

**Л. О. Кривопляс-Володіна, О. М. Гавва, С. В. Токарчук,
М. А. Масло, С.О. Володін**

**МЕХАТРОНІКА І РОБОТОТЕХНІКА В
СТРУКТУРІ ПАКУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Київ 2024

**УДК 681.51
Н40**

*Рекомендовано Вченою радою
Національного університету харчових технологій
(протокол №10 від 25.05.2023 року)*

Кривопляс-Володіга Л.О. Мехатроніка і робототехніка в структурі пакувального обладнання: Навчальний посібник / Л. О. Кривопляс-Володіна, О. М. Гавва, С. В. Токарчук, М. А. Масло, С.О. Володін – Київ: НУХТ, 2024 . – 305 с.

**УДК 681.51
Н40**

У навчальному посібнику подані відомості про сучасні технології організації виробництва, зокрема розглянуті особливості використання пневматичних систем, що разом з засобами автоматизації та ПЛК дозволяють створювати мехатронні роботизовані системи на виробництві. Розглянуті технології інтелектуальних приводів, датчиків і пневматичних пристроїв, а також системи управління за стандартами Індустрії 4.0. Дано практичні рекомендації щодо створення складних програмно-апаратних комплексів керування технологічними процесами (ТП).

Навчальний посібник дає можливість студентам ознайомитись із основами пневматики, навчитись виконувати розрахунки схем пневмоприводів, вивчити характеристики пневматичних приводів та оволодіти сучасними інструментами підготовки технологічних програм керування ТП, та перспективними мовами програмування промислових контролерів, такими як ST, LD, FBD, SFC.

Набуття теоретичних та практичних знань в галузі пневматики та мехатроніки, вивчення принципів програмування промислових контролерів, які застосовуються для функціонування АСУ ТП, є необхідним у процесі підготовки фахівців спеціальностей технічного спрямування, практична діяльність яких орієнтована на виробництво, обслуговування, автоматизацію та створення комп'ютерно-інтегрованих технологій і промислової автоматики та мехатроніки.

Навчальний посібник призначено для підготовки студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 1311 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», 174 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Може бути корисний аспірантам і фахівцям у промисловості, робота яких пов'язана з розробкою та організацією виробництв технічної галузі.

Рецензенти:

В.Г. Мирончук, д-р технічних наук, професор, професор кафедри технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проєктування, Національний ун-т харчових технологій;

В.Ю. Сухенко, д-р технічних наук, професор, професор кафедри харчових технологій ФХТСО, Черкаський Державний Технологічний університет;

І.І. Регей, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічного і пакувального виробництв, Українська академія друкарства.

© Л. О. Кривопляс-Володіна,
О. М. Гавва,
С. В. Токарчук,
М. А. Масло,
С. О. Володін, 2024

ЗМІСТ

Перелік умовних познач, скорочень і термінів	6
Вступ.....	7
1 Пневматичні системи та основи пневматики	9
1.1 Основні параметри стисненого повітря. Одиниці вимірювання тиску	9
1.2 Виробництво та розподіл стисненого повітря	30
1.3 Блоки підготовки повітря	44
1.4 Пневмоциліндри	58
1.5 Пневморозподільники.....	64
1.6. Контрольні запитання та завдання	79
2. Характеристика пневматичних елементів, розробка пневматичних схем та електричних схем	81
2.1. Інтегровані рішення функціональних модулів в задачах синтезу ежекторів та пневматичних приводів	81
2.2 Реле, індикатори тиску, електропневмоперетворювачі в системі керування ежекторами	92
2.3 Контрольні запитання та завдання	112
3. Мехатронні пневматичні системи	113
3.1. Завдання механіки маніпуляторів	113
3.2 Кінематичний аналіз механізму маніпулятора	113
3.3 Динаміка маніпуляторів промислових роботів.....	120
3.4 Системи управління з програмованими логічними контролерами.....	125
3.5 Контрольні запитання та завдання	153
4. Технологія програмування ПЛК.....	154
4.1 Загальні елементи програмування мовами стандарту МЕК	154
4.2 ПЛК, як кінцевий автомат	192

4.3 Структурований текст (ST)	195
4.4 Релейні діаграми (LD).....	208
4.5 Функціональні діаграми FBD	217
4.6 Контрольні запитання та завдання	221
5. ОСНОВИ РОЗРАХУНКІВ І ВИБОРУ	222
Параметрів пневматичного приводу технологічного обладнання.....	222
5.1. Особливості конструкції пневмоприводів для технологічного обладнання.....	222
5.2. Особливості конструкції позиційних та слідкувальних пневмоприводів	224
5.3. Методологічний підхід до визначення раціональних законів руху робочих органів мехатронних модулів на базі пневмоприводу	232
5.3.1. Визначення раціональних законів руху робочих органів мехатронних модулів на прикладі пакувальних машин	232
5.3.2. Формування структури електропневматичного позиційного приводу на основі принципів мехатроніки.....	238
5.4. Принцип конструктивної і функціональної інтеграції функціональних пристроїв на основі мехатронних модулів.	240
5.5. Синтез функціонального пристрою лінійного переміщення пакувальної машини на основі пропорційного електропневматичного регулятора тиску.....	241
5.6. Аналіз законів руху, придатні для реалізації пневмоприводом	248
5.7. Вирішення задачі щодо переміщення вантажів в режимі, наближеному до оптимального за швидкістю дії, за допомогою пневмопривода	253
5.8. Моделювання перехідних процесів в ММ із змінним навантаженням на трьох етапному переміщенні упаковки на ділянку фасування дрібно-штучних продуктів.....	268

5.9. Особливості розрахунку обертального пневматичного приводу.....	276
5.10. Деякі аспекти застосування пневмоприводу в soft-мехатронних модулях	284
Перелік джерел посилань	295
ДОДАТОК А.....	298
ДОДАТОК Б	301
ДОДАТОК В.....	304

5.10. Деякі аспекти застосування пневмоприводу в soft-мехатронних модулях

В останні роки м'які системи викликають дедалі більший інтерес до робототехнічного напрямку і для пневмосистем зокрема. Для побудови soft-мехатронних модулів, із відповідною поведінкою прийнято два основні підходи: перший - черпає натхнення з боку опорно-рухового апарату хребетних тварин і спирається на гнучкі суглоби, що досягається за допомогою виконавчих механізмів із змінною кінематикою (м'які шарнірні роботи); другий – відтворює концепцію на основі безхребетних та використовує еластичні матеріали, для створення структур, які безперервно деформуються (м'які роботи – soft модулі). Наведемо деякі процеси, щодо інтегрованих принципів проектування soft-мехатронних модулів, залучаючи пневматичні системи керування та датчики, а також – стиснене повітря, як енергоносіє.

Дійсно, м'якість біологічних структур є ключовим фактором взаємодії з навколишнім середовищем та реагування на зовнішні та внутрішні сили. У 2006 році було введено поняття морфологічних обчислень, щоб пояснити роль м'якості в механічній системі. Морфологічні обчислення вказують на те, що роль механіки тіла має фундаментальне значення в тому, як тіло може взаємодіяти та пристосовувати свою форму до навколишнього середовища. Такі властивості можуть надзвичайно полегшити - або перешкодити дії керування soft-мехатронних модулів. Ключовим елементом для досягнення такої розумної поведінки є м'якість корпусу робота. Як наслідок, одним із матеріалів, який найширше застосовується для побудови м'яких технічних систем - є силікон.

З точки зору активації використовується кілька схем для роботи з soft-мехатронними модулями, включаючи додаткові пасові передачі, матеріали - пам'яті форми, м'язоподібні виконавчі механізми, ефекти перепаду тиску в ресиверах. Деякі синтезовані структури використовують базу електричних компонентів та останні досягнення в галузі електроактивних полімерів (ЕАП) та технологій адаптивного виробництва для проектування м'яких приводів та

датчиків з електричними приводами з підвищеними можливостями. Незважаючи на такий прогрес, потреба у зменшенні кількості твердих компонентів дала імпульс щодо розвитку нових видів пневмоприводів. Деякі незв'язані мобільні роботи покладаються на пряме генерування робочого пневматичного тиску в результаті керованої контрольованої дії джерела живлення.

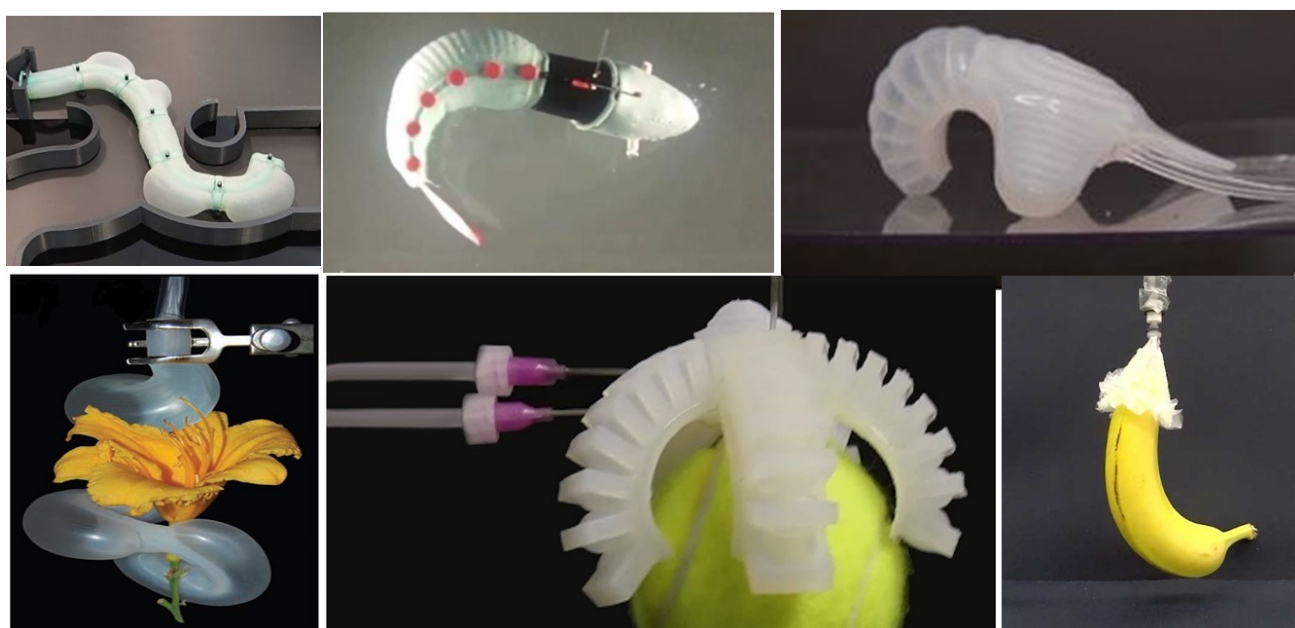
М'яка робототехніка відкрила проблеми, пов'язані з моделюванням та методами управління, зокрема – як керувати в основному деформованими системами через їх нелінійну реакцію? Сьогодні, загальна стратегія включає аналіз та опис soft-мехатронних модулів за допомогою експериментально перевічених, квазістатичних аналітичних моделей та результатів дослідження на основі методу скінченних елементів. У цьому підході важливу роль відіграє армування волокна: шляхом варіювання кута намотування волокон можна досягти зміну діапазону різної деформаційної поведінки виконавчого елемента. Більше того, комбінація декількох виконавчих механізмів дозволяє отримувати складні рухи з різним ступенем вільності.

Один із недоліків класичного пневматичного управління полягає в його громіздкості та важкості. Насправді, система керування зазвичай включає генератор тиску, регулятор тиску і принаймні один клапан (розподільник або ежектор) для кожної камери soft-мехатронного модуля. Це обмежує загальну продуктивність системи, особливо для мобільних та переносних модулів.

У літературі запропоновано декілька підходів, з метою спрощення архітектури приводу, - пропонують мініатюрний пневматичний регулятор для безпосередньої інтеграції в компактні soft-мехатронні модулі, що дозволяє спростити управління клапанами в таких системах. Інший шлях досліджує використання пасивних клапанів, що активуються за допомогою певної модуляції вхідного тиску. Пневматичні мережі малих каналів з еластичних матеріалів є привабливими для створення складних рухів із зменшеною кількістю елементів управління.

Зазвичай soft-мехатронні модулі складаються із безлічі незалежних камер, що індивідуально управляються через складну мережу трубопроводів і активних клапанів. Це дозволяє легко отримувати велику різноманітність

рухів, що є бажаною властивістю для різних застосувань. Розроблені системи, які включають: руки, де порядок змикання пальців може дати різні схеми захоплення, черв'яко подібні роботи, змієподібні модулі, які могли б адаптувати свою ходу для пересування по різних поверхнях або для переміщення по складних перешкодах; робот-риба, де м'який матеріал використовується для відтворення м'якої поведінки риб'ячого плавника або м'якого робота-восьминога, та для медичних приладів, де м'який роботизований рукав використовується для сприяння серцево-судинній функції під час операції.



Усі ці системи реалізують різні функції, здебільшого завдяки можливості надування / спуску своїх робочих камер у різних послідовностях. Розглянемо soft-мехатронний модуль із пневматичною мережею, що складається з N-надувних камер, з'єднаних паралельно джерелу тиску, як показано на **рис. 5.39**.

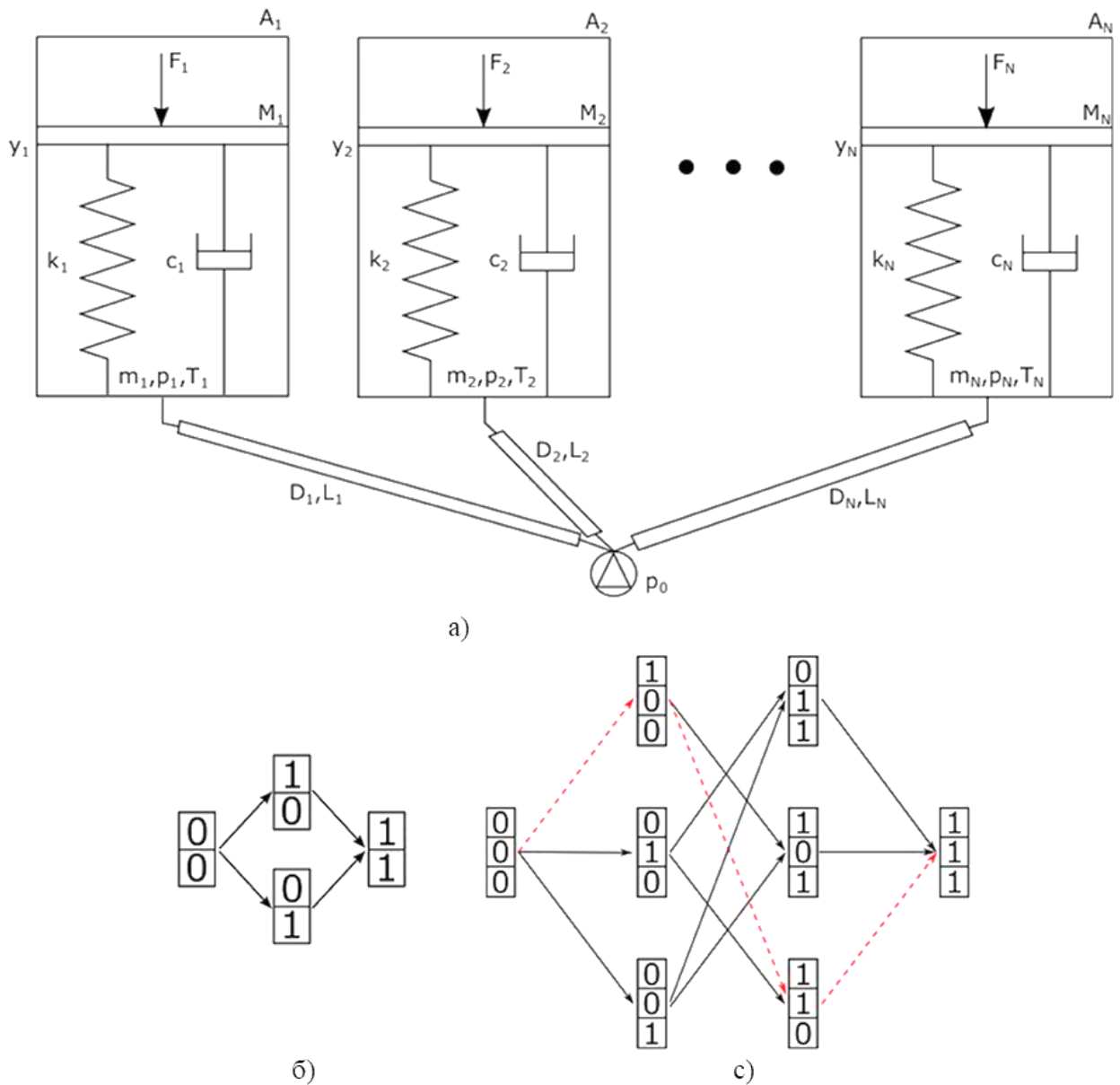


Рис.5.39. Загальна схема soft-мехатронного модуля: а) схема зображення текучої мережі soft-мехатронного модуля із кількома камерами, підключеними паралельно до одного джерела входу; б) 2-камерна система; в) 3-камерна система

Кожна камера змодельована як система пружин-демпферів. б), в) можливі конфігурації станів та поведінки двох систем. Вектори стовпців 0 і 1 с відповідають станам ввімкнення/вимкнення системи, стрілки відповідають різним діям. Можлива поведінка виділена червоною пунктирною лінією. Кожна камера виконана у вигляді поршня з кінцевим ходом, з'єднаного із

пружиною та заслінкою, що імітує як еквівалентні механічні властивості камери, так і сполученої конструкції модуля. Стиснене повітря (припущення) використовується як ідеальний газ при умові ламінарного потоку.

Динаміка системи регулюється рівняннями руху поршнів та балансами маси та енергії повітряного потоку. Кожну камеру описано за допомогою системи нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_i = \frac{p_0 - p_i}{Z_i} \quad (1) \\ \ddot{y}_i = \frac{1}{M_i} ((p_i - p_{\text{atm}})A_i - F_i - k_i(y_i - l_{ri}) - c_i \dot{y}_i) \quad (2) \\ \dot{p}_i = \frac{R}{c_v A_i y_i} \left(\dot{m}_i c_p T_{\text{atm}} - \frac{c_p}{R} A_i p_i \dot{y}_i + k_w S_i (T_i - T_{\text{atm}}) \right) \quad (3) \\ T_i = \frac{p_i A_i y_i}{m_i R} \quad (4) \end{array} \right.$$

Де

$$Z_i = \frac{32\mu L_i}{\pi \rho_i D_i^4} \quad (5)$$

$$\rho_i = \frac{m_i}{A_i y_i} \quad (6)$$

$$S_i = y_i \sqrt{4\pi A_i} \quad (7)$$

Визначення символів: μ , динамічна в'язкість повітря, p абсолютний тиск, p_0 подаючий тиск, p_{atm} атмосферний тиск, R постійна газова стала, ρ густина повітря, S зовнішня поверхня поршня, температура робочого середовища T , атмосферна температура T_{atm} , y - висота поршня, A - площа поршня, c - коефіцієнт демпфування, c_p теплоємність при постійному тиску, c_v теплоємність при постійному об'ємі, D діаметр трубопроводу, F зовнішня сила, k жорсткість, k_w коефіцієнт конвективної тепловіддачі, L довжина трубопроводу, l_r довжина спокою пружини, m маса повітря в поршні, M маса

поршня, Z співвідношення між перепадами тиску та швидкістю потоку, i - нижчий індекс відноситься до загальної камери.

Враховуючи камеру - a , ми описуємо її стан як повністю заповнений стисненим повітрям ($a = 1$) або порожній ($a = 0$). Отже, стан глобальної системи можна описати вектором з N (бінарний код 0,1). Ми визначаємо як поведінку кожену можливу послідовність ввімкнення/вимкнення різних камер. Рис. 5.39 (б,с) ілюструють набори всіх видів поведінки для двох систем з двома та трьома камерами відповідно. Приклад рисунку Рис. 5.39 (б) має дві можливі поведінки, тоді як малюнок Рис. 5.39 (с), що має три камери, - має шість.

Задається підмножина з n можливих способів поведінки, щоб визначити вхід управління $p(t)$ та конструкцію механічних параметрів системи, щоб всі n поведінки можна було б відтворити.

Для практичного опису обрано систему, що складається лише з двох надувних камер, паралельно з'єднаних з одним джерелом тиску.

Кожна камера виконана у вигляді поршня з кінцевим ходом, з'єданого з пружиною та заслінкою, що імітує як еквівалентні механічні властивості камери, так і сполученої конструкції soft-мехатронного модуля.

Різний за величиною тиск, дозволяє використовувати різну швидкість спрацьовування, що викликає різні способи поведінки загальної системи. Ключова ідея полягає в тому, що, граючи на швидкості подачі стисненого повітря, можна зробити динамічну реакцію заслінки домінуючою над ефектом пружини або навпаки. Коли тиск швидко зростає, демпфування відіграє найбільшу роль, тоді як при низьких градієнтах тиску домінує жорсткість ланок модуля. Ескіз цієї системи наведено на рис. 5.40, зміна робочих параметрів soft-мехатронної системи зображено на рис.5.41.

Припустимо, що жорсткість і демпфування двох камер можуть бути спроектовані вільно. Під час визначення механічних параметрів двох камер, формується потік стисненого повітря від керованого джерела. Моделюючи систему, можна визначити значення механічних параметрів, для яких проявляється передбачувана поведінка.

Як правило, швидка подача тиску дозволяє камері 1, рис.5.41 надуватися перед камерою 2, тоді як повільна подача тиску дозволяє одночасно накачувати дві камери.

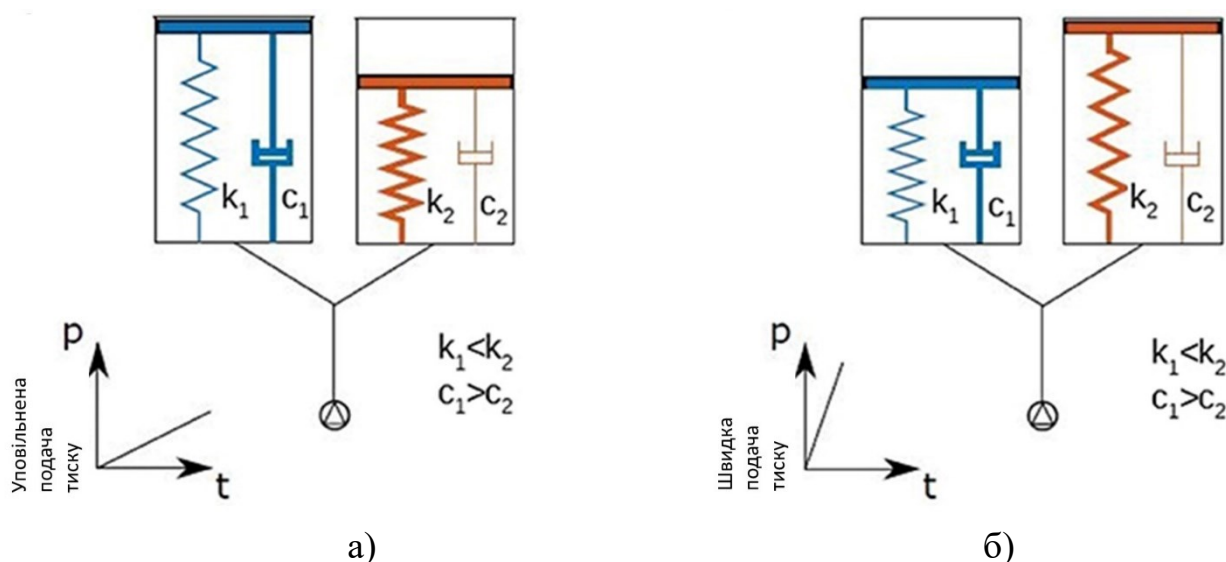


Рис.5.40 Схема soft-мехатронної системи, що складається лише з двох надувних камер, паралельно з'єднаних з одним джерелом тиску

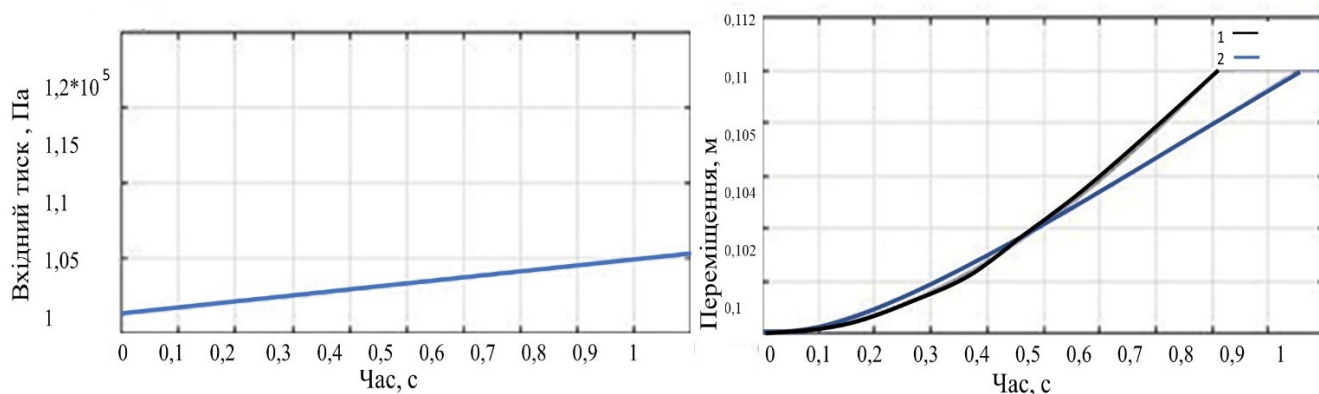


Рис.5.41. Зміна робочих параметрів soft-мехатронної системи

В'язкий демпфуючий ефект створюється, якщо між ділянками рідини присутнє тангенціальне ковзання, отже, вибір місця розташування рідини всередині стінки камери є критичним.

Враховуючи, що один скінченний елемент поверхневої мембрани має основну деформацію, яку він зазнає, коли камера піддається накачуванню (див. рис.5.42 а,б,в,г), можна описати поєднаним ефектом двох дій. А саме, розтягувальної дії через те, що камера із стисненим повітрям буде мати більшу

зовнішню поверхню та стискаючу дію, завдяки дії різних тисків, що діють на дві стінки мембрани. Якщо до елемента приєднати координатну сітку і подивитися на локальну швидкість деформації, спричинену вищезазначеною дією стисненого повітря (див.5.42, д).

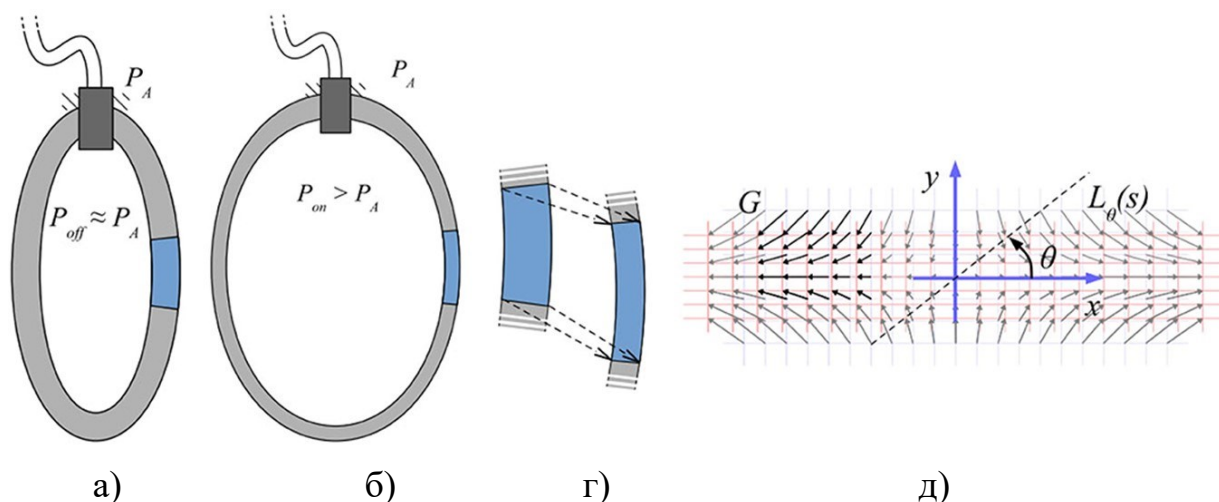


Рис.5.42. Загальний вид окремого елемента soft-мехатронної системи:

а) загальний вид надувної камери в умовах без тиску; б) із тиском; в) деформація макроскопічного елемента стінки камери; г) сітка деформацій для 2D прямокутної моделі

Визначення $P(t)$ траєкторії руху окремої точки елемента soft-мехатронної системи в залежності від часу потребує припущень.

Якщо припустити, що початковими умовами для $t = 0$ є $P(0) = [x_0, y_0]^T$, та що ізотропне перетворення, еволюціонує лінійно за часом - то деформоване положення в загальний час t можна визначити як:

$$P(t) = [x(t), y(t)] = [x_0 + \alpha x_0 t, y_0 - \nu \alpha y_0 t]^T, \quad (8)$$

де α - геометрична константа, що вказує на величину процесу деформації, а ν - друга геометрична константа, що описує відношення швидкості деформації у двох напрямках, нормальному та тангенціальному (аналогічно відношенню Пуассона). Місцеву швидкість поля деформації можна розрахувати як:

$$G(dP/dt) = [\alpha x_0, -\nu \alpha y_0]^T. \quad (9)$$

При визначенні напрямку спостереження цього векторного поля, який визначається лінією, що проходить повз початок нашої системи відліку під кутом θ , (див.рис. 5.42,д), заданий параметричним рівнянням

$L_{\theta}(s) = [s \cos(\theta), s \sin(\theta)]^T$, ми можемо визначити компонент G , ортогональний прямій $L_{\theta}(s)$, як:

$$G_{\perp\theta} = [-\sin(\theta), \cos(\theta)] [\alpha s \cos(\theta), -\nu \alpha s \sin(\theta)]^T = (-1/2)(1+\nu) \alpha s \sin(2\theta). \quad (10)$$

Для обчислення геометричної швидкості деформації зсуву $\dot{\gamma}$ використано похідну від попередньої відносно s , як:

$$\dot{\gamma} (\partial G_{\perp\theta} / \partial s) = (-1/2)(1+\nu) \alpha \sin(2\theta). \quad (11)$$

Як випливає із рівняння (11), навіть проста прямокутна камера із матеріалу, ізотропно деформується, як на (рис. 5.42.,д), тому що зазнає вплив напруги зсуву. Якби прямокутна камера була повна в'язкої рідини, вона зазнала б розподілу дисипативних в'язких напружень відповідно до:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \quad (12)$$

де τ - в'язка напруга зсуву, пропорційна динамічній в'язкості μ рідини та швидкості деформації зсуву $\dot{\gamma}$. Це призводить до уявлення про найпростішу можливу геометрію, яка могла б реалізувати дисипативний ефект. Як показано на рис.5.43, зміцнити конструкцію можна вбудувавши в середину камери додаткову трубку, заповнену в'язкою олією.

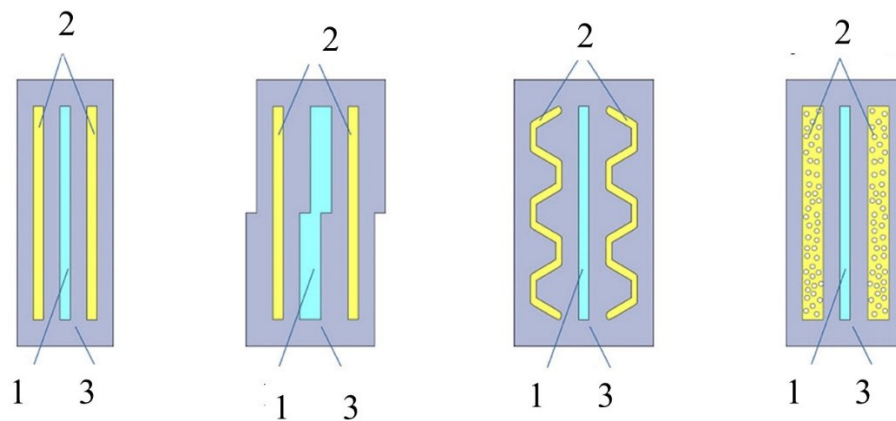


Рис.5.43. Загальний вид окремого елемента (циліндра) soft-мехатронної системи: 1 – стиснене повітря, 2 – мастило (в'язка рідина), 3 – силіконовий корпус

Результати цієї конструкції циліндра, описані рівняннями (11), (12) та відповідними припущеннями щодо їх конструкції. Зокрема, є три основні фактори, які обмежують можливу ефективність, що також пропонує три

можливі шляхи вдосконалення наведеного варіанту soft-мехатронної системи. Перший обмежувальний елемент полягає в тому, що рівняння (11) передбачає, що деформація є ізотропною.

Рівняння (11) описує напрямки, по яких швидкість деформації зсуву максимізується. Це напрямки, що відповідають $\theta = (\pi/4) + k(\pi/2)$. Це свідчить про те, що іншим можливим способом збільшення швидкості зсуву є створення стінки камери, для заповнення рідиною, паралельною цим напрямкам. Елементом, який найбільше впливає на демпфуючу дію, є коефіцієнт μ рівняння (12). Цей коефіцієнт залежить від конкретного типу в'язкої рідини, що використовується, враховуючи ньютонівські рідини, він вважається постійним. Готові силіконові мастила охоплюють необхідний діапазон в'язкості, тим не менш, відомий спосіб подальшого збільшення еквівалентної динамічної в'язкості рідини полягає у змішуванні її із суспензією. Різновиди виконання окремих елементів soft-мехатронних модулів наведено на рис.5.44.

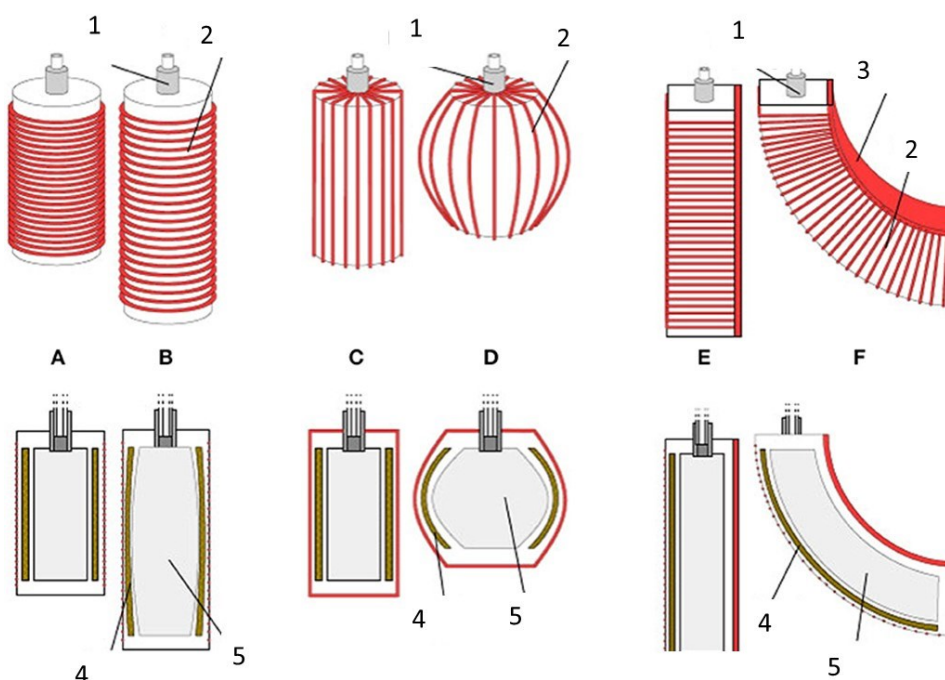


Рис.5.44. Загальний вид основних складових елементів soft-мехатронної модулів: 1- пневматична камера, 2 – зміцнююча стрічка, 3 – гнучкий пластик, 4 – демпфуюча оболонка; 5 – внутрішня камера для стисненого повітря

Під час роботи soft-мехатронної системи, що складається лише з двох надувних камер, паралельно з'єднаних з одним джерелом тиску, із різними формами складових елементів, формуються різні технічні параметри роботи, рис.5.45.

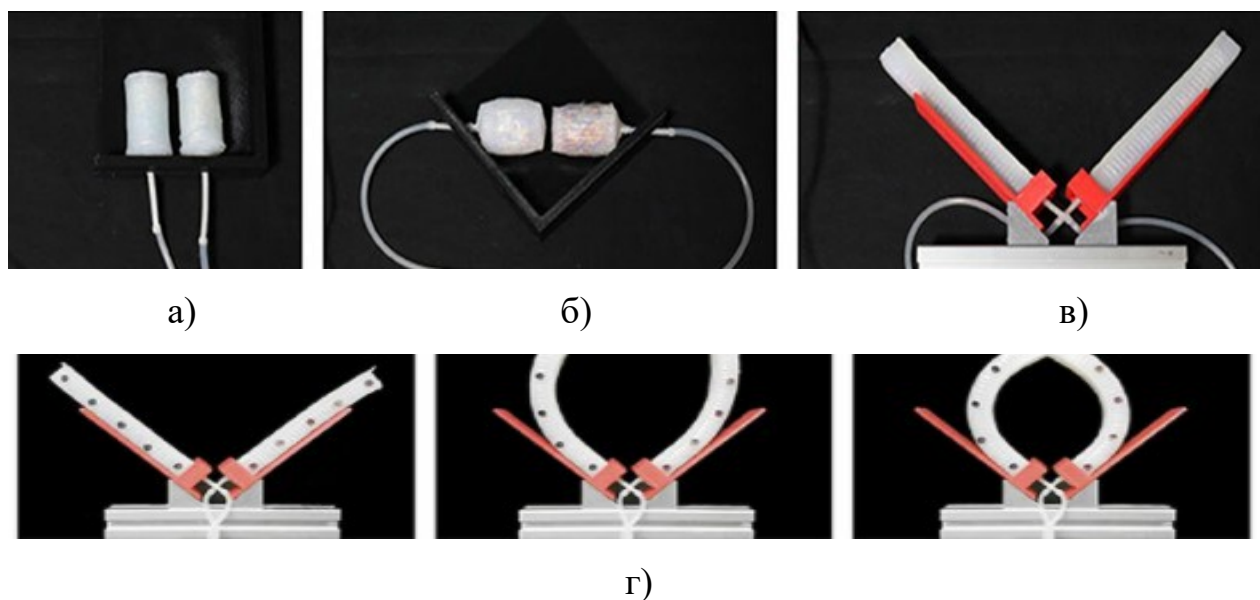


Рис.5.45. Загальний вид окремих елементів пневматичного soft-мехатронного модуля: а) зіштовхувальні, б) фіксуючі в) захват- фіксатор г) поетапне замикання захвата

Для збільшення робочих тактів та більш чіткого керування, можна використовувати два приводи згинання, щоб реалізувати захоплювач, здатний виконувати точні та силові дії. Два елемента захоплення з'єднані паралельно в одному джерелі тиску. Повільна швидкість подачі стисненого повітря сприятиме симетричному змиканню елементів захвата. Наведені конструкції доцільно обирати для обробки дрібних та легких предметів.

Більшість запропонованих на сьогоднішній день конструкцій soft-мехатронних модулів експериментально підтверджені. Одна із важливих проблем їх розроблення - це проектування м'яких надувних камер із різними демпфуючими властивостями.