількісного й якісного складу енерговитрат стисненого повітря з використанням ексергічного методу. При нормуванні диференціальних рівнянь використана теорія аналогічності тепломеханічних систем. При числовому інтегруванні нелінійних систем використаний метод Рунге-Кута, а при дослідженні лінійних моделей використовуються методи розв'язання систем неоднорідних лінійних рівнянь. При розробці стратегії керування багатопозиційним ПА використані: метод фазового простору, метод кореневого годографа, теорія систем з самонавчанням. При структурному синтезі використаний метод безроздільної декомпозиції рівнянь.

**Наукова новизна отриманих результатів:** • Використовуючи комплексний підхід до рішення проблеми руху пневмоагрегатів із мінімальними енергетичними витратами, на основі *методу безроздільної декомпозиції рівнянь* (метод проф. Черкашенко М. В.) уперше запропоновано універсальний алгоритм синтезу енергозберігаючих гідро-пневмоагрегатів.

- Вперше розроблені теоретичні основи синтезу дискретних ГПА, як систем змінної структури (СЗС), в яких рух, гальмування та позиціонування РО здійснюється за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків ПА залежно від розташування РО в тій або іншій підобласті фазового простору.

- Вперше проблема кардинального покращення основних експлуатаційних показників ПА, в тому числі розширення області застосування в бік суттєвого збільшення інерційних навантажень, вирішена за рахунок раціональної послідовності підключення порожнин пневмодвигуна до різних об'єктів комутації у процесі руху РО.

- Вперше розроблена універсальна ММ у безрозмірній формі з виділенням критеріїв динамічної подоби, відмінних від загальноприйнятих, що дозволяє провести всебічний аналіз динамічних і енергетичних характеристик ПА з гальмуванням і позиціонуванням шляхом зміни структури комутаційних зв'язків.

- Розроблено лінійну модель ПА, в основу якої покладена заміна нелінійних залежностей не дотичними, а січними, причому, завдяки оптимальній формі цих січних вдалося одержати досить точні аналітичні рішення для всіх змінних стану ПА.

- Вперше при проведенні досліджень на ЕОМ використана методика ексергічного аналізу дискретного ПА з розрахунком усіх компонентів енерговитрат і методика розрахунку оптимального гальмівного шляху РО.

- Запропоновано спосіб визначення області ефективного використання енергозберігаючих схем ПА, який ґрунтується на виділенні границь у просторі критеріїв динамічної подоби і дає можливість поряд із завданням структурного синтезу вирішити й завдання параметричного синтезу, що полягає у виборі діаметра

пневмоциліндра (ПЦ), забезпечуючи при заданому навантаженні безумовну доцільність використання енергозберігаючої схеми ПА.

- Запропоновано стратегію керування релейним багатопозиційним ПА із триетапним режимом позиціонування й самоналаштування системи керування, що дозволяє здійснити оптимізацію за критерієм точності та швидкодії.

- Розроблено методику побудови пневматичного керуючого модуля для багатопозиційного ПА, що має задану функціональну гнучкість, на основі універсального алгоритму синтезу гідропневмоагрегатів методом безроздільної декомпозиції рівнянь.

- Запропоновані на основі теоретичних та експериментальних досліджень алгоритми керування, а також модифіковані лінії перемикачів у фазовій площині дозволяють вирішити актуальне завдання реалізації вільнопрограмованого позиціонування ПА на базі серійної дискретної пневмоапаратури.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені в цій дисертаційній роботі схеми ПА, методики їх розрахунку, результати досліджень і рекомендації з використання носять закінчений характер і доведені до рівня, що дозволяє здійснити їх упровадження в практику проектування й експлуатації промислової пневматики.

- Розроблено нові пневматичні схеми й карти керування розподільниками, що забезпечують значне поліпшення енергетичних і динамічних характеристик ПА та розширюють область застосування силової пневматики у бік значно більших інерційних навантажень.

- Розроблено інженерні методики розрахунку найбільш раціональних способів гальмування, що ґрунтуються на використанні критеріїв динамічної подоби та графіків, побудованих з їхнім застосуванням, що дозволяє оперативно вибирати конструктивні та настроювальні параметри ПА.

- Визначено область раціонального використання енергозберігаючих схем і дається методика оперативного визначення економічної доцільності їх використання при заданих конструктивних параметрах і навантаженні.

- Запропоновано розрахункові формули для визначення параметрів ПЦ, що забезпечують економічну привабливість запропонованої енергозберігаючої схеми.

- Розроблено нову методику керування релейними багатопозиційними ПА, що ґрунтується на гальмуванні й позиціонуванні за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків, запропонована найбільш раціональна структура такого ПА, розроблені алгоритми мікропроцесорного керування у вигляді карт керування розподільниками й блок-схеми програми комп'ютерного керування, що оптимізує за рахунок самонавчання процес позиціонування як за точністю, так і за швидкістю.

- Розроблено комплект комп'ютерних програм, що дозволяє на основі універсальної математичної моделі ПА з гальмуванням одержувати перехідні процеси, енергетичні характеристики, докладний баланс енерговтрат, а також у процесі одного розрахунку визначати оптимальну координату гальмування РО ПА.

Результатом впровадження запропонованих у дисертації розробок у ВНДГідропривод (м. Харків) з'явилося видання трьох методичних рекомендацій для Мінстанкопрома СРСР (1984 р., 1986 р., 1986 р.).

Результати дисертаційної роботи впроваджені на ВАТ «Пневматика» (м. Сімферополь, акт упровадження від 28.08.2010 р.), Корпорації «Гідроелекс» (м. Харків, акт упровадження від 1.10.2010 р.) і в навчальний процес кафедри «Гідропневмоавтоматика і гідропривод» НТУ «ХПІ» (акт упровадження від 20.10.2010 р.).

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались й обговорювались на: Міжнародних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 1999, 2001, 2002, 2005, 2008, 2010), XVI Всесоюзній науково-технічній нараді по гідравлічній автоматичній (1983, Київ), V Всесоюзному симпозиумі по пневматичним (газовим) приводам (1986, Тула), XVII Всесоюзній нараді «Пневмогідроавтоматика і гідропривод» (1990, Суздаль), Міжнародній науково-технічній конференції «Пневмо-гідро 90» (1990, Мишкольц, Угорщина), Міжнародній науково-технічній конференції «Інтертехно 90» (1990, Будапешт, Угорщина), Міжнародному технічному семінарі (ВНДГідропривод, 1996, Харків), XV Міжнародній науково-технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (2010, Київ).

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковані в 40 наукових працях, серед них: 34 робіт у фахових наукових виданнях ВАК України, 3 авторських свідоцтва.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків. Повний обсяг дисертації 447 сторінок, серед них 164 рисунка за текстом, 54 рисунка на 47 окремих сторінках, 17 таблиць за текстом, список використаних джерел інформації з 196 найменувань на 18 сторінках, додатки на 47 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **введенні** обґрунтовується актуальність досліджень, формулюється мета й завдання дослідження, викладені наукова новизна, практичне значення й особистий внесок автора.

У **першому розділі** зроблений огляд способів гальмування й позиціонування РО ПА. Викладені існуючі методи розрахунків ПА із пневматичними гальмовими пристроями. При огляді методів позиціонування РО ПА особлива увага приділяється методам, що ґрунтуються на використанні керуючих ЕОМ. Розглядаються структури таких ПА, що ґрунтуються як на використанні аналогового сервоклапана, так і дискретної пневмоапаратури. Приділена також увага огляду методів математичного моделювання (ММ) процесів у ПА. Крім того, дається аналіз методів розрахунку енергетичних характеристик ПА, а також способів зниження непродуктивних енерговитрат.

Фізичним об'єктом дослідження є системи гідропневмоагрегатів (ГПА), ув'язаних в єдину технологічну лінію й керованих ЕОМ. Типова технологічна схема такого ГПА наведена на рис.1.

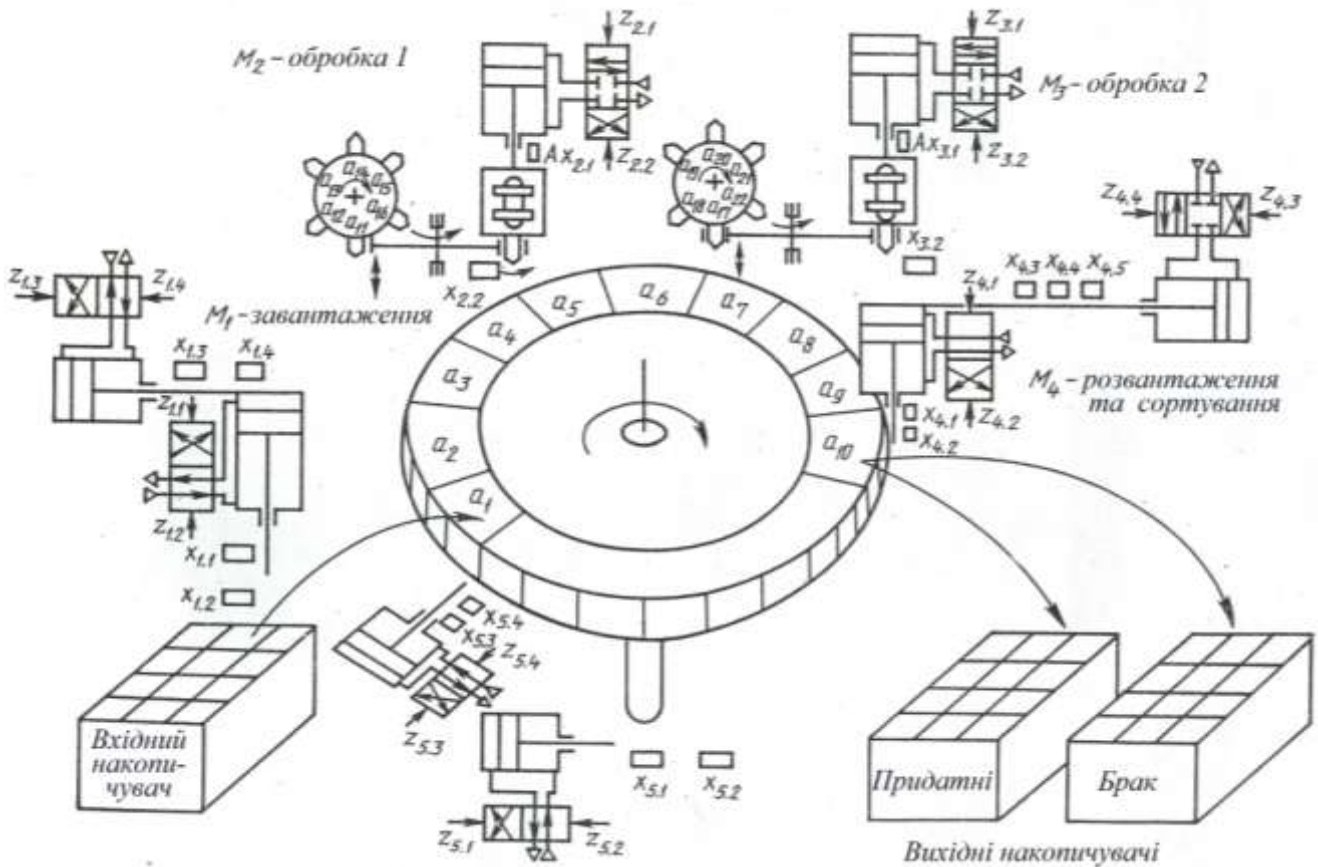


Рис. 1. Принципова технологічна схема ГПА з комп'ютерним керуванням

У другому розділі розроблені класифікація, схеми й ММ ПА з гальмуванням шляхом зміни структури комутаційних зв'язків. При цьому способі пропонується процес гальмування й позиціонування здійснювати за рахунок раціонально підбраної послідовності підключення порожнин ПА з різними об'єктами комутації в процесі руху РО, тобто розглядати ПА як систему змінної структури (СЗС). Показано, що саме така система має необхідну функціональну гнучкість і найбільшою мірою орієнтована на сучасне комп'ютерне керування. На рис. 2 показані типові комутаційні ситуації при фіксації РО (рис. 2.а), а також для вихлопної (рис. 2.б) й робочої (рис. 2.в) порожнин при гальмуванні. Варіанти комутації порожнин циліндра відповідно до такої нумерації для випадку максимального початкового перепаду тиску (індекс I) наведені в табл. 1. Аналогічні таблиці отримані й для інших варіантів вихідного стану (фіксації) з індексами II, III і IV.

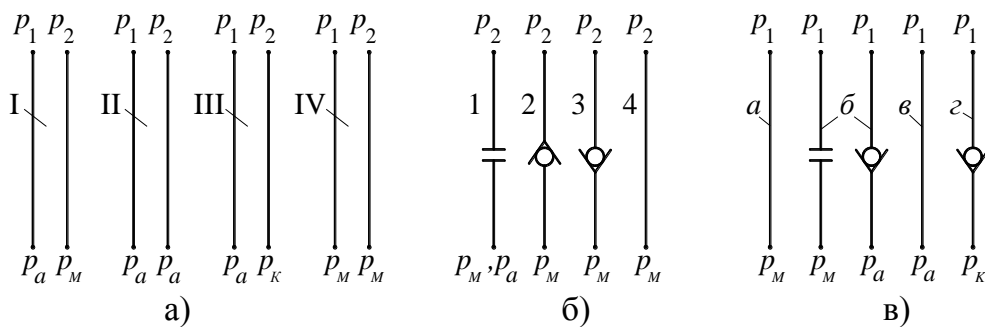


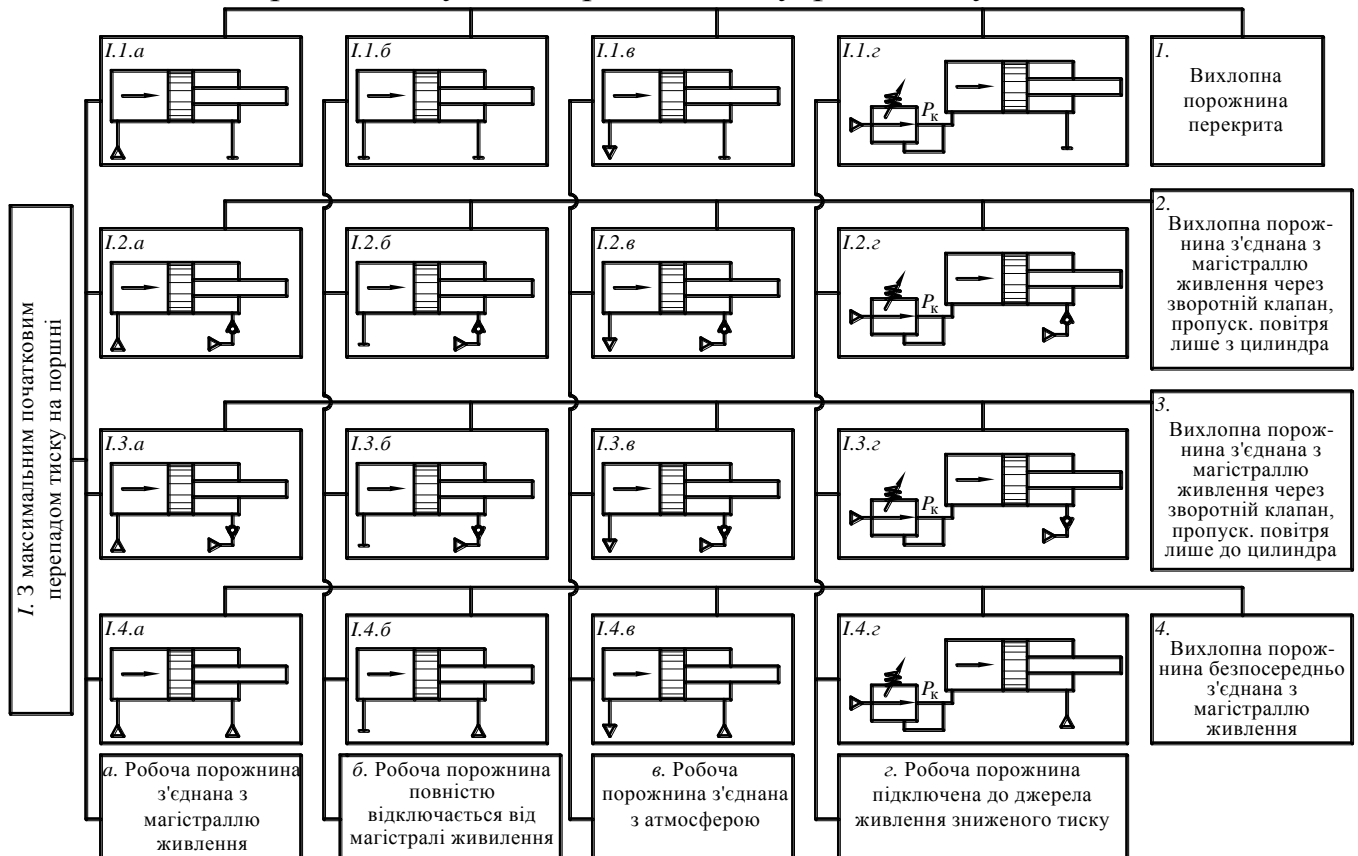
Рис. 2. Типові комутаційні ситуації при фіксації (а) і гальмуванні РО (б, в)



На базі цих класифікаційних таблиць розроблений досить повний альбом з 20 схем і алгоритмів гальмування шляхом зміни структури комутаційних зв'язків за допомогою серійної пневмоапаратури, деякі з яких вибірково подані в табл. 2.

Для об'єктивного вибору найбільш раціональних варіантів гальмування й позиціонування розроблена єдина ММ, придатна для аналізу всіх схем ПА, а також обраний критерій оцінки їхньої ефективності.

Табл. 1. Варіанти комутації порожнин ПА у фазі гальмування



$$\begin{aligned}
 Y_1 = & R \cdot \bar{T} \cdot p_{\hat{i}} + R \cdot T \cdot p_{\hat{e}} + \bar{R} \cdot T \cdot \left( p_{\hat{i}} \cdot \frac{1 + \text{sign}(p_1 - p_{\hat{i}})}{2} + p_1 \cdot \frac{1 + \text{sign}(p_{\hat{i}} - p_1)}{2} \right) + \bar{R} \cdot \bar{T} \cdot \\
 & \left( p_{\hat{a}} \cdot \frac{1 + \text{sign}(p_1 - p_{\hat{a}})}{2} + p_1 \cdot \frac{1 + \text{sign}(p_{\hat{a}} - p_1)}{2} \right); Y_2 = R \cdot \bar{T} \cdot \left( p_a \cdot \frac{1 + \text{sign}(p_2 - p_a)}{2} + p_2 \cdot \frac{1 + \text{sign}(p_{\hat{a}} - p_2)}{2} \right) + \\
 & + \bar{R} \cdot T \cdot p_{\hat{e}} + R \cdot T \cdot \left( p_{\hat{i}} \cdot \frac{1 + \text{sign}(p_2 - p_{\hat{i}})}{2} + p_2 \cdot \frac{1 + \text{sign}(p_{\hat{i}} - p_2)}{2} \right) + \bar{R} \cdot \bar{T} \cdot p_{\hat{i}}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Табл. 2. Схеми ПА з гальмуванням шляхом зміни структури комутаційних зв'язків (фрагмент)

№ п/п	Індекс схеми	Схема ПА	Карта керування			
			Ситуація	R	T	
4	I.2. б		ВІПРАВО	роз	1	0
				гал	1	1
				фік	1	0
			ВЛІВО	роз	0	0
				гал	0	1
				фік	0	0
6	I.2. г		ВІПРАВО	роз	1	0
				гал	1	1
				фік	1	0
			ВЛІВО	роз	0	0
				гал	0	1
				фік	0	0
11	I.4. в		ВІПРАВО	роз	1	-
				гал	0	-
				фік	1	-
			ВЛІВО	роз	0	-
				гал	1	-
				фік	0	-

Корективи  $z_1$  і  $z_2$  імітують процес дискретної зміни пропускної здатності магістралей для лівої і правої порожнин при зміні структури комутаційних зв'язків у процесі руху РО. Функції  $s_1, s_2, s'_1, s'_2$  дискретно змінюють структури правих частин диференціальних рівнянь математичної моделі, записаної у формі Коші, при переході від заповнення до спорожнення й навпаки.

При дослідженні енергетичних характеристик як споживана енергія використовувалася працездатність (ексергія) стисненого повітря, тобто максимальна корисна робота, яку можна одержати від термодинамічної системи в результаті оборотного переходу її до стану рівноваги з навколишнім середовищем. Показано, що якщо в ресивері й холодильнику компресора стиснене повітря приходить у термічну рівновагу з навколишнім середовищем, то енергія стисненого повітря, спожита в процесі одного спрацьовування визначалася як

$$E = R \cdot T_M \cdot \ln \frac{1}{\sigma_a} \cdot \int_0^{t_{cp}} G dt = f_1^3 \cdot p_M \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot T_M} \cdot \ln \frac{1}{\sigma_a} \cdot \int_0^{t_{cp}} \varphi \bar{I} dt, \quad (2)$$

де  $I = \frac{p_i}{p_{i1}} \cdot \frac{1}{\sigma_a} \cdot \text{sign}(p_{i1} - p_i)$  – відношення тисків у порожнині ПА і в об'єкті комутації;  $\sigma_a = p_a / p_M$  – відношення атмосферного тиску до магістрального;  $T_M$  – температура повітря в магістралі;  $G$  – масова витрата в магістралі живлення;  $\varphi \bar{I}$  – витратна функція.

Універсальна ММ ПА в безрозмірній формі має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma_1}{d\tau} = \frac{k}{\xi_{01} + \xi} \cdot \left[ s_1 \cdot z_1 \cdot \text{sign}(\sigma_{i1} - \sigma_1) \cdot \varphi \bar{I}_1 - \sigma_1 \cdot \frac{d\xi}{d\tau} \right]; \\ \frac{d\Theta_1}{d\tau} = \frac{\Theta_1}{\sigma_1} \cdot \frac{d\sigma_1}{d\tau} + \frac{\Theta_1}{\xi_{01} + \xi} \cdot \frac{d\xi}{d\tau} - \text{sign}(\sigma_{i1} - \sigma_1) \cdot s'_1 \cdot z_1 \cdot \frac{\varphi \bar{I}_1}{\xi_{01} + \xi}; \\ \frac{d\sigma_2}{d\tau} = -\frac{k}{\xi_{02} + 1 - \xi} \cdot \left[ s_2 \cdot z_2 \cdot \text{sign}(\sigma_{i2} - \sigma_2) \cdot \frac{\varphi \bar{I}_2}{\Pi_{21}^F} - \sigma_2 \cdot \frac{d\xi}{d\tau} \right]; \\ \frac{d\Theta_2}{d\tau} = \frac{\Theta_2}{\sigma_2} \cdot \frac{d\sigma_2}{d\tau} - \frac{\Theta_2}{\xi_{02} + 1 - \xi} \cdot \frac{d\xi}{d\tau} - \text{sign}(\sigma_{i2} - \sigma_2) \cdot \frac{s'_2 \cdot z_2 \cdot \varphi \bar{I}_2}{\Pi_{21}^F \cdot (\xi_{02} + 1 - \xi)}; \\ \frac{d\xi}{d\tau} = \dot{\xi}; \\ \frac{d\xi}{d\tau} = \frac{1}{\beta} (\sigma_1 - \sigma_2 \Pi_{21}^F - \chi); \\ \frac{dy}{d\tau} = \frac{\xi^2 \beta}{2}; \\ \frac{dR_1}{d\tau} = \sigma_1 - \sigma_a \xi; \\ \frac{dR_2}{d\tau} = \Pi_{21}^F \sigma_2 - \sigma_a \xi; \\ \frac{dM}{d\tau} = z_1 \cdot \bar{T} \cdot \varphi \bar{I}_1 - z_2 \cdot T \cdot \varphi \bar{I}_2 - \frac{1 + \text{sign}(\sigma_2 - 1)}{2} \quad (\text{дәй I.2. а}), \end{array} \right. \quad (3)$$

де  $\sigma_1, \Theta_1, \sigma_2, \Theta_2$  – безрозмірні тиски й температури в робочій і вихлопній порожнинах пневмоцилиндра (ПЦ),  $\xi$  – переміщення РО в безрозмірній формі.

У результаті числового інтегрування системи рівнянь (3) визначається осереднений за цикл ККД. Через те, що досліджувалися ПА з великим масовим навантаженням і гальмуванням РО наприкінці ходу, то як корисна робота крім  $P \cdot L$  враховувалася осереднена за цикл кінетична енергія рухомих частин.

$$\eta_{cp} = \frac{y / \tau'_{cp} + \chi}{M \cdot \ln(1/\sigma_a)}, \quad (4)$$

де  $\bar{M} = M / (\rho_M \cdot F \cdot L)$  – відносна масова кількість стисненого повітря, спожита ПА в процесі одного спрацьовування;  $\rho_M$  – густина повітря в магістралі живлення;  $F$  – площа поршня;  $L$  – повний хід;  $\tau'_{cp}$  – безрозмірний час руху РО.

При нормуванні рівнянь ММ виділені основні критерії динамічної подоби:

$$\beta = \frac{m \cdot L}{t_0^2 \cdot F_1 \cdot p_M} - \text{критерій інерційності (безрозмірна маса)} \quad \text{та} \quad \chi = \frac{P}{p_M \cdot F_1} -$$

параметр навантаження, де  $t_0 = F \cdot L / (f_1^3 \cdot a_M)$  – базова одиниця часу;  $a_M$  – швидкість звуку при параметрах повітря в магістралі живлення;  $f_1^3$  – ефективна площа тракту живлення.

*Лінійна модель ПА дискретної дії.* Традиційно лінійні моделі слідкуючих гідро-пневмоагрегатів будуються шляхом заміни реальних нелінійних залежностей дотичними (першими членами розкладання в ряд Тейлора). Для розімкнених дискретних ПА такий підхід виявляється неприйнятним через велику погрішність. Тому в основу лінеаризації була закладена заміна нелінійних залежностей січними. Рівняння січної для витратної функції  $\varphi(I)$  шукалося у вигляді  $\bar{\varphi} = \alpha_1 \sigma_1 + \beta_1$ , де  $\sigma_1 = p_1 / p_M$ . Оптимальні значення коефіцієнтів  $\alpha_1$  і  $\beta_1$  визначалися виходячи із принципу рівності інтегральних оцінок реальної функціональної залежності та її апроксимації, при реалізації якого середня помилка по витраті в необхідному

діапазоні  $\sigma$  дорівнювала нулю:  $\int_{\sigma_n}^{\sigma_k} \Delta d\sigma_1 = 0$ . Як додаткова умова досліджувалися

різні варіанти проходження січної через характерні точки. Як показали числові розрахунки, найбільш точною є така лінеаризація витратної функції, коли січна проходить через точки, що відповідають сталим значенням тиску в робочій порожнині ПЦ  $\sigma_{1y}$  і  $\sigma_1 = 1$ :

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi \sigma_{1y} - \varphi_1 - 1}{\sigma_{1y} - 1}, \text{ тобто } \alpha_1 = \frac{\varphi \sigma_{1y} - \varphi_1 - 1}{\sigma_{1y} - 1}; \beta_1 = -\alpha_1. \quad (5)$$

Аналогічно проводиться лінеаризація й інших нелінійних функцій.

Отримана система лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь третього порядку подавалася в матричній формі:

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\tau} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}, \quad (6)$$

де  $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \xi \end{pmatrix}$  – вектор змінних стану ПА;  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 0 \end{pmatrix}$  – квадратна матриця

постійних коефіцієнтів;  $\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$  – вектор задавальних функцій.

Кінцевий вираз для загального рішення неоднорідної системи (6) шукався у вигляді:

$$x = Ng \left[ \bar{N}^{-1} x_0 + N u g \left[ \bar{N}^{-1} b - N u N^{-1} b, \right. \right. \quad (7)$$

де  $N$  – модальна матриця;  $N^{-1}$  – матриця, зворотна матриці  $N$ ,  $x_0$  – вектор початкових значень змінних;  $g(\tau)$  – діагональна матриця експоненціальної функції  $e^{i\lambda\tau}$ . Змінні стану  $\sigma_2$ ,  $\sigma_1$ ,  $\xi$  є елементами вектора загального рішення системи неоднорідних рівнянь. Зокрема, безрозмірна швидкість РО подається у вигляді:

$$\xi = e^{\lambda_2\tau} \left[ \frac{a_{22} - a_{11} x_{20} - x_{2y} + 2a_{11} x_{10} - x_{1y}}{2\lambda_i} \operatorname{sh} \lambda_i \tau + x_{20} - x_{2y} \operatorname{ch} \lambda_i \tau \right] + x_{2y}, \quad (8)$$

де  $\lambda_i$  – корені характеристичного рівняння.

Показано гарний збіг лінійних рішень (7) із числовими нелінійними рішеннями системи (3) на основі 160 варіантів порівняльних розрахунків.

У третьому розділі реалізована широка програма чисельних досліджень робочих процесів у схемах, отриманих на основі класифікації способів гальмування за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків з використанням математичних моделей, розроблених у другому розділі.

Дослідження проводилися із застосуванням безрозмірної форми запису рівнянь при однакових критеріях динамічної подоби. Як приклад на рис. 3 дається перехідний процес, отриманий при  $\beta = 5$  й  $\chi = 0,1$ .

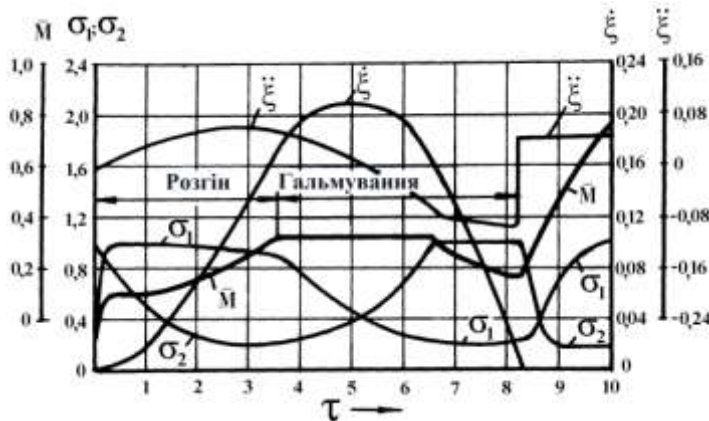


Рис. 3. Перехідний процес для ПА зі схемою I.2. б (б)

Результати розрахунків зводилися в таблицю (табл. 3 наведена як приклад і відбиває 2 варіанти з 20), в якій для кожної схеми враховувалися: безрозмірний час спрацювання ( $\tau$ ), відносна кількість спожитого повітря ( $\bar{M}$ ), максимальне негативне прискорення при гальмуванні ( $\xi_M$ ), осереднений за цикл ККД ( $\eta_{cp}$ ), максимальний ступінь стискання ( $\sigma_{2M}$ ), відносний гальмівний шлях ( $\xi_T$ ), відносна вартість апаратурної реалізації ( $c_m$ ). В знаменнику приведені оцінки в балах по кожному показнику.

Табл. 3. Основні показники різних схем гальмування (фрагмент)

№ П/П	Індекс схеми	$\tau / k_\tau$	$\bar{M} / k_{\bar{M}}$	$\eta_{\text{нд}} / k_\eta$	$\xi_{\text{і}} / k_{\xi_{\text{і}}}$	$\sigma_{2\text{і}} / k_\sigma$	$c_m / k_{c_m}$	$\xi_T$	$K$
1	I.1. а	$\frac{7,4}{9,0}$	$\frac{1,15}{1,4}$	$\frac{0,122}{1,6}$	$\frac{0,325}{2,3}$	$\frac{4,14}{2,4}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{0,91}{-}$	16,3
5	I.2. б	$\frac{8,35}{8,06}$	$\frac{0,78}{2,2}$	$\frac{0,158}{2}$	$\frac{0,085}{8,8}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{3,2}{3,1}$	$\frac{0,75}{-}$	25,1

Коефіцієнт вагомості кожного показника визначався методом експертних оцінок. На підставі інформації, приведеної в табл. 3 підраховувався комплексний показник технічного рівня  $K$

$$K = k_{\tau} \cdot B_{\tau} + k_M \cdot B_M + k_{\eta} \cdot B_{\eta} + k_{\xi_M} \cdot B_{\xi_M} + k_{\sigma} \cdot B_{\sigma} + k_{cm} \cdot B_{cm} \quad (9)$$

де  $B_i$  – коефіцієнти вагомості;  $k_i$  – оцінки в балах (у табл. 3 під рискою).

Зі схем з максимальним початковим перепадом (індекс  $I$ ) максимальний коефіцієнт  $K$  мають схеми I.2. б і I.2. г ( $K = 25,1$  і  $25,2$  відповідно). Тому схема I.2. б (схема №2) розглядалася як найбільш прийнятна при гальмуванні в умовах великих інерційних навантажень, що стало передумовою для розробки інженерної методики розрахунку, що ґрунтується на графіках  $\tau = f(\beta, \chi)$  і  $\xi_T = f(\beta, \chi)$ , де  $\tau$  та  $\xi_T$  – безрозмірний час спрацьовування й координата гальмування. Один із восьми графіків, що охоплюють велику область існування ПА, що працюють за схемою I.2.б поданої на рис. 4.

При розрахунках на ЕОМ з метою мінімізації витрат машинного часу попутно було вирішене завдання автоматизованого визначення оптимального гальмового шляху.

Графіки  $\tau = f(\beta, \chi)$  і  $\xi_T = f(\beta, \chi)$  є основою інженерної методики розрахунку, коли при відомих умовах функціонування й параметрах ПА визначаються його критерії подоби  $\beta$  й  $\chi$  і обчислюються спочатку безрозмірні, а потім і розмірні значення часу спрацьовування й оптимального гальмового шляху.

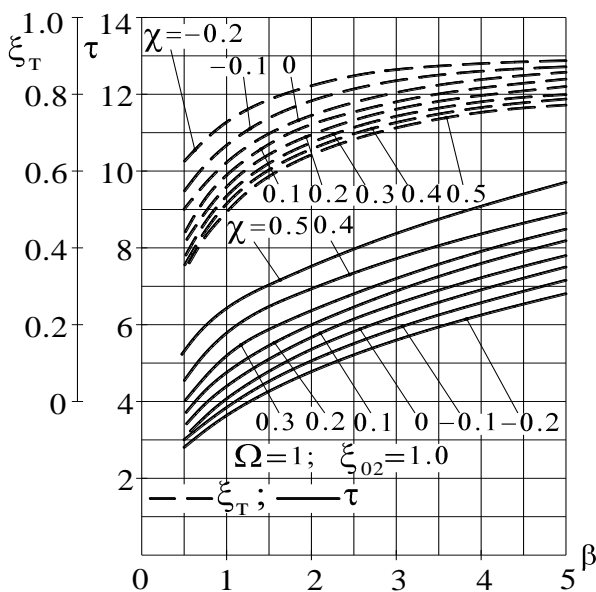


Рис. 4. Залежність оптимального гальмового шляху  $\xi_T$  й часу спрацьовування від основних критеріїв динамічної подоби  $\beta$  й  $\chi$

Для синтезу структури й параметрів енергозберігаючого ПА був проведений всебічний ексергічний аналіз усіх компонентів енерговитрат стисненого повітря для схем I.4. в (схема №1) і I.2. б (схема №2). Як показав аналіз, основними джерелами втрат працездатності стисненого повітря є: втрати через неповноту розширення повітря в робочій порожнині ( $\Delta E_{np}$ ), через невідповідність фактичного показника розширення ідеальному (ізотермічному) ( $\Delta E_{нп}$ ); втрати в шкідливому просторі ( $\Delta E_{мо}$ ), втрати на дроселювання ( $\Delta E_{др}$ ), додаткові витрати на фіксацію РО ( $\Delta E_{\phi}$ ). Були отримані розрахункові формули для всіх компонентів енерговитрат. Наприклад:

$$\Delta E_{\text{НП}} = \left\{ \ln \frac{\sigma_{\text{от}}}{\sigma_a} - \frac{k}{k-1} \Theta_{\text{от}} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{\text{от}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} \times \frac{\sigma_{\text{от}}}{\Theta_{\text{от}}} \left[ \xi_{01} 1 - \sigma_a^{1/k} + \xi_{\text{от}} \right], \quad (10)$$

де  $\sigma_{\text{от}}$ ,  $\Theta_{\text{от}}$  – безрозмірні тиск і температура в робочій порожнині в момент відсікання притоку повітря (перемикання гальмового розподільника);  $\xi_{\text{от}}$  – координата РО в момент відсікання.

Процентна діаграма енерговитрат для стисненого повітря, поданого в робочу порожнину ПА, що працює за схемою №1 подана на рис. 5. Зовнішня механічна робота  $R_1$  здійснювана повітрям становить 21,8 %, і значна частина її витрачається на здійснення роботи виштовхування стисненого повітря з вихлопної порожнини. Великі невірні втрати пов'язані з надмірною простотою апаратної реалізації найпростішої базової схеми І.4.в, коли в ПА, що має три фази руху вперед і три фази руху назад існує тільки дві комутаційні ситуації. В основу побудови енергозберігаючої схеми був покладений принцип: кожній фазі руху РО повинні відповідати найбільш оптимальні з погляду енергозбереження й швидкодії комутаційні зв'язки, які спочатку можуть бути описані словесно.

Із класифікаційної табл. 1 і рис. 2 найбільш ефективно цю проблему може вирішити набір комутаційних ситуацій, названий як ІІ.2. г. При фіксації РО повинен використатися мінімальний перепад, при якому нижній рівень відповідає атмосферному тиску ( $p_a$ ), а верхній настроюється редуційним клапаном ( $p_k$ ).

На основі цієї класифікаційної ознаки була складена таблиця оптимальних комутаційних зв'язків для всіх 6-ти фаз руху.

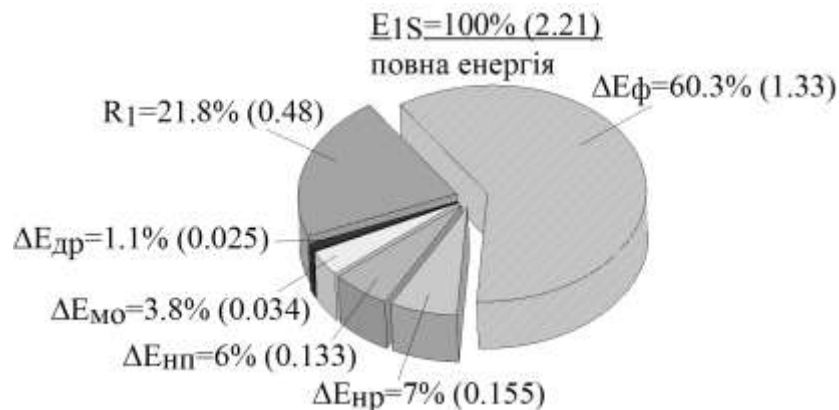
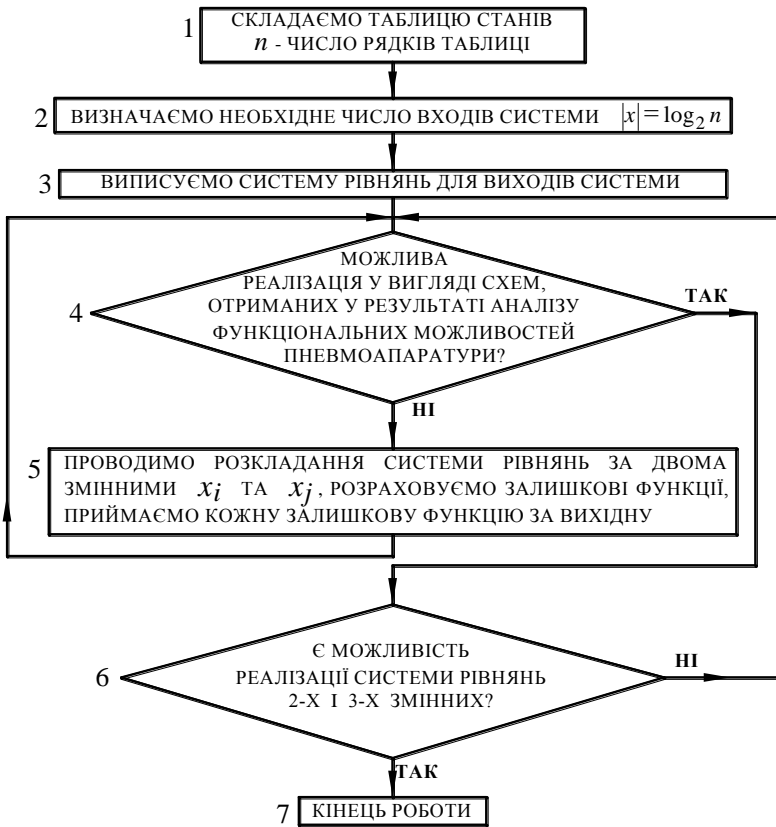


Рис. 5. Процентна діаграма енерговитрат стисненого повітря в робочій порожнині схеми І.4. в (схема № 1)

*Алгоритм синтезу енергозберігаючої схеми ПА* на основі методу безроздільної декомпозиції рівнянь складається з послідовного виконання наступних пунктів, у відповідності до блок-схеми:



У результаті реалізації цього алгоритма були отримані залежності для виходів системи:

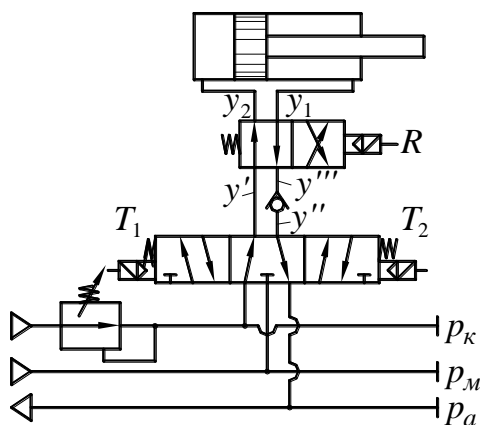
$$\begin{cases} y_1 = R (T_1 \bar{T}_2 p_M + \bar{T}_1 p_K), \\ y_2 = \bar{R} \bar{T}_1 T_2 p_K. \end{cases} \quad (11)$$

Шляхом введення внутрішніх змінних  $y'$ ,  $y''$ ,  $y'''$  для системи були визначені пневматичні елементи (табл. 4), що реалізують систему рівнянь (11).

Таблиця 4

Елемент			
Рівняння	$y''' = 0$	$y_1 = R y'$ ; $y_2 = \bar{R} y''$	$y' = T_1 \bar{T}_2 p_M + \bar{T}_1 p_K$ ; $y'' = \bar{T}_1 T_2 p_K$

Отримана структура ПА з алгоритмом керування розподільниками (рис. 6) повністю відповідає вимогам до енергозберігаючої схеми ПА.



Ситуація		$R$	$T_1$	$T_2$
Вправо	Розгін	0	1	0
	Гальмування	0	0	1
	Фіксація	0	0	0
Вліво	Розгін	1	1	0
	Гальмування	1	0	1
	Фіксація	1	0	0

Рис. 6. Енергозберігаюча структура ПА (схема № 3) [ 33].



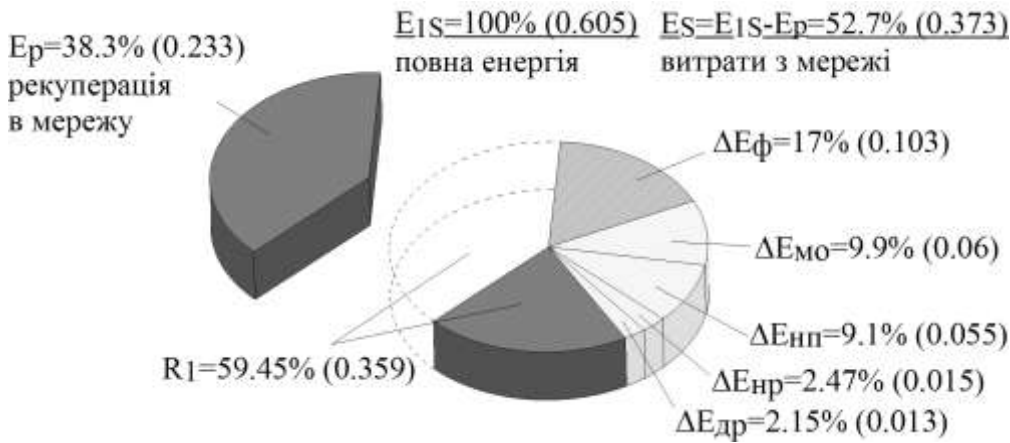


Рис. 7. Процентна діаграма енерговитрат стисненого повітря в робочій порожнині (схема № 3)

Процентна діаграма балансу енерговитрат для схеми №3 (рис. 7), отримана за тих самих умов функціонування, що й для схем №1 і №2, свідчить про істотне зниження невиробничих енерговитрат при одночасному

збільшенні швидкодії при переході до схеми №3. Значне зниження енерговитрат і підвищення швидкодії при переході до схеми № 3 відбувається за рахунок того, що для здійснення зовнішньої механічної роботи використовується не тільки транзитна працездатність стисненого повітря, як у традиційних схемах ПА, але й потенційна енергія стискання (розширення), причому збільшується частка корисної зовнішньої роботи за рахунок зниження непродуктивної роботи виштовхування стисненого повітря з вихлопної порожнини через знижений протитиск. Другим важливим фактором енергозбереження є рекуперация в мережу енергії гальмування, запасеної в гальмівній порожнині. І, нарешті, третім джерелом енергозбереження є мінімізація витрат стисненого повітря на фіксацію РО.

Використання безрозмірних критеріїв динамічної подоби  $\beta$  і  $\chi$  дозволило при розрахунках на ЕОМ охопити широку область існування енергозберігаючої структури ПА, обмежившись порівняно невеликими витратами машинного часу. Обробка результатів розрахунку на ЕОМ дала можливість визначити область раціонального використання енергозберігаючої схеми в просторі параметрів  $\beta$  і  $\chi$  (один з таких графіків наведений на рис. 8).

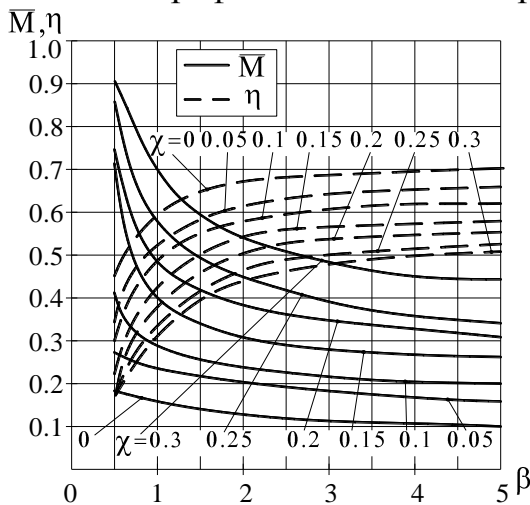


Рис. 8. Залежність відносної маси спожитого повітря  $\bar{M}$  та осередненого ККД  $\eta$  від параметрів  $\beta$  і  $\chi$  для схеми №3

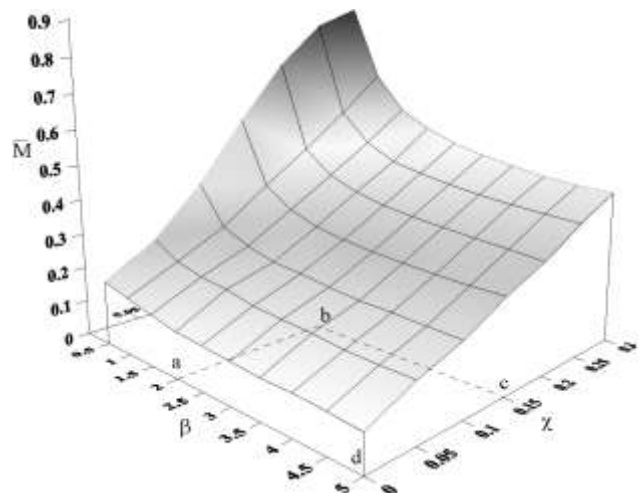


Рис. 9. Визначення області раціонального використання енергозберігаючого ПА (схема №3)

Найбільш істотне зниження енерговитрат (рис. 8) при переході до схеми №3 досягається при  $\chi = 0 \div 0,15$ , а при  $\chi = 0,15 \div 0,3$  зниження є істотним лише при  $2 \leq \beta \leq 5$ . При малих значеннях  $\beta$  ( $\beta < 0,5$ ) і більших значеннях  $\chi$  ( $\chi \geq 0,5$ ) використання ПА з енергозберігаючою структурою недоцільно, тому що не призводить до істотного зниження енерговитрат.

Виділення області раціонального використання енергозберігаючої схеми №3 у площині параметрів  $\beta$  і  $\chi$  (рис. 9) дозволило вирішити й завдання параметричного синтезу – вибір найбільш прийняттого діаметра пневмоциліндра, що забезпечує безумовну доцільність використання енергозберігаючої схеми. Виходячи з розмірів цієї області (площа  $S_{abcd}$ ) вибір діаметра пневмоциліндра  $D$  при заданому навантаженні ( $P, m$ ), довжині ходу ( $L$ ), а також ефективній площі пневмолінії живлення  $f_1^{\ominus}$  знаходиться з нерівностей

$$\sqrt{\frac{4}{\pi} \sqrt[3]{\frac{m \cdot f_1^{\ominus} \cdot k \cdot R \cdot T_m}{2 \cdot L \cdot p_m}}} \geq D \geq \sqrt{\frac{4P}{0,15 \cdot \pi \cdot p_m}}. \quad (12)$$

Зважаючи, що базова одиниця для маси повітря відповідає масі, необхідній для заповнення робочого об'єму ПЦ, графіки на рис. 8, 9 свідчать про те, що в області раціонального використання ( $S_{abcd}$ ) вдається скоротити витрати стисненого повітря в  $4 \div 10$  раз у порівнянні із традиційними схемами ПА.

У цьому ж розділі проведена подальша модифікація енергозберігаючих ПА й отримані схеми з компресійно-приводним режимом роботи, в яких повітря з гальмівної порожнини не повертається в мережу, а накопичується у тій же порожнині, а потім використовується для зворотного ходу. Це дозволило ще більш ефективно використати енергію стисненого повітря. Однак використання описаного методу можливе лише при наявності механічних фіксаторів із пневмокеруванням.

Проведений також порівняльний аналіз роботи запропонованих схем з гальмуванням за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків і традиційних схем дросельного гальмування. Показано, що традиційні способи дросельного гальмування при  $\beta > 0,3$  не здатні ефективно здійснювати гальмування через розвинений коливальний процес і непередбачений закон зміни імпульсу гальмового тиску, тоді як схеми №2 і №3 забезпечують надійне гальмування аж до  $\beta = 5$  за рахунок створення режиму гальмування з *контрольованим і регульованим імпульсом гальмового перепаду тиску на РО* (рис. 21).

**У четвертому розділі** розробляється специфічна стратегія дискретного керування для створення режиму вільнопрограмованого позиціонування РО ПА, в основу якої покладені методи гальмування шляхом зміни структури комутаційних зв'язків. Причому найбільш привабливо виглядає ідея створення таких ПА з використанням стандартної релейної пневмоапаратури, що в значній мірі здешевлює такі пристрої. Показано, що легше за все домогтися реалізації цієї ідеї можна у випадку використання режиму самонавчання.

Перші спроби створення вільнопрограмованого ПА з режимом самонавчання (Крейнін Г. В., Кистиченко А. А., Погорелов Б. В., Ульбріхт А., Франк В.) були реалізовані на пневмосхемах із дросельним гальмуванням із використанням двоетапного режиму позиціонування й могли ефективно працювати лише при дуже

малих інерційних навантажень ( $\beta < 0,25$ ). До того ж досить спрощений спосіб формування умови перемикання режимів не давав можливості при самонавчанні одночасно оптимізувати перехідний процес і за точністю позиціонування й за швидкодією.

В умовах позиційного керування найбільш перспективним видається використання ПА з дискретним керуванням, в якому висока швидкодія досягається за рахунок того, що більшу частину відстані між координатами позиціонування ПА проходить, залишаючись розімкнутим, без використання дроселюючих елементів у живильних і вихлопному трактах. Такі ПА, як і класичні слідкуючі системи, повинні бути оснащені датчиком положення й мати контур зворотного зв'язку, але замість аналогового сервоклапана, що реагує на величину й знак неузгодженості між вхідним сигналом і положенням робочого органу (РО), вони мають дискретний пневморозподільник із яскраво вираженою релейною характеристикою й реагують тільки на знак функції неузгодженості, причому остання у випадку відображення її у фазовій площині буде вважатися лінією перемикання.

Дослідження методом фазової площини й методом кореневого годографа показали, що найбільш прийнятними функціями неузгодженості (лініями перемикання) будуть:  $U = x_z - x - k_v \cdot V$  (двоконтурний ПД-регулятор) і  $U = x_z - x - k_v \cdot V - k_p \cdot \Delta p$  (триконтурний регулятор), де  $k_v$  і  $k_p$  – коефіцієнти зворотних зв'язків відповідно за швидкістю й перепадом тиску на пневмодвигуні.

Багатопозиційний ПА, побудований на таких принципах, є більш ефективним у системах позиційного керування й значно дешевшим за електропневматичні слідкуючі системи. Найбільш раціональним для подібного ПА видається 3-х етапний режим позиціонування, при якому перші два етапи: розгін і радикальне ("грубе") гальмування аж до першої зупинки РО здійснюються при розімкненому ПА (траєкторія 0-1-2 на рис. 10), а третій етап являє собою відстеження лінії перемикання, коли один з розподільників (реверсивний) перемикається залежно від знака функції неузгодженості  $U$  (траєкторія 2-3- $x_z$ ). Функція неузгодженості представляється як деяка гранична лінія у фазовій площині й найчастіше це похила лінія (лінія перемикання), що проходить через точку позиціонування  $x_z$  (рис. 10):

$$U = x_z - x - k_v \cdot V$$

де  $U$  – функція перемикання;  $x, x_z$  – поточна та задана координати РО;  $V$  – швидкість РО;  $k_v$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.

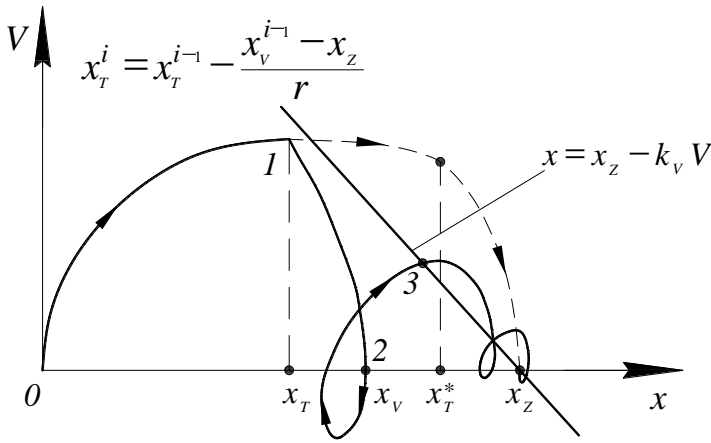


Рис. 10. Процес позиціювання у фазовій площині

Подібний режим позиціювання дозволяє реалізувати стратегію керування, що ґрунтується на самонавчанні (рис. 10), суть якої полягає в тому, що в режимі тестування нова координата радикального гальмування  $x_T^i$  залежить від різниці  $x_v^{i-1} - x_z$ , визначеної в результаті попереднього дослідження:

$$x_T^i = x_T^{i-1} - \frac{x_v^{i-1} - x_z}{r}, \quad (13)$$

де  $x_T^{i-1}$ ,  $x_v^{i-1}$  - координата початку гальмування й координата першої зупинки РО при попередньому досліді;  $r$  - коефіцієнт у межах від 1 до 2.

Тестування відбувається доки  $|x_z - x_v^i| \geq \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  - задана похибка.

Оптимальним вважається такий режим, при якому в результаті тільки одного перемикання гальмового розподільника забезпечується позиціювання із заданою точністю, а третя фаза руху взагалі відсутня. Перехід до третього етапу позиціювання в експлуатаційному режимі можливий у тому випадку, коли умови функціонування змінюються настільки, що координата позиціювання в результаті закінчення гальмування вийде за межі заданої точності. У цьому випадку третій етап буде завжди здійснювати «страховку», тобто безумовне відпрацювання заданої координати позиціювання й зміну координати початку гальмування  $x_T^*$ . Тому розроблену стратегію керування можна з усіма підставами вважати *адаптивною*.

Апаратурна реалізація триетапного процесу позиціювання була проведена на основі схем з гальмуванням (керуванням) шляхом зміни структури комутаційних зв'язків. Алгоритм синтезу керуючого пневматичного модуля був аналогічний принципу побудови схем гальмування шляхом зміни структури комутаційних зв'язків з урахуванням появи додаткової фази руху - відстеження лінії перемикання. Варіант комутації при вихідному стані (фіксації) позначався римською цифрою (I, II, III, IV), варіант комутації порожнин ПА в режимі радикального гальмування позначався арабською цифрою (1, 2, 3, 4), варіант комутації при відстеженні лінії перемикання - літерами а, б, в.

При побудові схеми використано алгоритм синтезу оптимальних структур ПА, що ґрунтується на методі безроздільної декомпозиції рівнянь (див. розділ 3). У результаті вдалося одержати систему логічних рівнянь, що описують умови роботи у вигляді:

$$\begin{cases} y_1 = \bar{R} \cdot \bar{T}_3 \cdot y^{\text{III}} + \bar{R} \cdot T_3 \cdot p_i + R \cdot p_\varepsilon \cdot \bar{T}_1 + R \cdot p_i \cdot T_1 \cdot \bar{T}_2, \\ y_2 = \bar{R} \cdot p_\varepsilon \cdot \bar{T}_1 + \bar{R} \cdot p_i \cdot T_1 \cdot \bar{T}_2 + R \cdot \bar{T}_3 \cdot y^{\text{III}} + R \cdot T_3 \cdot p_i, \end{cases} \quad (14)$$

де  $y^{III}$  – введена внутрішня змінна;  $T_1, T_2, T_3, R$  – сигнали перемикачів розподільників (булеві змінні). Вводячи додаткові внутрішні змінні  $y^I, y^II$  і провівши необхідні перетворення був отриманий універсальний пневмомодуль керування, здатний ефективно реалізувати концепцію триетапного позиціонування із самонавчанням (рис. 11).

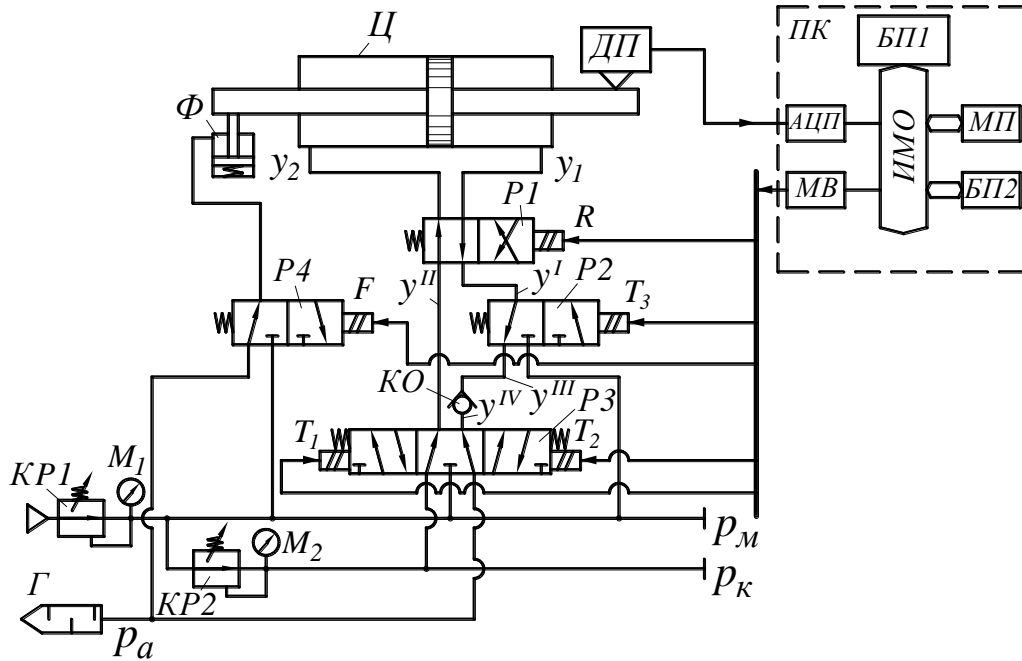


Рис. 11. Універсальний пневматичний модуль для триетапного позиціонування на базі 5-ти лінійного 3-и позиційного розподільника

На рис. 11 *ПК* – програмований контролер, *ДП* – датчик положення, *БП1* – блок живлення інтерфейсної магістралі, *БП2* – блок живлення вільнокомпанованих модулів контролера, *МП* – мікропроцесорний модуль, *АЦП* – аналогово-цифровий перетворювач, *МВ* – модуль виводу дискретних сигналів, *ИМО* – інтерфейсна магістраль.

Розроблений модуль має велику функціональну гнучкість. Деякі алгоритми керування з великої кількості можливих варіантів, реалізованих за допомогою цього пневматичного модуля, наведені в табл. 5.

Табл. 5. Програма керування пневморозподільниками при різних способах позиціонування (фрагмент)

Номер схеми	Фази руху	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$R$	Номер схеми	Фази руху	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$R$
І.3.б рух вправо	розгін	1	0	0	0	IV.2.в рух вправо	розгін	1	0	0	0
	грубе гальму- вання	0	1	1	0		грубе гальму- вання	0	1	0	0
	відстеж. лінії переми- кання	0	1	1	$\frac{1 - \text{sign}U}{2}$		відстеж. лінії переми- кання	0	0	0	$\frac{1 - \text{sign}U}{2}$
	фікса- ція	1	0	0	0		фікса- ція	0	0	0	0

Блок-схема програми керування контролера для одного з найбільш прийнятних алгоритмів І.3.б наведений на рис. 12 і зорієнтований на триетапний процес позиціонування з режимом самонавчання й відпрацьовуванням на третьому етапі пропорційно-диференційного закону керування.

Крім того, в четвертому розділі розробляється універсальна нелінійна ММ для багатопозиційного ПА з універсальним розподільним блоком (рис. 11), в основу якого покладена система рівнянь (3). Модель дозволяє однаковим способом досліджувати на ЕОМ усі варіанти й алгоритми позиціонування з урахуванням особливостей процесу позиціонування, відображених блок-схемою на рис 12.

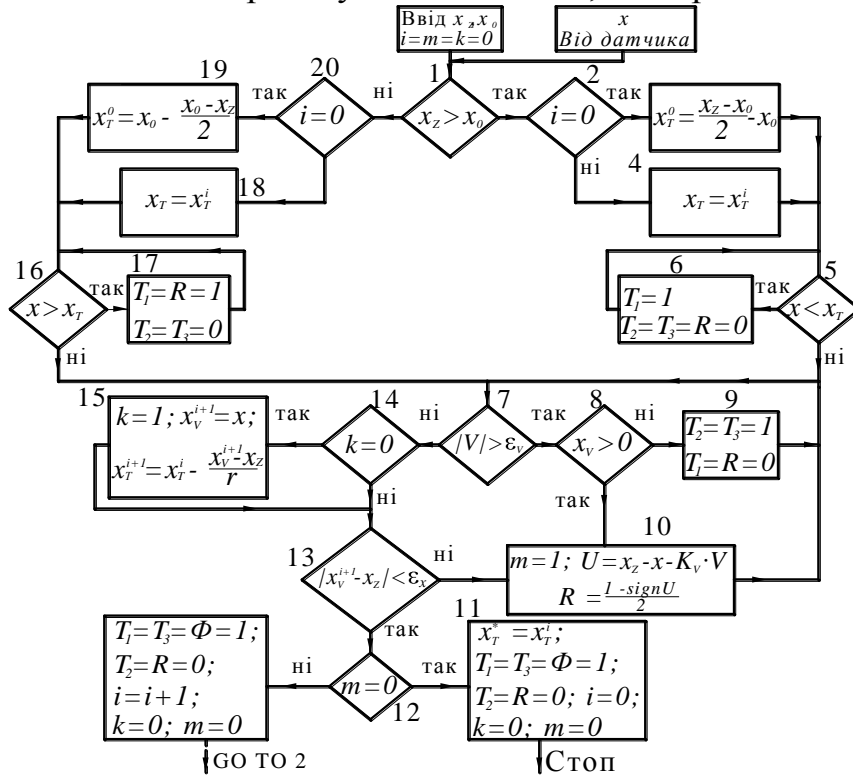


Рис. 12. Блок-схема програми керування ПА із триетапним процесом позиціонування із самонавчанням для варіанта І.3.б

Пропонується також лінійна ММ на основі розробок другого розділу (6).

У п'ятому розділі спираючись на розроблену ММ за допомогою ЕОМ проведено дослідження впливу структури ПА, виду функції перемикання і її коефіцієнтів, швидкодії розподільників і пневмомеханічного фіксатора, алгоритму керування, способу самонавчання на форму перехідних процесів, енерговитрати й точність позиціонування РО. У результаті досліджень виявлено, що відомі способи позиціонування із самонавчанням засновані на двоетапному

режимі позиціонування з виходом на «повзучу» швидкість на останньому етапі (Крейнін Г. В., Ульбріхт А., Франк В.) коректували при самонавчанні тільки координату спрацьовування фіксатора, відрізнялися невисокою швидкістю й здатністю працювати тільки при низьких інерційних навантаженнях ( $\beta < 0,25$ ). Дослідження показали, що використання в якості керуючого пневматичного модуля найпростішої структури ПА з мінімальним числом комутаційних ситуацій (Winston) і постійним відстеженням лінії перемикання (Linnet, Smith) у випадку використання двоконтурного ПД-регулятора призводить до появи коливальних процесів з великою амплітудою при  $\beta > 0,3$ . Це вимагає з метою забезпечення стабілізації процесу позиціонування застосування триконтурного регулятора, що ускладнює оптимізацію процесу позиціонування на основі самонавчання.

Як універсальний засіб для рішення проблеми позиціонування РО ПА з режимом самонавчання було досліджено можливості розробленого в 4 розділі вільнопрограмованого ПА (рис. 11).

Доведено, що алгоритм IV.2.в і частково I.2.в дозволяють реалізувати енергозберігаючий режим позиціонування (рис. 13). При великому інерційному навантаженні ( $\beta > 2$ ) і досить великих відстанях між координатами позиціонування ( $\Delta \xi_{Z_i} = |\xi_{Z}^{i-1} - \xi_{Z}^i| \geq 0,4$ ) цей алгоритм забезпечує зниження енерговитрат в 3÷4 рази порівняно з базовою схемою (алгоритм I.1.а).

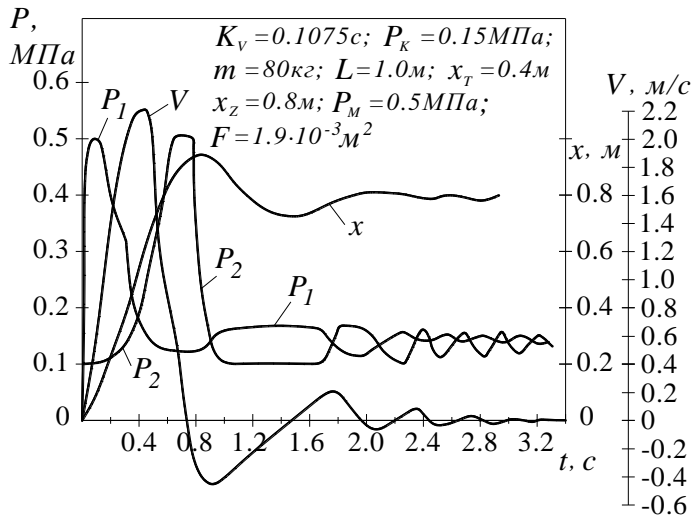


Рис. 13. Процес позиціонування за алгоритмом IV.2.в

Однак недолік цього алгоритму – велике від’ємне прискорення при гальмуванні й великий часовий проміжок між початком «грубого» гальмування й початком відстеження лінії перемикання (рис. 13) створює проблеми при відпрацюванні малих відстаней між координатами позиціонування особливо, коли гальмова порожнина ПЦ являє собою ємність великого об’єму, тобто при  $\xi_Z < 0,2$ . У цьому випадку спостерігався великий перебіг поршня, що досягав подвоєного значення координати позиціонування, а також неможливість відшукати оптимальну координату позиціонування на основі рекурентної формули (13), що змушувало ПА увесь час працювати в режимі триетапного позиціонування. Остання обставина знижувала швидкодію ПА, що працював у цих умовах. Найбільш раціональним при найрізноманітніших умовах експлуатації виявився алгоритм I.3.б (табл. 5). Програючи алгоритму IV.2.в в енергетичних характеристиках він виявив виняткову «всеїдність» при варіюванні масовим навантаженням у широких межах, при різних координатах позиціонування, забезпечуючи жорстке відстеження лінії перемикання й «м’який» режим гальмування й позиціонування (рис. 14).

Схема з алгоритмом I.3.б успішно здійснює позиціонування при  $0,07 < \beta < 5$  та  $\Delta \xi_Z = 0,01 \div 0,95$ . При всіх координатах позиціонування забезпечується швидкий процес самонавчання (рис. 15), причому перехід до оптимального двоетапного режиму позиціонування забезпечує скорочення часу спрацювання в порівнянні з первісним у 2÷2,5 рази (рис. 15).

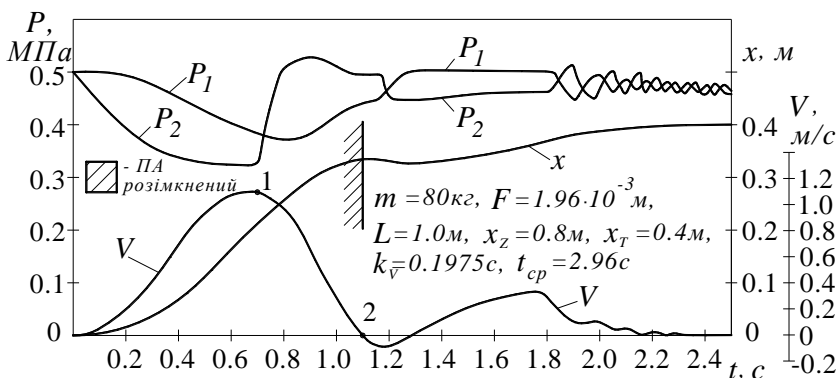


Рис. 14. Перехідний процес для ПА з алгоритмом I.3.б

Дослідження показали, що в процесі самонавчання особливо важлива третя фаза – відстеження лінії перемикання. Тут крім вибору раціональної схеми й алгоритму керування більшу роль відіграють налаштування. Вплив інерційності рухомих частин і стисливості повітря, які

перешкоджають жорсткому відпрацюванню лінії перемикання, можна деякою мірою компенсувати за рахунок збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку за швидкістю  $K_V$ . При досить великих значеннях  $K_V$  негативний вплив цих факторів взагалі усувається, тому що динамічна модель ПА вироджується в рівняння лінії перемикання (режим ковзання) (рис. 16).

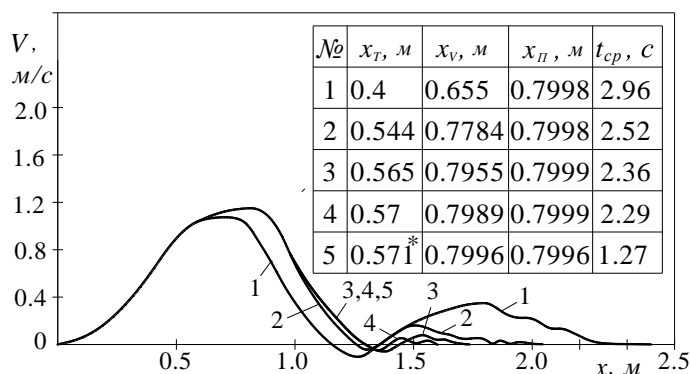


Рис. 15. Процес самонавчання для ПА з алгоритмом I.3.6

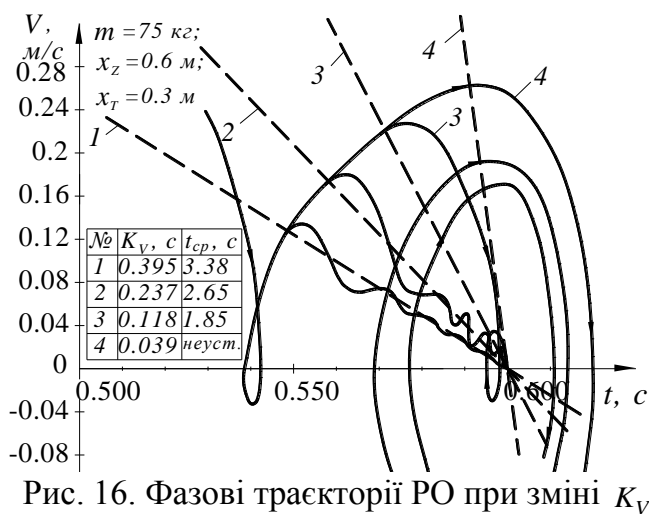


Рис. 16. Фазові траєкторії РО при зміні  $K_V$

Однак це супроводжується досить серйозним негативним фактором - збільшенням часу спрацювання ПА ( $t_{cp}$ ) і числа перемикань пневморозподільника ( $n$ ) рис. 17; що неприпустимо через швидке його зношування. Існування яскраво вираженого мінімуму у функціональній залежності часу позиціонування від коефіцієнта  $K_V$  дозволяє зробити обробку результатів розрахунку на ЕОМ і побудувати графіки в безрозмірній формі, що полегшують вибір цього коефіцієнта. Один з таких графіків представлений на рис. 18.

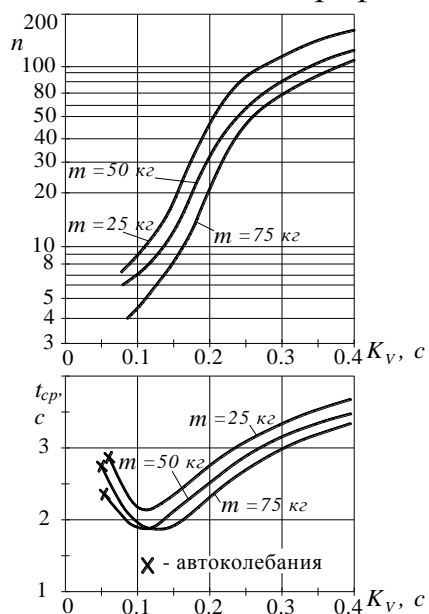


Рис. 17. Вплив  $K_V$  на число перемикань розподільника  $n$  і час позиціонування  $t_{cp}$

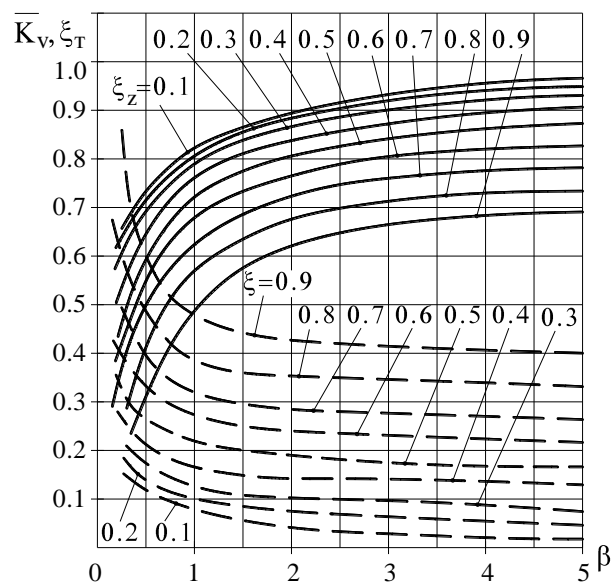


Рис. 18. Залежність оптимальних коефіцієнтів  $\bar{K}_V$  і координат початку гальмування  $\bar{\xi}_T$  від критеріїв подоби  $\beta$  і  $\chi$

Встановлено, що роль зворотного зв'язку за перепадом тиску при переході до триконтурного регулятора - в зниженні інерційності порожнин циліндра, зв'язаної зі



стисливістю повітря. Без такого зворотного зв'язку не можуть працювати найпростіші пневмосхеми керування (Winston). Але зі збільшенням коефіцієнта  $k_p$  також зростає кількість і частота перемикачів розподільника й знижується точність позиціонування.

У результаті досліджень визначено, що важливим елементом у забезпеченні необхідної гнучкості ПА (на рис. 11 з алгоритмом І.3.б) є можливість зміни перепаду тиску на РО в режимі відпрацювання лінії перемикачів.

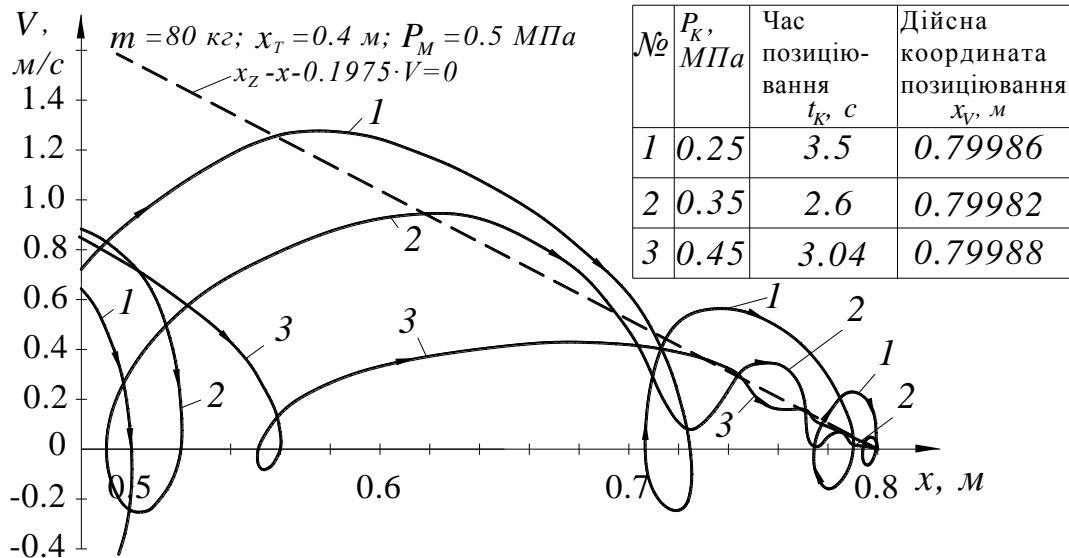


Рис. 19. Процес позиціонування у фазовій площині для ПА з алгоритмом І.3.б при різних налаштуваннях тиску редукційного клапана КР2

Ефект від використання мінімального перепаду тиску  $p_M - p_K$  ідентичний ефекту від уведення додаткового зворотного зв'язку за перепадом тиску (рис. 19). Можливість варіювати тиск  $p_K$  допомагає адаптувати роботу розподільного модуля (рис. 11) з алгоритмом І.3.б до найширшого діапазону інерційних навантажень ( $0,07 < \beta < 5$ ). Доведено, що можливість роботи з мінімальним перепадом тиску на РО знижує чутливість перехідного процесу до збільшення часої затримки в системі керування, а також дає можливість домогтися більш високої швидкодії за рахунок зниження коефіцієнта  $K_V$ .

Як показали дослідження, часове запізнювання  $T_P$  у системі керування може стати найсерйознішою перешкодою при вирішенні завдання позиціонування з використанням стандартної дискретної пневмоапаратури.

$$T_P = T_D + T_{\Sigma} + \Delta t_{cp}^P, \quad (15)$$

де  $T_D$  – період дискретності керуючої ЕОМ;  $T_{\Sigma}$  – сумарне запізнення електричних елементів;  $\Delta t_{cp}^P$  – запізнення в спрацьовуванні пневморозподільника, що становить ліву частку в  $T_P$ .

Найбільш стійким до цього несприятливого фактора є алгоритм І.3. б. Але при досить великих значеннях  $T_P$  і в цьому випадку процес відстеження лінії перемикачів стає нестійким. На рис. 20.а показано, що при  $T_P = 0,04 \text{ с}$  лінія перемикачів  $X = X_Z - 0,2768V$  трансформується у дві лінії перемикачів  $l_1$  та  $l_2$ ,

причому ці лінії були отримані аналітичним способом на основі розв'язання рівнянь лінійної моделі (розділ 2).

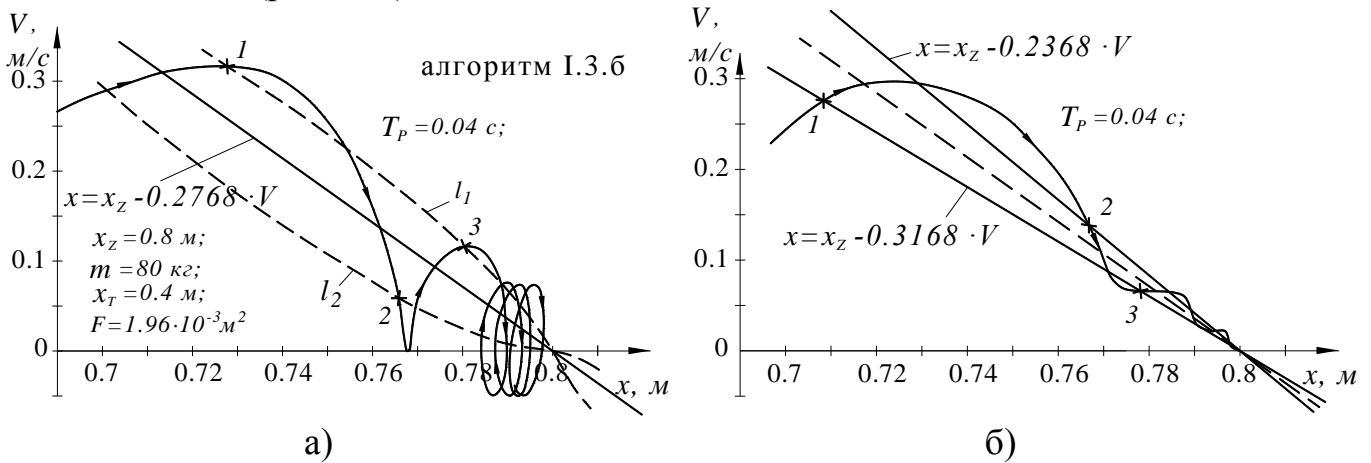


Рис. 20. Процес позиціонування при відпрацюванні реальної лінії перемикавання з урахуванням тимчасового запізнення в системі керування (а) і стабілізація процесу позиціонування при використанні модифікованої лінії перемикавання (в)

Найбільш універсальний засіб «парирування» цього явища ґрунтується на програмних методах. Показано, що лінію перемикавання в цьому випадку доцільно подати у вигляді променя, що виходить із точки позиціонування (рис. 20.б). Перемикавання розподільника  $PI$  виконується за програмою, що має «попереджувальний» (випереджальний) характер (точки 1, 2, 3 на рис. 20.б).

$$\begin{cases} \beta \hat{u} & x < x_z - (K_V \cdot V + T_p \cdot V), \quad \partial \hat{u} \quad U = x_z - x - (K_V \cdot V + T_p \cdot V), \\ \beta \hat{u} & x > x_z - (K_V \cdot V - T_p \cdot V), \quad \partial \hat{u} \quad U = x_z - x - (K_V \cdot V - T_p \cdot V), \\ R = \frac{1 - \text{sign} U}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

У результаті такої модифікації процес позиціонування повністю стабілізується (рис. 20.б).

Гарні результати також дає й інша модифікація, коли фазова область розбивається на три підобласті двома похилими прямими й керування виконується за схемою:

$$\begin{cases} \beta \hat{u} & x < x_z - \varepsilon - K_V \cdot V, \quad \partial \hat{u} \quad U = x_z - \varepsilon - x - K_V \cdot V, \\ \beta \hat{u} & x > x_z + \varepsilon - K_V \cdot V, \quad \partial \hat{u} \quad U = x_z + \varepsilon - x - K_V \cdot V. \end{cases} \quad (17)$$

У розділі проведені дослідження впливу затримок у часі спрацювання фіксатора, у результаті чого отримані рекомендації з усунення впливу цього негативного фактора.

Досліджувався також вплив інших факторів і можливості інших алгоритмів позиціонування. Наприклад, алгоритм I.2. б доцільно використовувати при малих інерційних навантаженнях ( $\beta < 0,5$ ), тому що він забезпечує більш плавний режим гальмування, але при досить великих відстанях між точками позиціонування ( $\Delta \xi_Z > 0,2$ ).

У шостому розділі проведені експериментальні дослідження дослідних макетів ПА з енергозберігаючою схемою (схема на рис. 6), а також дослідного макета вільнопрограмованого ПА (схема на рис. 11) з алгоритмом І.3.б. Як альтернатива досліджувався дослідний макет із дросельним гальмуванням із дво- і триетапним режимом позиціонування з виходом на «повзучу» швидкість на другому етапі (Крейнін Г.В., Ульбріхт В. і т.д.).

Основні завдання, які вирішувалися в ході експериментальних досліджень були пов'язані, по-перше, з перевіркою ідентичності результатів машинного й фізичного експериментів, по-друге з експериментальним підтвердженням основних висновків, зроблених у ході теоретичних досліджень.

Як виконавчі механізми на стенді використовувались два типи пневмоциліндрів: ПЦ 112-100-0400 ( $D=100$  мм,  $d_{ш}=25$  мм,  $L=400$  мм) і довгоходовий циліндр С92В50-1000В («SMC», Японія), оснащений пневматичним фіксатором ( $D=50$  мм,  $d_{ш}=16$  мм,  $L=1000$  мм). Крім самої пневматичної схеми керування на стенді були змонтовані тензотричні датчики тиску (ТДДМ), датчик переміщення реохордного типу (ДП), датчик швидкості ДС (тахогенератор постійного струму ТПП-1). Ці датчики, працюючи в комплексі з тензостанцією ТА-5 і шлейфовим осцилографом Н-115, використовувалися для реєстрації й запису перехідних процесів на світлочутливому папері.

Циліндр С92В50-1000В комплектувався інкрементальним фотооптичним датчиком положення JRC-111 (Чехія), що працював у комплекті з контролером МУ 58.01 і керуючою ЕОМ. Крім основного призначення як елемента зворотного зв'язку в системі керування багатопозиційним ПА датчик виконував також функцію вимірювально-інформаційного вузла й здійснював виведення точної інформації про положення й швидкість РО в цифровому виді на монітор ЕОМ.

Експериментальні дослідження на дослідному макеті підтвердили високі експлуатаційні характеристики ПА з гальмовим шляхом зміни структури комутаційних зв'язків: здатність працювати з великими інерційними навантаженнями, високою швидкістю при плавному безударному спрацюванні, значне зниження споживання стисненого повітря за рахунок раціонального використання його працездатності, передбачуваний і контрольований імпульс гальмового тиску, що забезпечує найбільш раціональний характер гальмування – рівносповільнений (рис. 21).

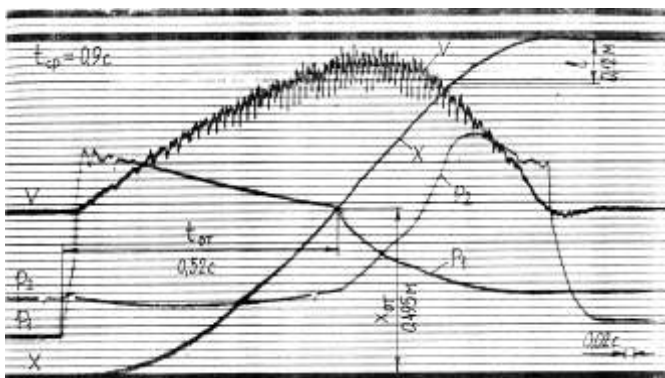


Рис. 21. Осцилограма перехідного процесу в ПА, що працює за схемою №3 (ІІ.2.г)

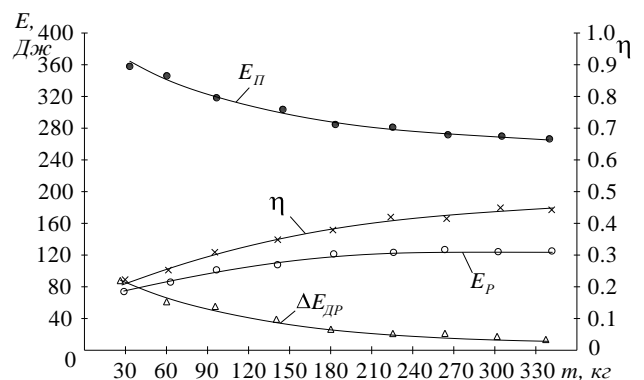


Рис. 22. Результати обробки осцилограм для схеми №3

Підтверджено, що ефективність використання енергозберігаючих схем ПА зростає з ростом інерційного навантаження. Доведено, що зі зменшенням інерційного навантаження зростають втрати транзитної працездатності стисненого повітря у вигляді втрат на дроселювання й збільшуються втрати, пов'язані з неефективністю використання потенційної енергії стисненого повітря (рис. 22).

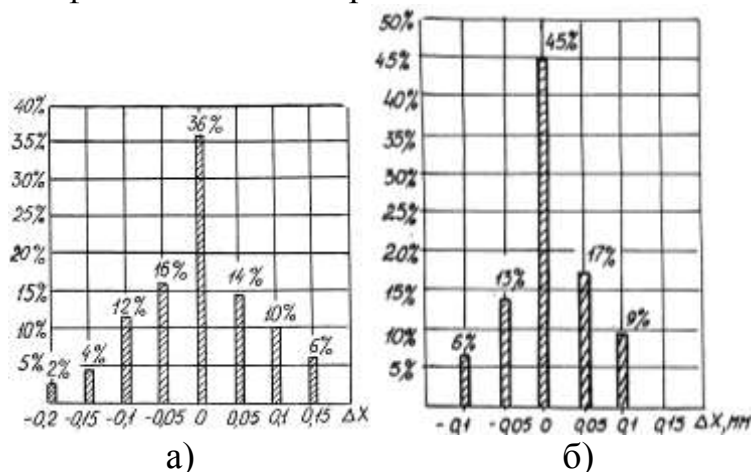


Рис. 23. Функція розподілу помилки позиціонування для ПА з алгоритмом І.3.б без робочої корекції (а) і з робочою корекцією (б)

гальмуванні за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків.

Випробування переконливо продемонстрували перевагу останньої концепції, що полягала в можливості позиціонування РО ПА зі значно більшими інерційними навантаженнями, а також у можливості робити оптимізацію в ході самонавчання не тільки за критерієм точності, але й швидкодії. Останнє дозволяло домогтися збільшення швидкодії в 4÷6 разів у порівнянні з методом «повзучої швидкості». На підставі чисельних дослідів показано, що робота ПА із запропонованою схемою (рис. 11) і алгоритмом І.3.б при постійно працюючій системі адаптації (корекції) координати початку гальмування дозволяє «парирувати» внесені в систему первинні помилки, утримувати точність позиціонування в заданих межах (рис. 23).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична проблема кардинального скорочення невиробничих енерговитрат, розширення області застосування дискретних ПА у бік значного збільшення інерційних навантажень, а також вільнопрограмованого позиціонування за рахунок використання запропонованих принципів гальмування й позиціонування РО шляхом зміни структури комутаційних зв'язків.

1. На основі методу безроздільної декомпозиції рівнянь запропоновано універсальний алгоритм синтезу енергозберігаючих ГПА й отримано ряд схем ПА, що забезпечують мінімізацію непродуктивних енерговитрат.

2. Розроблена універсальна нелінійна ММ у безрозмірній формі, що однаково чинно описує всі розроблені схеми ПА з виділенням двох основних критеріїв динамічної подоби  $\beta$  (безрозмірна маса) і  $\chi$  (параметр статичного навантаження).

Дослідне вивчення багато-позиційних макетів ПА з дискретним мікропроцесорним керуванням підтвердило можливість адаптивного керування на базі двох схем: схеми з режимом позиціонування «розгін-гальмування-повзуча швидкість» з адаптацією точки спрацьовування фіксатора, побудованої на дросельному гальмуванні й запропонованої в цій роботі схеми із триетапним гальмуванням «розгін-радикальне гальмування-відстеження лінії перемикачів виду  $U = x_z - x - k \cdot V = 0$ », побудованої на

3. Розроблена лінійна модель дискретного ПА на основі заміни нелінійних залежностей січними, а не дотичними, що в значній мірі підвищило точність аналітичних виразів для всіх змінних стану.

4. Для об'єктивного обліку енергетичних і динамічних показників досліджуваних ПА запропоновано комплексний показник технічного рівня, за допомогою якого систематизовані розрахунки на ЕОМ і розроблено ряд найбільш ефективних схем з гальмуванням шляхом зміни структури комутаційних зв'язків. Для однієї із цих схем розроблена інженерна методика розрахунку.

5. Сформульовані принципи енергозбереження та застосована методика експертного аналізу для дослідження енергетичних характеристик дискретних ПА.

6. Розроблений повний альбом схем ПА на основі класифікації всіх способів гальмування шляхом зміни структури комутаційних зв'язків, які забезпечують ефективну роботу пневмоагрегатів в умовах великих інерційних навантажень.

7. Визначена область раціонального використання енергозберігаючих схем ПА у просторі критеріїв подоби  $\beta$  і  $\chi$ , що знаходиться в границях  $2 \leq \beta \leq 5$  та  $\chi \leq 0,3$  де вдається знизити витрати стисненого повітря в 4÷10 разів. При цьому істотно розширена область ефективного гальмування РО ПА аж до  $\beta = 5$ , що набагато перекриває область використання ПА із традиційним дросельним гальмуванням ( $\beta \leq 0,3$ ).

8. Виділення границь раціонального використання енергозберігаючої схеми ПА в площину  $\beta$ - $\chi$  дозволило одержати розрахункові формули для визначення діаметра ПЦ, що забезпечує при заданому статичному й динамічному навантаженнях безумовну економічну доцільність використання даної схеми ПА.

9. Запропоновано стратегію адаптивного керування багатопозиційним дискретним ПА, в основі якої лежить метод триетапного режиму позиціонування з відпрацюванням на останньому етапі лінії перемикання виду  $U = x_z - x - k_v \cdot V = 0$  (двоконтурний ПД-регулятор), при якому за рахунок режиму самонавчання автоматично визначається оптимальний режим позиціонування.

10. За допомогою методу безроздільної декомпозиції рівнянь отримано розподільний блок керування, що має необхідну функціональну гнучкість і здатен ефективно реалізувати запропоновану стратегію керування.

11. Розроблено алгоритми керування (у тому числі й модифіковані лінії перемикання), що дозволяють використовувати розроблену схему ПА в широкому діапазоні інерційних навантажень  $0,07 \leq \beta \leq 5$  і координат позиціонування  $\Delta \xi_z = 0,01 \div 0,95$  при досить великих часових затримках у системі керування, що дозволяє використовувати для керування серійну пневмоапаратуру.

12. Експериментальна апробація доводить високу ефективність способів гальмування й позиціонування, що ґрунтуються на зміні структури комутаційних зв'язків. Результати роботи впроваджені на ВАТ «Пневматика» (м. Сімферополь), Корпорація «Гідроелекс» (м. Харків) і в навчальному процесі кафедри «Гідропневмоавтоматика і гідропривод» НТУ «ХП».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крутиков Г.А. Определение области рационального использования редуционного клапана с пневмоуправлением/ Г.А.Крутиков, А.И. Кудрявцев// Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления.- М., Машиностроение, 1981, №8. С. 225-232.

*Здобувач уперше використав метод теорії аналогічності теплотехнічних систем для нормування математичної моделі складної пневматичної системи.*

2. Крутиков Г.А. О стабилизации давления в быстродействующих пневмоприводах/ Г.А. Крутиков// Гидропривод и гидропневмоавтоматика.-Киев: Техніка, 1981, Вып. 17.- С.108-113.

3. Крутиков Г.А. Рациональные способы торможения пневмоприводов автоманипуляторов с большой инерционной нагрузкой/ Г.А. Крутиков, А.А. Оробченко, В.Н. Черныш// Известия ВУЗов. Машиностроение, Москва. 1983, №4. С. 58-62.

*Здобувачем запропонована схема з гальмуванням за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків.*

4. Крутиков Г.А. Рациональное использование сжатого воздуха в пневмоприводах автоманипуляторов/ Г.А.Крутиков// Известия ВУЗов. Машиностроение, Москва, 1984.- № 3. - С.71-76.

5. Крутиков Г.А.Торможение пневмоприводов автоматических манипуляторов с большой инерционной нагрузкой/ Г.А. Крутиков, А.И. Кудрявцев// Вестник машиностроения. – 1984. – № 9. – С. 33-38.

*Здобувачем запропоновано ряд схем з гальмуванням за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків і дається інженерна методика їхнього розрахунку.*

6. Крутиков Г.А.Способ улучшения энергетических характеристик пневмоманипуляторов/ Г.А. Крутиков, А.А. Оробченко, Л.А. Пекарь// Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. - М.: Машиностроение. - 1984. - Вып 11. - С.80-85.

*Здобувачем уперше запропонована методика розрахунку ПА з компресійно-приводним режимом роботи ПА.*

7. Крутиков Г.А. К вопросу выбора энергетически совершенных пневмоприводов автоманипуляторов/ Г.А. Крутиков, А.А. Оробченко// Теория механизмов и машин, Харьков, 1985. С. 13-19.

*Здобувачем досліджується одна з енергозберігаючих схем і пропонується для оцінки енергетичних характеристик використати осереднений за цикл ККД.*

8. Крутиков Г.А. Определение степени энергетического совершенства пневмоприводов дискретного действия/ Г.А. Крутиков// Гидропривод и гидропневмоавтоматика. - Киев: Техніка, 1985, Вып. 21. С. 82-86.

9. Крутиков Г.А. Об использовании компрессионно – приводного режима пневмопривода автоманипулятора для улучшения его динамических и энергетических характеристик/ Г.А.Крутиков, А.А.Оробченко А.А., Л.А.Пекарь//Теория механизмов и машин.-Харьков, 1986. Вып. 41. С.106 – 112.

*Здобувачем викладається розрахунок енергетичних характеристик ПА з компресійно-приводним режимом і визначається область раціонального використання.*

10. Крутиков Г.А. К вопросу выбора способа торможения пневмоприводов с большими присоединенными массами/ Г.А.Крутиков, А.И. Кудрявцев, Л.А. Пекарь// Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления -М.: Машиностроение. – 1987. – Вып. 13. – С. 60-71.

*Здобувачем запропонований повний альбом схем ПА з гальмуванням шляхом зміни структури комутаційних зв'язків і відібрані найбільш ефективні схеми при роботі з великими наведеними масами.*

11. Крутиков Г.А. К вопросу унификации расходной функции пневматических дросселирующих элементов/ Г.А. Крутиков, Н.Н. Вьет // Гидравлические машины.- Харьков, 1988, №22. С. 130-133.

*Здобувачем запропонована зручна форма для досліджень на ЕОМ витратних характеристик складних пневматичних ліній.*

12. Крутиков Г.А. Улучшение энергетических характеристик дискретных пневмоприводов за счет выбора рациональной схемы торможения/ Г.А.Крутиков, П.Л.Томан, И.Т.Тот// Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1988. – № 11. – С. 52-57.

*Здобувачем запропонована одна з енергозберігаючих схем і викладена методика автоматизованого вибору оптимального гальмового шляху.*

13. Крутиков Г.А. О выборе энергосберегающей структуры дискретного пневмопривода с большими инерционными нагрузками/ Г.А.Крутиков, П.Л.Томан, И.Т.Тот// Вестник машиностроения.- М., 1989, №6. С. 19-23.

*Здобувачем запропонована енергозберігаюча схема ПА і пропонується її ММ у безрозмірній формі..*

14. Крутиков Г.А. Алгоритм выбора рациональной структуры пневмопривода с торможением в конце хода/ Г.А. Крутиков, А.А. Оробченко, П.Л. Томан// Гидропривод и гидропневмоавтоматика, - Киев: Техніка, 1989. Вып. 25. С. 43-49.

*Здобувачем пропонується вибирати найбільш раціональну схему ПА з гальмуванням із використанням комплексного показника технічного рівня.*

15. Крутиков Г.А. О разработке линейной модели дискретного пневмопривода/ Г.А.Крутиков, Л.А. Пекарь// Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления.- М., Машиностроение, 1990. Вып. 15. С. 120-128.

*Здобувачем уперше запропонована лінійна модель дискретного ПА, що ґрунтується на заміні нелінійних залежностей січними.*

16. Крутиков Г.А. Пневматический сборочный манипулятор портального типа с микропроцессорным управлением/ Г.А. Крутиков, А.А. Оробченко, В.И. Евменкин// Теория механизмов и машин.- Харьков, 1990. Вып. 48, С. 11-16.

*Здобувачем уперше реалізована ідея комп'ютерного керування дискретним ПА з гальмуванням за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків.*

17. Крутиков Г.А. Дискретно-управляемый пневмопривод для точного позиционирования с минимальными энергозатратами/ Г.А. Крутиков, Р.Н. Плюхня // Гидравлические машины.- Харьков, 1992. Вып.26. С. 148-158.

*Здобувачем пропонується алгоритм керування й схема багатопозиційного ПА з двоконтурним ПД-регулятором, що забезпечує мінімум енерговитрат.*

18. Крутиков Г.А. Выбор оптимального управления релейным многопозиционным пневмоприводом/ Г.А. Крутиков, Б.А. Вурье// Автоматизация и современные технологии. - М., Машиностроение, 1995, № 9. С. 5-10.

*Здобувачем уперше запропонована стратегія керування ПА з режимом самонавчання.*

19. Крутиков Г.А. Ударный пневмопривод для холодного клеймения металла./ Г.А.Крутиков, Б.А.Вурье// Автоматизация и современные технологии. - М., Машиностроение, 1995, № 10. С. 3-6.

*Здобувачем розроблено й впроваджено один з додатків методу керування дискретним ПА шляхом зміни структури комутаційних ситуацій.*

20. Крутиков Г.А. Повышение быстродействия и точности позиционирования многопозиционного пневмопривода за счет адаптивного микропроцессорного управления/ Г.А.Крутиков, О.Г.Хмелевская// Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999, №49. – С. 28-33.

*Здобувачем викладається стратегія адаптивного керування багатопозиційним ПА за рахунок оптимізації коефіцієнта підсилення зворотного зв'язку за швидкістю.*

21. Крутиков Г.А. Оптимальная схема и алгоритм управления свободнопрограммируемого пневмопривода/ Г.А.Крутиков// Вістник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005, №24. – С. 68-75.

22. Крутиков Г.А. Выбор закона управления для многопозиционного дискретного пневмопривода/ Г.А. Крутиков// Вістник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007, №30. – С. 59-65.

23. Крутиков Г.А. Разработка энергосберегающей структуры пневмопривода с торможением в конце хода/ Г.А.Крутиков// Інтегровані технології та енергозбереження. – 2007. – № 1. – С. 3-10.

24. Крутиков Г.А. Определение области рационального использования энергосберегающей схемы пневмопривода/ Г.А.Крутиков// Інтегровані технології та енергозбереження. – 2007, – №4. – С. 7-10.

25. Крутиков Г.А. Универсальная математическая модель для свободнопрограммируемого пневмопривода с дискретным управлением/ Г.А.Крутиков // Вістник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008, – №23. – С. 98-103.

26. Крутиков Г.А. Энергосберегающая схема циклового пневмоагрегата для работы в условиях большой инерционной нагрузки/ Г.А.Крутиков// Інтегровані технології та енергозбереження. – 2008, – №3. – С.10-15.

*Здобувачем розроблена схема ПА з компресійно-приводним режимом роботи й даються графіки, що дозволяють оцінити доцільність її використання при заданих умовах роботи.*

27. Крутиков Г.А. Минимизация энергозатрат в пневмоагрегатах с большой инерционной нагрузкой/ Г.А.Крутиков, Али Султан Хусейн// Східно-Європейський журнал передових технологій. 2009, №2/7 (38), С. 20-24.



*Здобувачем запропоновано використання компресійно-приводного режиму для пневмомодуля повороту колони робота.*

28. Крутиков Г.А. Выбор эффективного торможения рабочих органов пневмоагрегатов с большой инерционной нагрузкой/ Г.А. Крутиков, В.В.Ермак Східно-Європейський журнал передових технологій., 2010, №2/5 (44). – С. 18-21.

*Здобувачем запропонований і досліджений один з альтернативних способів гальмування – ємнісний.*

29. Крутиков Г.А. Синтез свободнопрограммируемых пневмоагрегатов/ М.В.Черкашенко, Г.А.Крутиков// Інтегровані технології та енергозбереження.-2009. – № 4, – С. 86-94.

*Здобувачем розробляється пневматична схема багатопозиційного ПА методом безроздільної декомпозиції рівнянь і даються найбільш ефективні алгоритми керування.*

30. Крутиков Г.А. Влияние временного запаздывания в системе управления на процесс позиционирования рабочего органа пневмоагрегата/ М.В. Черкашенко, Крутиков Г.А.// Восточно-Европейский журнал передовых технологий., 2010, 1/6(43). – С. 11-15.

*Здобувачем пропонуються модифіковані лінії перемикання для багатопозиційного ПА, здатні «парирувати» негативний вплив часових затримок.*

31 Крутиков Г.А. Синтез энергосберегающих пневмоагрегатов/ М.В.Черкашенко, Г.А.Крутиков// Інтегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 2 – С. 18–27.

*Здобувачем здійснений синтез енергозберігаючої структури ПА методом безроздільної декомпозиції рівнянь, виділена область раціонального використання енергозберігаючих ПА.*

32. Крутиков Г.А. Пневмопривод / Г.А.Крутиков, А.И.Кудрявцев, Л.И.Водопьян // а.с. 1154492 СССР. Опубл. 07.05.85. Бюл. № 17,1985.- 2 с.

*Здобувачем запропонований один з найбільш ефективних режимів гальмування РО ПА з великими інерційним навантаженням – компресійно-привідний.*

33. Крутиков Г.А. Пневмопривод / Г.А.Крутиков, А.И.Кудрявцев, Л.А.Пекарь //а.с. 1455061 СССР.Опубл. 30.01.89. Бюл. № 4, 1989.-3 с.

*Здобувачем запропонований спосіб гальмування РО ПА за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків, мінімізуючий енерговитрати.*

34. Крутиков Г.А. Пневматический привод / Г.А.Крутиков, В.В.Седач //а.с. 1596142 СССР. Опубл. 02.08.89. Бюл. № 30,1990.- 2 с.

*Здобувачем запропонована схема вільнопрограмованого ПА з триетапним режимом позиціонування й оптимізацією процесу позиціонування за рахунок саманавчання.*

35. Крутиков Г.А. / Улучшение энергетических характеристик пневмоприводов/ Г.А. Крутиков, А.И. Кудрявцев// Тезисы докладов XVI Всесоюзного научнотехнич. совещания по гидравлической автоматике, 27-29 декабря 1983 г., Киев.

*Здобувачем запропоновано використовувати рекуперацію в мережу енергії гальмування для підвищення ККД ПА.*

36. Крутиков Г.А. Структурный анализ дискретных пневмоприводов поступательного и поворотного действия/ Г.А. Крутиков, А.И.Кудрявцев// Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по пневматическим (газовым) приводам и системам управления: Июнь 1986, Москва – Тула.

*Здобувачем проведена класифікація схем ПА з гальмуванням.*

37. Крутиков Г.А. Синтез энергозберігаючої структури пневмоагрегата для роботи в умовах великих інерційних навантажень// Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції: 12-14 травня 2010 р., у 4-х частинах. – Ч. II. – Харків.

38. Крутиков Г.А. Функционально-стоимостной анализ пневматических приводов и устройств/ А.И. Кудрявцев, Е.А.Рагулин, И.Н. Оленин, А.П. Пятидверный, Г.А.Крутиков// Методические рекомендации для Минстанкопрома, ВНИИТЭМР. Москва. 1984. – 67 с.

*Здобувачем запропоновано оцінювати ефективність гальмування та позиціонування на підставі методів функціонально-вартісного аналізу.*

39. Крутиков Г.А. Выбор и расчет оптимальных способов и схем торможения пневмодвигателей/ А.И.Кудрявцев, Л.А.Пекарь, Г.А. Крутиков, А.П.Пятидверный// Методические рекомендации для Минстанкопрома, ВНИИТЭМР, Москва, 1986. – 60 с.

*Здобувачем дається огляд всіх способів гальмування РО ПА та даються рекомендації з вибору раціональних варіантів.*

40. Крутиков Г.А. Снижение энергопотерь в пневмоприводах станков, автоматических манипуляторов и других машин/ А.И. Кудрявцев, Е.А. Рагулин, А.П.Пятидверный, Н.Н.Вьет, Г.А. Крутиков// Методические рекомендации для Минстанкопрома, ВНИИТЭМР, Москва, 1986. – 58 с.

*Здобувачем дані енергозберігаючі схеми ПА з гальмуванням за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків і рекомендації з їхнього впровадження.*

## АНОТАЦІЇ

Крутиков Г.А. Синтез энергозберігаючих гидропневмоагрегатов - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.05.17- гідравлічні машини і гідропневмоагрегати.- Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”: Харків, 2011.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічного завдання розширення області застосування дискретних пневмоагрегатів (ПА) у бік істотного збільшення інерційних навантажень, що вирішувалася одночасно з підвищенням швидкодії і значним зниженням непродуктивних енерговитрат, а також завдання високоточного вільнопрограмованого позиціонування робочого органа ПА на основі серійної пневмоапаратури з використанням нової стратегії дискретного керування.

Загальною основою знайдених рішень є уявлення ПА як системи змінної структури (СЗС), у якій рух РО, гальмування й позиціонування здійснюється за рахунок зміни структури комутаційних зв'язків залежно від знаходження РО в тій або іншій області фазового простору.

Упроваджена методика ексергічного аналізу дискретних ПА, що стала основою для синтезу енергозберігаючих схем ПА.

Розроблено алгоритм структурного синтезу енергозберігаючої структури ПА методом *безроздільної декомпозиції рівнянь*, що дозволив одержати ряд ефективних енергозберігаючих схем, у тому числі таких, що реалізують компресійно-приводний режим. Визначено область раціонального використання енергозберігаючих схем ПА в просторі основних критеріїв динамічної подоби., При цьому вирішується й інше завдання синтезу - вибір діаметра ПЦ, що забезпечує при заданому навантаженні безумовну доцільність використання енергозберігаючої схеми ПА.

Запропонована нова стратегія адаптивного керування багатопозиційним дискретним ПА з триетапним режимом позиціонування й відпрацьовуванням на останньому етапі лінії перемикання виду  $U = x_z - x - k_v \cdot v$  (двоконтурний ПД - регулятор), орієнтована на схеми гальмування шляхом зміни структури комутаційних зв'язків. Використання режиму самонавчання дозволило оптимізувати процес позиціонування, як за точністю так і за швидкістю.

За допомогою розробленого алгоритму структурного синтезу, що ґрунтується на методі *безроздільної декомпозиції рівнянь*, отримано універсальний розподільний блок керування, що має необхідну функціональну гнучкість й здатний ефективно реалізувати запропоновану стратегію керування.

Ключові слова: робочий процес гідропневмоагрегатів, вдосконалення конструкцій гідропневмоагрегатів, гальмування робочого органу пневмоагрегата, мінімізація енерговитрат, багатопозиційний пневмоагрегат.

Крутиков Г.А. Синтез энергосберегающих гидропневмоагрегатов – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.17- гидравлические машины и гидропневмоагрегаты.- Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена решению актуальных научно-технических задач: минимизации непроизводительных энергозатрат, повышения быстродействия дискретных пневмагрегатов ( ПА ) и расширения области применения их в сторону существенного увеличения инерционных нагрузок, а также задачи высокоточного свободнопрограммируемого позиционирования рабочего органа ПА за счет синтеза рациональной структуры и алгоритма управления.

Общей основой найденных решений является представление ПА как системы переменной структуры (СПС), в которой движение РО, торможение и позиционирование осуществляется за счет изменения структуры коммутационных связей в зависимости от нахождения РО в той или иной области фазового пространства.

В качестве первого этапа системного подхода при решении поставленных задач дана полная классификация способов торможения и позиционирования, основанных на *изменении структуры коммутационных связей*, и на этой основе разработан обширный альбом схем с использованием серийной пневмоаппаратуры.

Разработана универсальная нелинейная математическая модель, приведенная на основе методов теории аналогичности тепломеханических систем к безразмерной форме с выделением критериев динамического подобия, позволяющая единообразным способом провести анализ всех исследуемых структур ПА.

Линейная математическая модель, позволившая получить достаточно точные аналитические решения для всех переменных состояния дискретного ПА, получена на основе замены нелинейных зависимостей рационально подобранными секущими.

При выборе наиболее рациональной схемы торможения и позиционирования предложен комплексный показатель технического уровня, позволивший провести объективное сравнение исследуемых схем по целому комплексу показателей.

Для одной из наиболее рациональных схем торможения за счет изменения структуры коммутационных связей разработана инженерная методика расчета. Попутно была решена задача автоматизированного определения минимально необходимого тормозного пути при расчете переходного процесс на ЭВМ.

Внедрена методика эксергического анализа дискретных ПА, что явилось основой для синтеза энергосберегающих схем ПА.

Разработан алгоритм структурного синтеза энергосберегающей структуры ПА методом *безраздельной декомпозиции уравнений*, позволивший получить ряд эффективных энергосберегающих схем, в том числе, реализующих компрессионно-приводной режим, когда часть времени движения ПА работает в приводном режиме, а часть времени – как компрессор, запасая энергию торможения для обратного хода. Определена область рационального использования энергосберегающих схем ПА в пространстве основных критериев динамического подобия. При этом решается и другая задача синтеза - выбор диаметра ПЦ, обеспечивающего при заданной нагрузке безусловную целесообразность использования энергосберегающей схемы ПА.

Предложена новая стратегия адаптивного управления многопозиционным дискретным ПА с трехэтапным режимом позиционирования и отработкой на последнем этапе линии переключения вида  $U = x_z - x - k_v \cdot V$  (двухконтурный ПД - регулятор), ориентированная на схемы торможения путем изменения структуры коммутационных связей. Предложен эффективный и достаточно простой механизм самообучения, позволяющий на базе стандартной релейной пневмоаппаратуры осуществлять высокоточное позиционирование при высоком быстродействии многопозиционного пневмоагрегата.

С помощью разработанного алгоритма структурного синтеза, основанного на методе *безраздельной декомпозиции уравнений*, получен универсальный распределительный блок управления, обладающий необходимой функциональной гибкостью и способный эффективно реализовать предложенную стратегию управления.

Разработаны алгоритмы управления (в том числе и модифицированные линии переключения), позволяющие использовать разработанную схему многопозиционного ПА в широком диапазоне инерционных нагрузок и координат позиционирования при достаточно больших временных задержках в системе управления, что дает возможность использовать для управления серийную пневмоаппаратуру. Последнее делает разработанную методику позиционирования экономически привлекательной.

Экспериментальная апробация подтвердила высокую эффективность разработанных методов торможения и позиционирования за счет изменения структуры коммутационных связей.

Ключевые слова: рабочий процесс гидропневмоагрегатов, усовершенствование конструкций гидропневмоагрегатов, торможение рабочего органа пневмоагрегата, минимизация энергозатрат, многопозиционный пневмоагрегат.

Krutikov G. A. Synthesis of energy-saving hydropneumatic aggregates. The manuscript.

Thesis for degree of Doctor of Sciences in Technique for speciality 05.05.17 – hydraulic machinery and hydro-pneumatic aggregate. – National technical university the «Kharkiv polytechnical institute»: Kharkiv, 2011.

Thesis is devoted to the decision of a scientific and technical problem of expansion of a scope of discrete pneumounits (PU) aside an essential increase of inertial loads which was solved at the same time with increase of speed and significant decrease in unproductive power inputs, as well as problems precision free programming positioning of working body PA on the basis of the serial pneumoequipment with use of new strategy of discrete management.

Common basis of the solutions is to provide the PU as a system of variable structure (SVS), in which the movement of operating element (OE), deceleration and positioning is due to changes in the structure of commutation relations, depending on the location of OE in a particular region of phase space.

The synthesis problem of energy-saving structure of UA has been solved by optimally choose a sequence connecting the cavities PU switching to different objects in motion OE. The algorithm of structural synthesis of energy-efficient structure of PA by the *undivided decomposition equations*, which provided a number of energy-efficient schemes, including implementing the compression-drive mode, when part of the movement time PU working in the drive mode, and a part-time - as a compressor, storing braking energy for backstop. The field of rational use of energy-saving schemes in the PU area the basic criteria of dynamic similarity, which allows to assess the economic feasibility of using these schemes in the initial design stage.

A new strategy for multi-position adaptive control of discrete-PU with three-stage regime of positioning and testing of the final stage of the switching line of the form (double PD - controller), focused on the scheme of inhibition by changing the structure of the commutation relations. Using the self-optimizing the process of positioning as to exactly on speed.

With the help of the algorithm of structural synthesis, based on the method of the undivided decomposition, we obtain a universal distribution control unit has the necessary functional flexibility and the ability to effectively implement the proposed control strategy.

Key words: inhibition of the operating element pneumatic units, minimizing energy consumption, synthesis algorithm, multi-pnevmounit, line switching, positioning accuracy, self pneumatic unit.



Підписано до друку 18.02.2011 р. Формат 60x90 1/16.  
Папір офсетний. Друк - ризографія. Гарнітура Times New Roman  
Умовн. друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим. Зам. № 028445

---

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16.