

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДА

© Ярослав Олексюк, Орест Івахів, 2005

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра приладів точної механіки,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Запропоновано структуру моделі гідравлічної системи, адаптованої для використання програмного пакета MatLab Simulink. Наведено функціональні схеми як системи загалом, так і окремих її складових, розглянуто можливості застосування моделі під час проектування, оптимізації та випробовування системи.*

*Предлагается структура математической модели гидравлической системы, адаптированной к использованию программного пакета MatLab Simulink. Дано функциональные схемы как системы в целом, так и ее составных частей, рассмотрены возможности использования модели при проектировании, оптимизации и испытаниях системы.*

*Structure of a hydraulic system's MatLab Simulink model is presented. Functional schemes of the entire system and its elements are given as well as possible applications for design, optimization and tests described.*

**Вступ.** На різних стадіях проектування чи впровадження гідравлічних приводів (тут і надалі йтиметься про гідростатичні приводи) виникає потреба в аналізованні їхньої роботи. Для економії витрат і часу доцільним є застосування теоретичних математичних моделей [1, 2, 3]. Таке моделювання пов'язане із певними труднощами, що виникають внаслідок наявності серед теоретичних засад гідравліки значної кількості емпіричних величин та формул, а також різних підходів до вирішення певних проблем описання поведінки потоків рідини [4]. Пропонуємо структуру моделі гідравлічного привода, адаптованої до середовища MatLab Simulink. Модель описано на трьох рівнях: загальна побудова моделі та зв'язки між її основними блоками, структура окремого блока та приклад математичного описання деяких гідравлічних пристроїв.

Вхідну інформацію для побудови моделі становлять:

- функціональна гідравлічна схема привода;
- функціональні гідравлічні схеми окремих гідравлічних пристроїв;
- технічні характеристики пристроїв;
- необхідні значення параметрів режимів роботи системи та її складових.

Внаслідок застосування моделі передбачається отримання такої вихідної інформації:

- розрахункові параметри роботи системи та її складових у заданих режимах;

- значення сукупних параметрів якості роботи системи за заданих умов і режимів;

- розходження між теоретичними характеристиками роботи системи та необхідними чи одержаними експериментально.

MatLab Simulink – це програмний пакет для моделювання та аналізування лінійних та нелінійних динамічних систем. Побудована засобами MatLab Simulink модель є набором у певний спосіб з'єднаних функціональних блоків [5], в основу побудови котрих покладено ієрархічно-модульний принцип: складові частини моделі є багаторівневими математичними модулями, кожен з яких може застосовуватися у різних моделях. Створення бібліотеки таких модулів значно спрощує побудову нових моделей.

MatLab Simulink є універсальним математичним пакетом, отже, запропонована структура моделі орієнтована на узгодження можливостей пакета та потреб машинобудівної гідравліки.

**Прийняті терміни та позначення.** Надалі для описання структури моделі гідравлічної системи прийнято такі основні терміни:

- система – досліджуваний гідравлічний привод;
- пристрій – складова частина досліджуваного гідравлічного привода (тут ідеться про будь-який гідравлічний чи гідромеханічний вузол привода);
- модель – сукупність елементів та взаємозв'язків між ними, котра у певний спосіб відображає функціонування досліджуваного привода;

– елемент – складова частина моделі; прийнято два типи елементів: гідравлічні – теоретичні аналоги пристроїв, теоретичні – умовні елементи, призначені для керування моделлю, опрацювання даних та замикання алгоритмів її роботи;

- блок – функціональне поєднання елементів моделі;
- модуль – складова частина елемента.

При моделюванні гідравлічна система описується сукупністю змінних та констант, що є аналогами як дійсних гідравлічних, механічних, електричних величин, так і теоретичних (математичних, фізичних, логічних тощо). Ці величини згруповано за їхньою природою у такі типи даних:

– Г – гідромеханічні – сукупність змінних, що описують гідравлічні (тиск, потік тощо), механічні (частота обертання ротора, швидкість руху виконавчого органу тощо) величини; значення цих величин отримують в результаті застосування моделі;

–  $G_{вх}, G_{вих}$  – вхідні та вихідні значення гідромеханічних величин відповідно;

– К – керувальні сигнали – величини, що задають режим роботи елемента;

–  $K_{вх}$  – вхідні для деякого елемента значення керувальних сигналів;

–  $K_{вих}$  – вихідні для деякого елемента значення керувальних сигналів – сигнали зворотного зв'язку;

– П – параметри – змінні параметри елементів та блоків моделі (робочі об'єми гідромеханічних пристроїв, тиски налаштування клапанів, величини, що описують стан комутувальних пристроїв, характеристики режимів потоків тощо); значення цих величин змінюються під час роботи моделі, а також задаються при встановленні її режимів;

– С – сталі – гідравлічні, механічні, математичні та інші константи.

**Загальна структура моделі.** Модель можна розглядати як ієрархічну структуру із такими рівнями:

– верхній – складається із блоків керування та елементів власне моделі, умовно об'єднаних в один блок, хоч фактично елементи є самостійними блоками (рис.1);

– середній – рівень складових частин блоків верхнього рівня: елементів моделі (рис.2), функціональних частин блоків керування К і Д (рис. 1);

– нижній – рівень складових частин модулів – величин та формул, що складають модулі П, С, М.

Необхідно зауважити, що у поданій ієрархії на кожному із рівнів може утворюватися будь-яка кількість підрівнів.

На верхньому рівні гідравлічна система подається як сукупність елементів, котрі функціонально описують пристрої реальної системи. З'єднання між елементами визначаються топологією схеми системи. Зовнішній вплив на пристрої описується відповідними параметрами та константами у кожному елементі окремо.

Утворену у такий спосіб модель на найвищому ієрархічному рівні можна зобразити як поєднання таких блоків (рис. 1):

– Оператор – особа, котра заданням параметрів режимів здійснює керування моделлю, збирає інформацію про її функціонування;

– К – блок керування – блок керування моделлю, через який подають команди, що задають режими роботи системи, та збирають сигнали зворотного зв'язку від елементів моделі;

– Д – блок даних – блок накопичення та опрацювання інформації про функціонування елементів моделі, виведення її у зручній для оператора формі;

– ГС – гідросистема – власне модель, описує пристрої системи, складається із елементів моделі;

–  $E_{11}...E_{ij}$  – елементи моделі.

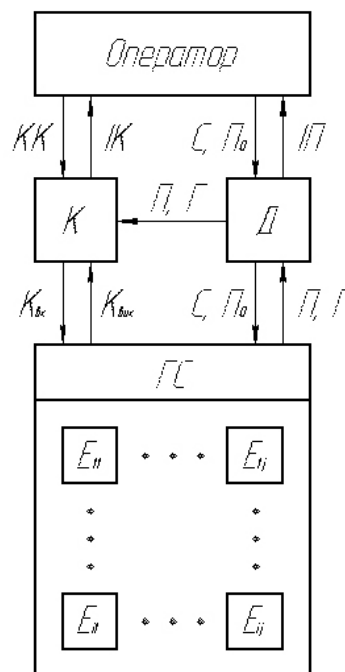


Рис. 1. Загальна структура моделі

Робота моделі полягає в опрацюванні заданих ззовні величин відповідно до закладених в елементах алгоритмів, отриманні проміжних значень та як результат роботи – виведення у певній формі вихідних даних.

Перед застосуванням моделі оператор вводить у блок Д значення констант С та початкові значення параметрів  $P_0$ , котрі через блок Д надходять до ГС. Функціям керування приводом відповідає введення до блока К певних команд керування КК; оператор отримує інформацію про поточний стан органів керування ІК цього блока. Від блока К до блока ГС надходять сигнали керування  $K_{вх}$ , згенеровані на підставі команд КК. Блок ГС моделює роботу системи у заданих умовах. Від нього до блока К надходять поточні значення величин зворотного зв'язку елементів Е у вигляді сигналів  $K_{вих}$ , а до блоку Д – поточні значення параметрів П та гідромеханічних змінних Г. Опрацьована у блоці Д інформація про роботу моделі (системи) як сукупність даних П надходить до оператора. Саме ця сукупність, опрацьована у блоці Д, є результатом роботи моделі.

**Загальна структура елемента.** Окремий елемент можна розглядати як підсистему моделі із подібною структурою. Загальну структуру елемента моделі подано на рис. 2. Елемент складається із трьох функціональних модулів: математичного М, модулів параметрів П та сталих С, а також умовних модулів введення та виведення даних. На рис.2 не зображено зв'язку модулів П та С із блоком даних Д моделі.

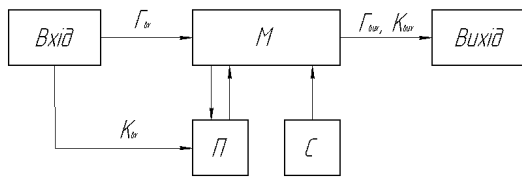


Рис. 2. Схема узагальненого елемента

На вхід елемента від інших елементів подаються значення гідромеханічних величин  $\Gamma_{вх}$ , а також від блока К – сигнали керування  $K_{вх}$ . Ці сигнали змінюють значення параметрів у модулі П. На підставі оновлених значень П та  $\Gamma_{вх}$  у математичному модулі М здійснюється обчислення значень вихідних величин – гідромеханічних  $\Gamma_{вих}$  та сигналів зворотного зв'язку  $K_{вих}$ . Останні надходять безпосередньо до блока К і/або виконують роль вхідних керувальних сигналів  $K_{вх}$  для інших елементів, а, отже, не виходять за межі блока ГС.

Функції елемента повністю визначаються структурою модуля М, котра відображає математичну модель пристрою. Враховуючи це, можна сформулювати підхід до побудови сукупності елементів моделі. Створюється набір стандартних елементів різних видів: кожному виду пристроїв відповідає один окремий стандартний елемент; вид пристрою визначається структурою модуля М та набором параметрів П і сталих С; для описання конкретного пристрою параметрам стандартного елемента надають відповідні значення.

**Класифікація пристроїв та елементів.** Кожний елемент є аналогом пристрою, отже, класифікації елементів та пристроїв збігаються. На рис. 3 подано класифікацію пристроїв, складену на основі загальноприйнятої у машинобудівній гідравліці номенклатури. На найнижчому класифікаційному рівні подано приклади пристроїв певних видів, проте не охоплено увесь спектр можливих варіантів.

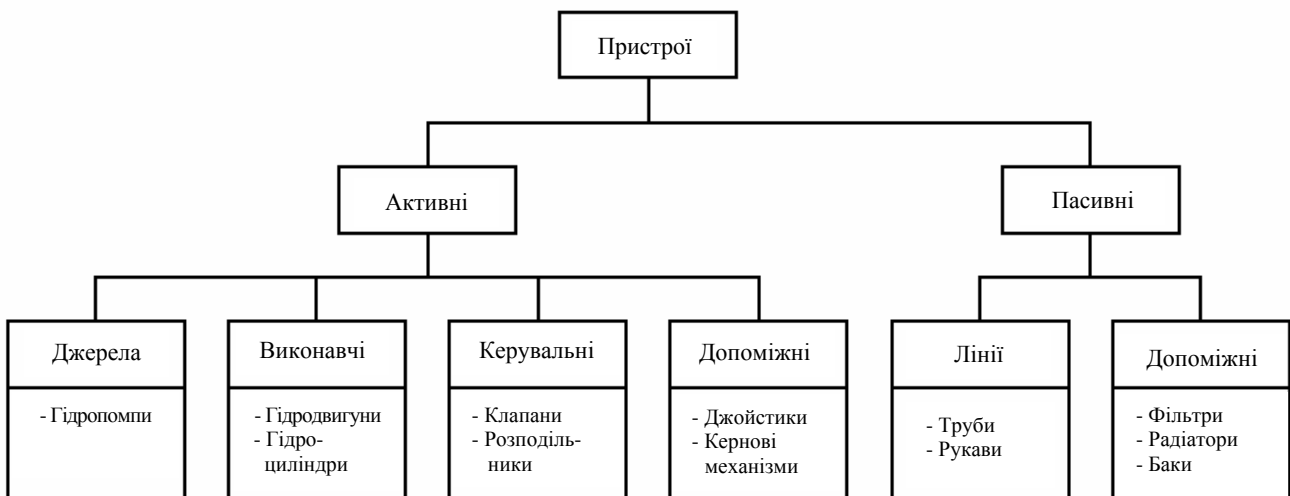


Рис. 3. Класифікація гідравлічних пристроїв

Поділ на активні та пасивні пристрої тут є умовним. До активних належать пристрої генерування гідравлічної потужності та керування потоками робочої рідини, а до пасивних – вузли, що забезпечують з'єднання між іншими та можуть розглядатися лише як гідравлічні опори.

До джерел та виконавчих пристроїв належать гідромеханічні вузли, що здійснюють перетворення механічної енергії у гідравлічну (джерела) і навпаки (виконавчі). Керувальні пристрої переважно здійснюють дві дії: комутацію та регулювання енергетичних параметрів потоків. Частково функціями регулювання можуть володіти також джерела та виконавчі механізми. Допоміжні пристрої найчастіше є різновидами керувальних, проте виділені окремо у зв'язку із специфічністю функцій, котрі вони виконують. Як зазначалося вище, основною характеристикою пасивних пристроїв вважають їхній гідравлічний опір, хоч радіатори, фільтри характеризуються низкою специфічних параметрів, котрі, проте, не мають безпосереднього впливу на функціональність системи. Така класифікація сформульована не так сукупністю гідравлічних характеристик пристроїв, як принципами побудови їхніх моделей.

**Приклад математичного описання пристроїв.**

Одним із методів описання пристрою є його подання як гідравлічного опору, котрий відображається через спад тиску на пристрої. Загалом гідравлічні опори як спади тисків елементів можна поділити на три групи:

– гідравлічні довжинні  $\Delta p_1$  – виникають в результаті сил тертя, розподіляються рівномірно на

ділянках прямолінійного та рівномірного руху і дещо нерівномірно на ділянках нерівномірного руху рідини;

– гідравлічні місцеві  $\Delta p_s$  – виникають у місцях різкої зміни значення і напрямку швидкості на ділянках різкої зміни конфігурації потоку;

– механічні  $\Delta p_m$  – зумовлені механічним опором рухомих частин гідромеханічних пристроїв (гідропомп, гідродвигунів, клапанів тощо).

Визначаючи сумарні втрати тиску, використовують принцип незалежності втрат енергії, за яким повні втрати дорівнюють арифметичній сумі довжинних і місцевих втрат, а також механічних, що фактично є різновидом місцевих [4]:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_1 + \Delta p_s + \Delta p_m.$$

Відповідно до цього підходу основними величинами, що описують роботу системи, є тиск і потік. Їхні значення у певних точках системи дають необхідну інформацію для таких важливих процедур, як енергетичний аналіз системи, кінематичний та силовий її розрахунки тощо.

Отже, у цьому прикладі аналізування роботи гідросистеми із застосуванням моделі полягає у визначенні спадів тисків системи та відстеженні значень потоків рідини у всіх ділянках системи.

У таблиці подано приклади наборів величин модулів П, С та М, що відповідають деяким видам пристроїв. Необхідно зауважити, що подано вміст найпростіших блоків поширених елементів.

**Приклади наборів величин модулів елементів**

Елемент (пристрій)	Модуль П	Модуль С	Модуль М	Коментар
1	2	3	4	5
Гідропомпа	Робочий об'єм V Коефіцієнт моменту $c_M$ Частота обертання n	Об'ємний ККД $\eta_Q$ Гідравлічний ккд $\eta_p$	Вихідний тиск: $p_{\text{вих}} = c_M \cdot \text{ЧМ}_{\text{вх}}$ ; Вихідний потік: $Q_{\text{вих}} = V \cdot \text{Чп}$	Подано для регульованої гідропомпи
Гідродвигун	Робочий об'єм V Коефіцієнт моменту $k_M$ Частота обертання n	Об'ємний ККД $\eta_Q$ Гідравлічний ККД $\eta_p$	Вихідний момент: $M_{\text{вих}} = k_M \cdot \text{Чр}_{\text{вх}} \cdot \text{Чз}_p$ ; Вихідна частота обертання: $n_{\text{вих}} = \frac{Q_{\text{вх}} \cdot \text{Чз}_Q}{V}$	Подано для регульованого гідродвигуна
Гідроциліндр	Робочий об'єм V Поточне видовження L	Робоча площа S Найбільша довжина $L_m$	Вихідне зусилля: $F_{\text{вих}} = S \cdot \text{Чр}_{\text{вх}}$ ; Вихідна швидкість: $v_{\text{вих}} = \frac{Q_{\text{вх}}}{S}$	–

Продовження табл.

1	2	3	4	5
Клапан	Падіння тиску $\Delta p$ Тиск спрацювання $p_m$	Коефіцієнт потоку $k_Q$	Тиск виходу: $p_{\text{вих}} = p_{\text{вх}} - \Delta p$ Потік зливу: $Q_{\text{вих}} = k_Q \cdot C(p_{\text{вх}} - p_m)$	Подано для узагальненого клапана як вентиля
Розподільник	Падіння тиску $\Delta p$ Оператор комутації $f_{ij}$ (логічна функція)	–	Тиск $j$ -го виходу: $p_{\text{вих}j} = (p_{\text{вх}i} - \Delta p) \cdot C f_{ij}$ ; Потік $j$ -го виходу: $Q_{\text{вих}j} = Q_{\text{вх}i} \cdot C f_{ij}$	$f_{ij}$ – стан з'єднання $i$ -го входу із $j$ -м виходом
Труба	Коефіцієнт довжинного опору $\xi$ Коефіцієнт місцевого опору $\lambda$ Коефіцієнт нерівномірності опору $\alpha$	Умовний діаметр $D_N$	Вихідний потік: $Q_{\text{вих}} = Q_{\text{вх}}$ ; Спад тиску: $\Delta p = \frac{6 \cdot C \cdot C u^2}{g} \left( \frac{\alpha \cdot C l}{\rho \cdot C D_N^2} + \frac{l}{2} \right)$	$l$ – довжина труби; $\rho$ – густина рідини; $u$ – швидкість руху рідини у трубі;

**Застосування моделі.** Описаний вище підхід до моделювання роботи гідравлічного привода дає змогу розв'язувати деякі завдання, що можна звести до трьох основних груп:

– підбір значень параметрів привода при проектуванні (у блоці Д задають необхідні значення параметрів роботи системи, котрі порівнюють із отриманими при моделюванні значеннями); оцінювання якості роботи системи та раціональність її побудови за певними критеріями (коефіцієнт корисної дії, функціональність тощо); коригування характеристик моделі та її елементів, а, отже, і привода як гідравлічної системи;

– оптимізація параметрів та функціонування гідросистеми; у блоці Д задають необхідні значення критеріїв оптимізації та процедури отримання їх поточних значень; моделювання та коригування параметрів відбуваються аналогічно до описаного у попередній групі; метою є перевірка роботи вже наявної системи та виявлення можливих ресурсів покращання її функціонування відповідно до заданих критеріїв;

– опрацювання результатів випробувань наявної гідравлічної системи та уточнення експериментальних

параметрів; у блок Д вводять результати вимірювань, здійснених при випробуванні системи, котру описує модель; після задіяння моделі порівнюють результати вимірювань та одержані при моделюванні, на підставі чого, залежно від конкретного завдання, можна робити висновок або про точність вимірювання, або про адекватність моделі реальній системі.

У межах описаних задач модель дає змогу здійснювати енергетичний, кінематичний розрахунки системи, аналіз її функціонування тощо. Точність отриманих результатів залежить від адекватності та точностей моделі, математичного апарату і значень емпіричних величин.

1. *Simulation hydraulischer und pneumatischer Antriebe und Komponenten.* [http://www.tu-dresden.de/mwifd/forsch/proj\\_12.html](http://www.tu-dresden.de/mwifd/forsch/proj_12.html). 2. *Entwicklungswerkzeuge für Schienenfahrzeuge mit hydraulischen Komponenten.* [http://www.tudresden.de/mwifd/forsch/proj\\_17.html](http://www.tudresden.de/mwifd/forsch/proj_17.html). 3. *Experimentelle Ermittlung und Berechnung des Energienutzungsgrades hydraraulischer Antriebe.* [http://www.tudresden.de/mwifd/forsch/proj\\_22.html](http://www.tudresden.de/mwifd/forsch/proj_22.html). 4. Левицький Б.Ф., Леуїї Н.П. *Гідравліка. Загальний курс.* Л., 1994. 5. *Simulink. Dynamic System Simulation for MatLab.* The MathWorks Inc., 2000. 742 p.