

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Конспект лекцій

з дисципліни «Динамика гідропневмосистем» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітніх програми « Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика », спеціальності D4 «Енерговиробництво», «Моделювання технічних систем» спеціальності D9 «Прикладна механіка», «Машини і обладнання для технологічних процесів» спеціальності D11 «Машинобудування»

Затверджено
редакційно–видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 26.06.2025 року

Харків
НТУ «ХП»
2025

Конспект лекцій з дисципліни «Дінаміка гідропневмосистем» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітніх програми «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика », спеціальності D4 «Енерговиробництво», «Моделювання технічних систем» спеціальності D9 «Прикладна механіка», «Машини і обладання для технологічних процесів» спеціальності D11 «Машинобудування» / Уклад.: А.И. Гасюк. Харків: НТУ «ХП», 2025. 76 с.

Укладач Олександр ГАСЮК

Рецензент Юрий КУХТЕНКОВ

Кафедра гідравлічні машини

ВСТУП

Дисципліна «Динаміка гідропневмосистем» розглядає ключові теоретичні та практичні питання аналізу динамічних процесів у системах, які працюють з рідинами та газами. Методом вивчення дисципліни є формування у студентів здатності розраховувати та моделювати динамічні характеристики гідравлічних і пневматичних систем, оцінювати їх стійкість і ефективність в умовах різних експлуатаційних навантажень.

Вивчення дисципліни дозволяє майбутнім фахівцям володіти методами аналізу коливальних процесів у гідропневмосистемах, визначення їх причин та шляхів усунення негативних явищ. Планування системи роботи з урахуванням її динамічних властивостей забезпечує ефективність роботи, зниження ризиків аварій та витрат на експлуатацію.

Крім того, дисципліна включає вивчення методів оптимізації характеристик системи шляхом вибору матеріалів, конструктивних елементів та параметрів роботи. Здобувачі освіти отримують практичні навички розробки математичних моделей, застосування сучасних програмних засобів для моделювання процесів.

Важливою складовою дисципліною є розгляд реальних прикладів застосування гідропневмосистем у різних галузях промисловості, таких як машинобудування, енергетика, транспорт, авіація тощо. Студенти вивчають методи проектування системи, які забезпечують оптимальну взаємодію між компонентами, за рахунок впливу зовнішніх факторів і умов експлуатації.

Дисципліна також акцентує увагу на питаннях енергоефективності та екологічності гідропневмосистем. Сучасні тенденції розвитку технологій вимагають впровадження рішень, які мінімізують споживання енергії та зменшують шкідливий вплив на навколишнє середовище. Ці аспекти є збільшенням для забезпечення конкурентоспроможності підприємств у сучасних умовах.

Конспект лекцій містить 17 тем, у кожній з яких розглядається зміст питань теми, розкривається їх сутність.

Тема 1 Динаміка слідкувальних ГПС з дросельним управлінням.

План

1.1 Принцип роботи та структура слідкувальних ГПС з дросельним управлінням.

1.2 Динамічні характеристики та аналіз перехідних процесів у системах.

1.3 Енергетична ефективність та оптимізація слідкувальних ГПС із дросельним управлінням

1.1 Принцип роботи та структура слідкувальних ГПС з дросельним управлінням.

Принцип роботи та структура слідкувальних ГПС з дросельним управлінням є основою для забезпечення високої точності та надійності регулювання параметрів механічних систем, таких як швидкість, положення або ефективність ефективних механізмів. Це дозволяє ефективно керувати різноманітними технічними пристроями в багатьох галузях, включаючи машинобудування, авіацію

Основним елементом такої системи є джерело енергії, яке постачає робоче середовище під тиском. У гідравлічних системах це насос, що створює потік масла, а в пневматичних системах – компресор для подачі стисненого повітря. Це робоче середовище надходить до дросельного елемента, який виступає як регулятор потоку. Дросель може бути виконаний у вигляді клапана, що змінює свій відвір відповідно до сигналу управління, тим самим регулюючи кількість робочої рідини або газу, який надходить до виконавчого механізму. Залежно від необхідності, пропускна здатність дроселя може бути збільшена або зменшена, що дозволяє точніше контролювати швидкість або успіх успішного або

Далі робоче середовище створює до виконавчого механізму, який перетворює потік енергії на механічну роботу. У гідравлічних системах це можуть бути гідроциліндри або гідромотори, які забезпечують рухи чи інші операції, а в пневматичних системах – пневмоциліндри або пневмомотори. Вся система управляється через блок управління, який отримує сигнал від датчиків або оператора і виводить відповідні команди на дросель. блок аналізує вимоги і коригує параметри роботи цього дроселя для досягнення високого ре

Крім того, важливою складовою є система зворотного зв'язку. Вона складається з датчиків, які постійно відстежують параметри виконавчого механізму, такі як положення, швидкість або успіх. Отримані дані передаються

до системи управління, яка, у разі потреби, коригує роботу дроселя. Це дозволяє системі стабільно працювати в реальних умовах і забезпечувати високу точність.

Основний принцип роботи слідкувальних ГПС з дросельним управлінням утворюється в тому, щоб через зміну пропускну здатності дроселя регулювати витрати робочого середовища, а також швидкість або успіх ефективного механізму. При отриманні сигналу від системи управління дросель змінює його положення, збільшуючи або зменшуючи потік середовища до виконавчого механізму. Це дозволяє забезпечити бажану швидкість руху або точне позиціонування механізму. Система зворотного зв'язку дозволяє постійно коригувати ці процеси, досягаючи максимальної точності.

Слідкувальні ГПС з дросельним управлінням мають широкий спектр застосування. Вони застосовуються в промислових верстатах, де необхідна точність у позиціонуванні інструменту, в гідравлічних підйомниках для плавного регулювання підйому або опускання, а також у автоматизованих системах для виконання точних маніпуляцій. Такі системи широко застосовуються в транспорті, зокрема для регулювання підвіски в транспортних засобах, що дозволяє

Усі ці системи мають низку переваг, зокрема високу точність та гнучкість налаштування, що дозволяє адаптувати їх до різноманітних умов роботи. Однак інші недоліки, такі як енергетичні втрати через нагрівання робочого середовища та чутливість до забруднення або зміни температури, що може вплинути на ефективність системи.

Таким чином, слідкувальний ГПС з дросельним управлінням є основними технічними засобами, що дозволяють з високою точністю контролювати параметри роботи виконавчих механізмів у різних галузях. Вони забезпечують ефективне управління навіть за змінених умов і мають широкий спектр програм, що підтверджує їх цінність.

1.2 Динамічні характеристики та аналіз перехідних процесів у системах.

Динаміка системи характеризується такими величинами, як час встановлення, час затримки, максимальна амплітуда колювання та період. Вони дають уявлення про те, як система реагує на зміну умов. Завдання аналізу перехідних процесів удається в тому, щоб зрозуміти швидкість, з якою система

досягає стабільного стану, і як її характеристики змінюються під впливом різних чинників.

Особливу увагу слід приділити вивченню інсталюваного часу – це час, за який система після змін досягає приблизно своєї нової рівноважної величини. Час затримки – це інтервал між моментом внесення змін і початком відповіді системи на ці зміни. Визначення цих характеристик дозволяє оцінити ефективність та стабільність роботи системи.

Перехідний процес у технічних системах часто супроводжується коливаннями, які можуть бути непередбачуваними і привести до нестабільності. Для цього необхідно провести аналіз перехідних процесів за допомогою математичних моделей, які описують поведінку системи під час змін. Такі моделі можуть включати рівняння для опису механізмів керування та перегляду систем на зовнішніх та інших внутрішніх змінах

Загальний підхід до аналізу перехідних процесів полягає в тому, щоб оцінити всі обрані варіанти розвитку ситуації в системі, розрахувати очікувані динамічні характеристики й програму, чи здатна система досягти стабільності в межах заданих параметрів.

Для детальнішого аналізу перехідних процесів часто використовуються методи математичного моделювання, які дозволяють побудувати точнішу картину поведінки системи. Найпоширенішими підходами є використання диференціальних рівнів, що описують динаміку змін системи, а також перетворення цих рівнів у простіші моделі, наприклад, у вигляді передавальних функцій чи моделей зворотного зв'язку. Вони допомагають не тільки забезпечити поведінкову систему в перехідний момент часу, але й оптимізувати параметри для забезпечення стабільності.

Важливою характеристикою, яку потрібно використовувати при аналізі перехідних процесів, є тип системи: лінійна чи нелінійна. Лінійні системи, як правило, мають передбачувану та стабільну реакцію на зміни умов, що робить їх вивчення досить простим. Нелінійні системи, у своєму зверненні, можуть демонструвати складні, а іноді й хаотичні перехідні процеси, що потребують більш глибокого аналізу та застосування спеціалізованих методів моделювання.

При проектуванні та експлуатації технічних систем слід також враховувати фактори, які можуть впливати на перехідний процес, такі як час затримки у відгуку, швидкість змін умов і реакцій системи, а також можливість коливання чи перевантаження. Для забезпечення системи необхідно забезпечити правильну настройку її параметрів, що дозволяє уникати значних

відхилень від стабільного стану під час змін або навантаження. Крім того, важливо передбачити механізми контролю та регулювання, які не дозволяють оперативно коригувати параметри системи у разі виникнення непередбачених ситуацій. Це може включати використання автоматизованих систем управління, здатних реагувати на зміни в реальному часі, забезпечуючи швидке повернення до нормального функціонування.

Під час аналізу перехідних процесів в економічних системах важливо впливати на зовнішні та внутрішні фактори, які також можуть впливати на їх поведінку, такі як ринкові умови, політичні зміни або зміни в попиті на продукцію чи послуги. Це дозволяє не тільки описати сам процес, але й спрогнозувати його довгострокові дослідження для підприємства чи держави, що є місцем для виконання.

1.3 Енергетична ефективність та оптимізація слідкувальних ГПС із дросельним управлінням.

Енергетична ефективність є однією з ключових характеристик сучасних технічних систем, особливо коли мова йде про автоматизовані або роботизовані системи, такі як слідкувальні ГПС (гідроприводи з сервоуправлінням) із дросельним управлінням. Оптимізація таких систем дозволяє знизити енергетичні витрати, підвищити продуктивність і продовжити термін служби обладнання.

Слідкувальні ГПС є механізмами, що забезпечують точне позиціонування і контроль руху об'єктів, зазвичай у складних і динамічних умовах. Вони використовуються в різних галузях, включаючи промисловість, сільське господарство, авіацію та автомобільну техніку.

Дросильне управління може значно знизити енергетичну ефективність через постійну втрату енергії у вигляді тепла, що створюється через фрикційні опори в клапанах або інших компонентах системи. Основною проблемою є те, що при зміні навантаження в системі дросельного управління не оптимізує енергоспоживання, а лише обмежує потік рідини, створюючи додаткові енергетичні.

Один із шляхів підвищення енергетичної ефективності таких систем – це використання змінного об'єму робочої рідини одночасно, що дозволяє більш точно регулювати енергію, необхідну для виконання певного завдання. Застосування насосів з варіативним об'ємом, а використання також електронних

систем управління дозволяє регулювати потік робочої рідини з високою точністю, зменшуючи втрати енергії при зміні умов експлуатації.

Іншим аспектом є впровадження технологій для зменшення гідравлічних витрат у системах з дросельним управлінням. Це включає в себе використання клапанів з низьким коефіцієнтом втрати, а також оптимізацію конструкції самих систем для зменшення тертя та інших перешкод для потоку рідини. В результаті система стає здатною працювати більш стабільно і зменшує споживання енергії, що є місцем для довгострокового використання.

Один із перспективних напрямків для оптимізації енергетичної ефективності слідкувальних ГПС із гідросельним управлінням – це використання методів регулювання, заснованих на моделюванні та прогнозуванні навантажень. Завдяки математичним моделям можна точно передбачити зміну навантаження та адаптувати роботу системи до реальних умов, що дозволяє мінімізувати витрати.

Застосування систем зворотного зв'язку та регулярних алгоритмів дозволяє автоматично адаптувати параметри системи до поточних умов, що також позитивно впливає на енергетичну ефективність. Наприклад, в умовах низького навантаження система може працювати в енергозберігаючому режимі, знижуючи потік рідини і, відповідно, енергоспоживання.

Насамкінець, інтеграція технологій інтелектуального управління в наступні ГПС з дросельним управлінням дозволяє не тільки підвищити їх енергетичну ефективність, але й значно підвищити функціональні характеристики. Враховуючи сучасні тенденції до зниження енергетичних витрат та забезпечення стійкості системи в умовах змінених навантажень, такі інновації можуть істотно підвищити конкурентоспроможність.

Питання для обговорення

- 1. Як дросельне управління впливає на ефективність роботи слідкувальних ГПС і систем енергоспоживання?*
- 2. Як зміна навантаження в системі впливає на точність та швидкість роботи слідкувальних ГПС із дросельним управлінням, і що можна зробити для покращення цих показників у змінних умовах?*
- 3. Які основні проблеми виникають при використанні дросельного управління в слідкувальних ГПС, і як їх можливий виправити за допомогою нових технологій?*
- 4. Яким чином можна зменшити втрати енергії в системах з дросельним управлінням і які технічні рішення дозволять підвищити енергетичну ефективність?*
- 5. Як впливає час затримки в системах з дросельним управлінням на динаміку роботи слідкувальних ГПС, і що можна зробити для зменшення цього?*

6. Які методи можна використати для оптимізації параметрів дросельного управління, щоб підвищити ефективність роботи системи в різних режимах?

7. Як нові технології, такі як автоматизовані системи управління або інтелектуальні алгоритми, можуть покращити роботу слідкувальних ГПС?

Тема 2. Лінійна модель слідкувальної ГПС.

План

2.1 Вихідна система рівнянь, їхня лінеаризація.

2.2 Передавальні функції ланок ГПС

2.3 Структурні схеми

2.1 Вихідна система рівнянь, їхня лінеаризація.

Слідкувальні гідропневматичні системи використовуються для точного відтворення заданого переміщення або зусилля. Типовий приклад – система керування положенням виконавчого механізму.

Основні елементи ГПС:

- Гідроциліндр
- Дросель
- Запірна арматура
- Пневматичний або гідравлічний акумулятор
- Зворотні клапани

2. Вихідна система рівнянь

Для опису поведінки системи використовуються:

- Рівняння витрати через дросель
- Рівняння рівноваги сил на поршні
- Рівняння зміни тиску в камері циліндра

Приклад системи рівнянь:

1. Гідравлічне рівняння витрати:

$$Q = Cd A \sqrt{2/\rho * (Ps - Pc)}$$

2. Рівняння рівноваги сил на поршні:

$$M d^2x/dt^2 = A(Pc - Po) - Fc - kx$$

3. Рівняння зміни тиску в камері:

$$dP_c/dt = (\beta_e / V) * (Q - A dx/dt)$$

3. Лінеаризація системи

Лінеаризація – це процес наближення нелінійної системи до лінійної біля робочої точки (x_0, P_{c0}, Q_0) за допомогою розкладу в ряд Тейлора та збереження тільки перших похідних.

Приклад нелінійної залежності:

$$Q = Cd A \sqrt{(P_s - P_c)}$$

Лінеаризується за $P_c \approx P_{c0}$:

$$\Delta Q \approx - (Cd A / (2 \sqrt{(P_s - P_{c0})})) * \Delta P_c$$

Аналогічно лінеаризуються інші рівняння, і система зводиться до вигляду:

$$\dot{x} = A x + B u,$$

де x – вектор станів, u – вектор керуючих впливів, A , B – матриці коефіцієнтів.

Лінеаризація є важливим етапом моделювання ГПС, оскільки дозволяє застосовувати аналітичні методи аналізу та синтезу системи. Отримана лінійна модель використовується для побудови передатних функцій, визначення стійкості, настроювання регуляторів тощо.

2.2 Передавальні функції ланок ГПС

Передавальна функція – це математичне співвідношення між вхідними та вихідними сигналами динамічної системи у комплексній змінній s , яке отримується за допомогою перетворення Лапласа. Вона дозволяє описати динамічні властивості системи та дослідити її реакцію на різні вхідні впливи.

У гідروпневматичних слідкувальних системах (ГПС) передавальні функції застосовуються для моделювання окремих ланок системи – дроселя, гідропневматичної камери та виконавчого механізму (поршня) – і для аналізу поведінки системи в цілому.

Передавальні функції основних ланок ГПС:

1. Дросель (формула 2.1)

$$W_{др}(s) = \frac{Q(s)}{\Delta P(s)} = \frac{C_q}{1 + T_{др}s} \quad (2.1)$$

де: $Q(s)$ – об’ємна витрата робочої рідини,
 $\Delta P(s)$ – перепад тиску на дроселі,
 C_q – коефіцієнт витрати,
 $T_{др}$ – постійна часу дроселя.

2. Гідропневматична камера

Гідропневматична камера накопичує та підтримує тиск, згладжує коливання. Передавальна функція камери (формула 2.2):

$$W_{кам}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{K_p}{1 + T_p s} \quad (2.2)$$

де: $P(s)$ – тиск у камері,
 $Q(s)$ – об’ємна витрата робочої рідини,
 $K_p = \beta/K$ – коефіцієнт стисливості, де β – модуль об’ємної стисливості, V – об’єм камери,
 T_p – постійна часу камери.

3. Виконавчий механізм (поршень)

Виконавчий механізм перетворює тиск на механічне переміщення. Передавальна функція має вигляд (формула 2.3):

$$W_{порш}(s) = \frac{X(s)}{P(s)} = \frac{A}{Ms^2 + Bs} \quad (2.3)$$

де: $X(s)$ – переміщення поршня,
 $P(s)$ – тиск у камері,
 A – площа поршня,
 M – маса рухомої частини,
 B – коефіцієнт демпфування.

Гідропневматична система складається з послідовного з’єднання ланок: дроселя, камери, виконавчого механізму. Загальна передавальна функція (формула 2.4):

$$W_{ГПС}(s) = W_{др}(s) \cdot W_{кам}(s) \cdot W_{порш}(s) \quad (2.4)$$

Вона характеризує динамічну поведінку всієї системи.

Розглянемо структурну схему ГПС на рисунку 1. Вхідний перепад тиску ΔP подається на дросель, який регулює витрату Q . Далі робоча рідина надходить

у гідропневматичну камеру, де формується тиск P . Під дією цього тиску виконавчий механізм (поршень) здійснює переміщення X .

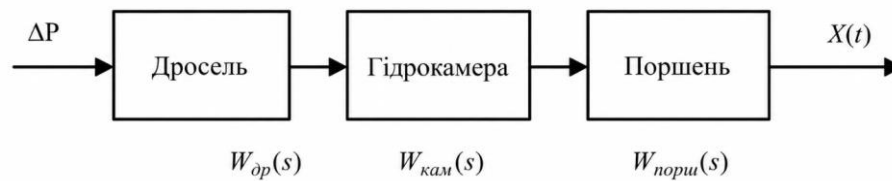


Рисунок 1 – Структурну схему ГПС

Передавальні функції є важливим інструментом для:

- ✓ Аналізу динамічних властивостей окремих ланок і системи загалом,
- ✓ Розробки автоматичних регуляторів положення виконавчих механізмів,
- ✓ Моделювання систем в програмних пакетах (MATLAB/Simulink),
- ✓ Оптимізації параметрів системи для покращення якості регулювання,
- ✓ Аналізу стійкості системи та її перехідних процесів.

2.3 Структурні схеми

Структурна схема –це графічне подання основних функціональних елементів системи та їх взаємозв'язків, що дає змогу наочно оцінити принцип роботи та логіку функціонування системи.

Основні елементи структурної схеми ГПС:

Вхідний сигнал –керуючий вплив, який задає бажану позицію або швидкість поршня.

Дросель –регулює витрату робочої рідини, створюючи перепад тиску, пропорційний вхідному сигналу.

Гідропневматична камера –накопичує та підтримує робочий тиск, забезпечує демпфування та згладжування коливань.

Виконавчий механізм (поршень) –перетворює тиск у механічне переміщення, яке є вихідним сигналом системи.

Зворотній зв'язок –механізм зворотного зв'язку від положення поршня, який забезпечує корекцію та стабілізацію роботи системи.

Принцип роботи системи за структурною схемою

Вхідний сигнал надходить на дросель, який змінює витрату рідини пропорційно сигналу.

Ця зміна витрати викликає зміну тиску в гідропневматичній камері.

Під впливом тиску поршень здійснює переміщення, яке є вихідним сигналом системи.

Положення поршня фіксується датчиком і подається у зворотний зв'язок, де порівнюється з вхідним сигналом.

Різниця між вхідним сигналом та зворотним зв'язком викликає корекцію сигналу на дроселі, що забезпечує точне слідування за задачею.

Базова структура слідувальної ГПС зображена на рисунку 2:

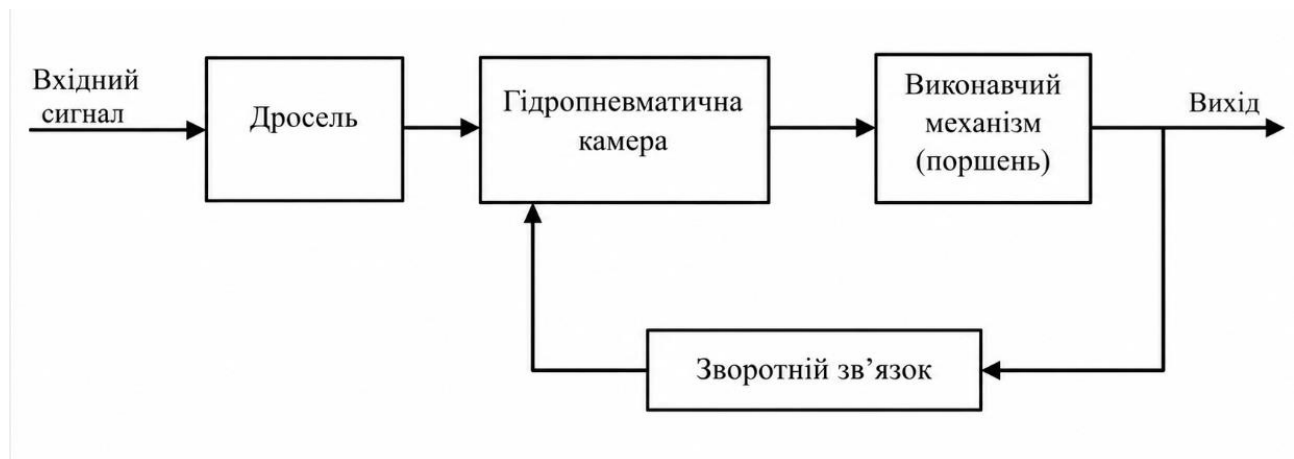


Рисунок 2 – Базова структура слідувальної ГПС

Базова структура слідувальної ГПС з детальним зворотним зв'язком і регулятором зображена на рисунку 3:



Рисунок 3 – Базова структура слідкувальної ГПС з детальним зворотним зв'язком

Базова структура слідкувальної ГПС з урахуванням зовнішніх впливів і шумів зображена на рисунку 4



Рисунок 4 – Базова структура слідкувальної ГПС з урахуванням зовнішніх впливів і шумів

Структурні схеми слідкувальної гідропневматичної системи є важливим інструментом для візуалізації та розуміння принципів її роботи. Вони відображають основні елементи системи –вхідний сигнал, регулюючі органи (дросель), гідропневматичну камеру, виконавчий механізм та систему зворотного зв'язку. Завдяки чіткій побудові структурних схем можна наочно простежити процес перетворення керуючого сигналу у механічне переміщення поршня з урахуванням корекції та стабілізації за допомогою зворотного зв'язку.

Застосування різних варіантів структурних схем дозволяє розглядати систему як з базових позицій, так і з урахуванням додаткових елементів – регуляторів, зовнішніх впливів і шумів, що підвищує точність моделювання та ефективність керування.

Загалом, структурні схеми слідкувальної ГПС є необхідною основою для подальшого аналізу, лінеаризації системи, розробки математичних моделей і створення ефективних методів управління, що забезпечують високу точність та надійність роботи системи у складних технічних умовах.

Питання для обговорення:

- 1. Що таке лінійна модель гідропневматичної системи та які її основні переваги порівняно з нелінійною моделлю?*
- 2. Які основні припущення використовуються при лінеаризації вихідної системи рівнянь слідкувальної ГПС?*
- 3. Яким чином лінеаризація системи впливає на точність моделювання її динамічних властивостей?*
- 4. Які основні компоненти включає структура лінійної моделі слідкувальної ГПС?*
- 5. Як роль зворотного зв'язку реалізована в лінійній моделі слідкувальної ГПС і чому вона важлива?*
- 6. Які методи розв'язання системи лінійних рівнянь застосовуються для аналізу динаміки ГПС?*
- 7. У яких випадках лінійна модель слідкувальної ГПС може бути недостатньо точною і що робити для покращення моделі?*

Тема 3. Динаміка слідкувальної гідравлічної системи (СГС) з чотирикромковим золотником.

План

3.1 Принципова схема, конструктивні особливості.

3.2 Вихідна система рівнянь і прийняті допущення.

3.1 Принципова схема, конструктивні особливості слідкувальної гідравлічної системи (СГС) з чотирикромковим золотником.

Слідкувальні гідравлічні системи (СГС) є важливими автоматичними системами управління, які забезпечують точне позиціонування виконавчих механізмів. Вони широко застосовуються у верстатах, робототехніці, авіації та інших галузях, де необхідне швидке та точне слідкування за задавальним сигналом.

Одна з найпоширеніших конструкцій таких систем – слідкувальна гідравлічна система з чотирикромковим золотником, яка відрізняється простотою конструкції і високою точністю управління.

Принципова схема слідкувальної гідравлічної системи з чотирикромковим золотником

Принципова схема системи складається з наступних основних компонентів:

Задаччик сигналу – задає необхідне положення або переміщення.

Порівняльний механізм (позиційний регулятор) – порівнює заданий сигнал із фактичним положенням виконавчого органу і формує управляючий вплив.

Чотирикромковий золотник – основний керуючий елемент, який регулює подачу робочої рідини в обидва порти гідроциліндра.

Гідроциліндр (виконавчий механізм) – виконує механічне переміщення у відповідь на вплив рідини.

Датчик зворотного зв'язку – фіксує фактичне положення поршня і передає інформацію до регулятора.

Гідросистема живлення – забезпечує подачу і підтримку необхідного тиску робочої рідини.

Розглянемо дві схеми принципову схему слідкувальної гідравлічної системи з чотирикромковим золотником та схему чотирикромкового золотника на рисунках 5 та 6

Опис роботи: Задавальник задає бажане положення. Позиційний регулятор порівнює фактичне та бажане положення і керує золотником. Золотник регулює потоки в гідроциліндр, викликаючи рух поршня. Датчик зворотного зв'язку передає інформацію про фактичне положення назад у регулятор.

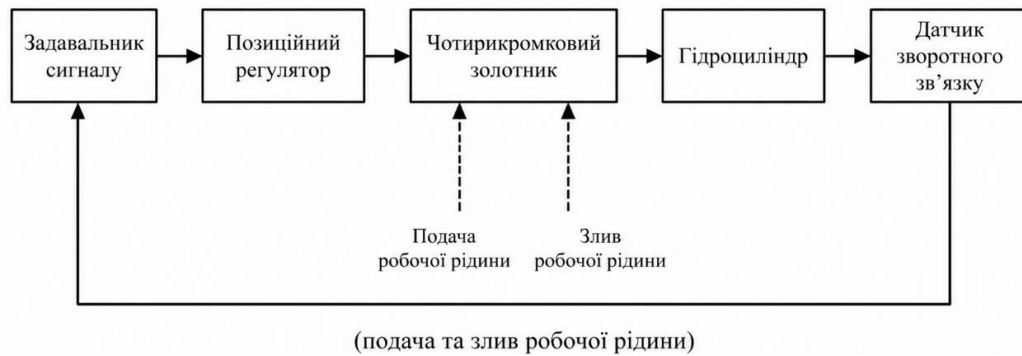


Рисунок 5 – Принципова схема слідкувальної гідравлічної системи.



Рисунок 6 – Схема чотирикромкового золотника

Опис роботи: Чотири кромки (відкриття) регулюють напрямок і обсяг потоку робочої рідини. Переміщення золотника змінює положення кромки відносно каналів системи, відкриваючи або закриваючи потоки.

Принципова схема слідкувальної гідравлічної системи з чотирикромковим золотником

Принципова схема системи складається з наступних основних компонентів:

- ✓ Задатчик сигналу – задає необхідне положення або переміщення.
- ✓ Порівняльний механізм (полоційний регулятор) – порівнює заданий сигнал із фактичним положенням виконавчого органу і формує управляючий вплив.
- ✓ Чотирикромковий золотник – основний керуючий елемент, який регулює подачу робочої рідини в обидва порти гідроциліндра.
- ✓ Гідроциліндр (виконавчий механізм) – виконує механічне переміщення у відповідь на вплив рідини.
- ✓ Датчик зворотного зв'язку – фіксує фактичне положення поршня і передає інформацію до регулятора.

✓ Гідросистема живлення – забезпечує подачу і підтримку необхідного тиску робочої рідини.

Чотирикромковий золотник – це циліндричний або призматичний клапан, який має чотири отвори (кромки), що регулюють напрямок і обсяг потоку робочої рідини. Основні конструктивні особливості:

✓ Кількість кромок. Чотири кромки розташовані симетрично, що дозволяє точно регулювати потоки у двох напрямках.

✓ Тип переміщення. Золотник переміщується у напрямку осі, відкриваючи або закриваючи отвори, що з'єднують камери гідроциліндра з напором або зливом.

✓ Герметичність. Для запобігання витокам робочої рідини використовується точна обробка поверхонь та ущільнення.

✓ Матеріали. Золотники виготовляють із міцних сталей або бронзи, що забезпечує довговічність та стійкість до зношування.

✓ Привід. Переміщення золотника здійснюється під впливом регулюючого сигналу від позиційного регулятора.

При надходженні вхідного сигналу від задавальника, позиційний регулятор формує керуючий сигнал, який переміщує золотник.

Залежно від положення золотника, робоча рідина подається у відповідну камеру гідроциліндра, викликаючи переміщення поршня в необхідному напрямку. Поршень переміщується до позиції, що відповідає вхідному сигналу. Датчик зворотного зв'язку фіксує фактичне положення поршня і подає сигнал у регулятор. Якщо положення поршня співпадає із заданим, золотник займає нейтральне положення, припиняючи рух поршня. В разі розбіжності позицій регулятор коригує положення золотника для досягнення точного слідування.

Переваги системи з чотирикромковим золотником

- Висока точність керування завдяки чіткій регуляції потоку.
- Простота конструкції та надійність.
- Швидка реакція на зміни вхідного сигналу.
- Можливість роботи у двох напрямках.

Недоліки системи з чотирикромковим золотником

- Потребує високої точності виготовлення та налаштування.
- Можливі втрати тиску через тертя золотника.
- Вразливість до забруднень робочої рідини.

СГС з чотирикромковим золотником широко використовуються в системах автоматичного управління положенням у промислових гідравлічних

приводах, системах автоматизації верстатів, підйомних механізмах, авіаційній техніці та робототехніці.

Слідкувальна гідравлічна система з чотирикромковим золотником є ефективним засобом автоматичного управління, що забезпечує точне позиціонування виконавчих органів. Її конструктивні особливості дозволяють досягти високої точності та швидкості реакції, що є важливим у багатьох галузях сучасної техніки.

3.2 Вихідна система рівнянь і прийняті допущення слідкувальної гідравлічної системи (СГС) з чотирикромковим золотником.

Для математичного моделювання та аналізу динаміки слідкувальної гідравлічної системи (СГС) з чотирикромковим золотником необхідно сформулювати вихідну систему рівнянь, що описують її роботу. Вони відображають взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами, а також враховують особливості гідравлічного приводу.

Для спрощення подальшого аналізу роблять низку допущень, які дозволяють лінеаризувати рівняння і отримати прийнятну математичну модель.

Основні компоненти моделі наступні:

- ✓ Золотник, що керує подачею робочої рідини.
- ✓ Гідроциліндр, у якому рух поршня здійснюється під впливом тиску рідини.
- ✓ Потоки рідини у каналах системи.
- ✓ Динаміка руху поршня під впливом сил, що виникають у гідроциліндрі.
- ✓ Датчик зворотного зв'язку, який формує сигнал для регулювання положення золотника.

Для спрощення математичного опису системи приймаються такі допущення:

- ✓ Ідеальність робочої рідини. Робоча рідина є стисненою, але в'язкість і теплові втрати не враховуються.
- ✓ Лінійність витрат через кромки золотника. Потік робочої рідини через кромки пропорційний площі відкриття та різниці тисків.
- ✓ Мала амплітуда коливань. Положення золотника і поршня коливаються близько до робочої точки, що дозволяє лінеаризувати рівняння.
- ✓ Ідеальна герметичність. Відсутність витоків робочої рідини у системі.

✓ Постійний тиск живлення. Тиск у магістралі подачі робочої рідини вважається сталим.

✓ Механічні втрати в приводі і тертя поршня враховуються як лінійні сили опору.

Розглянемо рівняння руху поршня гідроциліндра. Динаміка руху поршня описується другим законом Ньютона (формула 3.1):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = A(p_1 - p_2) - F_{\text{тертя}} - F_{\text{навантаження}} \quad (3.1)$$

де:

- m – маса рухомих частин,
- x – положення поршня,
- A – площа поршня,
- p_1, p_2 – тиски у робочих камерах гідроциліндра,
- $F_{\text{тертя}}$ – сила тертя,
- $F_{\text{навантаження}}$ – зовнішня сила навантаження.

Розглянемо рівняння потоку рідини через золотник

Потоки через кромки золотника пропорційні площі їх відкриття та різниці тисків (формула 3.2):

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_d w (x_v + x_0) \sqrt{2/\rho(P_s - p_1)} \\ Q_2 &= C_d w (x_0 - x_v) \sqrt{2/\rho(p_2 - P_t)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

де:

- Q_1, Q_2 – потоки робочої рідини у відповідні камери,
- C_e – коефіцієнт витрати,
- w – ширина кромки золотника,
- x_v – положення золотника,
- x_0 – розмір зазору при нейтральному положенні,
- P_s – тиск живлення,
- P_t – тиск зливу (атмосферний),
- ρ – густина рідини.

Розглянемо рівняння зв'язку між потоком і швидкістю поршня

Об'єм робочої камери змінюється залежно від руху поршня (формула 3.3):

$$Q = A \frac{dx}{dt} + V \frac{dp}{dt} / \beta \quad (3.3)$$

- Q – об'ємний потік,
- V – об'єм камери,
- β – коефіцієнт стисненості рідини.

Розглянемо лінеаризація рівнянь

З метою спрощення аналізу рівняння лінеаризуються у робочій точці ($x=0, p_1=p_2=p_0$) за допомогою розкладу в ряд Тейлора до перших членів.

В результаті отримаємо лінійні співвідношення, які дозволяють моделювати систему як лінійний динамічний об'єкт.

Вихідна система рівнянь і допущення є основою для побудови математичної моделі слідкувальної гідравлічної системи з чотирикромковим золотником. Лінеаризація дозволяє аналізувати динаміку системи за допомогою методів теорії управління і розробляти ефективні системи автоматичного керування.

Питання для обговорення:

1. *Які основні фактори впливають на динаміку слідкувальної гідравлічної системи з чотирикромковим золотником?*
2. *Як змінюється рух поршня у гідроциліндрі під впливом тисків у робочих камерах?*
3. *Які допущення приймаються для спрощення моделювання динаміки СГС?*
4. *Як впливає положення золотника на швидкість та напрямок руху поршня?*
5. *Яким чином лінеаризація рівнянь допомагає аналізувати динаміку системи?*
6. *Як враховуються сили тертя і зовнішні навантаження в динамічній моделі СГС?*
7. *Які методи управління застосовуються для забезпечення стабільної роботи слідкувальної гідравлічної системи?*

Тема 4. Лінійна модель

План

4.1 Лінійна модель, передавальні функції, структурні схеми.

4.2 Частота незатухаючих коливань, коефіцієнт демпфірування, коефіцієнт підсилення за швидкістю.

4.1 Лінійна модель, передавальні функції, структурні схеми.

Лінійна модель – це математичне представлення динамічної системи, в якому вхідні та вихідні параметри пов'язані лінійними рівняннями або лінійними операторами. Вона описує поведінку системи в області малих відхилень від робочої точки.

Лінійність визначає:

- Принцип суперпозиції виконується (відповідь на суму сигналів дорівнює сумі відповідей на кожен сигнал окремо).
- Відповідь системи пропорційна вхідному сигналу.

Лінійна модель полегшує аналіз та проектування систем автоматичного керування завдяки застосуванню методів лінійної алгебри та теорії керування.

Передавальна функція – це математичне відношення між комплексним представленням вхідного сигналу та вихідного сигналу системи в частотній або операторній області.

Формально, передавальна функція $W(s)$ визначається як (формула 4.1):

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (4.1)$$

де $Y(s)$ – образ Лапласа вихідного сигналу

$U(s)$ – образ Лапласа вхідного сигналу

s – комплексна змінна Лапласа

Основні властивості передавальних функцій

✓ Передавальна функція – раціональна функція від s , тобто відношення поліномів у s .

✓ Нулі передавальної функції – значення s , при яких $W(s) = 0$.

✓ Полюси передавальної функції – значення s , при яких $W(s) \rightarrow \infty$.

✓ Розташування полюсів визначає стійкість та динамічні властивості системи.

Структурна схема – це графічне зображення логічної структури системи автоматичного керування, що показує взаємозв'язки між окремими елементами (блоками) системи.

Основні елементи структурної схеми:

- Блоки (елементи системи) – позначаються прямокутниками і відповідають за певну функцію (наприклад, передавальна функція).
- Стрілки – показують напрямок сигналу.
- Суми – місця сумування сигналів, позначаються колами з плюсами та мінусами.

Розглянемо приклади систем:

1. Проста лінійна система з одним блоком

$$U(s) \text{ ---> } [W(s)] \text{ ---> } Y(s)$$

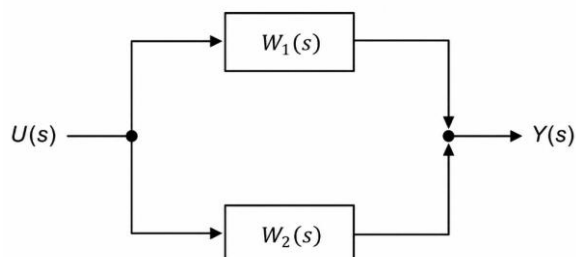
- $U(s)$ – вхідний сигнал
 - $W(s)$ – передавальна функція
 - $Y(s)$ – вихідний сигнал
2. Послідовне з'єднання двох блоків

$$U(s) \text{ ---> } [W_1(s)] \text{ ---> } [W_2(s)] \text{ ---> } Y(s)$$

Передавальна функція всієї системи (формула 4.2):

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s) \tag{4.2}$$

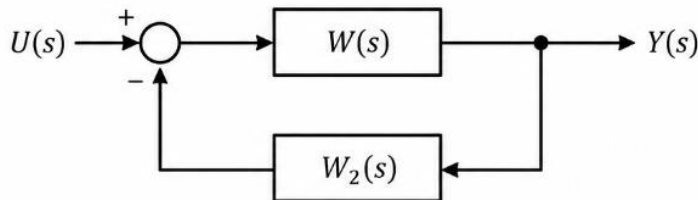
3. Паралельне з'єднання двох блоків:



Передавальна функція всієї системи(формула 4.3):

$$W(s) = W_1(s) + W_2(s) \quad (4.3)$$

4. Зворотний зв'язок



Передавальна функція замкненої системи(формула 4.4):

$$W(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} \quad (4.4)$$

Значення лінійних моделей в аналізі СГС

Лінійна модель слідкувальної гідравлічної системи дає змогу:

- ✓ Аналізувати динамічні властивості системи.
- ✓ Проектувати системи керування.
- ✓ Прогнозувати поведінку системи при зміні вхідних впливів.
- ✓ Спростувати розрахунки завдяки використанню передавальних функцій і структурних схем.

4.2 Частота незатухаючих коливань, коефіцієнт демпфірування, коефіцієнт підсилення за швидкістю.

У процесі аналізу лінійної моделі слідкувальної гідропневматичної системи важливе значення мають динамічні характеристики другого порядку, які дозволяють оцінити реакцію системи на змінні зовнішні впливи.

Частота незатухаючих коливань ω_0 це власна частота системи, при якій вона здійснює коливання за відсутності зовнішнього збурення та демпфування. Вона характеризує інерційні властивості системи та визначається за формулою(формула 4.5):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (4.5)$$

де K – жорсткість (коефіцієнт пружності),

M – приведена маса (інерційність системи).

Коефіцієнт демпфірування ζ це безрозмірна величина, яка характеризує здатність системи пригнічувати коливання. Значення ζ визначає характер реакції системи:

- ✓ $\zeta=0$ – чисто коливальна система (незатухаючі коливання),
- ✓ $0<\zeta<1$ – коливальна система з поступовим затуханням (недемпфована або слабо демпфована),
- ✓ $\zeta=1$ – критичне демпфування,
- ✓ $\zeta>1$ – перенадмірне демпфування.

Коефіцієнт демпфірування визначається(формула 4.6):

$$\zeta = \frac{B}{2\sqrt{KM}} \quad (4.6)$$

де B – коефіцієнт в'язкого тертя (демпфування),

K – жорсткість (коефіцієнт пружності),

M – приведена маса (інерційність системи).

Коефіцієнт підсилення за швидкістю K_v це показник того, наскільки точно система здатна відстежувати зміну вхідного сигналу зі швидкістю. Його використовують при аналізі усталених похибок при лінійному зростанні вхідного впливу.

Для систем другого порядку з одиничним зворотним зв'язком (формула 4.7):

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sW(s) \quad (4.7)$$

$W(s)$ – передавальна функція системи.

Для типових систем із передавальною функцією виду (формула 4.8):

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (4.8)$$

Коефіцієнт підсилення за швидкістю розраховується за формула 4.9:

$$K_v = \frac{K}{T} \quad (4.9)$$

Чим більший K_v , тим менша усталена похибка при дії лінійного вхідного сигналу.

Знання частоти незатухаючих коливань, коефіцієнта демпфірування та коефіцієнта підсилення за швидкістю дозволяє здійснити повноцінний динамічний аналіз роботи слідкувальної гідропневматичної системи. Розглянуті параметри є основою для:

- ✓ забезпечення стабільної роботи системи,
- ✓ усунення автоколивань,
- ✓ коригування точності та швидкодії системи.

Питання для обговорення:

1. *Що таке лінійна модель слідкувальної гідропневматичної системи і для чого вона використовується?*
2. *Які основні складові входять у вихідну систему рівнянь слідкувальної ГПС?*
3. *Які припущення та допущення приймаються при лінеаризації вихідної системи рівнянь?*
4. *Що таке передавальна функція і як вона відображає поведінку гідропневматичної системи?*
5. *Які основні типи структурних схем використовуються для моделювання ГПС?*
6. *Як визначають частоту незатухаючих коливань та коефіцієнт демпфірування в лінійній моделі ГПС?*
7. *Яким чином коефіцієнт підсилення за швидкістю впливає на якість слідкування системи?*

Тема 5. Нелінійна модель

План

5.1 *Нелінійна модель, структурно-функціональні схеми елементів системи і системи в цілому.*

5.2 *Особливості побудови структурно-функціональної схеми рівняння руху виконавчого органу при пасивному навантаженні.*

5.1 Нелінійна модель, структурно-функціональні схеми елементів системи і системи в цілому.

У сучасних гідропневматичних системах (ГПС) моделювання поведінки системи часто вимагає врахування нелінійних властивостей окремих елементів та взаємодій між ними. Нелінійні моделі допомагають більш точно відтворити

реальні процеси, які не підкоряються лінійним законам, і забезпечити більш коректний аналіз динаміки системи.

Нелінійна модель – це математичне представлення системи, у якому зв'язки між вхідними та вихідними параметрами не є лінійними. Це означає, що зміна виходу не пропорційна зміні входу, а залежить від поточного стану системи, її параметрів та зовнішніх умов.

У контексті гідропневматичних систем це може проявлятися у вигляді:

- ✓ Нелінійної залежності між витратою і перепадом тиску через клапани,
- ✓ В'язких нелінійних опорів,
- ✓ Нелінійного тертя у рухомих частинах,
- ✓ Обмежень руху золотників або поршнів (насичення),
- ✓ Зміни параметрів системи у процесі роботи (температура, тиск).

Структурно-функціональна схема – це графічне подання окремих елементів системи та їх взаємозв'язків, яке відображає:

- ✓ Функціональні ролі елементів,
- ✓ Потоки сигналів та енергії,
- ✓ Взаємодію між підсистемами.

Основні елементи слідкувальної гідропневматичної системи:

1. Джерело енергії (насос, компресор) – забезпечує подачу робочої рідини або газу.
2. Регулюючі елементи (золотники, клапани) – керують потоком робочої речовини.
3. Виконавчі механізми (поршні, гідроциліндри) – перетворюють гідравлічну енергію у механічну роботу.
4. Датчики та зворотний зв'язок – вимірюють поточний стан системи і передають інформацію для регулювання.
5. Системи управління – приймають рішення та формують керуючі сигнали на основі інформації зі зворотного зв'язку.

Нелінійна система у загальному вигляді можна представити як послідовність блоків:

- ✓ Вхідний сигнал $x(t)$ (задана траєкторія або команда),
- ✓ Блок керування (електроніка, ПЛК, гідравлічний контролер),
- ✓ Нелінійні регулюючі елементи,
- ✓ Виконавчий механізм,
- ✓ Об'єкт керування (механізм, що слідкує за командою),

- ✓ Датчики зворотного зв'язку,
- ✓ Порівнювач сигналів (помилка слідкування),
- ✓ Повернення інформації до блоку керування.

Приклад структурно-функціональна схема нелінійної слідкувальної ГПС наведена на малюнку 5.1

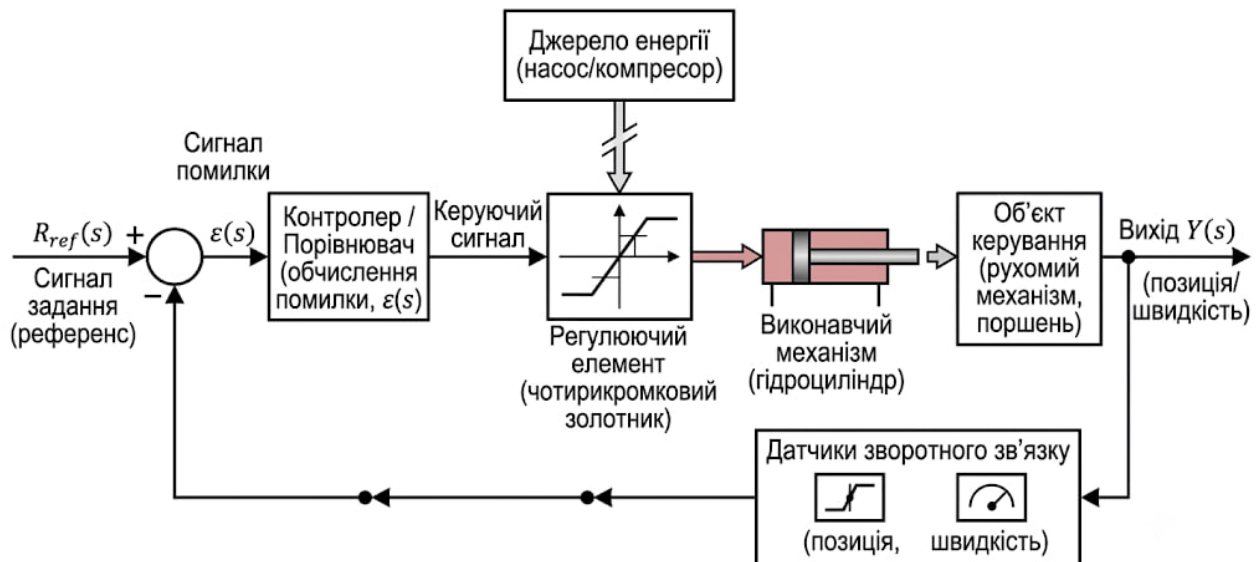


Рисунок 5.1 – Структурно-функціональна схема нелінійної слідкувальної ГПС

Цикл формує замкнений контур керування, у якому нелінійні елементи можуть суттєво впливати на стабільність і точність роботи.

Особливості моделювання нелінійних систем наступні:

- ✓ Часто використовують диференціальні рівняння з нелійними членами, операторні методи, методи імітаційного моделювання.
- ✓ Для спрощення аналізу окремі ділянки нелінійної характеристики можуть апроксимуватися лінійними моделями в робочій точці.
- ✓ Нелінійні моделі потребують більш потужних методів розв'язання, часто застосовують чисельне моделювання.

Нелінійні моделі і структурно-функціональні схеми дозволяють більш глибоко аналізувати складні поведінкові характеристики гідропневматичних систем. Вони дають змогу передбачити реакції на різноманітні умови роботи і спроектувати ефективні системи управління, враховуючи реальні фізичні обмеження та особливості елементів.

5.2 Особливості побудови структурно-функціональної схеми рівняння руху виконавчого органу при пасивному навантаженні .

При дослідженні динаміки слідкувальних гідравлічних систем (СГС) з чотирикромковим золотником важливим етапом є побудова структурно-функціональної схеми, яка відображає взаємозв'язки між основними елементами системи. Особлива увага приділяється моделюванню виконавчого органу (наприклад, гідроциліндра) під дією пасивного навантаження.

Розглянемо особливості побудови структурно-функціональної схеми.

1. Визначення основних елементів системи:

- ✓ Джерело енергії (насос).
- ✓ Регулюючий орган (чотирикромковий золотник).
- ✓ Виконавчий орган (гідроциліндр або інший механізм).
- ✓ Пасивне навантаження (зовнішня сила або момент, що протидіє руху).

- ✓ Датчики зворотного зв'язку (позиції, швидкості).
- ✓ Контролер (порівнювач, регулятор).

2. Зв'язки між елементами:

- ✓ Керуючий сигнал від контролера подається на регулюючий орган.
- ✓ Регулюючий орган управляє подачею робочої рідини до виконавчого органу.

- ✓ Виконавчий орган здійснює рух, протидіє пасивному навантаженню.

✓ Положення або швидкість виконавчого органу контролюються датчиками і повертаються в контролер для формування сигналу керування.

3. Врахування пасивного навантаження:

✓ Пасивне навантаження впливає як додаткова зовнішня сила або момент, що створює опір руху виконавчого органу.

✓ У моделі це відображається як додатковий член у рівнянні руху, який зменшує прискорення чи швидкість.

Розглянемо рівняння руху виконавчого органу, наприклад, гідроциліндра, як класичне динамічне рівняння:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_u - F_p \quad (5.1)$$

де: m – маса рухомої частини виконавчого органу,

b – коефіцієнт демпфування (враховує опір руху),

k – коефіцієнт жорсткості пружного елемента (якщо є),

x – переміщення виконавчого органу,

F_u – сила, що створюється виконавчим органом (гідроциліндром),

F_p – пасивне навантаження, що протидіє руху.

Розглянемо складові рівняння:

– Інерційна складова $m \cdot (d^2x/dt^2)$ описує прискорення рухомої частини.

– Демпфіруюча складова $b \cdot (dx/dt)$ відповідає силам тертя або гідродинамічного опору.

– Пружна складова k_x враховує пружність механічних елементів (якщо вона присутня).

– Активна сила F_u формується в результаті подачі робочої рідини до виконавчого органу, керованого золотником.

– Пасивне навантаження F_p – зовнішня сила, яка діє проти руху, наприклад, вагове навантаження або опір середовища.

Побудова структурно-функціональної схеми слідкувальної гідравлічної системи з урахуванням пасивного навантаження є важливим етапом для точного моделювання її динаміки. Вона дозволяє відобразити взаємозв'язки між джерелом енергії, регулюючим органом, виконавчим механізмом, пасивним навантаженням, датчиками зворотного зв'язку та контролером. Врахування пасивного навантаження у вигляді зовнішньої сили, що протидіє руху виконавчого органу, дозволяє більш реалістично описати поведінку системи. Рівняння руху виконавчого органу, що включає інерційні, демпфіруючі, пружні складові та пасивне навантаження, дає змогу врахувати всі важливі фізичні впливи і сприяє точнішому прогнозуванню динаміки системи. Це дозволяє оптимізувати керування, підвищити стабільність і точність роботи слідкувальної гідравлічної системи в реальних умовах експлуатації.

Питання для обговорення

1. *Які основні елементи слідкувальної гідравлічної системи необхідно враховувати при побудові структурно-функціональної схеми?*

2. *Як пасивне навантаження впливає на динамічні характеристики виконавчого органу?*

3. *Які фізичні процеси відображаються у рівнянні руху виконавчого органу з пасивним навантаженням?*

4. *Як врахування демпфіруючих і пружних сил покращує точність моделі слідкувальної гідравлічної системи?*

5. *Яким чином структурно-функціональна схема допомагає у розробці ефективних алгоритмів керування гідравлічною системою?*

Тема 6. Визначення динамічних процесів у системі шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ

План

6.1 Порівняння результатів моделювання на основі лінійної моделі СГС.

6.2 Порівняння результатів моделювання на основі нелінійної моделі СГС.

6.1 Порівняння результатів моделювання на основі лінійної моделі СГС.

Після побудови й лінеаризації математичної моделі слідкувальної гідравлічної системи (СГС) на основі передавальних функцій та структурних схем наступним кроком є перевірка її адекватності шляхом моделювання і порівняння з еталонними (експериментальними чи нелінійними) результатами. Це дозволяє оцінити, наскільки добре лінійна модель описує динаміку реальної системи в умовах малих відхилень.

Розглянемо деякі методи моделювання:

1. Часовий аналіз – подається ступінь відгуку на одиничний кроковий вхід (step response) або імпульс (impulse response).

2. Частотний аналіз – будуються характеристики Bode (амплітудо- та фазо-частотні характеристики) та N_{Nyquist} , що показують поведінку у різних діапазонах частот.

3. Відгук на траєкторію – моделюється слідкування за гладкою часовою траєкторією (наприклад, синусоїдою або лінійним нахилом).

Ключові параметри для порівняння цих методів були обрані наступні:

✓ Час встановлення t_{st} – час, за який вихідний сигнал $X(t)$ потрапляє в заданий інтервал близько до нового встановленого значення.

✓ Перерегулювання M_p – максимальне перевищення вихідного сигналу над заданим значенням (у % від амплітуди крокового впливу).

✓ Час затухання коливань – час, за який нерегульовані коливання спадають у прийнятний інтервал.

✓ Статична помилка слідкування – різниця між кінцевим значенням виходу лінійної моделі та еталонного.

✓ Частотна чутливість – невідповідність амплітудо- та фазочастотних характеристик моделі й експерименту.

Приклад порівняння показників наведено в таблиці 6.1

Таблиця 6.1 – Приклад порівняння показників

Показник	Лінійна модель	Еталонні дані (нелінійна/експеримент)	Різниця (Δ)
Час встановлення, с	0.8	0.75	+0.05 (6.7 %)
Перерегулювання, %	12	15	-3 (абс.) (-20 %)
Статична помилка, %	1.2	0.8	+0.4 (0.4 %)
Амплітудне відхилення	-	-	див. Bode-графіки

В цьому прикладі видно, що лінійна модель трохи занижує перерегулювання і дає більшу статичну помилку, але загалом добре відтворює час встановлення.

Також, лінійна модель СГС проявляє високу адекватність при малих відхиленнях від робочої точки: час встановлення та амплітудні характеристики в таких умовах дуже близькі до експериментальних даних, що підтверджує її корисність для початкового етапу проектування системи. По-друге, у міру збільшення амплітуди вхідного сигналу або навантаження починають проявлятися нелінійні ефекти – зміна коефіцієнта витрати дроселя, насичення золотника, турбулентні втрати – через що модель занижує перерегулювання і збільшує статичну похибку. По-третє, для покращення відповідності лінійної моделі реальній системі рекомендується застосовувати багатоточкову лінеаризацію та доповнювати модель додатковими аперіодичними або частотними коректорами, що дозволяє врахувати зміну динамічних властивостей у різних режимах. По-четверте, систематичне порівняння результатів моделювання з експериментом є критично важливим кроком валідації: воно виявляє ділянки найбільшої невідповідності, сприяє вдосконаленню моделі й гарантує необхідну точність і стабільність роботи СГС в реальних умовах експлуатації.

Порівняння результатів моделювання на основі лінійної моделі СГС з еталонними даними є обов'язковим етапом валідації моделі. Отримані розбіжності допомагають виявити ділянки, де лінійна модель недостатньо точна, і вчасно скоригувати її або доповнити коректорними елементами. Таким чином, грамотне порівняння дозволяє забезпечити потрібну точність та надійність системи управління в реальних умовах експлуатації.

6.2 Порівняння результатів моделювання на основі нелінійної моделі СГС.

У ході розробки та валідації моделі слідкувальної гідравлічної системи (СГС) неминуче постає питання, наскільки адекватно нелінійна модель відтворює реальну динаміку системи. На відміну від лінійної моделі, яка обмежена малими відхиленнями, нелінійна модель здатна врахувати такі ефекти, як залежність витрати від перепаду тиску у квадраті, зони застою золотника, насичення клапанів та турбулентні втрати.

1. Розглянемо такі методи моделювання:

У разі нелінійної моделі ми теж використовуємо ті самі підходи, що і у попередньому питанні:

1. Часовий аналіз – реакція на крокове й імпульсне збурення;
2. Частотний аналіз – на практиці для сильно нелінійних систем частотний підхід обмежений, але можна виконати локальний FFT-відгук на синусоїду;
3. Симуляція траєкторії – моделювання слідування за складними, нетиповими для лінійної моделі сигналами (різкими прискореннями, стрибками навантаження).

При порівнянні результатів нелінійної симуляції з даними досліду чи із реальним прототипом звертають увагу на:

- ✓ Нелінійність перерегулювання – форма «пікових» коливань може бути асиметричною або подвійною, що лінійна модель ніколи не відтворить.
- ✓ Затримки й ефекти зони нечутливості золотника – нелінійна модель покаже «мертву зону», в якій зміна вхідного сигналу не призводить до руху.
- ✓ Насичення – при великих зрушеннях золотника чи гідроциліндра вихідна швидкість та прискорення сповільнюються порівняно з лінійною передбачуваністю.
- ✓ Відгук на динамічні навантаження – коли навантаження швидко змінюється, нелінійна модель відображає затримки в перетворенні тиску на силу, що лінійна «забуває» враховувати.

Розглянемо приклад.

3. Приклад порівняння. Змоделюємо реакцію СГС на ступінчасте зміщення на 10 мм із початковою швидкістю 50 мм/с при змінному навантаженні 0–200 Н.

✓ Нелінійна модель показує затримку вхідного сигналу на 20–25 мс, подвійне перерегулювання (спочатку швидкий ривок, потім корекція), а потім плавне загасання.

✓ Лінійна модель при тих же параметрах дає єдине перерегулювання та значно меншу затримку.

✓ Експеримент підтверджує затримку ≈ 22 мс і двофазний характер перерегулювання – отже, нелінійна модель ближча до реальності.

Проаналізуємо результати:

✓ Нелінійна модель краще відтворює ефекти зони нечутливості та насичення, критичні для точних слідкувальних систем.

✓ При малій амплітуді коливань обидві моделі працюють схоже, але при великих відхиленнях або швидких змінах тільки нелінійна модель гарантує коректний прогноз.

✓ Основна ціна – вищі вимоги до обчислювальних ресурсів і складніша параметризація (необхідність точно знати закони зміни коефіцієнтів витрати та тертя).

Нелінійна модель слідкувальної ГПС суттєво підвищує точність моделювання в широкому діапазоні робочих режимів, враховуючи зони нечутливості, насичення та турбулентні втрати. Проте для простого та швидкого попереднього аналізу залишається актуальною лінійна модель. Валідація нелінійної моделі за допомогою порівняння з експериментальними даними є обов'язковою перед впровадженням у реальних приводах.

Питання для обговорення

1. *Які основні етапи підготовки математичної моделі системи для імітаційного моделювання на ЕОМ?*

2. *Які критерії точності та достовірності результатів обчислювального експерименту слід використовувати при аналізі динамічних процесів?*

3. *Як впливають вибір кроку інтегрування та метод розв'язання диференціальних рівнянь на якість і стабільність моделювання?*

4. *Які підходи до валідації моделі (порівняння з експериментом або аналітичними рішеннями) можна застосувати для підтвердження адекватності динамічних процесів?*

5. *Як аналіз чутливості параметрів моделі допомагає виявити ключові фактори, що визначають поведінку системи під час динамічних переходів?*

Тема 7. Динаміка програмних ГПС з дросельним управлінням.

План

7.1 Динаміка програмних ГПС з дросельним управлінням, що спроектовані для обладнання з ЧПУ.

7.2 Галузь застосування, класифікація, особливості ГПС.

7.3 Конструкція двокаскадних гідропідсилювачів типу "сопло-заслінка" - золотник з електроуправлінням, електрогідропідсилювач (ЕГП).

7.1 Динаміка програмних ГПС з дросельним управлінням, що спроектовані для обладнання з ЧПУ.

Гідропневматичні системи (ГПС) із дросельним управлінням застосовуються в приводах ЧПУ-обладнання для точного керування переміщенням виконавчих органів. такі системи забезпечують плавність ходу, регульовану швидкість, стабільність процесу обробки деталей і високу точність позиціонування.

Основні елементи конструкції це гідроциліндр або гідромотор, дросельний регулятор витрати, золотниковий розподільник, вимірювальні та зворотні зв'язки (давачі положення, швидкості) та електрогідравлічний підсилювач або сервоклапан.

Системи з дросельним управлінням мають наступні особливості:

- ✓ Нелінійність характеристики витрати через дросель, що залежить від перепаду тиску.
- ✓ Затухаючі коливання при зміні сигналу керування, особливо на початку руху або при різких змінах навантаження.
- ✓ Залежність жорсткості приводу від параметрів гідросистеми та розмірів дроселя.
- ✓ Затримки в керуванні, спричинені інерцією рідини та виконавчих органів.

Для аналізу динаміки будується математична модель, що включає:

Рівняння витрати через дросель наведені в формулі 7.1

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (7.1)$$

де C_d – коефіцієнт витрати, A – площа перерізу, Δp – перепад тиску.

Рівняння сили, що діє на поршень наведено в формулі 7.2:

$$F = A_1 p_1 - A_2 p_2 - F_{\text{спротиву}} \quad (7.2)$$

Рівняння руху виконавчого органу (формула 7.3):

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F \quad (7.3)$$

На основі цих рівнянь будують модель у вигляді передавальних функцій або структурно-логічної схеми, що дозволяє виконати імітаційне моделювання в MATLAB/Simulink чи інших САПР-середовищах.

Для обладнання з числовим програмним управлінням важливими є такі вимоги як: швидка реакція системи на команду, малі перехідні процеси, відсутність пульсацій і вібрацій, точне дотримання програмної траєкторії.

Наведемо спрощену структурно-функціональну схему гідросистеми з дросельним керуванням (рисунок 7.1):

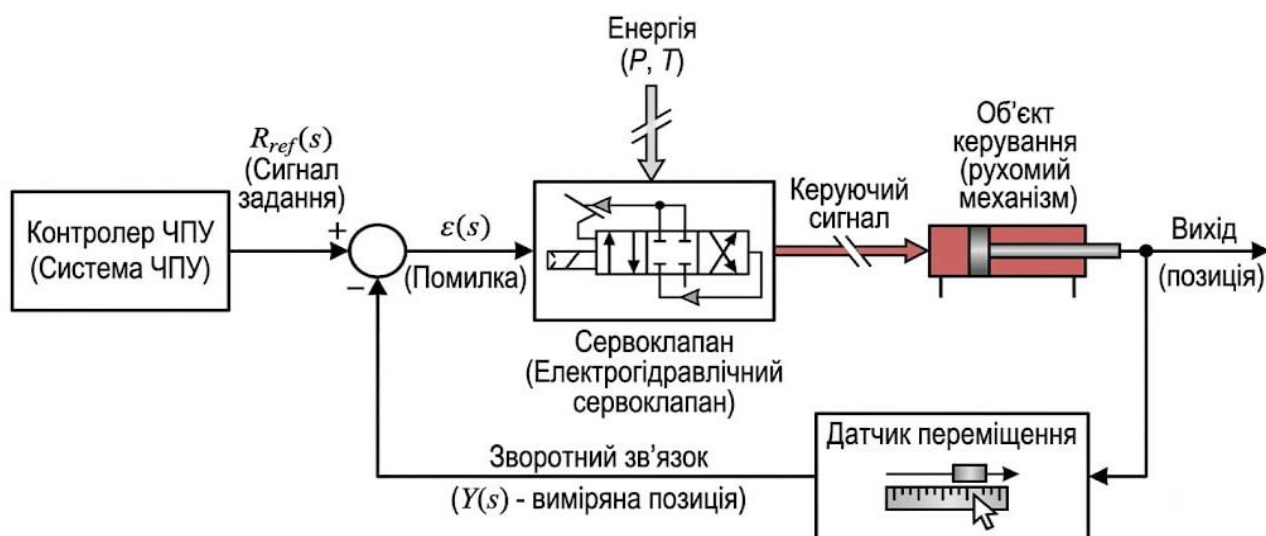


Рисунок 7.1 – Структурно-функціональну схему гідросистеми з дросельним керуванням

ГПС із дросельним управлінням для обладнання з ЧПУ – це ефективне рішення для автоматизації високоточних переміщень. Вони забезпечують гнучке керування за умови правильної побудови моделі та врахування динамічних ефектів. Застосування адекватного моделювання дозволяє підвищити ефективність, зменшити коливання та втрати енергії..

7.2 Галузь застосування, класифікація, особливості ГПС.

Гідроприводні системи (ГПС) є важливою складовою сучасного автоматизованого обладнання, завдяки своїй високій надійності, компактності, потужності та точності регулювання. Основні галузі, де використовуються ГПС:

- ✓ Машинобудування – металорізальні верстати, пресове обладнання, пакувальні машини.
- ✓ Авіація та аерокосмічна техніка – керування закрилками, шасі, стабілізаторами.
- ✓ Сільське господарство – трактори, комбайни, гідроманіпулятори.
- ✓ Будівництво – екскаватори, підйомні крани, бульдозери.
- ✓ Морський транспорт – керування рулевими механізмами, лебідками.
- ✓ Енергетика – регулювання турбін, клапанів, шлюзів.
- ✓ Автомобілебудування – гідропідсилювачі керма, гідропідвіски.

Завдяки універсальності, ГПС ефективні як у стаціонарних установках, так і в мобільних машинах.

ГПС можна класифікуються за такими ознаками:

1. За видом енергії та принципом дії:
 - Гідравлічні (рідина під тиском)
 - Пневматичні (стиснене повітря)
 - Гідропневматичні (комбіновані)
2. За способом керування:
 - Ручне керування
 - Автоматичне керування
 - Програмне (електронне) керування
3. За характером руху вихідної ланки:
 - Системи з поступальним рухом
 - Системи з обертальним рухом
4. За принципом регулювання витрати:
 - Дросельні
 - Об'ємні (регулювання потоку зміною робочого об'єму)
 - Комбіновані
5. За призначенням:
 - Силкові приводи
 - Слідкувальні системи
 - Стабілізаційні системи

Розглянемо основні особливості гідроприводних систем:

- ✓ Висока питома потужність. ГПС дозволяють передавати велику силу при невеликих розмірах.
- ✓ Гнучкість у компоунванні. Можливість розміщення виконавчих органів на великій відстані від джерела енергії.
- ✓ Точність та плавність ходу. Забезпечення мікропереміщень і регулювання швидкості руху.
- ✓ Можливість автоматизації. ГПС легко інтегруються в автоматизовані та керовані комп'ютером системи.
- ✓ Надійність і довговічність. За належного обслуговування термін служби ГПС дуже високий.
- ✓ Потреба в якісному обслуговуванні. Системи чутливі до забруднень робочої рідини.
- ✓ Втрати енергії. Через в'язкість рідини можливі гідравлічні втрати, особливо у дросельних системах.

Гідроприводні системи відіграють ключову роль у технічному прогресі промисловості та транспорту. Завдяки широкому спектру застосування, різноманітності конструкцій та функціональних можливостей, вони є незамінними в багатьох технологічних процесах. Їх ефективне використання залежить від правильного вибору типу системи відповідно до умов експлуатації та завдань.

7.3 Конструкція двокаскадних гідропідсилювачів типу "сопло-заслінка" - золотник з електроуправлінням, електрогідропідсилювач (ЕГП).

Електрогідропідсилювачі (ЕГП) – це двокаскадні виконавчі пристрої, що перетворюють електричний сигнал управління в гідравлічний, і використовуються для керування потоком робочої рідини в гідроприводних системах. Основна задача ЕГП – забезпечення точного й швидкого керування гідропотоків із мінімальною витратою енергії електричної частини.

Перший каскад включає гідромеханічний підсилювач типу "сопло-заслінка". Цей каскад виконує роль попереднього гідравлічного підсилення. Його структура включає:

- ✓ Сопло – подає рідину під тиском;
- ✓ Заслінка – зміщуючись, частково перекриває струмінь з сопла;
- ✓ Ресивери – приймають рідину після сопла;

✓ Об'єм управління золотником – тиск у ньому змінюється залежно від положення заслінки.

Коли електромагніт подає імпульс, заслінка зміщується, змінюючи тиск у камерах керування, що приводить у рух золотник другого каскаду.

Другий каскад є основним розподільником потоку в гідросистемі. Його особливості:

- ✓ Виконує переміщення потоку до виконавчого механізму;
- ✓ Керується зміною тиску від сопло-заслінкового механізму;
- ✓ Має високу потужність і швидкість спрацювання.

Розглянемо основні принцип дії електрогідропідсилювача (ЕГП). Електричний сигнал подається на електромагніт або електропривід першого каскаду. Положення заслінки в сопло-заслінковому пристрої змінює співвідношення тисків у керувальних камерах золотника. Під дією диференціалу тисків золотник переміщується, відкриваючи канали для подачі рідини у виконавчий циліндр або гідромотор. Таким чином реалізується перетворення слабкого електричного сигналу в керування потужним гідравлічним потоком.

Схема конструкції двокаскадного гідропідсилювача типу «сопло-заслінка» – золотник з електроуправлінням (електрогідропідсилювач, ЕГП) наведена на рисунку 7.2

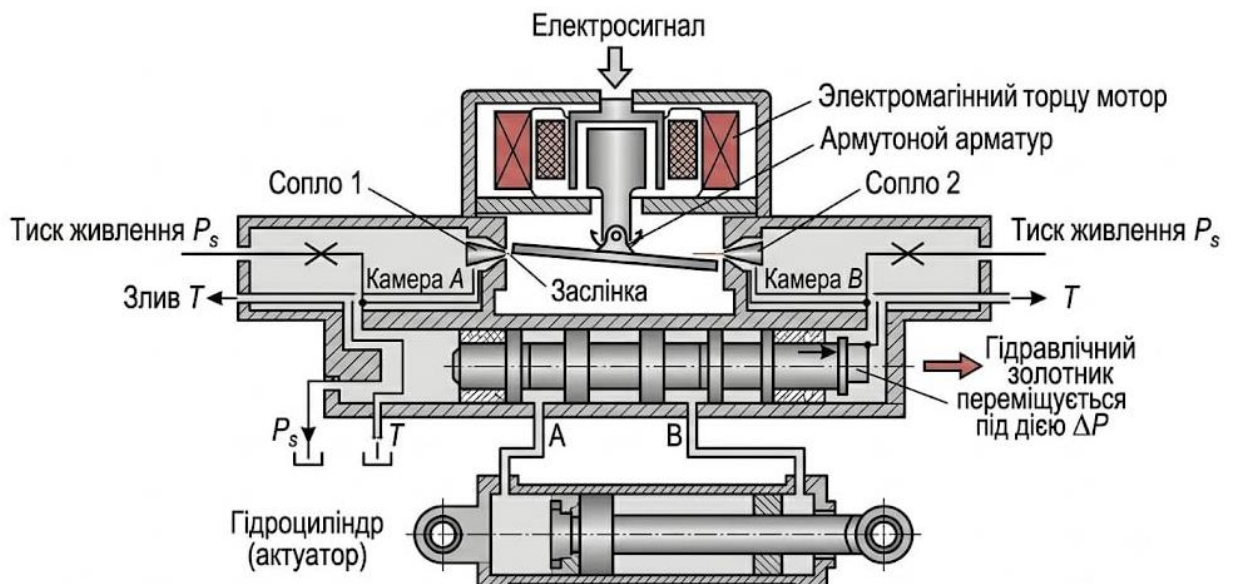


Рисунок 7.2 – Схема конструкції двокаскадного гідропідсилювача типу «сопло-заслінка» – золотник з електроуправлінням

Особливості застосування цієї конструкції та експлуатації наступні: висока чутливість і швидкодія, невеликі розміри сопло-заслінкового вузла, потреба у якісній фільтрації робочої рідини, чутливість до вібрацій і забруднень, можливість зворотного зв'язку для побудови САПР.

Двокаскадні електрогідروпідсилювачі типу "сопло–заслінка – золотник" є ключовими компонентами високоточної гідравліки. Вони поєднують переваги електронного керування і потужного гідравлічного виконання, дозволяючи забезпечити ефективну роботу складних мехатронних систем. Застосовуються в гідравлічні системи верстатів із ЧПУ, авіаційній гідравліці (керування стабілізаторами, рулями), Робототехніці, гідравлічних приводах прецизійного устаткування.

Питання для обговорення

- 1. Які основні особливості дросельного управління в програмних гідроприводах для обладнання з ЧПУ?*
- 2. У яких галузях та для яких задач найкраще застосовувати різні типи гідроприводів систем (ГПС)?*
- 3. Які конструктивні відмінності та переваги має двокаскадний гідропідсилювач типу «сопло-заслінка» з електроуправлінням?*
- 4. Як електрогідропідсилювачі забезпечують точність і плавність регулювання в системах з ЧПУ?*
- 5. Які недоліки характерні для систем «сопло-заслінка» і як їх можна подолати у практичних застосуваннях?*

Тема 8. Динаміка гідравлічної системи переміщення повзуна листозгинального преса з ЧПУ.

Динаміка гідравлічної системи переміщення повзуна листозгинального преса з ЧПУ для виготовлення коробів та інших гнутих профілів, які використовуються в машинобудуванні

План

8.1. Динаміка гідравлічної системи переміщення повзуна листозгинального преса з ЧПУ для виготовлення коробів та інших гнутих профілів, які використовуються в машинобудуванні

8.1 Динаміка гідравлічної системи переміщення повзуна листозгинального преса з ЧПУ для виготовлення коробів та інших гнутих профілів, які використовуються в машинобудуванні.

Листозгинальний прес – це спеціалізоване обладнання, призначене для формування гнутих металевих профілів, таких як короби, корпуси, панелі тощо, що широко застосовуються у машинобудуванні. Управління пресом з використанням систем числового програмного керування (ЧПУ) забезпечує високу точність, автоматизацію та повторюваність технологічних процесів.

Основні елементи гідравлічної системи переміщення повзуна:

1. Гідроциліндр – безпосередньо відповідає за переміщення повзуна, перетворюючи гідравлічну енергію у механічний рух.
2. Гідронасос – забезпечує робочою рідиною систему під необхідним тиском.
3. Дросельні клапани – регулюють швидкість переміщення повзуна, забезпечують плавність руху та гасіння коливань.
4. Датчики положення, тиску та швидкості – забезпечують зворотний зв'язок для системи ЧПУ.
5. Система ЧПУ – керує рухом повзуна, аналізує дані з датчиків та автоматично коригує параметри роботи гідросистеми.

Динамічні процеси у системі визначаються взаємодією гідравлічних, механічних та електронних компонентів. Розглянемо основні фактори:

- Гідравлічні явища – стиснення робочої рідини, гідравлічні втрати, дроселювання.
- Механічні характеристики – маса повзуна, жорсткість кріплень, демпфування коливань.
- Керування – через зміну положення дросельних клапанів, зміни тиску в гідроциліндрі.

Для опису динаміки застосовуються диференційні рівняння руху, які враховують сили, що діють на повзун, та характеристики робочої рідини.

Структурної схеми гідравлічної системи переміщення повзуна наведена на рисунку 8.1.

Ця схема ілюструє, що насос подає робочу рідину через клапан до гідроциліндра, який рухає повзун. Датчики зворотного зв'язку надсилають інформацію в систему ЧПУ, яка регулює положення клапана для досягнення потрібного положення повзуна.

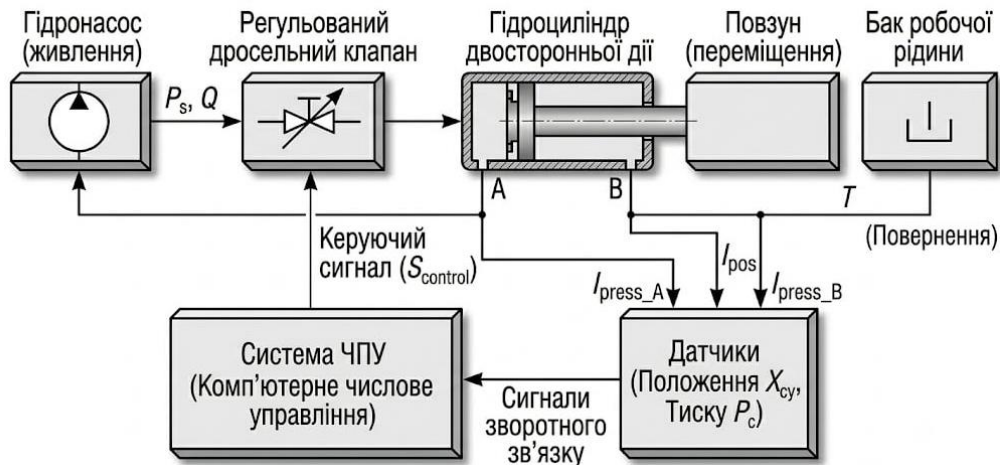


Рисунок 8.1 – Структурної схеми гідравлічної системи переміщення повзуна

Для покращення роботи системи проводять імітаційне моделювання у спеціалізованих програмних середовищах (Matlab/Simulink, Amesim тощо), що дозволяє:

- ✓ Передбачити поведінку системи при різних навантаженнях.
- ✓ Оптимізувати налаштування клапанів для мінімізації коливань.
- ✓ Оцінити вплив параметрів системи (жорсткості, демпфування) на точність руху.

Завдяки точному управлінню переміщенням повзуна преса забезпечується:

- ✓ Висока точність вигину профілів.
- ✓ Зменшення виробничих дефектів.
- ✓ Підвищення продуктивності та зниження часу переналадки обладнання.

Динаміка гідравлічної системи переміщення повзуна листозгинального преса з ЧПУ є складним комплексом взаємодіючих гідравлічних, механічних та електронних компонентів. Ефективне керування цією системою забезпечує високу точність і надійність роботи преса, що є критично важливим для виготовлення складних гнутих профілів у машинобудуванні. Використання динамічного моделювання дає змогу прогнозувати поведінку системи, оптимізувати її параметри та мінімізувати коливання, що сприяє підвищенню якості продукції та зниженню витрат на виробництво. Таким чином, інтеграція сучасних гідравлічних систем із цифровими методами управління значно

покращує технологічні можливості та конкурентоспроможність виробничого обладнання.

Питання для обговорення

- 1. Які основні компоненти гідравлічної системи переміщення повзуна листозгинального преса з ЧПУ?*
- 2. Як впливає динаміка гідравлічної системи на точність роботи листозгинального преса?*
- 3. Які методи моделювання використовуються для аналізу динаміки гідравлічних систем у машинобудуванні?*
- 4. Які основні причини виникнення коливань у гідравлічній системі і як їх можна мінімізувати?*
- 5. Як цифрові системи управління ЧПУ інтегруються з гідравлічними приводами преса?*
- 6. Які переваги дає використання динамічного моделювання при проектуванні гідравлічних систем?*
- 7. Яким чином удосконалення гідравлічних систем впливає на якість та продуктивність виготовлення гнутих профілів?*

Тема 9. Принципова і функціональна схеми гідросистеми. Нелінійна модель програмної гідросистеми листозгинального преса, замкнутої за положенням повзуна.

План

9.1 Нелінійна модель програмної гідросистеми листозгинального преса, замкнутої за положенням повзуна.

9.1 Нелінійна модель програмної гідросистеми листозгинального преса, замкнутої за положенням повзуна.

Нелінійна модель програмної гідросистеми (ПГС) листозгинального преса, замкнутої за положенням повзуна, є більш складною порівняно з лінійною моделлю, оскільки враховує реальні фізичні явища, що викликають нелінійності в системі. Основними причинами нелінійності є:

- ✓ Залежність параметрів гідравлічних компонентів від робочих умов (наприклад, зміна витрати рідини через дроселі та золотники).
- ✓ Механічні характеристики повзуна та навантаження, які можуть змінюватися залежно від положення.
- ✓ Властивості гідравлічної рідини, такі як зміна в'язкості та стисливості під впливом температури та тиску.

✓ Вплив зовнішніх навантажень, які можуть бути непередбачуваними або змінними у часі.

У замкнутій системі управління за положенням повзуна використовується датчик положення, який забезпечує зворотний зв'язок, дозволяючи контролювати точне розміщення повзуна в реальному часі. Контролер обробляє сигнал з датчика і формує керуючий вплив на гідравлічний виконавчий механізм (золотник або електрогідропривід), коригуючи рух повзуна.

Розглянемо основні структурні елементи нелінійної моделі:

1. Гідравлічний привід (золотник, дроселі, гідроциліндр із змінною витратою та тиском).
2. Механічна ланка (повзун, його маса, тертя та навантаження).
3. Датчик положення (забезпечує зворотний зв'язок за координатою повзуна).
4. Контролер (програмний блок, який обробляє сигнали та формує команду управління).
5. Зовнішні впливи (навантаження, зміна параметрів середовища).

Особливості моделювання нелінійної моделі:

✓ Нелінійна модель описується системою диференціальних рівнянь, які враховують змінність параметрів у часі.

✓ Для розв'язання таких моделей часто використовують чисельні методи та імітаційне моделювання на ЕОМ.

✓ Аналіз нелінійної моделі дозволяє більш точно прогнозувати поведінку системи під реальними умовами експлуатації, зокрема при різних навантаженнях і змінах технологічного процесу.

Приклад структурної схеми нелінійної ПГС листозгинального преса (рисунок 9.1):

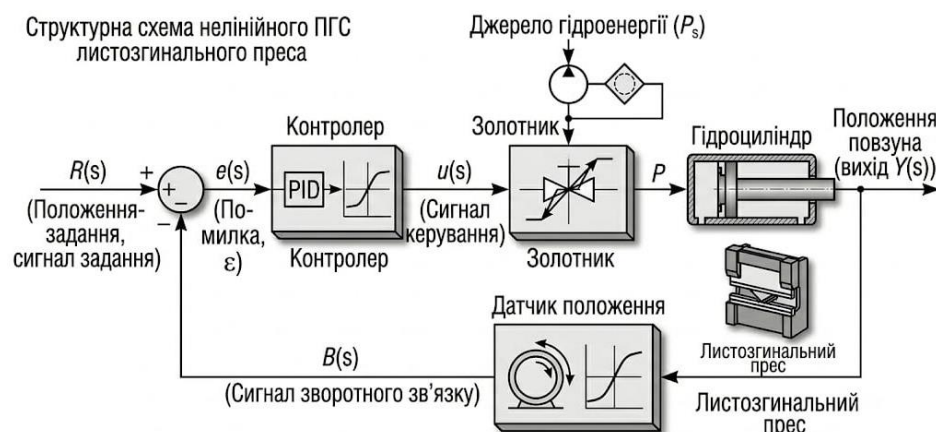


Рисунок 9.1 – Структурна схема нелінійного ПГС листозгинального преса

У цій схемі контролер формує керуючий вплив на золотник, що регулює потік рідини до гідроциліндра, який переміщує повзун. Датчик положення вимірює фактичне положення повзуна і передає дані назад контролеру для коригування.

Нелінійна модель програмної гідросистеми листозгинального преса, замкнутої за положенням повзуна, дозволяє значно точніше відобразити динамічні процеси у реальних умовах експлуатації. Вона враховує змінність гідравлічних, механічних та зовнішніх факторів, зокрема нелінійні залежності витрати, тиску, тертя та навантаження. Завдяки зворотному зв'язку від датчика положення система набуває властивостей адаптивності й точного позиціонування. Імітаційне моделювання такої системи дозволяє проаналізувати її поведінку при різних сценаріях роботи, що є критично важливим для забезпечення надійності, продуктивності та точності згинальних операцій у машинобудівному виробництві. Застосування подібних моделей сприяє покращенню якості проектування та налаштування гідросистем високої складності.

Питання для обговорення

- 1. Які основні відмінності між лінійною та нелінійною моделлю гідросистеми листозгинального преса?*
- 2. Як впливають зміни навантаження та температури на поведінку нелінійної ПГС?*
- 3. Які переваги дає використання замкнутої системи управління за положенням повзуна?*
- 4. Які джерела нелінійностей необхідно враховувати при моделюванні гідросистеми преса?*
- 5. Як впливає точність моделі на результати імітаційного моделювання ПГС?*
- 6. Які труднощі виникають при реалізації нелінійного моделювання в системах з ЧПУ?*
- 7. Як можна оптимізувати налаштування регулятора для стабільної роботи преса за умов нелінійної поведінки системи?*

Тема 10. Складання структурно-функціональної схеми.

План

10.1 Складання структурно-функціональної схеми за рівняннями математичної моделі для пакета імітаційного моделювання.

3) *Формування стрілочної схеми.* Між блоками прокладаються зв'язки, що вказують на напрям передавання сигналів (тиск, витрата, положення, швидкість, зусилля). Наприклад, положення вихідного органу надходить на датчик, зворотний сигнал порівнюється із задачним, а сигнал помилки обробляється регулятором.

4) *Програмна реалізація.* Отримана схема переводиться в модель у середовищі імітаційного моделювання. Кожному блоку ставиться у відповідність типова структурна одиниця: інтегратор, підсилювач, передавальна функція, логічний елемент тощо.

Приклад розглянутої схеми наведено на рисунку 10.2.

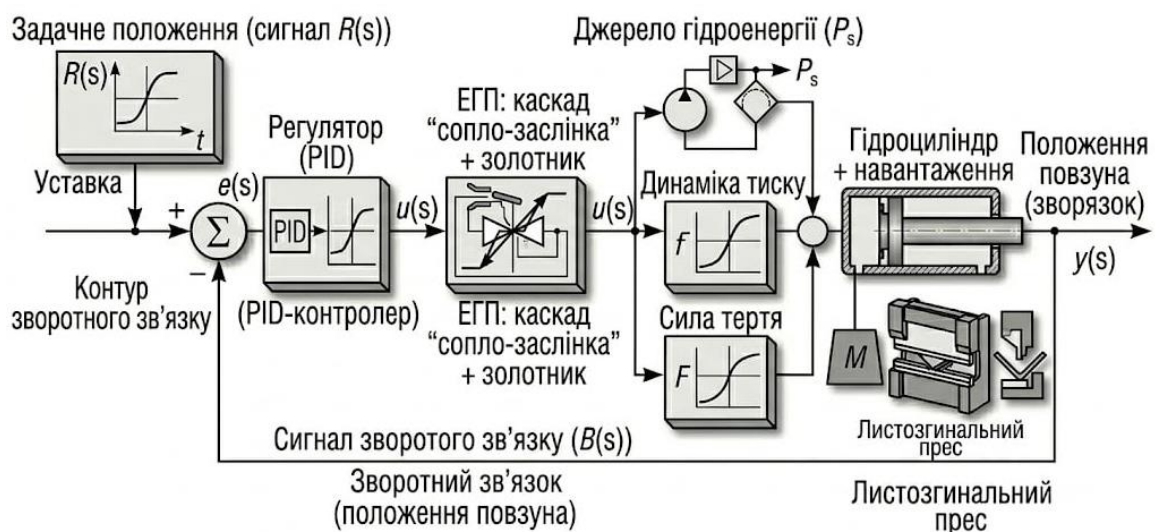


Рисунок 10.2 – Структурно-функціональна схема

Приклад математичної моделі для структурно-функціональної схеми слідкувальної гідравлічної системи (СГС) преса з ЧПУ, заснований на передавальних функціях основних елементів:

- ✓ Вхідне завдання (референс):

$x_3(t)$ – задане положення повзуна.

- ✓ Помилка регулювання розрахунок, якої наведено у формула 10.1:

$$e(t) = x_3(t) - x(t) \quad (10.1)$$

- ✓ Регулятор (наприклад, ПІД-регулятор) описується формулою 10.2:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10.2)$$

✓ Електрогідропідсилювач (ЕГП), передавальна функція наведено у формулі 10.3):

$$G_{\text{ЕГП}}(s) = \frac{K_{\text{ЕГП}}}{T_{\text{ЕГП}}s + 1} \quad (10.3)$$

✓ Гідроциліндр із навантаженням (інерційно-демпфована система) описується формулою 10.4:

$$G_{\text{ГЦ}}(s) = \frac{K_{\text{ГЦ}}}{ms^2 + bs + k} \quad (10.4)$$

✓ Зворотній зв'язок положення (формула 10.5):

$$x(s) = G_{\text{ГЦ}}(s) \cdot G_{\text{ЕГП}}(s) \cdot u(s) \quad (10.5)$$

✓ Враховуючи зворотній зв'язок, загальна передавальна функція системи має вигляд наступний (формула 10.6):

$$G_{\text{заг}}(s) = \frac{X(s)}{X_3(s)} = \frac{G_{\text{рег}}(s) \cdot G_{\text{ЕГП}}(s) \cdot G_{\text{ГЦ}}(s)}{1 + G_{\text{рег}}(s) \cdot G_{\text{ЕГП}}(s) \cdot G_{\text{ГЦ}}(s)} \quad (10.6)$$

Ці рівняння описують повну поведінку системи у частотній області та можуть бути використані у пакеті імітаційного моделювання (наприклад, MATLAB Simulink або Scilab Xcos).

Структурно-функціональна схема дозволяє:

- ✓ Візуалізувати логіку роботи гідросистеми;
- ✓ Формалізувати взаємозв'язки змінних і елементів;
- ✓ Підготувати модель до реалізації в Simulink чи іншій платформі;
- ✓ Забезпечити можливість подальшого аналізу, тестування і оптимізації системи.

Питання для обговорення

1. *Які основні етапи побудови структурно-функціональної схеми гідравлічної системи за математичною моделлю?*
2. *Як обираються передавальні функції для ключових елементів системи в моделі?*
3. *Яким чином рівняння руху виконавчого органа інтегруються у структурно-функціональну схему?*

4. Які припущення та спрощення приймаються при моделюванні гідравлічної системи у пакеті імітаційного моделювання?
5. Як формується замкнута система регулювання у структурно-функціональній схемі?
6. Які труднощі можуть виникнути при реалізації цієї схеми в програмному середовищі, наприклад, у Simulink?
7. Які параметри моделі найбільш суттєво впливають на точність імітаційного моделювання системи?

Тема 11. Визначення динамічних процесів в системі шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ

План

11.1 Динаміка нелінійної СГС з урахуванням в'язкого тертя.

11.2 Математична модель ГПС у режимі включення та її структурно-функціональна схема для набору в пакеті імітаційного моделювання на ЕОМ.

11.3 Динаміка нелінійної СГС при вхідному гармонійному впливі.

11.1 Динаміка нелінійної СГС з урахуванням в'язкого тертя.

У реальних гідравлічних слідкувальних системах точність і стабільність роботи істотно залежать від сили тертя, що виникає у виконавчих механізмах, особливо в парах тертя (напр., шток – втулка, поршень – циліндр). Одним із найпоширеніших типів тертя є в'язке тертя, величина якого пропорційна швидкості руху. Врахування цього чинника в математичній моделі дозволяє адекватно описати поведінку системи в динамічних режимах.

Розглянемо математичну модель. Рівняння руху виконавчого органу з урахуванням сили в'язкого тертя має вигляд (формула 11.1):

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F_{\text{гiдр}} \quad (11.1)$$

де: M – маса рухомої ланки (наприклад, повзун), B – коефіцієнт в'язкого тертя, K – жорсткість елементів (може враховуватись пружність гідроліній або пружних елементів), x – переміщення виконавчого органу, $F_{\text{гiдр}}$ – зусилля, створене гідравлічною системою.

Це рівняння є нелінійним, якщо гідравлічне зусилля $F_{\text{гiдр}}$ залежить від положення, швидкості або інших змінних у складний (не лінійний) спосіб – наприклад, при дросельному управлінні або при змінній площі поперечного перерізу каналу.

При моделюванні потрібно враховувати наступне:

✓ В'язке тертя враховується у вигляді $B \cdot \dot{x}$, що дозволяє змоделювати ефект "згладжування" переходів у СГС, зменшення швидкості коливань.

✓ При значному коефіцієнті тертя система має тенденцію до демпфування коливань, покращується стійкість.

✓ Водночас надмірне тертя може знижувати точність та швидкодію.

Типові прояви динаміки:

✓ Поява амплітудних затухаючих коливань у разі змін навантаження.

✓ Покращення стабільності при різких змінах вхідного сигналу.

✓ Зменшення переналаштування (overshoot) у перехідних процесах.

Наприклад у листозгинальному пресі з ЧПУ в'язке тертя в направляючих елементах виконавчого механізму враховується для точного позиціонування повзуна, особливо при зменшенні швидкості перед завершенням згинального ходу.

11.2 Математична модель ГПС у режимі включення та її структурно-функціональна схема для набору в пакеті імітаційного моделювання на ЕОМ.

Гідропідсилювачі (ГПС) – це ключові елементи в гідравлічних системах керування, які підсилюють управляючий сигнал і забезпечують потрібну механічну дію на виконавчий орган. Особливо це важливо у складних системах, наприклад, у гідросистемах із числовим програмним керуванням (ЧПУ), де потрібна точність та швидкість реакції.

Математична модель ГПС у режимі включення описує роботу гідропідсилювача при його активації (увімкненні), тобто в момент передачі керуючого впливу від сигналу до механічного руху виконавчого елемента. Така модель необхідна для аналізу динаміки системи, прогнозування її поведінки, оптимізації параметрів і розробки систем автоматичного управління.

Розглянемо основні компоненти математичної моделі ГПС:

1. Гідравлічний розподільник (золотник). Золотник керує потоком гідравлічної рідини, регулюючи її напрямок і витрату. Положення золотника визначається вхідним управляючим сигналом (електричним або гідравлічним), а витрата рідини через нього залежить від відкритої площі проходу, що змінюється зі зміною положення золотника. Модель враховує нелінійність залежності витрати від площі перерізу та перепаду тиску.

2. Гідроциліндр (виконавчий механізм). Гідроциліндр перетворює гідравлічну енергію в механічний рух повзуна. Модель гідроциліндра включає рівняння динаміки руху (прискорення, швидкість, положення), враховує масу, сили тертя, пружність, а також зовнішні навантаження.

3. Динаміка тиску у гідросистемі. Тиск у камерах гідроциліндра змінюється під впливом витрати рідини, її стисливості, об'єму камери. Враховується об'ємна стисливість гідравлічної рідини і зміна об'єму камери через переміщення поршня.

4. Контролер (програмний блок). Обробляє сигнал від датчика положення повзуна і формує керуючий вплив на золотник, підтримуючи замкнений контур управління.

5. Датчик положення. Забезпечує зворотний зв'язок, вимірюючи фактичне положення повзуна і передаючи дані контролеру для корекції керування.

6. Зовнішні навантаження. Можуть бути сталими або змінними у часі, впливають на рух повзуна і змінюють умови роботи системи.

Далі розглянемо рівняння математичної моделі.

1. Рівняння руху повзуна (формула 11.2):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_{\text{гідр}} + F_{\text{зовн}} \quad (11.2)$$

де: m – маса повзуна, b – коефіцієнт в'язкого тертя, k – коефіцієнт пружності (якщо пружина є), $F_{\text{гідр}}$ – гідравлічна сила на поршні, $F_{\text{зовн}}$ – зовнішні сили навантаження.

2. Витрата рідини через золотник:

$$Q = C_d A(x_v) \sqrt{2\rho(P_s - P_c)} \quad (11.3)$$

де: C_d – коефіцієнт витрати, $A(x_v)$ – ефективна площа перерізу золотника (функція від його положення x_v), ρ – густина рідини, P_s та P_c – тиски на вході і виході золотника.

3. Рівняння зміни тиску у камерах гідроциліндра (формула 11.4):

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\beta}{V} \left(Q_{in} - A \frac{dx}{dt} \right) \quad (11.4)$$

де: β – об’ємна стисливість рідини, V – об’єм камери, Q_{in} – об’ємна витрата рідини у камеру, A – площа поршня.

Розглянемо структурно-функціональна схема моделі на рисунку 11.1

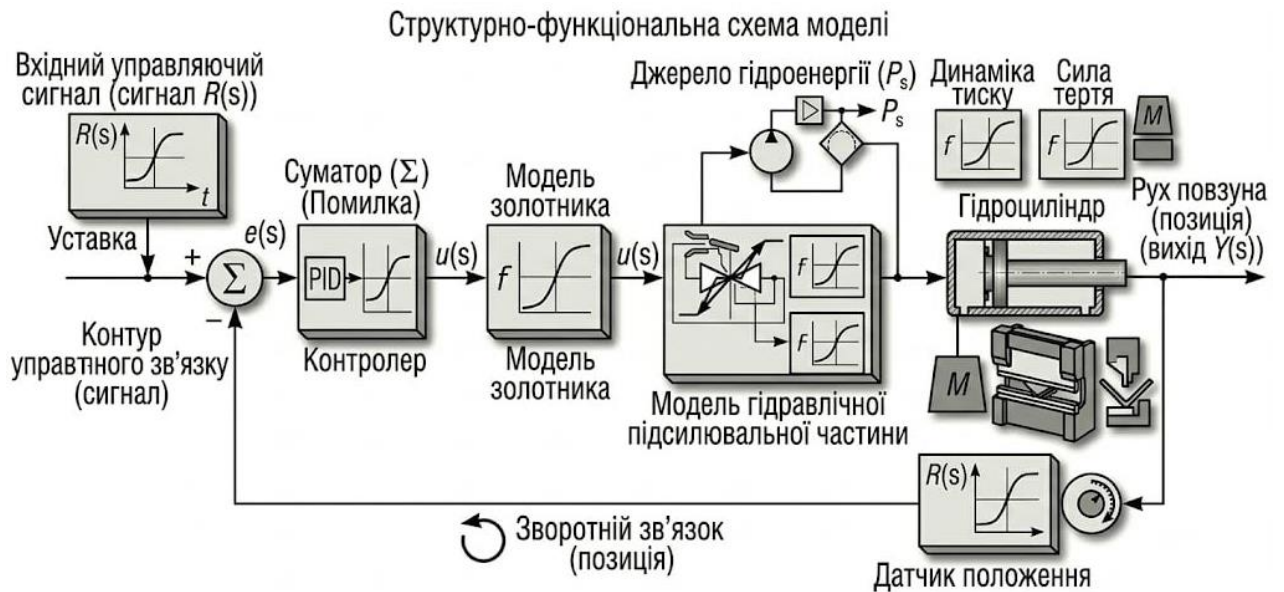


Рисунок 11.1 – Структурно-функціональна схема моделі.

Особливості моделювання даної моделі наступні:

- ✓ Модель є нелінійною через залежність витрати і тиску від положення золотника, змінність навантажень, тертя та інших факторів.
- ✓ Для розв’язання рівнянь використовуються чисельні методи (наприклад, метод Рунге-Кутти).
- ✓ Модель дає змогу виконувати імітаційне моделювання на ЕОМ, яке допомагає прогнозувати динамічні характеристики системи при різних режимах роботи.
- ✓ Застосування моделі допомагає розробляти системи автоматичного керування, підвищуючи точність і стабільність роботи преса.

Розглянемо листозгинальний прес з ЧПУ, де точне позиціонування повзуна є критичним для якості виробу. Використання описаної моделі гідросистеми дозволяє розробити оптимальний алгоритм управління, враховуючи всі реальні нелінійності, зворотній зв’язок і змінні зовнішні умови.

Математична модель гідропідсилювача у режимі включення дозволяє детально описати динамічні процеси в гідравлічній системі, зокрема зміну тиску, витрати рідини та рух виконавчого органа. Побудова такої моделі є основою для проведення імітаційного моделювання на ЕОМ, що дає змогу досліджувати роботу системи в різних режимах, оцінювати її стійкість і точність, а також оптимізувати параметри регулювання. Структурно-функціональна схема моделі наочно відображає взаємозв'язки між елементами системи, що особливо важливо при створенні систем керування з числовим програмним управлінням (ЧПУ) та при розробці адаптивних і високоточних гідроприводів.

11.3 Динаміка нелінійної СГС при вхідному гармонійному впливі.

Динаміка нелінійної слідкуючої гідросистеми (СГС) при дії гармонійного (синусоїдального) вхідного впливу є важливою складовою аналізу працездатності системи керування, особливо у високоточних приводах із числовим програмним управлінням (ЧПУ). Гармонійний вплив моделює зміну вхідного сигналу за синусоїдальним законом (формула 11.5):

$$x_{\text{зад}}(t) = A \sin(\omega t) \quad (11.5)$$

де: A – амплітуда коливань, ω – кругова частота сигналу, t – час.

У відповідь система формує рух повзуна, який не завжди точно повторює форму вхідного сигналу через нелінійні ефекти. Відгук може мати фазове запізнення, зменшену амплітуду або спотворення форми (появу гармонік вищих порядків).

Динаміку виконавчого органа можна описати рівнянням другого порядку з нелінійними складовими (формула 11.6):

$$m\ddot{x}(t) + B(\dot{x}) + F_{\text{тр}}(\dot{x}) = F_{\text{гід}}(t) - F_{\text{н}}(t) \quad (11.6)$$

де: m – маса рухомої частини (повзуна), $\ddot{x}(t)$ – прискорення, $\dot{x}(t)$ – швидкість, $B(\dot{x})$ – в'язке тертя (залежне від швидкості), $F_{\text{тр}}(\dot{x})$ – сила сухого тертя, $F_{\text{гід}}(t)$ – гідравлічна сила, створена циліндром, $F_{\text{н}}(t)$ – зовнішнє навантаження.

Для моделювання такої системи використовують чисельні методи, оскільки аналітичний розв'язок за наявності нелінійностей часто неможливий. Імітаційне моделювання в середовищах типу MATLAB/Simulink дозволяє просканувати частотну характеристику, тобто оцінити амплітуду і фазу вихідного сигналу при різних значеннях частоти ω / ω .

На основі цих даних будують амплітудно-частотну (АЧХ) та фазо-частотну (ФЧХ) характеристики, що дозволяє виявити резонансні області, затухання, втрату точності та стабільності.

Важливим є також визначення граничної смуги пропускання системи – тобто максимальної частоти, при якій система ще встигає відстежувати вхідний сигнал із допустимим запізненням і амплітудною похибкою. Такий аналіз дозволяє адаптувати гідросистему до реальних умов експлуатації, виявити потенційні нестійкості та внести корективи до алгоритмів керування.

Питання для обговорення

- 1. Які основні етапи побудови імітаційної моделі динамічної системи на ЕОМ?*
- 2. Які типи динамічних процесів можна ефективно досліджувати за допомогою імітаційного моделювання?*
- 3. Які мови або програмні середовища найбільш придатні для моделювання динаміки технічних систем і чому?*
- 4. Як враховується вплив нелінійностей та збурень у процесі імітаційного моделювання?*
- 5. У чому полягає перевага використання чисельних методів при моделюванні динаміки на ЕОМ у порівнянні з аналітичними підходами?*
- 6. Як інтерпретуються результати імітаційного моделювання для прийняття рішень у процесі проєктування або налаштування системи?*
- 7. Які показники (метрики) ефективності або стабільності системи найчастіше аналізують під час моделювання її динаміки?*

Тема 12. Динаміка ГПС з об'ємним регулюванням.

План

12.1 Галузь застосування, переваги і недоліки в порівнянні з дросельним управлінням.

12.2 Схеми сполучень регульованих і нерегульованих насосів і гідродвигунів з об'ємним управлінням, швидкісні і механічні характеристики

12.1 Галузь застосування, переваги і недоліки в порівнянні з дросельним управлінням.

Системи програмного (позиційного) керування в гідравлічних приводах, зокрема ті, що використовують замкнені контури зворотного зв'язку за положенням виконавчого елемента (повзуна), знаходять широке застосування в сучасних машинах і технологічному обладнанні, яке вимагає високої точності, швидкодії та повторюваності переміщень. Галузі використання таких систем охоплюють верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ), листозгинальні та штампувальні преси, роботи та автоматизовані лінії в машинобудуванні, авіаційній, автомобільній, енергетичній та медичній техніці.

У цих системах досягається чітке позиціонування виконавчого механізму за допомогою електрогідравлічних підсилювачів, гідроциліндрів, високоточних датчиків положення та мікропроцесорних контролерів, що забезпечують замкнене регулювання.

Основні переваги програмного керування у порівнянні з дросельним (відкритим) управлінням полягають у наступному:

- ✓ Вища точність регулювання положення виконавчого механізму завдяки використанню зворотного зв'язку.
- ✓ Зменшення енергетичних втрат, оскільки керування витратою реалізується оптимально з урахуванням поточного стану системи, на відміну від постійних втрат енергії в дросельному режимі.
- ✓ Можливість адаптації до змін навантаження та умов роботи, що дозволяє забезпечити стабільну роботу навіть при нестабільному зовнішньому впливі.
- ✓ Більша гнучкість у налаштуваннях та реалізації складних алгоритмів керування (наприклад, ПД-регулятори, адаптивне керування, логіка перемикачів).

Проте системи програмного керування мають і деякі недоліки у порівнянні з простим дросельним управлінням:

- ✓ Вища вартість через складність електроніки, сенсорики та програмного забезпечення.
- ✓ Підвищені вимоги до надійності та точності вимірювальних компонентів (датчиків).
- ✓ Необхідність у спеціалізованому обслуговуванні та налаштуванні програмного забезпечення.

✓ Чутливість до зовнішніх завад (електричних, вібраційних), що потребує якісного захисту та фільтрації сигналів.

Вибір між дросельним і програмним керуванням залежить від вимог до системи: якщо потрібна простота і низька вартість – перевагу надають дросельному регулюванню; якщо ж ключовими є точність, адаптивність і енергоефективність – доцільно використовувати програмно-керовані системи.

12.2 Схеми сполучень регульованих і нерегульованих насосів і гідродвигунів з об'ємним управлінням, швидкісні і механічні характеристики.

У гідравлічних приводах з об'ємним керуванням використовують два основні типи насосів – нерегульовані (постійної подачі) та регульовані (змінної подачі) – і два типи виконавчих гідродвигунів (насамперед гідромотори та гідроциліндри). Від вибору комбінації та схеми їх сполучення залежать робочі характеристики привода: швидкість обертання чи переміщення, момент або сила на валу (штоку), а також динамічні властивості системи.

Розглянемо можливі схеми:

1. Нерегульований насос + нерегульований гідродвигун

Найпростіша схема, де насос подає фіксований об'єм рідини під сталим тиском у гідродвигун, а надлишок стікає у бак через запобіжний клапан. Швидкість обертання (або швидкість руху штока) пропорційна моменту опору в навантаженні, а її зміну забезпечує лише зміна навантаження або тиску магістралі (рисунок 12.1).

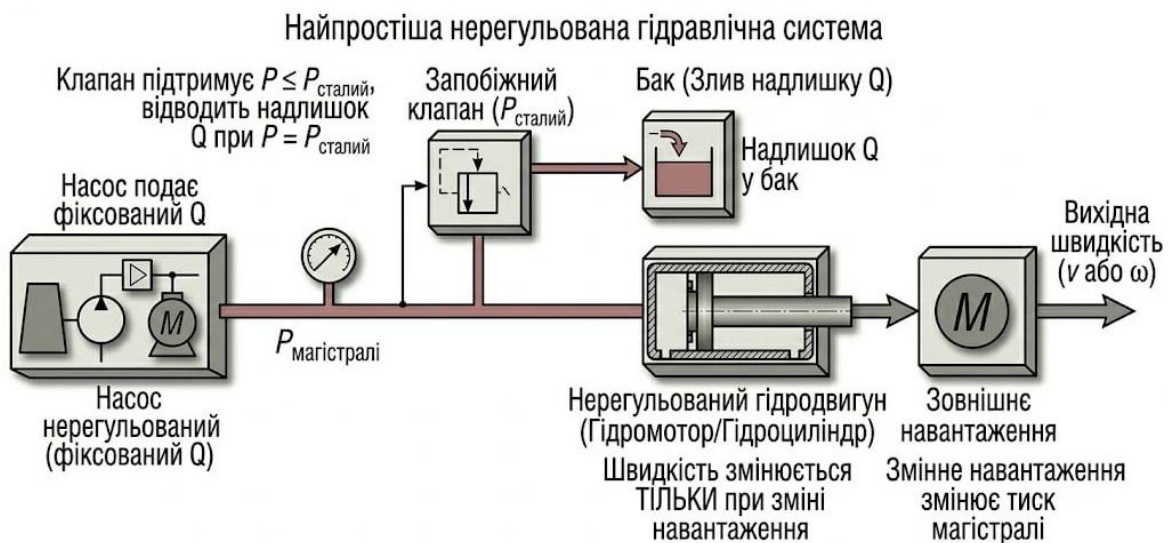


Рисунок 12.1 – Схема нерегульований насос + нерегульований гідродвигун

Проаналізуємо характеристики цієї схеми:

- ✓ Швидкісна характеристика: майже лінійна залежність $n = Q_{const}/V_g$, слабка адаптація до навантаження;
- ✓ Моментна характеристика: $M = p \cdot V_g$, де V_g – об'ємний хід; момент прямо пропорційний тиску;
- ✓ Механічна характеристика: проста, бюджетна, але малоефективна при зміні режимів.

2. Регульований насос + нерегульований гідродвигун
Регульований насос змінює об'єм подачі Q за допомогою кулачкового або електромагнітного регулятора, що дає змогу керувати швидкістю гідродвигуна незалежно від навантаження. Схема включає регульований насос із задавальною ланкою, нерегульований двигун та запобіжний клапан (рисунок 12.2)

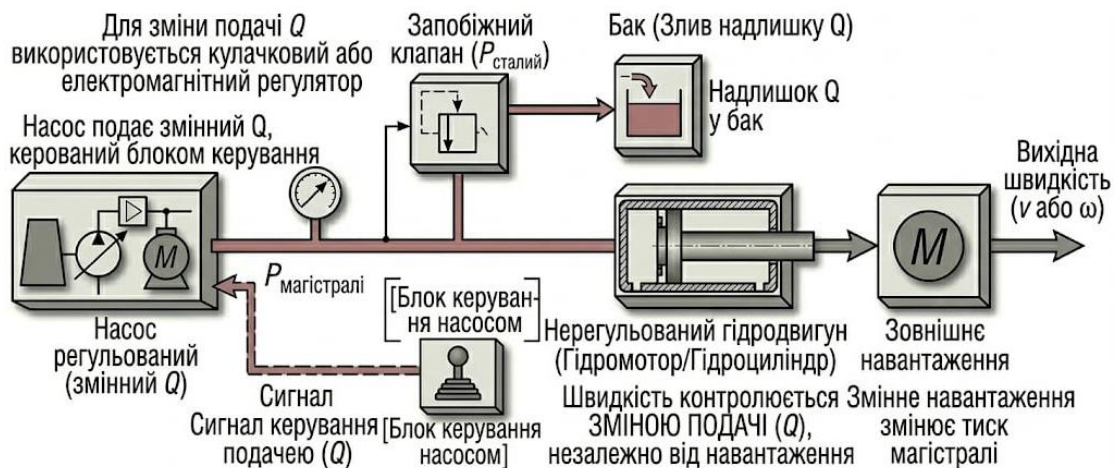


Рисунок 12.2 – Схема регульований насос + нерегульований гідродвигун

Проаналізуємо характеристики цієї схеми:

- ✓ Швидкісна характеристика: n пропорційна $Q_{reg}(p_cmd)$, де p_cmd – сигнал регулятора;
- ✓ Моментна характеристика: $M = p \cdot V_{const}$; момент залежить від тиску, але швидкість – від команди;
- ✓ Механічна характеристика: забезпечує сталі швидкість та високу точність керування, вища складність та вартість.

3. Нерегульований насос + регульований гідродвигун. Насос подає постійний об'єм, а гідродвигун регулює свій внутрішній об'єм (наприклад,

зміною кута нахилу диска кулачкового мотора). Це дає змогу керувати швидкістю двигуна без зміни подачі насоса (рисунок 12.3).

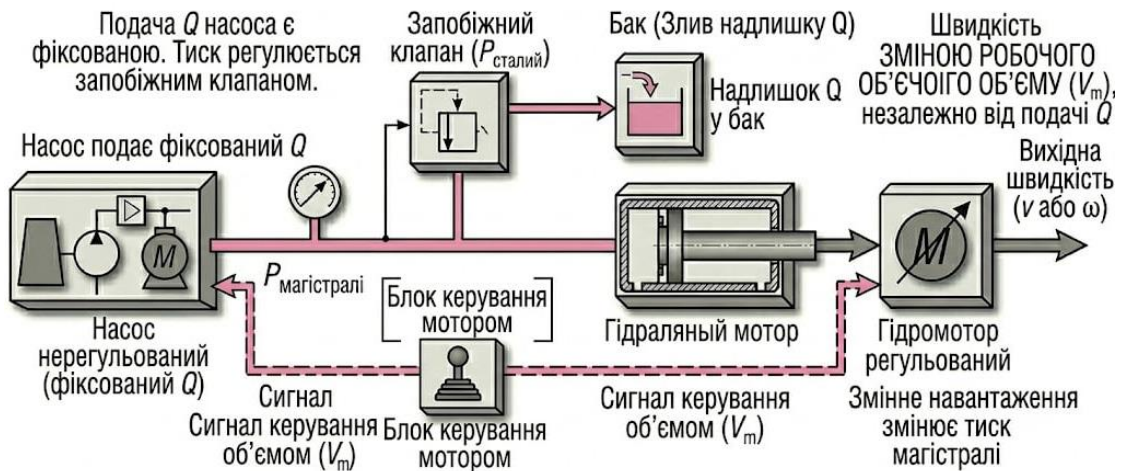


Рисунок 12.3 – Схема нерегульований насос + регульований гідродвигун

Характеристики цієї схеми:

- ✓ Швидкісна характеристика: змінюється за рахунок внутрішнього об'єму $V_g(x_cmd)$;
- ✓ Моментна характеристика: $M = p \cdot V_g$, змінюється зі зміною кута регулювання;
- ✓ Механічна характеристика: дає хорошу динаміку при перемінних навантаженнях, висока складність гідромотора.

4. Регульований насос + регульований гідродвигун

Найбільш гнучка і ефективна схема. Подвійне об'ємне керування дозволяє змінювати і подачу насоса, і внутрішній об'єм двигуна, тим самим точно налаштовуючи і швидкість, і момент (рисунок 12.4).

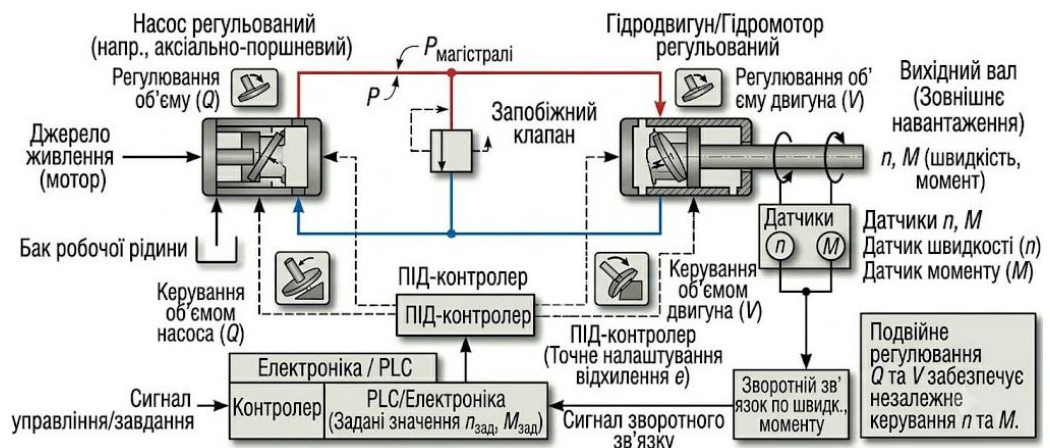


Рисунок 12.4 – Схема регульований насос + регульований гідродвигун

Проаналізуємо характеристики цієї схеми:

- ✓ Швидкісна характеристика: висока точність регулювання по команді;
- ✓ Моментна характеристика: адаптивна зміна моменту під навантаження, низька перерегулювання;
- ✓ Механічна характеристика: максимальна економічність і гнучкість, проте висока вартість і складність.

Порівняння переваг і недоліків розглянутих схем:

- ✓ Нерег./Нерег. – найпростіша та найдешевша, але неадаптивна.
- ✓ Регул.насос/Нерег.двигун – точне керування швидкістю, але момент завжди залежить від навантаження.
- ✓ Нерег.насос/Регул.двигун – хороша динаміка головним чином за рахунок мотора, але складність в гідродвигуні.
- ✓ Регул.насос/Регул.двигун – найвищі характеристики, але максимальні капітальні та експлуатаційні витрати.

Кожна з цих схем застосовується залежно від вимог до точності, швидкодії, динамічної стійкості та бюджету проєкту.

Питання для обговорення

1. *Які відмінності в динаміці між схемою «нерегульований насос + нерегульований двигун» і схемою «регульований насос + нерегульований двигун»?*
2. *Як об'ємне регулювання насоса впливає на перехідні процеси (час встановлення, переналаштування) у ГПС?*
3. *Які динамічні ефекти виникають у схемі «нерегульований насос + регульований двигун» при зміні внутрішнього об'єму гідромотора?*
4. *Яким чином подвійне об'ємне регулювання (регульований насос + регульований двигун) покращує стійкість і точність системи в умовах змінного навантаження?*
5. *Як нелінійні характеристики об'ємних насосів і моторов (насичення, мертві зони) відображаються на амплітудно-частотних характеристиках ГПС?*
6. *Які основні критерії (швидкодія, енергоефективність, динамічна точність) слід враховувати при виборі типу об'ємного регулювання для конкретного застосування?*
7. *Які методи моделювання та імітаційного аналізу використовуються для оцінки динаміки ГПС з об'ємним регулюванням та як вони допомагають оптимізувати параметри системи?*

Тема 13. Динаміка гідравлічної системи гідроприводного бурового насоса з об'ємним управлінням.

План

13.1 Характеристика насоса і принцип дії.

13.1 Характеристика насоса і принцип дії.

Насос у гідравлічних системах призначений для перетворення механічної енергії на гідравлічну, тобто створення потоку та напору робочої рідини. Його вибір і правильне використання визначають ефективність, швидкодію та стійкість гідросистеми.

1. Класифікація насосів

За способом подачі робочої рідини:

✓ Об'ємні (поршневі, плунжерні, шестеренні, пластинчасті) – подача прямо пропорційна оберту приводу й об'єму робочої камери.

✓ Гідродинамічні (кільцеві, відцентрові) – подача залежить від створеного тиску й швидкості потоку, об'ємні втрати змінюються зі зростанням напору.

За типом регулювання подачі:

✓ Нерегульовані – фіксований об'єм подачі й напір (через запобіжний клапан надлишок скидається в бак).

✓ Регульовані – змінна подача за рахунок механічного (кулачковий, пластинчастий) чи електрогідравлічного (сервоклапан) регулятора.

За конструктивним виконанням:

✓ Поршневі/плунжерні – висока тископродуктивність, хороша жорсткість характеристик, однак складніші та дорожчі в обслуговуванні.

✓ Шестеренні – простіша конструкція, бюджетні, але обмежені у максимальному тиску та точності подачі.

✓ Пластинчасті – проміжний варіант: висока ефективність, м'який пуск, але чутливі до забруднень.

2. Основні характеристики насоса

✓ Подача Q – об'єм рідини, який насос подає за одиницю часу (л/хв або м³/с).

✓ Напір (тиск) P – максимальна різниця тисків між лінією нагнітання і лінією всмоктування, яку насос може створити (МПа або бар).

✓ Потужність насоса N – механічна потужність, витрачена на привід, та гідравлічна потужність на виході (формула 13.1):

$$N_{\text{гдр}} = Q \cdot P \quad (13.1)$$

✓ ККД – відношення корисної гідравлічної потужності до механічної потужності приводу (формула 13.2):

$$\eta = \frac{Q \cdot P}{N_{\text{мех}}} \quad (13.2)$$

✓ Жорсткість напірної характеристики – швидкість зміни подачі насосом при зміні навантаження: об'ємні насоси – висока жорсткість; гідродинамічні – низька.

3. Принцип дії об'ємного насоса (на прикладі шестеренного)

✓ Всмоктування: при обертанні шестерень у зоні входу порожнини між зубцями розширюються, створюється розрідження, рідина засмоктується з бака.

✓ Перенесення: рідина захоплюється клітьми між зубцями та корпусом і переміщується вздовж колеса.

✓ Нагнітання: у зоні виходу кліті здавлюються, створюючи надлишковий тиск, і рідина надходить у нагнітальний трубопровід.

У поршневих насосах за таким самим принципом змінюється об'єм камери: під час руху поршня назад камера заповнюється рідиною, а при русі вперед рідина під високим тиском виштовхується в лінію нагнітання.

4. Особливості та сфери застосування

✓ Об'ємні насоси використовують там, де потрібна точна, незмінна подача і високий тиск (пресове обладнання, гідроприводи кранів, слідкуючі системи ЧПУ).

✓ Гідродинамічні насоси (відцентрові) застосовують у системах охолодження, циркуляції олівців чи мастильних контурів, де велика подача потрібна при відносно невисокому тиску.

Вибір типу насоса та режиму його роботи визначає динамічні властивості гідросистеми: час встановлення тиску, рівень шуму, енергоефективність, чутливість до зміни навантаження та стійкість характеристик. Правильний підбір і налаштування насоса – перший крок до створення надійної та точної гідроприводної системи.

Насос є ключовим елементом будь-якої гідравлічної системи, оскільки саме він перетворює механічну енергію в гідравлічну й задає базові параметри

роботи контуру – подачу та напір робочої рідини. Об'ємні насоси (поршневі, шестеренні, пластинчасті) забезпечують точне дозування й високу жорсткість характеристик, що необхідно у прецизійних приводах із ЧПУ та слідкувальних системах; водночас гідродинамічні насоси (відцентрові, кільцеві) умикаються там, де важлива велика подача при помірному тиску. Подача, напір, потужність і ККД насоса визначають ефективність, швидкодію та енергоефективність системи в цілому, а жорсткість характеристик – здатність контуру протистояти змінам навантаження. Принцип дії різних типів насосів – від захоплення рідини зубцями шестерень чи рухомими пластинами до роботи плунжерів – обумовлює їхню придатність до конкретних застосувань і впливає на складність конструкції, вартість обслуговування та надійність. Розуміння класифікації, робочих характеристик та принципів роботи насосів дозволяє інженерам оптимально підбирати й налаштовувати гідроприводи для досягнення необхідних технічних вимог – від швидкості й точності до економічності й довговічності.

Питання для обговорення

1. Які критерії слід враховувати при виборі типу насоса (об'ємного чи гідродинамічного) для конкретної гідравлічної системи?
2. Як характеристика напір–подача насоса впливає на динамічні властивості та стійкість гідросистеми під змінним навантаженням?
3. Яким чином ККД насоса та його жорсткість характеристик позначаються на енергоефективності та тимчасових показниках (час встановлення, перерегулювання) привода?
4. Як особливості конструкції різних об'ємних насосів (поршневі, шестеренні, пластинчасті) впливають на їхню швидкісну та механічну характеристики?
5. Які переваги та обмеження мають нерегульовані і регульовані насоси у завданнях прецизійного позиціонування та високошвидкісного керування?
6. Як вплив забруднення робочої рідини позначається на працездатності та надійності насосів різних типів, і які методи профілактики можна застосувати?
7. Яким чином динаміка та принцип дії насосів з об'ємним управлінням використовуються при побудові схем із замкненим контуром автоматичного керування?

Тема 14. Принципова гідравлічна схема насоса, основні особливості його функціонування.

План

14.1 Принципова гідравлічна схема насоса, основні особливості його функціонування.

14.1 Принципова гідравлічна схема насоса, основні особливості його функціонування.

Насос є серцем будь-якої гідравлічної системи, саме він створює потік і тиск робочої рідини, що приводить у рух виконавчі механізми. Нижче наведено докладний опис кожного елемента принципової схеми та пояснення, як вони взаємодіють у робочому циклі (рисунок 14.1).

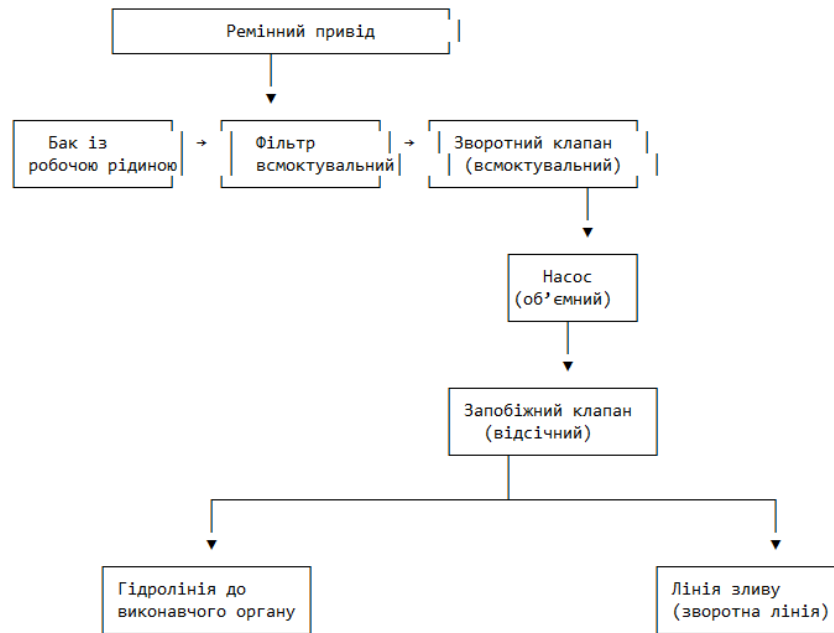


Рисунок 14.1 – Структурна схема гідросистеми

1. Бак із робочою рідиною:
 - ✓ забезпечує постійний запас гідравлічної рідини.
 - ✓ обладнується внутрішніми дефлектором для запобігання піноутворенню, теплообмінником для охолодження рідини, магнітним уловлювачем металевих часток.
2. Фільтр всмоктувальний
 - ✓ очищає рідину від великих домішок перед потраплянням у насос, захищаючи внутрішні деталі від абразивного зносу.
 - ✓ суфажний (сітчастий) або картриджний; встановлюється між баком і насосом.
3. Зворотний (всмоктувальний) клапан
 - ✓ утримує робочу камеру насоса заповненою рідиною при вимкненому приводі, запобігаючи «сухому ходу» та кавітації.

✓ після зупинки насоса закривається під дією пружини та надлишкового зовнішнього тиску.

4. Об'ємний насос

✓ може бути шестереневим, пластинчастим або поршнеvim.

✓ при обертанні робочі елементи (зубці шестерень, пластини або поршні) захоплюють рідину у всмоктувальній зоні, переміщують її до нагнітальної, де стискають і під високим тиском виштовхують у магістраль.

5. Запобіжний (відсічний) клапан

✓ захищає систему від надмірного тиску.

✓ коли тиск на виході насоса перевищує задане значення (настроюється пружиною), клапан відкривається і перепускає надлишок рідини до бака через зливну лінію.

6. Гідролінія до виконавчого органу

✓ передає робочу рідину під необхідним тиском до гідроциліндра або гідромотора.

✓ виконана з безшовних сталевих труб або армованих рукавів високого тиску, обладнана манометрами та швидкороз'ємними з'єднаннями.

7. Лінія зливу

✓ повертає надлишкову або зливну частину робочої рідини в бак.

✓ має зливний фільтр для очищення рідини перед поверненням у бак та демпферний акумулятор для зменшення пульсацій тиску.

Об'ємний насос у гідравлічній системі виконує основну роль перетворення механічної енергії приводу в гідравлічний потік із заданим об'ємом і тиском. Завдяки вбудованому зворотному клапану та фільтру всмоктування він завжди заповнений чистою рідиною, що усуває ризик кавітації та «сухого ходу». Стабільність подачі навіть при зміні навантаження забезпечується високою жорсткістю напірної характеристики: об'ємні елементи (поршні, шестерні чи пластини) подають майже постійний об'єм рідини до настання заданого тиску. При досягненні максимальної величини запобіжний клапан автоматично перекидає надлишок рідини в бак, захищаючи систему від аварійних перевантажень. Учасники системи відчують пульсації тиску через дискретний характер подачі, тому для їх згладжування встановлюють демпфери та акумулятори. Під час роботи об'ємний насос виділяє тепло через тертя й внутрішні втрати, тому бак із теплообмінником і магнітними уловлювачами продовжує ресурс насоса й підтримує оптимальну температуру рідини. У комплексі ці властивості дозволяють об'ємному насосу забезпечувати

надійне, точне й ефективне керування виконавчими механізмами, водночас автоматично захищаючи систему від перевантажень і забезпечуючи стабільність роботи навіть за змінних умов експлуатації.

Питання для обговорення

- 1. Як компоненти всмоктувальної лінії (бак, фільтр, зворотний клапан) впливають на надійність роботи об'ємного насоса?*
- 2. Які наслідки можуть виникнути при неправильному налаштуванні запобіжного клапана, і як це позначається на гідросистемі?*
- 3. Чому об'ємні насоси мають високу жорсткість напірної характеристики, і як це впливає на динаміку приводів під змінним навантаженням?*
- 4. Які методи згладжування пульсацій потоку та тиску використовують у практичних гідросистемах і наскільки вони ефективні?*
- 5. Як теплообмінні елементи та магнітні уловлювачі продовжують ресурс насоса та забезпечують стабільність його роботи?*

Тема 15. Принципова гідравлічна схема насоса, основні особливості його функціонування.

План

15.1 Рівняння руху штоків гідроциліндрів робочої рідини і бурового розчину.

15.2 Рівняння пружності двофазної робочої рідини.

15.1 Рівняння руху штоків гідроциліндрів робочої рідини і бурового розчину.

У загальному вигляді рух штока гідроциліндра під дією сили робочої рідини (гідравлічного масла чи бурового розчину) описується другим законом Ньютона для поступального руху з урахуванням маси, демпфування та зовнішніх сил:

1. Рівняння руху штока з гідравлічним маслом розглянуто у формулі 15.1:

$$m \ddot{x}(t) + B \dot{x}(t) + k x(t) = A (p_1(t) - p_2(t)) - F_{\text{навантаження}}(t), \quad (15.1)$$

де m – маса рухомої частини поршня зі штоком, $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ – прискорення, швидкість і переміщення штока, B – коефіцієнт демпфування (в'язке тертя масла та внутрішні втрати), k – ефективна жорсткість (пружні елементи корпусу

або ліній стисливості), A – площа поршня, $p_1(t)$, $p_2(t)$ – тиски у відповідних камерах гідроциліндра, $F_{\text{навантаження}}(t)$ – зовнішнє робоче навантаження.

2. Рівняння руху штока з буровим розчином розглянуто у формулі (15.2):

$$m \ddot{x}(t) + B_{\text{розчину}} \dot{x}(t) + k x(t) = A(p_1(t) - p_2(t)) - F_{\text{навантаження}}(t), \quad (15.2)$$

де $B_{\text{розчину}}$ – підвищений коефіцієнт демпфування за рахунок високої вязкості та пульсаційного затримування бурового розчину в щілинах, всі інші величини як у випадку масла, проте гідравлічна сила формується неспрямованими градієнтами тиску й може містити додаткові гідродинамічні витрати.

Рівняння руху штока в обох випадках мають однакову структуру (інерційна, демпфуюча та пружна складові з одного боку, гідравлічна сила й зовнішнє навантаження – з іншого), але коефіцієнт демпфування B у разі бурового розчину зростає через більшу в'язкість, нерівномірність потоку та пульсаційні втрати. Це призводить до більш повільної динаміки, кращого гасіння коливань і менш різких перехідних процесів, що слід враховувати в системах управління й налаштуванні керуючих алгоритмів.

15.2 Рівняння пружності двофазної робочої рідини.

У двофазних гідравлічних системах (наприклад, коли до рідини додано газові бульбашки або аеріроване середовище) пружна поведінка робочої рідини значно відрізняється від чисто рідинної. Загальна пружність (або об'ємна стисливість) такої суміші визначається ефективним модулем об'ємної пружності K_{ef} , який залежить від об'ємних часток рідини та газу і враховує їхні індивідуальні модулі стисливості.

Нехай об'ємна частка рідкої фази (рідини) дорівнює ϕ_l , а об'ємна частка газової фази (повітря, пари або інших газів) – $\phi_g = 1 - \phi_l$. Модулі об'ємної пружності (bulk modulus) чистих фаз позначимо K_l для рідини та K_g для газу. Тоді для рівномірно змішаної (гомогенної) двофазної суміші справедливе співвідношення (формула 15.3) :

$$\frac{1}{K_{\text{ef}}} = \frac{\phi_l}{K_l} + \frac{\phi_g}{K_g}. \quad (15.3)$$

Оскільки K_g (для газу) в кілька разів менший за K_l (для рідини), навіть невелика частка газу (ϕ_g) здатна зменшити загальну жорсткість суміші на порядок.

Якщо взяти до уваги те, що модуль об'ємної пружності газу K_g залежить від процесу (ізотермічного чи адіабатного стиснення), то формула 15.4 має вигляд

$$K_g = \begin{cases} p_0, & \text{ізотермічно,} \\ \gamma p_0, & \text{адіабатно,} \end{cases} \quad (15.4)$$

де p_0 – початковий тиск газорідинної суміші, γ – показник адіабати газу ($\approx 1,4$ для повітря).

Рівняння пружності двофазної робочої рідини вказує, що ефективний модуль об'ємної пружності суміші обернено пропорційний ваговим (об'ємним) часткам фаз, а найменша пружність газової компоненти визначає високий ступінь компресійності всієї суміші. Навіть невелика наявність газових бульбашок різко знижує жорсткість гідравлічного контуру, що впливає на динаміку, швидкодію та стабільність систем управління. Для точності моделювання й проектування високоточних приводів слід враховувати цей ефект та підтримувати газове розчинення на мінімальному рівні (або застосовувати дегазацію), щоб уникнути зайвих затримок і втрат від надмірної стисливості.

Питання для обговорення

1. Які функції виконують зворотний (всмоктувальний) та запобіжний клапани в принциповій гідравлічній схемі насоса, і як їх правильний підбір впливає на безпеку та надійність системи?
2. Як особливості конструкції об'ємного насоса (шестерневий, пластинчастий, поршневий) визначають його напірно-подачні характеристики та жорсткість напірної характеристики?
3. Які наслідки виникають від пульсацій тиску і потоку в нагнітальній лінії, і які пристрої (демпфери, акумулятори) найефективніше зменшують ці пульсації?
4. Як фільтр всмоктування та система теплообміну впливають на довговічність насоса та стабільність роботи гідросистеми?
5. У яких випадках доцільно використовувати нерегульований насос, а в яких – регульований, з огляду на вимоги до точності, швидкості та енергоефективності привода??

Тема 16. Нелінійна модель гідросистеми в цілому.

План

16.1 Рівняння статичної та початкової умови, що необхідні для розрахунку динаміки системи..

16.1 Рівняння статичної та початкової умови, що необхідні для розрахунку динаміки системи.

У гідравлічних і гідропневматичних системах перед початком динамічного моделювання необхідно із достатньою точністю визначити їхній статичний стан – точку рівноваги, у якій усі сили й потоки зрівноважені. Саме ці статичні рівняння та початкові умови забезпечують коректний старт чисельної інтеграції й адекватне відтворення перехідних процесів.

По-перше, баланс сил на поршні (або мембрані) гідроциліндра в статичному режимі має співпадати з нульовим прискоренням і швидкістю, яка розраховується за формулою 16.1:

$$A(P_{\text{нап}} - P_{\text{зл}}) - F_{\text{тр}} - F_{\text{зовн}} = 0. \quad (16.1)$$

де A – площа поршня, $P_{\text{нап}}$ і $P_{\text{зл}}$ – тиски у напірній та зливній магістралях, $F_{\text{тр}}$ – усталена сила тертя циліндра (як сухого, так й в'язкого), а $F_{\text{зовн}}$ – статичне зовнішнє навантаження. Цей баланс дозволяє знайти різницю тисків, необхідну для підтримки поршня у фіксованому положенні.

По-друге, для кожного дроселя, сполучення чи запірною клапана слід записати умови збереження об'єму або витрати: у статичному режимі об'ємна витрата через регульовальний елемент дорівнює нулю (якщо поршень нерухомий). Для дроселя з коефіцієнтом C_q і переміщенням золотника x_v використовуємо формулу 16.2:

$$Q_{\text{дросель}} = C_q x_v \sqrt{P_{\text{нап}} - P_{\text{зл}}} = 0 \implies P_{\text{нап}} = P_{\text{зл}}. \quad (16.2)$$

У схемах із ресивером або гідропневматичною камерою слід додатково врахувати об'ємну стисливість середовища з використанням формули 16.3:

$$\beta \frac{\Delta V}{V_0} = P_{\text{кам}} - P_{\text{атм}}, \quad (16.3)$$

де β – модуль об'ємної стисливості суміші (рівняння 15.2), V_0 – початковий об'єм камери, а ΔV – зміна об'єму, що виникає через переміщення поршня чи вбудовані компенсатори. Ця рівновага задає статичний тиск у накопичувачі.

Після розв'язання статичних рівнянь система опиняється в початковій точці $x(0)=x$, $\dot{x}(0)=0$, $P(0)=P_0$. Саме ці значення підставляють у диференціальні рівняння руху (формулу 16.4):

$$m \ddot{x} + B \dot{x} + k x = A (P_{\text{нап}}(t) - P_{\text{зп}}(t)) - F_{\text{зовн}}(t), \quad (16.4)$$

а також у рівняння витрати й динаміки тиску (формула 16.5):

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\beta}{V} (Q_{\text{ін}} - A \dot{x}). \quad (16.5)$$

Без правильної статичної точки ці рівняння при інтегруванні можуть надати фізично нереалістичні перехідні процеси: шток може «підстрибнути», тиск миттєво просісти або підійти до зливної камери без проміжної стадії.

Крім того, до початкових умов часто додають температура рідини $T(0)=T_0$, що визначає в'язкість і модуль стисливості, а також вихідні значення електричних сигналів регулятора $u(0)=u$, якщо система містить електронні контури. У сумі це дозволяє моделювати не лише механічні, а й термогідрравлічні та електромеханічні перехідні процеси з максимальною точністю.

Підготовка статичних рівнянь і початкових умов – не формальна вимога, а обов'язкова умова коректного аналізу динаміки. Лише зі стабільного, фізично обґрунтованого стартового стану можна отримати правдоподібні криві прискорення, швидкості, тиску та витрати в часі, необхідні для проектування й оптимізації гідроприводів.

Питання для обговорення

1. Які основні джерела нелінійностей у гідросистемі (наприклад, залежність витрати від перепаду тиску, тертя, стисливість рідини) та як їх враховують у моделі?

2. Які переваги й обмеження дає застосування нелінійної моделі гідросистеми порівняно з лінійною при проєктуванні й аналізі динаміки?
3. Як вибрати адекватні чисельні методи й крок інтегрування для інтеграції нелінійної системи диференціальних рівнянь?
4. Яким чином нелінійні ефекти (насичення клапанів, “мертва зона” золотника) відображаються на перехідних процесах та стійкості системи?
5. Як проводити валідацію нелінійної моделі гідросистеми з експериментальними даними, щоб переконатися в її адекватності та точності?

Тема 17. Складання структурно-функціональної схеми за рівняннями математичної моделі.

План

- 17.1 Складання структурно-функціональної схеми за рівняннями математичної моделі для пакета імітаційного моделювання VisSim
- 17.2 . Дослідження динамічних процесів бурового насоса на EOM

17.1 Складання структурно-функціональної схеми за рівняннями математичної моделі для пакета імітаційного моделювання VisSim.

Для реалізації математичної моделі гідросистеми в середовищі VisSim потрібно побудувати блок-схему, яка точно відтворює всі рівняння та взаємозв'язки між змінними. Нижче наведемо алгоритм складання структурно-функціональної схеми на прикладі слідкуючої гідросистеми з електрогідропідсилювачем і гідроциліндром.

Підготовка моделі

Формулюємо вихідні рівняння (формула 17.1):

$$\begin{aligned}
 m \ddot{x} + B(\dot{x}) + kx &= F_{\text{гидр}}(u, t) - F_{\text{зовн}}(t) \\
 Q(u, P) &= C_d A(u) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_c)} \\
 \frac{dP_c}{dt} &= \frac{\beta}{V} (Q(u, P_s) - A \dot{x})
 \end{aligned}
 \tag{17.1}$$

де $u(t)$ – сигнал керування (наприклад, від ПІД-регулятора), P_s – сталий тиск подачі, P_c – тиск у камері.

Далі виділяємо блоки:

- Інтегратори 2-го порядку для отримання $x'' = \ddot{x}$; $x' = \dot{x}$.
- Функціональні блоки: « $B(\cdot)$ » (в'язке тертя), « $k \cdot x$ » (пружність), « $F_{гидр}(u, P)$ » (гідролічна сила), « $F_{зовн}(t)$ » (збурення).
- Блок «Flow» для моделі витрати $Q(u, P_s)$.
- Інтегратор для динаміки тиску dP_c/dt

Будуємо схеми у VisSim

- ✓ Сигнал керування $u(t)$ → PID-контролер → вихід PID → блок « $F_{гидр}(u, P)$ ».
- ✓ Блок «Flow Q» отримує $u(t)$ і P_s та формує Q → подається в блок динаміки тиску « dP_c/dt » → інтегратор → P_c .
- ✓ Силова частина: P_c та P_s через площу A дають $F_{гидр}$; зовнішнє $F_{зовн}(t)$ віднімається; суматори формують праву частину рівняння руху.
- ✓ Динаміка руху: суматор → інтегратор двічі → $x(t)$.
- ✓ Зворотний зв'язок: $x(t)$ надходить у PID як зворотна ланка.

Далі налаштуваєм параметрів блоків

- Ввести числові значення $m, B(\cdot), k, Cd, A, \rho, \beta, V$.
- Задати початкові умови в інтеграторах: $x(0) = x \dot{x}(0) = 0, P_c(0) = P_{c0}$.

Робимо валідацію моделі:

- Запускаємо VisSim-моделювання: подаємо кроковий та гармонійний вхід $u(t)$.
- Перевіряємо реакцію $x(t), P_c(t)$ на відповідність аналітичним очікуванням або експериментальним даним.
- Далі за потреби уточнити параметри та блоки (лінеаризація окремих нелінійних характеристик, додавання демпферів).

Структурно-функціональна схема VisSim наведено на рисунку 17.1

Цей опис можна перенести до графічного інтерфейсу VisSim, використовуючи стандартні блоки: Source, Sum, Gain, Function Table (для $B(\cdot)$), Integrator, PID, Scope (для візуалізації).

Таке поетапне формування схеми гарантує, що модель у VisSim точно відтворює всі важливі нелінійні та динамічні ефекти гідросистеми.

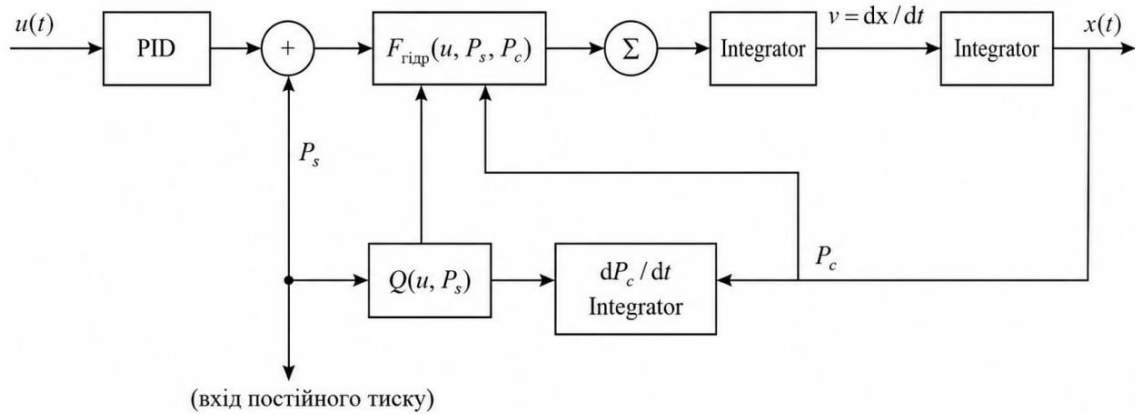


Рисунок 17.1 – Структурно-функціональна схема VisSim

17.2 . Дослідження динамічних процесів бурового насоса на ЕОМ

Динамічний аналіз бурового насоса за допомогою імітаційного моделювання на ЕОМ дозволяє виявити поведінку системи під час пуску, зміни навантаження та переходу між режимами роботи. Буровий насос зазвичай представляє собою поршневий або плунжерний механізм з сильними пульсаціями витрати й високою в'язкістю рідини – факторами, що значно впливають на динаміку. При моделюванні необхідно врахувати як механічний привід, так і гідравлічні характеристики середовища, включаючи стисливість розчину, тертя в насосному механізмі й нелінійність клапанних груп.

Початково формуються диференціальні рівняння руху поршня, в яких інерційну складову становить маса поршневої групи, демпфуючу – в'язке тертя бурового розчину й механічні втрати в підшипниках, а пружну – жорсткість ущільнень і стисливість рідини у напірних і зливних лініях. Одночасно вводиться модель витрати через зворотні та запобіжні клапани, де витрата залежить від перепаду тиску та ходу клапана. Система рівнянь доповнюється динамікою тиску в ресиверах і акумуляторах, що згладжують пульсації.

Після формулювання повного набору рівнянь підключають чисельний інтегратор (зазвичай метод Рунге–Кутти 4-го порядку) і ставлять початкові умови: початкове положення поршня, тиск у гідролінії, температура та в'язкість рідини. У середовищі моделювання (наприклад, MATLAB/Simulink або VisSim) створюють блок-схему, що відтворює: приводний механізм (електродвигун і редуктор), насосну групу (поршень із клапанами), лінії зливу та подачі, акумулятор, датчики тиску і витрати.

Проведення чисельного експерименту включає дослідження переходу з «холодного» пуску, реакцію на різкі зміни частоти обертання приводу, зміну зовнішнього навантаження (наприклад, об'ємний опір свердловини) та нестабільні умови (повітряні пробки або змішування зі шламом). Аналіз вихідних сигналів – координат поршня, тиску, витрати–дозволяє побудувати часові графіки, оцінити час встановлення, перерегулювання та затухання пульсацій.

Такий підхід дає змогу оптимізувати розміри гідроліній, підібрати налаштування запобіжних клапанів і акумуляторів, а також розробити алгоритми керування приводом, що мінімізують ударні навантаження та знижують механічний знос.

У підсумку імітаційне моделювання динаміки бурового насоса – це інструмент, який забезпечує глибоке розуміння робочих процесів, дозволяє знизити ризики аварій і забезпечити ефективність буріння в умовах високих динамічних навантажень.

Питання для обговорення

- 1. Які основні фізичні явища необхідно враховувати під час моделювання динаміки бурового насоса на ЕОМ?*
- 2. Як впливають пульсації тиску та витрати на загальну стабільність роботи бурового насоса?*
- 3. Які елементи бурового насоса вносять найбільший вклад у нелінійність моделі, і як це враховується в імітаційному моделюванні?*
- 4. Які методи чисельної інтеграції найдоцільніше застосовувати для розв'язання рівнянь динаміки насоса і чому?*
- 5. Як результати імітаційного моделювання можуть бути використані для покращення конструкції або алгоритму керування буровим насосом?*

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. А. В. Назаров, О. В. Кочерган, В. А. Голуб'єв. Системний підхід до дослідження динаміки механічних систем: теорія та методи. Київ: Видавництво "Наукова думка", 2018. 352 с.
2. Луговський О. Ф., Струтинський С.В., Гришко І.А., Семінська Н.В., Ночніченко І.В., Зілінський А.І. «Гідроавтоматика та робототехніка»: навч. посіб. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 61 с.
3. Нестеренко В.П. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навч. Посібник. Рівне: НУВГП, 2013.-328 с.
4. Лур'є З.Я., Іваніцька О.П., Жерняк А.І. Моделювання та оптимізація гідравлічних систем. Учбов. посібник. Київ: ІСДО, 1995. 144с.
5. Лур'є З.Я., Іваніцька О.П. Моделювання та динаміка гідравлічних систем. Учбов. Посібник.- Харків, ХДПУ, 2000. 132с.
6. Лур'є З.Я., Гасюк О.І. Динаміка об'ємних гідропневмосистем загальнопромислового призначення: навч. посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2008.- 112с. (<http://library.kpi.kharkov.ua>)
7. С. П. Мовчана та Ю. В. Дехтяренка Гідравліка та пневматика: навчальний посібник. Донбаська видавнича спілка", 2017, 416 с..

ЗМІСТ

Вступ	3
Тема 1. Динаміка слідкувальних ГПС з дросельним управлінням.....	4
Тема 2 Лінійна модель слідкувальної ГПС	8
Тема 3. Динаміка слідкувальної гідравлічної системи (СГС) з чотирикромковим золотником	15
Тема 4. Лінійна модель	20
Тема 5. Нелінійна модель	25
Тема 6. Визначення динамічних процесів у системі шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ	30
Тема 7. Динаміка програмних ГПС з дросельним управлінням	34
Тема 8. Динаміка гідравлічної системи переміщення повзуна листоозгинального преса з ЧПУ	38
Тема 9. Принципова і функціональна схеми гідросистеми.....	42
Тема 10. Складання структурно-функціональної схеми.....	48
Тема 11. Визначення динамічних процесів в системі шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ	52
Тема 12. Динаміка ГПС з об'ємним регулюванням.....	56
Тема 13. Динаміка гідравлічної системи гідропровідного бурового насоса з об'ємним управлінням.....	59
Тема 14. Принципова гідравлічна схема насоса, основні особливості його функціонування	63
Тема 15. Математичні моделі основних гідропристроїв насоса	69
Тема 16. Нелінійна модель гідросистеми в цілому	72
Тема 17. Складання структурно-функціональної схеми за рівняннями математичної моделі.....	74
Список джерел інформації.....	75

Навчальне видання

Конспект лекцій
з дисципліни «Динаміка гідропневмосистем»
для здобувачів другого (магістр) рівня вищої освіти
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»

Укладач Олександр ГАСЮК

В авторській редакції

План 2025 р., поз 652

Підп. до друку 15.10.2023 Формат 64 x 84 1/16.
Папір офісний. Riso-друк.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,3. Наклад 50 прим.
Зам. № ____ . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
