

doi: 10.32620/oikit.2023.99.09

УДК 681.523.4.015

О. В. Белявський  
О. В. Косенко

## Моделювання характеристик гідравлічних пристроїв автоматики

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»*

У роботі наведені результати розрахунків регресивної моделі гідравлічних втрат технологічного обладнання, зокрема шиберного насосу СВ1-25, який використовується в практиці лабораторного дослідження гідравлічного обладнання (ГО) в рамках навчального процесу на кафедрі теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем НАУ «ХАІ». Завданням роботи виступало встановлення характеру та фактичних гідравлічних втрат у залежності від гідравлічного навантаження. За отриманими даними, в свою чергу, метою виступало встановлення математичної моделі залежності втрат від навантаження ГО. В ході проведення ряду експериментів при послідовному збільшенні гідравлічного навантаження, фіксувалися витрати робочої рідини та гідравлічна потужність системи; обчислювалися втрати потужності та гідравлічний ККД системи. Внаслідок проведення експерименту підтверджена нелінійна теоретична, а саме, параболічна залежність втрат від навантаження, яка описана параболічною регресією при неув'язці моделі, що не перевищує 4%. Отримана математична модель втрат в подальшому може бути використана для побудови повної структурної моделі ГО і детального аналізу факторів, що обумовлюють появу втрат його потужності. Математична модель втрат реального обладнання, що отримана в ході експериментального дослідження може бути додана до вже існуючої моделі ГО з метою нелінійної корекції його ККД при змінному гідравлічному навантаженні в реальних умовах використання. В ході розрахунку математичної моделі були спрощені де-які етапи математичного моделювання, а саме: не розглядалися моделі з більш високим ступенем полінома (тобто не змінювався тип регресивної залежності), не проводилася характеристика значущості отриманих коефіцієнтів за їх розкидом при зміні зовнішніх умов застосування ГО. Застосування у роботі потужної математичної САПР Sim Hidraulics (MATLAB) надає можливість спрощення процесу проектування новітніх систем гідравлічної автоматики з урахуванням досліджених залежностей.

**Ключові слова:** гідравлічне обладнання, гідравлічні втрати, гідравлічний опір, регресивний аналіз, структурне моделювання, технологічні параметри.

### Вступ

Сучасний етап розвитку промислової гідравліки (промислові роботи, верстати ЧПК, тощо) вимагає все більш точнішого та найшвидшого позиціонування деталей та інструменту в умовах широкого діапазону зміни маси механічного навантаження при виконанні допоміжних логістичних процедур та механічної верстатної обробки. При цьому на гідравлічне обладнання, як на найпотужніше та найточніше накладаються особливі вимоги стабільності роботи, враховуючи численні гідравлічні удари, що виникають в ході комутації розподільчої апаратури. З цих причин до характеристик продуктивності гідронасосів висувуються вимоги їх стабільності у всьому діапазоні потужностей  $H(Q)$ , який вони перекривають.

Завдання моделювання гідронасосів розглядалося в багатьох дослідженнях різних провідних наукових колективів України [1...3], в яких

висувались певні цілі моделювання. Зокрема в дослідженнях [1], переслідувалась мета вивчення можливостей середовища Sim Hydraulics (САПР MATLAB) з приводу наближення параметрів моделі відцентрового насосу лопаткового типу до реального об'єкту методом надання його характеристик налаштуванням вбудованих параметрів моделі. В роботі [2] в САПР Sim Hydraulics розглянута структурна модель системи керування стопорним механізмом машини безперервного лиття заготовки. Мета моделювання – покращення динамічних властивостей гідравлічного стопорного механізму для забезпечення підвищення продуктивності процесу розливу металу. В роботі [3] запропоновано узагальнену структуру моделі промислового гідроприводу, яка розроблена з метою визначення енергетичної ефективності системи.

Наявна робота має на меті встановлення математичної моделі втрат гідравлічної рідини об'ємного насосу в залежності від змінного гідравлічного опору системи з метою подальшого наближення моделі до реального відбиття фізичних процесів, що відбуваються в гідравлічному обладнанні.

### Структура автоматизованого гідропривода

На рис. 1 наведено структурну модель гідравлічної системи промислового робота, яка відтворена в образах САПР MATLAB і відображає реальний гідравлічний стенд, що використовується при вивченні курсу «Гідроелектроприводи роботів та верстатів з ЧПК», який викладається кафедрою теоретичної механіки, матеріалознавства і роботомеханічних систем студентам-робототехнікам.

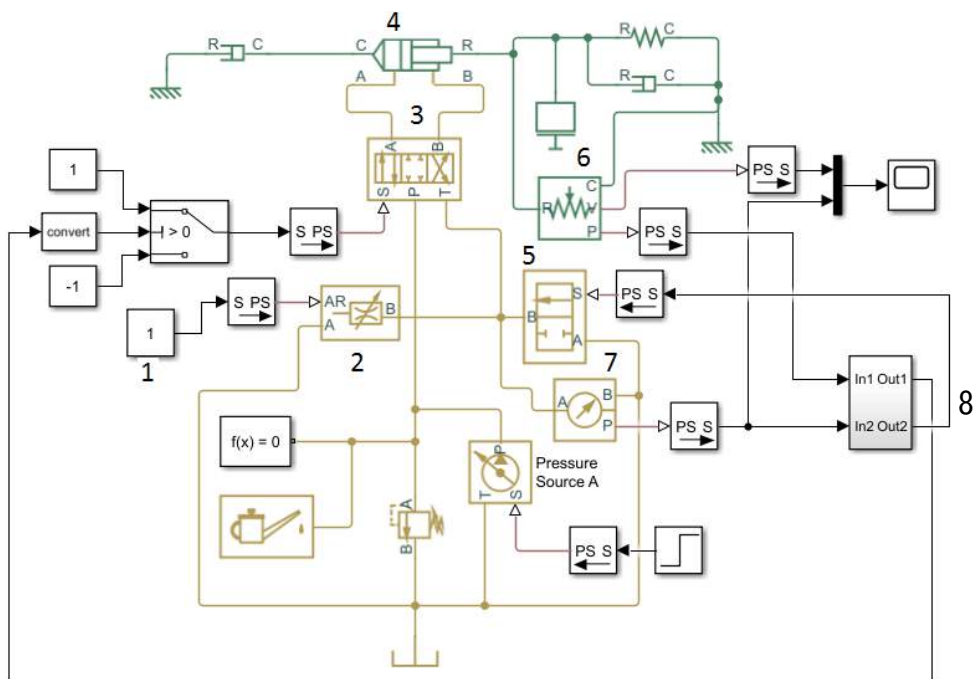


Рис. 1. Структурна модель гідравлічного стенду для дослідження характеристик гідравлічного обладнання: 1 – константа задання змінного опору гідравлічного дроселя 2; 3 – золотниковий розподільувач задання напрямку руху штоку гідроциліндру 4; 5 – зворотний клапан; 6 – модуль контролю координати та швидкості; 7 – модуль контролю тиску у зливній магістралі; 8 – модуль системи керування гідравлічною апаратурою.

Стенд призначений для розробки та дослідження параметрів ГО, що використовується в промислових роботах та верстатах з ЧПК. В ході проводилось дослідження та моделювання нелінійних гідравлічних втрат в об'ємному насосі, які відбувалися за зміни навантаження гідравлічної системи регулюванням прохідного отвору гідравлічного дроселя 2 (Г55-21) (рис. 1) за умови зворотного руху гідроциліндра 4, напрям руху якого регулювався розподільвачем золотникового типу 3, а швидкість керувалась розподільвачем 5. В модулі контролю здійснювалось вимірювання дистанції та часу руху а також тиску у зливній магістралі (В) гідроциліндра. При розрахунках гідравлічних втрат насоса проводились обчислення секундної подачі гідравлічної рідини  $Q_i = V/t_i$  та її порівняння з втратами при повністю відкритому дроселі  $Q_0 = V/t_0$ . Дані експерименту занесені до табл.1.

Таблиця 1  
Дані експерименту визначення гідравлічних втрат об'ємного насосу СВ1-25

№	Тиск $P_i$ Атм	Дросель, К-мм <sup>2</sup>	Час руху, с	Подача $Q_i$ , л/с	Гідравлічні втрати $Q_{iBT} = Q_0 - Q_i$ , л/с	Повна гідравлічна потужність $N_i$ , кВт
1	30	12	66	0.1136	0.02791	3.408
2	20	20	59	0.1240	0.0175	2.481
3	10	32	56	0.1339	0.00758	1.339
4	7	42	53	0.14151	0	0.9906

### Теоретична модель залежності гідравлічних втрат від навантаження

Виходячи з попереднього аналізу отриманих даних, за основу приймемо параболічну залежність втрат робочої рідини, які збільшуються з ростом тиску гідравлічного навантаження у вигляді:

$$y_p = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (1)$$

Коефіцієнти моделі можуть бути знайдені за методом найменших квадратів (МНК) з рівнянь, які отримані з функціоналу:

$$F(a_i) = \min \sum_1^n \left[ y_e - (a_0 + a_1x + a_2x^2) \right]^2 \oplus \quad (2)$$

Для спрощення обчислень доцільно початок відліку абсцис  $x_i$  розмістити в середині інтервалу експериментально знятих значень і скористатися симетричними значеннями  $x_i$ . У цьому випадку всі суми непарних ступенів будуть оберталися в нуль, що значно спростить систему рівнянь.

Коефіцієнти  $a_0...a_2$  є невідомими змінними. У відповідності до (2) складаємо систему рівнянь:

$$\frac{\partial F}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_{ei} - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) = 0;$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_{ei} - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) x_i = 0;$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_{ei} - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) x_i^2 = 0.$$

Якщо дорівняти суми парних степенів  $x_i$  нулю, отримуємо:

$$a_0 n + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_{ei};$$

$$a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_{ei} x_i;$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n y_{ei} x_i^2.$$

Розв'язок відносно коефіцієнтів:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ei} + \sum_{i=1}^n x_i^4 - \sum_{i=1}^n y_{ei} x_i^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^4 - \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^2}. \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ei} x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}; \quad a_2 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_{ei} x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_{ei} \sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^4 - \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^2}.$$

Після обчислення коефіцієнтів регресивної моделі нелінійної характеристики гідравлічних втрат за наведеними формулами і рекомендаціями [4], отримана параболічна регресивна залежність (4), яка моделює реальні гідравлічні втрати насоса СВ1-25 за нормальних умов експлуатації.

$$Q_{BT} = 17.5 + (P - 20)(1,015 + 0,0025(P - 20)), \quad (4)$$

де  $Q_{BT}$  – втрати в мл/с,  $P$  – збитковий тиск в Атм.

Нев'язка регресії не перевищує 0,11 мл/с, що не перевищує відносної похибки моделі 4%. Сама ж регресивна залежність може в подальшому бути використана при моделюванні реальних властивостей ГО.

### Висновки

Отримана модель втрат гідравлічного обладнання дозволяє запропонувати певним чином наближену до реальності модель втрат об'ємного насоса СВ1-25, що, в свою чергу, дозволяє розширити дослідження причин зменшення гідравлічного ККД та розробці запобіжних заходів на цьому шляху.

Завдання моделювання гідравлічного обладнання, зокрема гідроапаратів об'ємної дії є актуальним з огляду на розробку новітнього ГО, що дозволяє вже на етапі проекту оцінити якісні показники майбутніх агрегатів.

Математичне моделювання є невід'ємною часткою навчального процесу, що суттєво сприяє активації критичного мислення здобувачів освіти в тому числі за умов дистанційного навчання.

### Список літератури

1. Бур'ян С. О. Моделювання гідравлічних систем за допомогою пакету SIM HYDRAULICS / С. О. Бур'ян, Р.С. Бронцевич // Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики.: тези доп. / Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского". – Київ: «Політехніка», 2009, с 473.

2. Чернишев М. М. Розробка імітаційної моделі гідросистеми управління стопором ковша МБЛЗ / М. М. Чернишев // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2014. – № 2 (18). – С.87–89.

3. Левченко О. В. Моделювання виконавчого рівня апаратів систем промислового гідроприводу / О. В. Левченко, О. П. Губарев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати: зб. наук. пр./ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 2. – С. 30–38.

### References

1. Buryan S. O. Modeling of hydraulic systems using the SIM HYDRAULICS package / S. O. Buryan, R.S. Brontsevich // International science and technology conf. young scientists, graduate students and students. Modern problems of electric power engineering and automation.: theses add. / National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Ihor Sikorsky". – Kyiv: Polytechnic, 2009, с. 473.

2. Chernyshev M. M. Development of a simulation model of the hydraulic system for controlling the stopper of the MBLZ bucket / M. M. Chernyshev // Automation of technological and business processes. – 2014. – No. 2 (18). – P.87–89.

3. Levchenko O. V.. Modeling of the executive level of industrial hydraulic drive system devices / O. V. Levchenko, O. P. Gubarev // Bulletin of the KhPI National Technical University. Ser.: Hydraulic machines and hydraulic aggregates: coll. of science pr./ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021. – No. 2. – P. 30–38.

Надійшла до редакції 20.12.2023, розглянута на редколегії 21.12.2023.

### Modeling of characteristics of hydraulic devices of automation

The paper presents the results of calculations of the regression model of hydraulic losses of technological equipment, in particular, the gate pump SV1-25, which is used in the practice of laboratory research of hydraulic equipment (GE) as part of the educational process at the Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Science and Robotic Systems of NAU "KHAU". The task of the work was to

establish the nature and actual hydraulic losses depending on the hydraulic load. According to the obtained data, in turn, the goal was to establish a mathematical model of the dependence of losses on the load of the public utility. In the course of conducting a number of experiments with a successive increase in the hydraulic load, the flow rate of the working fluid and the hydraulic power of the system were recorded; power losses and hydraulic efficiency of the system were calculated. As a result of the experiment, the nonlinear theoretical, namely, the parabolic dependence of the losses on the load, which is described by parabolic regression with a looseness of the model that does not exceed 4%, was confirmed. The obtained mathematical model of losses can be used in the future to build a complete structural model of the GE and a detailed analysis of the factors that determine the occurrence of its power losses. The mathematical model of losses of real equipment obtained in the course of experimental research can be added to the already existing model of the GE for the purpose of non-linear correction of its efficiency under variable hydraulic load in real conditions of use. During the calculation of the mathematical model, some stages of mathematical modeling were simplified, namely: models with a higher degree of polynomial were not considered (that is, the type of regressive dependence was not changed), the significance of the obtained coefficients was not characterized by their dispersion when the external conditions of the application of the GE were changed. The use of the powerful mathematical CAD Sim Hidraulics (MATLAB) provides an opportunity to simplify the process of designing the latest hydraulic automation systems, taking into account the studied dependencies.

**Key words:** hydraulic equipment, hydraulic losses, hydraulic resistance, regression analysis, structural modeling, technological parameters.

#### **Відомості про авторів:**

**Белявський Олександр Вадимович** – старший викладач кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна; o.bieliavskiyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-5782-8437.

**Косенко Оксана Валеріївна** – асистентка кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна; o.kosenko@khai.edu; ORCID: 0009-0007-6264-5778

#### **About the Author:**

**Bieliavskiyi Oleksandr Vadimovych** – senior teacher of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; o.bieliavskiyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-5782-8437.

**Kosenko Oksana Valeriivna** – assistant of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; o.kosenko@khai.edu; ORCID: 0009-0007-6264-5778.