

Моделювання технологічних процесів

УДК 621.9.62-92

О.В. Узунов, д.т.н., О.С. Галецький, асистент

БУДОВА ГІБРИДНОГО ПОЗИЦІЙНОГО ПРИВОДУ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЙОГО СКЛАДОВИХ ЧАСТИН

АНОТАЦІЯ. Рассмотрены вопросы создания позиционного привода для технологического оборудования, удовлетворяющего требованиям гибкости и энергоэффективности. Повышение этих показателей достигается применением контроллерного программного управления в сочетании с объемным принципом регулирования положения рабочего органа. Команды контроллера преобразуются пневмогидравлическим дозатором в порции рабочей жидкости, подаваемые в полости гидравлического исполнительного устройства, шток которого позиционирует рабочий орган. Разработанные математические модели компонентов позволяют построить модель привода для исследования его работы и выбора рационального соотношения параметров.

ANNOTATION. Creation problems of positional drive for processing equipment, serving flexibility and power efficient has been considered. Increase of these characteristics is reached by using program control in aggregate with bulk principle of position regulation of actuator. Controller commands are converted by hydropneumatic proportional in portions of working fluid, wish are supplied in hydraulic actuating device interstice, actuator is positioned by shaft. Developed math component models let build drive model for research its work and rational parameters relation choosing.

Актуальність, постановка проблеми, ціль і задачі досліджень.

Ефективність технологічного обладнання в значній мірі залежить від характеристик приводів, що використовуються. Серед таких приводів широке застосування знайшли приводи, які забезпечують позиціонування робочих органів. Сучасне виробництво висуває нові вимоги до позиційних приводів: високі гнучкість та енергоефективність. Під гнучкістю розуміють можливість швидкого переналаштування приводу на виконання потрібних технологічних операцій та відносно широкий діапазон технічних характеристик, які можуть бути забезпечені. Це досягається за рахунок оперативної зміни програми роботи приводу при його керуванні від контролера або комп'ютера при наявності потенційних можливостей приводу забезпечувати потрібні характеристики. Що стосується енергоефективності, то її підвищення досягне за рахунок використання раціонального принципу керування, відповідної організації структури та компонентного складу приводу. У відомих позиційних приводах використовують об'ємний або дросельний принцип керування, що в значній мірі визначає їх енергоефективність та гнучкість (таблиця 1) [1,2].

Таблиця 1

Властивості позиційних приводів, побудованих на різних принципах керування

Тип приводу	Принцип керування	Властивості	
		Гнучкість	Енергоефективність
Електро-гідравлічний	Об'ємний	«-» (для узгодженої роботи з контролером є необхідним введення додаткового приводу керування)	«+» (Забезпечує ККД до ~90%)
Електро-гідравлічний, Електро-пневматичний	Дросель-ний	«+» (узгодження роботи з контролером є більш простим)	«-» (значні енергетичні втрати)
Гібридний (електропневмогідравлічний)	Об'ємний	«+»	«+»

Використання дросельного принципу керування (табл. 1) забезпечує приводу гнучкість, за рахунок узгодженості з контролером або комп'ютером, але суттєво знижує його енергоефективність. В той час як використання в приводі об'ємного принципу керування дозволяє отримати високу енергоефективність, але значно ускладнює його узгодження з керуючим пристроєм. Проблема полягає в відсутності компромісного рішення яке, при використанні об'ємного принципу керування з відповідною організацією позиційного приводу, дозволило б раціонально узгодити його з контролером або комп'ютером та забезпечити гнучкість при високій енергоефективності. При цьому потенційні можливості отримання потрібних властивостей привода частково створює використання гібридної будови, що комбінує електричні, пневматичні та гідравлічні компоненти.

Ціллю роботи є підвищення гнучкості та енергоефективності позиційного приводу за рахунок використання гібридної будови та вибору раціональних значень параметрів компонентів. В роботі вирішувались задачі розробки принципової схеми гібридного позиційного приводу та математичних моделей його складових частин.

Принципова схема гібридного позиційного приводу. В основу розробленого позиційного привода покладено об'ємний принцип керування, який реалізовано відповідною структурною організацією та компонентним складом (рис. 1). [3]

У якості носія енергії на вході в привод використано стисле повітря. Особливостями

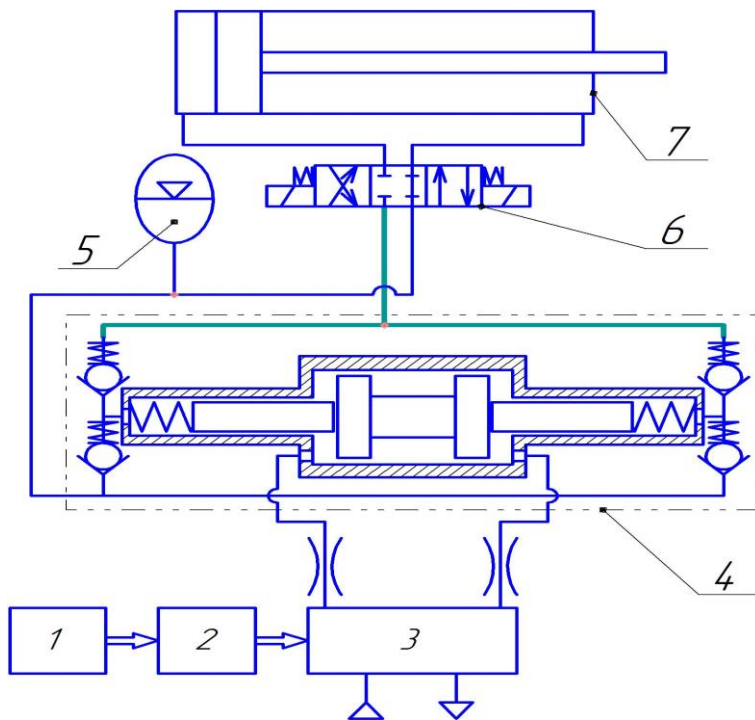


Рисунок 1. Принципова схема гібридного позиційного приводу:

1 – контролер; 2 – блок узгодження; 3 – блок комутації стисненого повітря; 4 – пневмогідравлічний дозатор; 5 – пневмогідравлічний акумулятор; 6 – розподільник; 7 – гідравлічний виконавчий пристрій.

привода, з врахуванням декількох фаз роботи пневмогідравлічного дозатора та різної природи елементів. Оскільки в існуючих джерелах інформації не виявлено потрібної математичної моделі, то її створення було необхідним. Першим кроком до розробки моделі приводу було створення моделей складових частин.

Математичні моделі складових частин приводу. Зважаючи на складність процесу функціонування приводу для побудови його моделі було використано циклічно-модульний

принципової схеми приводу (рис. 1) є застосування пневмогідравлічного дозатора, що дозволяє формувати порції робочої рідини, які подаються у порожнину гідравлічного циліндру для позиціонування робочого органу. Програмне керування пневмогідравлічним дозатором через блок комутації стислого повітря забезпечує контролер. Така схема потенційно забезпечує приводу енергоефективність та гнучкість. Для переходу від принципового рішення до роботоспроможної конструкції приводу, яка має потрібні експлуатаційні характеристики, необхідно моделювання дії приводу. Процедура розробки математичної моделі гібридного приводу є достатньо складною. Це обумовлено необхідністю узгодження процесів, що забезпечують функціонування

підхід [4]. Математичну модель привода було розділено на складові частини - модель гідравлічного циліндру двохсторонньої дії та модель пневмогідравлічного дозатора (рис. 2). Математична модель пневмогідравлічного дозатора побудована в послідовності: визначено модулі, побудовано моделі модулів, проведено тестування модулів, узгоджено сумісну роботу модулів у складі моделі дозатора.

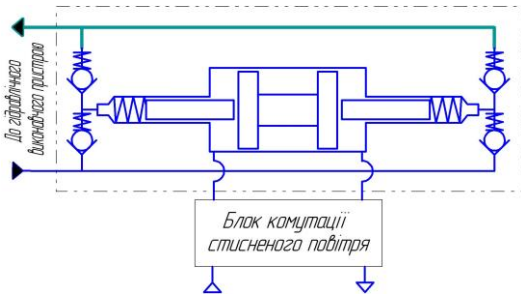


Рисунок 2. Пневмогідравлічний дозатор.

При визначенні модулів встановлено, що модулі є як в пневматичній, так і в гідравлічній частині дозатора. В кожній з цих частин також виявлено однотипні модулі. В пневматичній частині в такий модуль згруповано елементи: пневматичний дросель, що імітує опір трубопроводів, пневматичну камеру, поршень (рис. 3 а). Типовий модуль гідравлічної частини включає елементи: плунжер, гідравлічну камеру, пружину, гідравлічний дросель (рис. 3 б).

На основі аналізу схеми модуля пневматичної частини виявлено комплект типових елементів, які забезпечують виконання окремих дій в процесі функціонування дозатора. Об'єднання типових елементів відповідно до порядку дій процесу дозволило отримати схему будови моделі модуля (рис. 4).

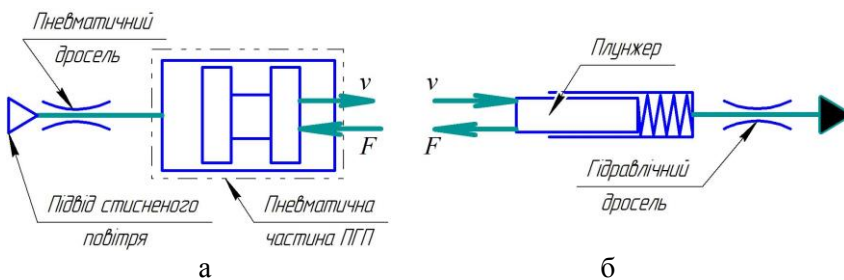


Рисунок 3. Принципові схеми модулів пневмогідравлічного дозатора: а – модуль пневматичної частини; б – модуль гідравлічної частини.

Функціонування модуля, відповідно до схеми, відбувається наступним чином.

Елемент 1 імітує подачу стисненого повітря від блоку комутації до елемента розгалужувача потоку 2, в якому повітря розподіляється між двома каналами. В кожному з каналів розташований пневматичний дросель 3, 4. Виходи дроселів 3 та 4 з'єднані з елементом логіки 5. Елемент логіки 5 приймає рішення про подачу стислого повітря в залежності від режиму (надкритичний або підкритичний) до елемента 6 розгалужувача потоку. Витрата через елемент 6 поступає до камери змінного об'єму 7 в якій відбувається зростання тиску. Зміна тиску в камері 7 через елемент 6 передається до елемента логіки 5 та до пневмомеханічного перетворювача 8. Дія тиску на поршень пневмомеханічного перетворювача 8 призводить до виникнення сили, яка через розгалужувачі механічної енергії 9 та 12 поступає до рухомої маси 14. Під дією сили маса 14 починає рухатись при цьому її швидкість та переміщення передаються до елемента „умовне з'єднання” 10, який в поєднанні з опорою 11 імітує обмеження ходу. Швидкість руху маси 14, через елемент 12 передається на пару тертя 13, яка взаємодіє з опорою 15. Сила супротиву від пари тертя 13 діє на елемент 12, де відбувається векторне складання з силами від дій елементів 9 та 14. Переміщення та швидкість маси 14 передається також на поршень пневмомеханічного перетворювача 8. Ця швидкість, в свою чергу, визначає витрату стислого повітря, яка споживається при русі поршня та відбирається через елемент 6 від витрати, яка потрапляє в камеру 7. Переміщення поршня також змінює об'єм камери 7. Зміна витрати, яка потрапляє до камери 7 та об'єму цієї камери, також впливає на зміну тиску в ній і відповідно на величину тиску на виході елементів 3 та 4. Результатом роботи модуля є переміщення і швидкість руху пневматичного поршня.

На основі схеми будови моделі (рис.4) записана система математичних рівнянь (1), що відображає функціонування модуля.

$$\begin{cases}
 p_{1,1} = p(t); \\
 p_{2,1} = p_{1,1}; \\
 p_{2,2} = p_{2,3} = p_{2,1}; \\
 p_{3,1} = p_{2,2}; \\
 p_{4,1} = p_{2,3}; \\
 q_{3,2} = 0.0899 \cdot \mu \cdot f \cdot p_{3,1} \cdot \sqrt{\sigma^k - \sigma^{\frac{k+1}{k}}} \cdot \text{sign}(\sigma^k - \sigma^{\frac{k+1}{k}}); \\
 q_{5,1} = q_{5,2} = q_{3,2}, \text{ при } \sigma = \frac{p_{7,1}}{p_{3,1}} < 0.528; \\
 q_{4,2} = 0.02326 \cdot \mu \cdot f \cdot p_{4,1}; \\
 q_{5,1} = q_{5,3} = q_{4,2}, \text{ при } \sigma = \frac{p_{7,1}}{p_{4,1}} > 0.528; \\
 q_{6,1} = q_{5,1}; \\
 q_{6,2} = q_{6,1} - q_{6,3}; \\
 q_{7,1} = q_{6,2}; \\
 \frac{dp_{7,1}}{dt} = \frac{k \cdot R \cdot T_M \cdot q_{7,1} - k \cdot p_{7,1} \cdot \Delta V}{V_0 + \Delta V}; \\
 p_{6,2} = p_{7,1}; \\
 p_{6,1} = p_{6,3} = p_{6,2}; \\
 p_{8,1} = p_{6,3}; \\
 F_{8,2} = p_{8,1} \cdot S; \\
 F_{9,1} = F_{8,2}; \\
 F_{9,3} = F_{9,1}; \\
 F_{12,1} = F_{9,3}; \\
 F_{12,3} = F_{12,1} - F_{12,2}; \\
 F_{14,1} = F_{12,3}; \\
 \frac{dv_{14,1}}{dt} = \frac{F_{14,1}}{m}; \\
 F_{12,2} = b \cdot v_{12,2}; \\
 h_{12,2} = \int v_{12,2} dt; \\
 v_{8,2} = v_{14,1} = v_{12,2}; \\
 q_{6,3} = v_{8,2} \cdot s; \\
 v_{15,1} = 0, h_{15,1} = 0, \text{ при } h \geq h_{\max},
 \end{cases} \quad (1)$$

де $p_{1,1}$ - тиск на вході до пневматичної камери; $q_{3,2}$ - витрата повітря через дросель в підкритичному режимі; $q_{4,2}$ - витрата повітря через дросель в надкритичному режимі; μ - коефіцієнт витратити; f - площа перерізу дроселя; σ - безрозмірний тиск; k - показник адиабати; p_2 - тиск у пневматичній камері; R - газова стала; T_M - абсолютна температура в магістральній лінії; V_0 - початковий об'єм пневматичної камери; ΔV - змінний об'єм

пневматичної камери; v - швидкість руху пневматичного поршня; S - ефективна площа пневматичного поршня; b - коефіцієнт в'язкого тертя; $F_{8,2}$ - зусилля, що створюється на

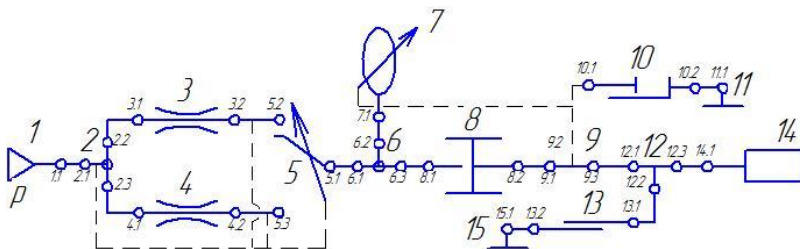


Рисунок 4. Схема будови моделі пневматичної частини дозатора.

пневмопоршні; h - переміщення пневматичного поршня;

Аналогічним чином побудована математична модель модулю гідравлічної частини дозатора. Схема будови моделі отримана на основі комплекту типових елементів, які поєднано відповідно до порядку виконання окремих дій у процесі функціонування (рис. 5).

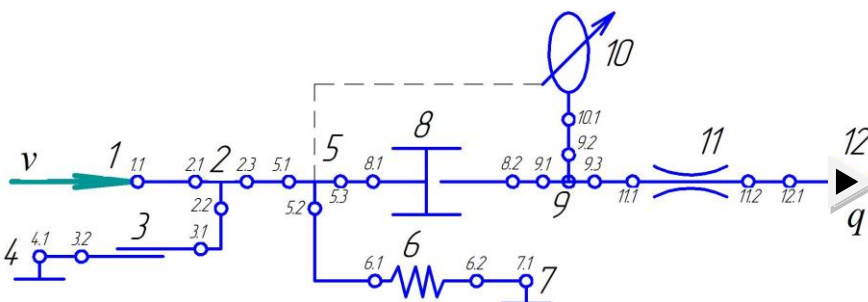


Рисунок 5. Схема будови модуля гідравлічної частини дозатора.

Переміщення передається на елемент 6 пружину, яка взаємодіє з опорою 7 і

Вхідним сигналом є швидкість v та переміщення, що передаються від пневматичного поршня на елемент 2. Через елементи 2 та 5 швидкість передається на елемент 3 тертя, який створює силу спротиву, що діє на

створює силу, яка передається на елемент 5. Дія швидкості і переміщення на механогідравлічний перетворювач 8 призводить до виникнення витрати робочої рідини на його виході і зміні об'єму камери 10. Витрата від елемента 8 через елемент 9 потрапляє у камеру 10, де призводить до збільшення тиску. Зміна тиску в камері 10 через елемент 9 передається на елементи 8 та 11. Це призводить до виникнення витрати через елемент 11, яка відбирається через елемент 9 від витрати, що підводиться до камери 10. Зміна тиску в елементі 9 призводить також до зміни тиску в гідравлічній частині механогідравлічного перетворювача 8 і відповідно зміні сили на його поршень. Ця сила в елементах 5 та 2 взаємодіє з силами від дії пружини та силою тертя. Результуюча сила передається через елемент 2 на вхід модулю. У відповідності до схеми будови моделі записана система рівнянь моделі модулю гідравлічної частини дозатора (2).

На основі систем рівнянь (1) та (2) в програмі Simulink побудовано математичні моделі пневматичного та гідравлічного модулів.

Для тестування роботоспроможності математичних моделей використані наступні значення параметрів: діаметр пневматичного поршня – 20 мм; діаметр гідравлічного плунжера – 5 мм; робочий хід пневматичного поршня – 10 мм; тиск живлення пневматичної частини – 7 бар.

Аналіз характеру робочих процесів в кожному з модулів показав їх відповідність фізичним законам, що підтвердило коректність роботи моделей (рис. 6).

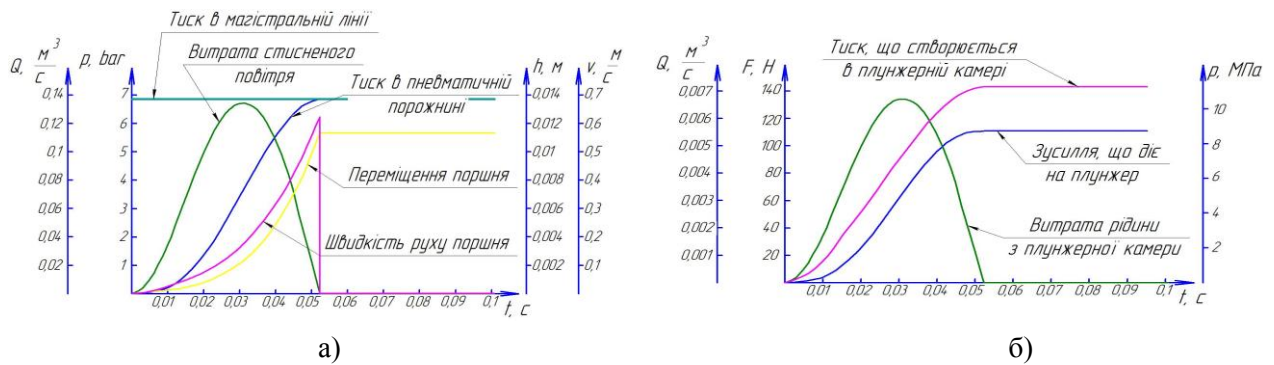


Рисунок 6. Результати тестування математичних моделей модулів пневмогідравлічного дозатора а) – модуль пневматичної частини; б) – модуль гідравлічної частини.

$$\begin{cases}
 v_{1,1} = v(t); & h_{5,2} = \int v_{5,2} dt; & p_{9,2} = p_{10,1}; \\
 v_{2,1} = v_{1,1}; & h_{6,1} = h_{5,2}; & p_{9,1} = p_{9,3} = p_{9,2}; \\
 v_{2,2} = v_{2,3} = v_{2,1}; & h_{6,2} = h_{7,1}; & p_{8,2} = p_{9,1}; \\
 v_{3,1} = v_{2,2}; & h_{7,1} = 0; & F_{5,3} = F_{8,1}; \\
 v_{3,2} = v_{4,1}; & F_{6,1} = c \cdot (h_{6,1} - h_{6,2}); & F_{8,1} = p_{8,2} \cdot S; \\
 v_{4,1} = 0; & F_{5,2} = F_{6,1}; & F_{5,1} = F_{5,2} + F_{5,3}; \\
 F_{3,1} = b \cdot (v_{3,1} - v_{3,2}); & v_{8,1} = v_{5,3}; & F_{2,1} = F_{2,2} + F_{2,3}; \\
 F_{2,2} = F_{3,1}; & q_{8,2} = v_{8,1} \cdot S; & F_{1,1} = F_{2,1}; \\
 v_{5,1} = v_{2,3}; & q_{9,1} = q_{8,2}; & q_{11,1} = q_{9,3}; \\
 v_{5,2} = v_{5,3} = v_{5,1}; & q_{9,2} = q_{9,1} - q_{9,3}; & p_{11,1} = p_{9,3}; \\
 v_{6,1} = v_{5,2}; & q_{10,1} = q_{9,2}; & q_{11,2} = \mu \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{11,1} - p_{11,2}|} \cdot \text{sign}(p_{11,1} - p_{11,2}); \\
 & \frac{dp_{10,1}}{dt} = \frac{E}{V_0 - \Delta V} q_{10,1}; & q_{12,1} = q_{11,2}; \\
 & & p_{12,1} = 0; \\
 & & p_{11,2} = p_{12,1},
 \end{cases} \quad (2)$$

де v - швидкість руху гідравлічного плунжера; k - коефіцієнт жорсткості пружини; ρ - густина робочої рідини; E - модуль пружності рідини; μ - коефіцієнт витрати; f - площа перерізу дроселюю чого отвору; $p_{10,1}$ - тиск, що створюється в плунжерній камері.

Моделі модулів використано для побудови моделі пневмогідралічного дозатора. Для цього визначено змінні, що забезпечують взаємодію модулів, і за їх допомогою, виконано об'єднання модулів в модель пневмогідралічного дозатора (рис. 7).

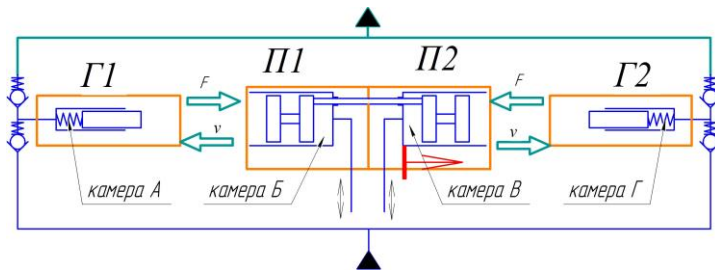


Рисунок 7. Схема взаємодії одностипних модулів у пневмогідралічному дозаторі.

„Г”. Водночас з'єднання камери „Б” з атмосферою призводить до падіння в ній тиску, збільшення об'єму камери „А” та всмоктування в неї робочої рідини. Вказані процеси відповідають процесам в пневмогідралічному дозаторі. Після досягнення торцевої стінки поршні та плунжери зупиняються, що відповідає фіксації їх положення на графіку процесу переміщення. В цей момент змінюється канал підключення стисненого повітря в пневмогідралічному дозаторі. Повітря під тиском подається в камеру „Б”, а камера „В” сполучається з атмосферою. Це призводить до початку зворотного руху поршнів та плунжерів. При цьому на графіках спостерігається зростання тиску в камері „А” та падіння тиску в камері „Г”, що призводить до всмоктування робочої рідини. При досягненні лівої торцевої стінки поршні і плунжери зупиняються. Потім змінюється канал підключення стисненого повітря і цикл повторюється.

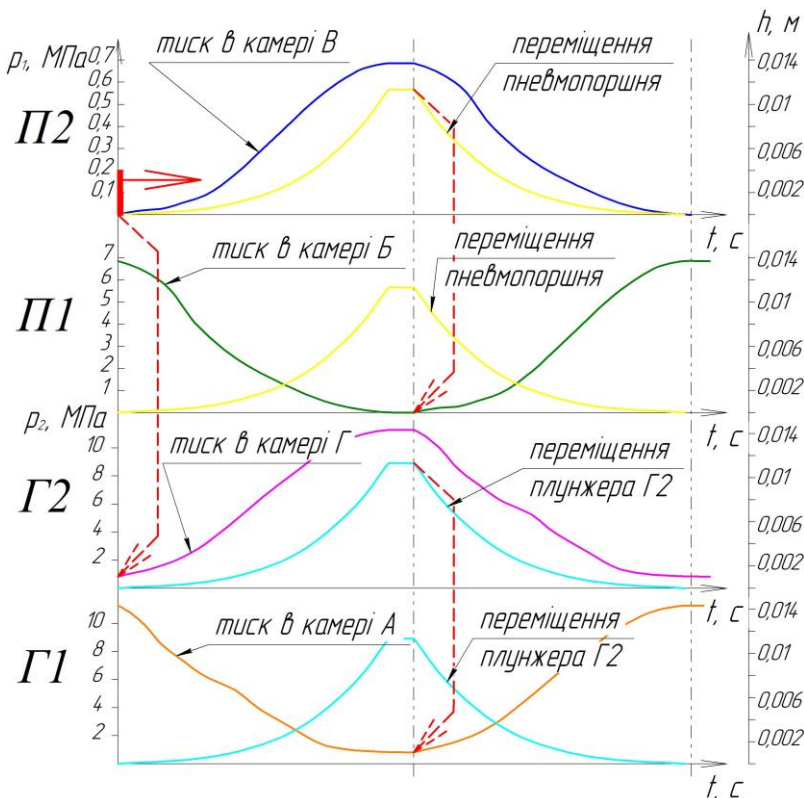


Рисунок 8. Графіки процесів у пневмогідралічному дозаторі.

модель пневмогідралічного дозатора, коректна робота яких підтверджена результатами тестових іспитів, можуть бути використані для побудови математичної моделі гібридного позиційного приводу.

Моделювання дії пневмогідралічного дозатора (рис. 8) показало, що при подачі тиску в камеру „В” пневматичний поршень П2 разом з пневмопоршнем П1 та гідралічними плунжерами Г1, Г2 рухаються до моменту досягнення упору. Подача стисненого повітря в камеру „В” призводить до зростання в ній тиску та зростанні тиску в камері

Аналіз результатів моделювання підтвердив коректну взаємодію моделей модулів у складі моделі пневмогідралічного дозатора. Це дозволяє перейти до перевірки адекватності моделі та після її підтвердження перейти до визначення раціональних параметрів пневмогідралічного дозатора для забезпечення потрібних експлуатаційних характеристик.

Висновки

1. Запропонована принципова схема гібридного позиційного приводу створює потенційні можливості для забезпечення його гнучкості та енергоефективності.

2. Розроблені математичні моделі пневматичного і гідралічного модулів, а також

3. Застосування циклічно-модульної будови математичної моделі пневмогідравлічного дозатора дозволило скоротити термін її створення за рахунок використання однотипних модулів і зменшення кількості ітерацій при налагодженні моделі.

Література

1. Лещенко В.А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением., М.: Машиностроение, 1975, 288с.
2. Гамынин Н.С. и др. под ред. Лещенко В.А. Гидравлический следящий привод. -М.: Машиностроение, 1968, 376 с.
3. Патент України №64197 на корисну модель, МПК (51) F15B 9/00. Позиційний привід /Узунов О.В., Ночніченко І.В.; заявники, подано 25.05.2011, опубліковано 25.10.2011, бюл. №20.
4. Узунов А.В. Циклично-модульный подход в задаче моделирования объектов с гидравлическими компонентами. Промислова гідроліка і автоматика. Всеукраїнський науково-технічний вісник. №1(23) 2009, стр. 61-66.
5. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Динамика пневматических приводов машин-автоматов., М.: Машиностроение, 1975, 238 с.
6. Узунов О.В., Галецький О.С., Ночніченко І.В. Уточнена методика вибору раціональних параметрів електрогідравлічного об'ємного приводу з числовим програмним керуванням Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія машинобудування №62, 2011 р., стор. 255-259.