



## Техніка для земляних та дорожніх робіт

УДК 630.383

Л.Е. Пелєвін<sup>1</sup>, д.т.н., професорМ.М. Карпенко<sup>1</sup>, аспірант,В.В. Чемерис<sup>2</sup>, аспірант<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури (КНУБА)<sup>2</sup>Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (ВТУ ім. Гедимінаса)

### ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАМКНЕНО-РОЗГАЛУЖЕНОГО ПРОМИСЛОВОГО ГІДРОПРИВОДУ ЯК СКЛАДНОГО ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ

**АНОТАЦІЯ.** У статті проведений аналіз роботи багатопривідних систем промислових гідроприводів, визначені рівні енергетичних втрат при роботі системи в кожний момент часу та в окремих ділянках гідравлічної системи. Розроблено граф-аналітична система рівнянь балансу витрат в умовах планового розвитку проектувати промислові гідроприводи з максимальним використанням енергопотоків. Визначені шляхи мінімізації енергетичних втрат та запропоновані заходи з реалізації зменшення рівня енергоспоживання промислових систем через розробку та впровадження енергоефективних схем

**Ключові слова:** гідропривід, енергетичні втрати, гідро лінії, витрати, управління.

**АННОТАЦИЯ.** В статье проведен анализ работы багатопривідних систем промислових гідроприводов, определены уровни энергетических потерь при работе системы в каждый момент времени и в отдельных участках гидравлической системы. Разработана граф-аналитическая система уравнений баланса расходов в условиях планового развития проектировать промышленные гидроприводы с максимальным использованием энергопотоков. Определены пути минимизации энергетических потерь и предложены меры по реализации уменьшения уровня энергопотребления промышленных систем путем разработки и внедрения энергоэффективных схем

**Ключевые слова:** гидропривод, энергетические потери, гидро линии, расходы, управление

**ABSTRACT.** In the article the analysis of industrial hydraulic systems multipass specified level of energy losses in the system at any given time and in some parts of the hydraulic system. Developed graph-analytical system of balance equations costs in a planned development of industrial design actuator with maximum use of energy flows. The ways to minimize energy losses and proposed measures to implement the reduction of energy consumption of industrial systems through the development and implementation of energy efficiency schemes.

**Keywords:** hydraulic, energy losts, hydraulic lines, cost, controls.

**Вступ.** З урахуванням значних енергетичних затрат при роботі технологічного обладнання в процесі виробництва, варіантом підвищення економічної ефективності роботи системи є підвищення безпосередньо ефективності роботи пристроїв гідроприводу, які входять до складу цієї системи [1]. Більшість промислових виробництв (металургія, важке машинобудування, хімічне виробництво тощо) використовують в технологічному циклі велику довжину гідравлічних ліній. Аналіз гідравлічних промислових систем показав не ефективне використання цього обладнання, тому актуальним постає питання підвищення ефективності та економічності роботи даної частини системи, що дозволить значно зменшити затрати на експлуатацію всієї системи промислового підприємства в цілому, що є однією з основних практичних задач.

**Мета роботи.** Підвищення енергетичної ефективності виробництва є однією з основних задач для інженерів та проектувальників, що пов'язано не лише з економічною складовою цього питання, а, в першу чергу, і з обмеженнями на обсяги використання ресурсів як окремими підприємствами, так і державою в цілому. Очевидно, що на

енергетичну ефективність впливає велика кількість факторів, в зв'язку з складністю, різноманітністю та мехатронною спрямованістю промислових систем. Ступінь на енергетичну ефективність кожного з них є неоднаковим, а також шляхи зменшення впливу не завжди можуть бути реалізовані традиційними засобами. Таким чином, виникає необхідність проведення аналізу роботи багатопривідних систем гідроприводів з метою визначення рівня енергетичних втрат при роботі системи в кожний момент часу та в окремих ділянках гідравлічної системи. В результаті чого, можливо надати, як найточніші рекомендації по покращенню проектування даних промислових гідроприводів з урахуванням складного управління ними.

**Виклад основного матеріалу.** Промисловий гідропривід, як об'єкт управління є складний комплекс взаємопов'язаних пристроїв, що забезпечують робочі пристрої згідно з їх потребами. Розміщення цих пристроїв від баку до робочого органу та їх взаємне розміщення проектується у відповідності до нормативно-технічних рекомендацій та вимог, в результаті чого створюється замкнено-розгалуженна система (рис. 1).



Рис. 1. Елементи насосної станції промислового гідроприводу

Замкнено-розгалужені гідроприводи являють собою замкнуті суміжні контури, або кільця. Такі мережі мають велику надійність. У таких мережах виведення з ладу ділянки може бути компенсовано подачею по паралельних і обхідних лініях.

Розрахунки замкнено-розгалужених гідроприводів є складним завданням, що враховує не тільки трубопроводи, а всі елементи – насоси, розподільники, дроселі, перехідники, гідроциліндри, гідромотори і т.д. [2].

Структура замкнено-розгалуженого гідроприводу класифікується за ступенем оперативного впливу та за засобами з'єднання (рис. 2).

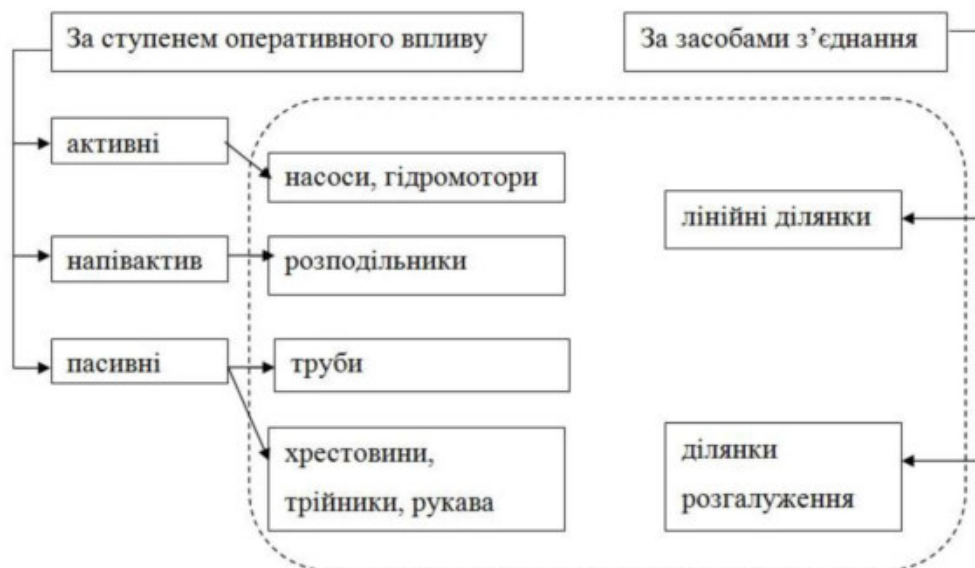


Рис. 2. Класифікація елементів гідроприводу





За ступенем оперативного впливу елементи гідроприводу розділяються на пасивні  $G_n$  (до яких не можна застосувати управляючий вплив в оперативному режимі – трубопроводи (магістралі), трійники, хрестовини, рукава), напівактивні  $G_{na}$  (до яких можна частково застосувати управляючий вплив - розподільники) та активні  $G_a$  (якими безпосередньо можна управляти в оперативному режимі – насоси, гідромотори).

За засобами з'єднання елементи гідроприводу розділяються на лінійні ділянки та ділянки розгалуження.

Вихідними відомостями замкнено-розгалуженого промислового гідроприводу є загальна конфігурація мережі, довжина ділянок, матеріали труб, так як, основною частиною даних гідроприводів являються трубопроводи, які можуть досягати навіть кілька сотнів метрів.

Спершу, для більш точного аналізу, визначають напрямлення руху робочої рідини (початковий розподіл потоків). При цьому повинен забезпечуватися перший закон Кірхгофа, тобто рівність нулю суми витрат, які надходять до вузла (додатні) і які виходять з вузла (від'ємні):

$$\sum Q_i = 0. \quad (1)$$

Втрати опору у вузлах повинні задовольняти другий закон Кірхгофа, тобто алгебраїчна сума витрат опору в кожному вузлі має бути рівна нулю:

$$\sum h_{i-k} = 0, \quad (2)$$

де  $h_{ik}$  – втрата опору на  $i$  ділянці і  $k$  вузлам.

Знаючи секундну витрату і загальну довжину всіх ділянок, знаходимо питому витрату на одиницю довжини трубопроводів:

$$q_{нит} = \frac{Q_{сек}}{\sum L} \text{ (м}^3\text{/с на м)}. \quad (3)$$

Витрату робочої рідини окремими ділянками називають шляховою витратою. Шляхова витрата кожної ділянки – це добуток питомої витрати і довжини ділянки:

$$Q_{шлях} = g_{пит} L_{діл}, \text{ м}^3\text{/с}. \quad (4)$$

Вузлова витрата дорівнює півсумі шляхових витрат ділянок, які примикають до вузла:

$$Q_{вуз} = 0,5 \sum Q_{шлях}, \text{ м}^3\text{/с}. \quad (5)$$

Для перевірки необхідно скласти всі вузлові витрати, які повинні дорівнювати секундній витраті:

$$\sum Q_{вузл} = Q_{сек}. \quad (6)$$

Для кожного кільця вузла рух по годинниковій стрілці – додатний, а проти – від'ємний.

Після розподілу витрат рідини по ділянках визначаємо діаметри ділянок мережі.

Швидкість руху рідини визначають за таблицями Ф.А.Шевелєва [3] або виходячи з рівняння нерозривності струменя:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot V. \quad (7)$$

Після виконання вищевказаних операцій приступаємо до розрахунку мережі, тобто знаходимо втрату опору по кожній ділянці. Для цього використовуємо залежність

$$h = ALKg^2, \quad (8)$$

де  $g$  – секундна витрата для ділянки мережі,  $\text{м}^3\text{/с}$ ;  $A$  – коефіцієнт шорсткості, залежно від діаметра при витраті в  $\text{м}^3\text{/с}$ ;  $L$  – довжина ділянки,  $\text{м}$ ;  $K$  – коефіцієнт швидкості.

Розрахунок вузла складається з того, що втрати опору в кожному кільці вузла по ходу і проти стрілки годинника повинні бути рівними,  $\sum (+h) = \sum (-h)$ . Їх різницю називають нев'язкою мережі, що повинна вона бути не більше 0,5 м.вод.ст.

Найбільш поширеним способом розрахунків даних мереж є метод Лобанова-Кросса [4]. Суть цього метода в послідовному виправленні витрат попереднього розподілу потоків

по всіх ділянках мережі з доведенням їх до дійсних за значенням нев'язких втрат  $\Delta h$  у кожному кільці.

При цьому виправлення витрат на ділянках здійснюється зменшенням витрат на перевантажених ділянках і збільшенням на недовантажених ділянках, рахуючи втрати опору напору на ділянках з рухом води за годинниковою стрілкою зі знаком плюс і проти годинникової стрілки зі знаком мінус. Поправочна витрата для ділянок кожного кільця гідроприводу визначається залежно від величини нев'язки по кільцю  $\Delta h$  за формулою:

$$\Delta g = -\frac{\mp \Delta h}{2 \sum (Sg)}. \quad (9)$$

Розрахувавши мережу, знаючи основні параметри проведемо формалізацію управління замкнено-розгалуженого промислового гідроприводу.

Адекватною топологічною моделлю яка описує багатовимірність управління такими гідроприводами є граф  $G(X, V)$ , елементам якого поставлена у відповідність деяка множина змінних і ознак [5]. Граф  $G(X, V)$  є заданим, якщо задана сукупність множини елементів  $X$  і підмножини множин впорядкованих пар елементів:

$$(x_i, x_j) \in (X \times X). \quad (10)$$

Підмножина множини пар  $(x_i, x_j)$  декартового добутку  $X \times X$  еквівалентна бінарному відношенню  $R$ , яке задане на множені  $X$ . Елементи поля відношення  $R$ , тобто елементи множини  $X$ , називаються вершинами графа. Множина  $V$  є множиною віток графа  $G$ .

Серед параметрів вершин  $X$  і віток  $V$  розрізняємо: технічні характеристики (діаметри труб, розміри перерізів каналів, довжини та гідравлічні опори гілок); гідравлічні параметри (втрати тиску на гілках або в вузлах, тиск у вузлах, зміни тиску на гілках), які описують стан системи в будь-якому з її режимів роботи; граничні умови (варійовані вхідні дані), величини навантажень, допустимі діапазони в значеннях гідравлічних параметрів [6].

Вектор  $h_i$  можна представити у вигляді об'єднання двох  $E$  - вимірних векторів тиску на початку  $H_{in}$  та  $H_{ik}$  дуги  $e_i$  графа мережі  $G$

$$h_i = H_{in} - H_{ik}. \quad (11)$$

Витрата робочої рідини в системі гідроприводу пов'язана з відповідним перетином труби при заданій швидкості руху:

$$q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v, \quad (12)$$

де  $v$  - швидкість руху робочої рідини,  $d$  - внутрішній діаметр труби.

Втрати напору при русі робочої рідини по елементах трубопроводу пропорційні їхній довжині і залежать від діаметра труб, витрати рідини (подача), характеру і ступеня шорсткості стінок труб (тобто від типу і матеріалу труб) і від області гідравлічного режиму їхньої роботи.

Основною формулою гідравліки, що зв'язує всі зазначені характеристики, є формула Дарсі-Вейсбаха [7]:

$$h = \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (13)$$

де  $h$  - втрати тиску,  $\lambda$  - коефіцієнт гідравлічного опору.

До активних елементів гідроприводу можна віднести множину  $E \subset V = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  - вершин графа, кожен елемент якої представляється насосною станцією, що складається з насосних установок (у випадку встановлення декількох насосів). Напір  $N_{em}$ , що розвивається насосом, установленими в  $e$ -му вузлі визначається за формулою:

$$N = N_2 - N_1 = z_2 - z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}, \quad (14)$$





де  $p_1, p_2$  - тиск на вході та виході з насосу;  $v_1, v_2$  - швидкість води на вході та виході з насосу;  $z_1, z_2$  - висота центру тяжіння перерізу входу та виходу;  $g$  - прискорення вільного падіння.

Після чого об'єднуємо граfi і ув'язка замкнених контурів мережі забезпечується виконанням законів Кірхгофа для кожного замкненого контуру мережі. Закон балансу витрат робочої рідини для кожного кільця гідроприводу  $k$ , описуємо за допомогою граф-аналітичного методу наступним рівнянням:

$$\sum_{i \in V} q_i = \begin{cases} Q_e^{(u)}, e \in E_1; \\ Q_e^{(z)}, e \in E_2; \\ 0, e \in X / (E_1 \cup N, \text{або } E_2 \cup N); \\ -Q_e^{(n)}, e \in N; \end{cases} \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I_k^+} \sum_{j \in J_i} h_{ij} d_{ij} - \sum_{i \in I_k^-} \sum_{j \in J_i} h_{ij} d_{ij} = 0.$$

де  $k$  - порядкові номери замкнутих контурів;  $I_k^+$  - ділянки, по яких рідина прямує за годинниковою стрілкою,  $I_k^-$  - проти годинникової стрілки;  $E_1$  - множина вершин графа, що належать множині джерел;  $E_2$  - множина вершин графа, що належить множині джерел;  $Q_e^{(u)}$  - витрата, яку одержує споживач, розташоване в вершині  $e \in E_1$ ;  $Q_e^{(z)}$  - витрата, що розташована в вершині  $e \in E_2$ ;  $Q_e^{(n)}$  - витрата, яку одержує споживач, розташований в вершині  $e \in N$ , де  $N$  - множина споживачів.

#### Висновок.

На основі аналізу роботи багатопривідних систем гідроприводів визначені рівні енергетичних втрат при роботі системи в кожний момент часу та в окремих ділянках гідравлічної системи. В результаті чого, було розроблено граф-аналітична система рівнянь балансу витрат, яка дає змогу в умовах планового розвитку проектувати промислові гідроприводи з максимальним використанням енергопотоків.

Ці дослідження дозволять визначити шляхи мінімізації енергетичних втрат та реалізувати зменшення рівня енергоспоживання промислових систем шляхом розробки та впровадження методик по розробці енергоефективних схем.

#### Література

1. Скрицкий В.Я. Эксплуатация промышленных гидроприводов / В.Я. Скрицкий, В.А. Рокшевский. – М.: Машиностроение, 1984. – 176 с.
2. Пелевін Л.Є., Лаврик С.В., Карпенко М.М., Пристайло М.О. / Навантаження на робочий орган відвального типу / Техніка будівництва. - 2013. - № 30. - С. 4-10.
3. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. - изд.5-е, доп. - М.:Стройиздат, 1973. – 112с.
4. Абрамов Н. Н., Поспелова М. М., Сомов М. А. и др. Расчет водопроводных сетей: Учеб. пособие для вузов - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Стройиздат, 1983. – 278 с., ил.
5. Евдокимов А.Г., Дубровский В.В., Тевяшев А.Д. Потокораспределение в инженерных сетях. - М.: Стройиздат, 1979. - 199 с.
6. Кулик Ю.В. Оптимізація проєктованих трубопривідних систем. К. - 1991. – 151с.
7. Гидравлический расчет сетей водоотведения: Расчетные таблицы / Ю.М. Константинов, А.А. Василенко, А.А. Сапунин, Б.Ф. Батченко.– К.: Будівельник, 1987. – 120 с.

Надійшло до редакції 13.06.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Сукач М.К.