

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-15>

УДК 621.225.001.4

А. І. Панченко¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1230-1463

А. А. Волошина¹, д-р. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4052-2674

О. С. Ковязін¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

І. А. Панченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2150-4278

А. А. Волошин², викл. спецдисциплін

ORCID: 0009-0004-3850-7613

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Відокремлений структурний підрозділ «Мелітопольський фаховий коледж ТДАТУ»

e-mail: voloshinaa2012@gmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТАРНОГО ГІДРОМОТОРА В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація. У роботі досліджено зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора в процесі експлуатації з урахуванням його технічного стану. Встановлено, що ключовим фактором деградації параметрів є збільшення діаметрального зазору між роторами, яке впливає на частоту обертання, витрату робочої рідини та енергетичні показники. На основі повного факторного експерименту обґрунтовано вибір визначальних факторів (навантаження, витрата, зазор) та отримано математичні моделі у вигляді рівнянь регресії, що адекватно описують робочі процеси з довірчою ймовірністю 0,95. Встановлено, що коефіцієнт корисної дії є малочутливим до зміни технічного стану, тоді як частота обертання є найбільш інформативним діагностичним параметром. Отримані залежності дозволяють визначати технічний стан гідромотора за експлуатаційними параметрами без розбирання. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення надійності гідроприводів та вдосконалення методів діагностики самохідної техніки.

Ключові слова: крутний момент, витрата робочої рідини, діаметральний зазор, частота обертання, повнофакторний експеримент.

Постановка проблеми. Ефективність функціонування сучасної самохідної техніки безпосередньо визначається надійністю та стабільністю роботи її мехатронних систем, зокрема гідравлічних приводів активних робочих органів та їх елементів [1, 2]. Особливе місце серед елементів гідроприводів займають планетарні (орбітальні) гідромотори, які забезпечують високі питомі енергетичні показники та компактність конструкції [3, 4]. Водночас у процесі експлуатації їх вихідні характеристики зазнають суттєвих змін, обумовлених як режимними параметрами роботи (навантаження, витрата робочої рідини), так і деградацією конструктивних елементів.

Ключовим фактором, що визначає технічний стан планетарного гідромотора, є збільшення діаметрального зазору в циклоїдальному зацепленні роторів, спричинене зносом [4, 5]. Зростання цього зазору призводить до зміни внутрішніх витоків, порушення герметичності робочих камер та, як наслідок, до погіршення енергетичних і кінематичних параметрів гідромотора. Однак існуючі підходи до оцінювання технічного стану гідромашин переважно базуються на непрямих показниках (ККД, тиск, витрата), які не завжди чутливо реагують на початкові стадії зносу.

Аналіз сучасних досліджень свідчить [6], що значна увага приділяється питанням проектування, моделювання та підвищення ефективності героторних насосів, тоді як задачі прогнозування зміни вихідних характеристик саме планетарних гідромоторів у процесі їх експлуатації залишаються недостатньо дослідженими. Особливо це стосується встановлення кількісних залежностей між технічним станом (зазором), режимами роботи та функціональними параметрами, які можуть бути використані для діагностики та прогнозування працездатності.



Таким чином, виникає науково-прикладна проблема, що полягає у відсутності адекватних математичних моделей та експериментально підтверджених залежностей, які дозволяють достовірно оцінювати та прогнозувати зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора з урахуванням його технічного стану та умов експлуатації. Розв'язання цієї проблеми є важливим для підвищення надійності гідроприводів, зниження експлуатаційних витрат, а також створення ефективних систем діагностики та технічного обслуговування самохідної техніки.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження у сфері гідравлічних машин характеризуються значною увагою до підвищення їх енергоефективності, надійності та довговічності. Зокрема, у роботах [7–9] досліджуються динамічні процеси в насосно-турбінних агрегатах, включаючи вплив резонансних явищ на надійність конструкцій [8]. Використання чисельних методів і теорії коливань дозволяє отримати достовірні результати для реверсивних насосів-турбін [9]. Водночас ці підходи мають обмежену релевантність для об'ємних гідромашин [10, 11], де домінують інші фізичні процеси (витоки, локальні гідродинамічні ефекти, контактні взаємодії), що знижує можливість їх прямої екстраполяції на планетарні гідромотори.

У дослідженні [12] розглянуто вплив експлуатаційних факторів (газовміст робочої рідини, навантаження) на характеристики аксіально-поршневих гідромоторів. Незважаючи на підтверджену адекватність математичних моделей, їх обмеження полягає у відсутності урахування зносу робочих елементів, що є ключовим чинником зміни параметрів у довгостроковій перспективі. Аналогічно, підхід [13], який базується на інтегральному критерії оцінювання технічного рівня, є ефективним на етапі проектування, але не забезпечує діагностичної чутливості до змін технічного стану в експлуатації.

Найбільш розвиненим напрямом є дослідження героторних машин [14]. Розроблено геометрію профілю ротора, що дозволяє забезпечити зачеплення однієї пари зубів у кожний момент часу, та уникнути зносу [14], обґрунтовано оптимальні параметри для повного визначення геометрії профілю роторів [15], визначено вплив конструктивних особливостей системи роторів [16] та похибки форми виготовлення зубчастого профілю роторів [17] на стабільність вихідних характеристик планетарного гідромотора. Наведено аналіз сил і моментів, що виникають між роторами героторного насоса [18], для чого розроблені фізична та аналітична моделі [19]. Запропоновано теорію зубчастого зачеплення для розробки математичної моделі внутрішніх роторів з різницею в один зуб [20], що дозволяє забезпечити високий ККД [21]. Розроблено модель, що описує зміни геометрії зубчастих профілів роторів [22], а також модель, що враховує динамічну зміну об'єму робочої рідини в робочих камерах [23] та зміну навантажень у зубчастому зачепленні [24]. Запропоновано програмне забезпечення для проектування гіпоциклоїдальних поверхонь роторів з урахуванням гідродинаміки руху рідини у робочих камерах [25] та програма для моделювання процесу взаємодії роторів, що забезпечують працездатність планетарного гідромотора [26]. Досліджено вплив конструктивних особливостей героторного насоса на його вихідні характеристики [27]. Проте, попри значну глибину цих досліджень, їх фундаментальне обмеження полягає у фокусі на стаціонарних або квазістаціонарних режимах та ігноруванні еволюції параметрів у процесі зносу. Більше того, більшість моделей є детермінованими та не інтегрують експлуатаційні варіації параметрів, що істотно обмежує їх прикладну цінність для задач діагностики.

Проведені дослідження робочих процесів, що відбуваються у розподільних системах з урахуванням їх конструктивних особливостей [28] розширюють розуміння їх протікання, зокрема щодо пульсацій тиску [29], витоків і контактних явищ. Запропоновано способи зниження пульсації робочої рідини [30], а також досліджено вплив зміни пропускної здатності систем розподілу робочої рідини на зміну вихідних параметрів гідромашин планетарного типу. Обґрунто-

вано раціональні зазори між розподільними вікнами, розроблено структурно-функціональну схему математичної моделі, що дозволяє моделювати раціональне зусилля в контактній зоні системи розподілу робочої рідини [31]. Обґрунтовано раціональні конструктивні параметри рухомого та нерухомого розподільників [32], що дозволяють знизити витoki в контактній зоні системи розподілу рідини і, як наслідок, підвищити продуктивність гідромашин планетарного типу. Запропоновані конструктивні рішення дозволяють підвищити ефективність машин, однак залишаються в межах проєктного підходу і не враховують зміну параметрів у процесі експлуатації.

Розглянуто питання моделювання внутрішніх витоків [33] з урахуванням зазорів між шестернями. Досліджено вплив зазору між зубами та деформації зубів шестеренного насоса на зміну тиску [34], що дозволило прогнозувати працездатність шестеренного насоса. Відомо [35], що працездатність шестеренних гідромашин більшою мірою визначається точністю виготовлення зубчастого профілю роторів, для чого були розроблені засоби автоматизованого контролю роторів. Проведено динамічний аналіз для прогнозування фактичної роботи героторного насоса [36]. Розроблено математичну модель у вигляді рівнянь регресії для прогнозування найбільших значень витрати та об'ємного ККД з урахуванням підбору оптимальних параметрів героторного насоса [37]. Отримані моделі дозволяють прогнозувати ефективність насосів, але їх перенесення на гідромотори є некоректним через відмінності в енергетичних перетвореннях і режимах роботи. Крім того, ці дослідження не враховують взаємодію експлуатаційних факторів і технічного стану.

Роботи [38, 39] є одними з небагатьох, де експериментально підтверджено вплив діаметрального зазору на вихідні характеристики планетарного гідромотора. Встановлено, що збільшення зазору призводить до зниження частоти обертання та стабільності роботи. Проте ці дослідження мають фрагментарний характер і не формують узагальненої математичної моделі, придатної для прогнозування технічного стану в широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел вказує на відсутність інтегрованих моделей, що одночасно враховують експлуатаційні фактори (навантаження, витрата, тиск) та погіршення вихідних характеристик; домінування досліджень, орієнтованих на проєктування, при недостатній увазі до режимів експлуатації; відсутність універсального діагностичного параметра, чутливого до зміни технічного стану планетарних гідромоторів; обмежену кількість експериментально підтверджених моделей для прогнозування вихідних характеристик; відсутність підходів, що поєднують факторний експеримент і математичне моделювання для прогнозування вихідних характеристик планетарних гідромашин.

Тому вирішення питань, пов'язаних з визначенням (прогнозуванням) вихідних характеристик планетарного гідромотора в процесі експлуатації при зміні його технічного стану, навантаження на валу гідромотора та кількості робочої рідини, що подається насосною станцією, є актуальним завданням.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Технічний стан планетарного гідромотора у процесі експлуатації визначається зміною величини діаметрального зазору між роторами [4, 5]. Тому для визначення (прогнозування) зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора в умовах експлуатації необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати основні фактори, що визначають зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора в умовах експлуатації та визначити їх рівні варіювання;
- провести планування експериментальних досліджень для отримання рівнянь регресії, що описують зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора в заданому діапазоні зміни навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору;



– дослідити вплив навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору на зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора.

Основна частина. Аналіз кінематики переміщення роторів планетарного гідромотора показав [4, 5], що основним параметром, що визначає технічний стан планетарного гідромотора, є діаметральний зазор між його роторами. Встановлено, що при визначенні технічного стану планетарного гідромотора, що має ротора з циклоїдальним зачепленням, «найчутливішим» параметром (з числа функціональних) є частота обертання його вихідного валу [4, 5]. Тому для того, щоб визначати (прогнозувати) технічний стан планетарного гідромотора в експлуатаційних умовах необхідно знати залежність зміни його вихідних характеристик в умовах експлуатації.

При дослідженні зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора у процесі експлуатації залежно від його технічного стану, зміни навантаження та кількості робочої рідини використано математичне планування повного факторного експерименту [40].

При проведенню дослідженні як функції відгуків y_i (вихідні параметри) вибиралися наступні параметри:

- частота обертання n валу гідромотора (y_1);
- перепад тисків Δp робочої рідини (y_2);
- об'ємний ККД $\eta_{об}$ гідромотор (y_3);
- механічний ККД η_m гідромотора (y_4);
- загальний ККД η гідромотора (y_5).

Основними факторами, що змінюються x_i (вхідні параметри), що визначають технічний стан планетарного гідромотора, є:

- крутний момент $M_{кр}$ на валу гідромотора (x_1);
- дійсна витрата Q робочої рідини (x_2);
- діаметральний зазор G циклоїдального зачеплення (x_3).

Контрольованими незмінними факторами z_i , що визначають технічний стан планетарного гідромотора прийняті:

- температура T робочої рідини (z_1);
- кінематична в'язкість ν робочої рідини (z_2);
- тонкість фільтрації Φ робочої рідини (z_3).

Вибрані фактори та рівні варіювання зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Інтервали та рівні варіювання факторів

Найменування фактору	Позначення	Код. знач. фактору	Од. вимір.	Інтерв. варіювання	Рівні факторів		
					нижн.	осн.	верхн.
Крутний момент	$M_{кр}$	x_1	Н·м	580	280	860	1440
Витрата робочої рідини	Q	x_2	л/хв	20	70	90	110
Діаметральний зазор	G	x_3	мм	0,09	0,02	0,11	0,20
Температура	T	z_1	°C	–	50±4		–
Кінематична в'язкість	ν	z_2	м²/с	–	65·10 ⁻⁶		–
Тонкість фільтрації	Φ	z_3	мкм	–	не більше 63		–

Результати експериментальних досліджень впливу навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору на технічний стан планетарного гідромотора при реалізації факторного експерименту наведено у таблицях 2...4.



Таблиця 2

Вихідні дані визначення коефіцієнтів регресії

№ досліджу	Середнє значення функції відгуку				
	n, y_1	$\Delta p, y_2$	$\eta_{об}, y_3$	$\eta_{м}, y_4$	η, y_5
1	100,4	2,4	0,985	0,845	0,832
2	30,5	10,8	0,870	0,938	0,807
3	17,5	3,1	0,890	0,655	0,648
4	161	10,7	0,943	0,932	0,862
5	96	2,3	0,975	0,870	0,848
6	32	10,7	0,877	0,935	0,819
7	164	2,9	0,938	0,690	0,648
8	150	10,4	0,883	0,962	0,849

Із серії дослідів (табл. 4) дисперсія відтворюваності дорівнює:

$$S^2_{(y1)} = 3,956; S^2_{(y2)} = 2,678 \cdot 10^{-2}; S^2_{(y3-5)} = 3,1671 \cdot 10^{-4}.$$

Найменше значення значущого коефіцієнта регресії дорівнює (значення критерію Стюдента $t = 2,26$ при числі ступенів свободи $f = 9$ [28]):

$$|b_{i(y1)}| = 1,58925; |b_{i(y2)}| = 0,1308; |b_{i(y3-5)}| = 1,421985 \cdot 10^{-2}.$$

Таблиця 3

Коефіцієнти рівнянь регресії

Коефіцієнти регресії	Функції відгуку				
	n, y_1	$\Delta p, y_2$	$\eta_{об}, y_3$	$\eta_{м}, y_4$	η, y_5
b_0	113,625	67	0,92025	0,84575	0,784
b_1	-20,25	40,25	-0,027	0,0875	0,04
b_2	48,875	1,5	-0,0065	-0,05125	-0,0425
b_3	-3,125	-1,25	-0,00175	0,0185	0,007
b_{12}	13,25	-1,75	0,02625	0,04125	0,0535
b_{13}	0,75	-0,5	-0,0115	0,0035	0,003
b_{23}	-2,375	-0,75	-0,001	0,013	0
b_{123}	0,75	-0,5	-0,01575	0,0105	0,004

Таблиця 4

Вихідні дані до визначення дисперсії відтворюваності

$n, об/хв$	$\Delta p, МПа$	η
153	15,3	0,938
154	15,5	0,925
151	15,3	0,972
154	15,7	0,945
154	15,6	0,945
155	15,5	0,964
156	15,7	0,977
157	15,5	0,97
157	15,3	0,97
157	15,3	0,97

Використання факторного експерименту при дослідженні впливу навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору на технічний стан планетарного гідромотора дозволяє суттєво скоротити кількість дослідів та отримати (з заданою ймовірністю) математичну

модель, що визначає технічний стан (діаметральний зазор) гідромотора при різних значеннях функціональних параметрів $G = f(Q, \Delta p, n)$.

Використання повного факторного експерименту щодо впливу навантаження $M_{кр}$, витрати робочої рідини Q і діаметрального зазору G зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора дозволяє істотно скоротити кількість дослідів [3]. При цьому отримана математична модель, виражена рівняннями регресії, дозволяє з ймовірністю 0,95 визначити вплив навантаження M , витрати робочої рідини Q і діаметрального зазору G на зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора:

$$y_1(n) = 113,625 - 20,25 \cdot x_1 + 48,875 \cdot x_2 - 3,125 \cdot x_3 + 13,25 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2,375 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (1)$$

$$y_2(\Delta p) = 67 + 40,25 \cdot x_1 + 1,5 \cdot x_2 - 1,75 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (2)$$

$$y_3(\eta_{об}) = 0,92025 - 0,027 \cdot x_1 + 0,02625 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,01575 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (3)$$

$$y_4(\eta_m) = 0,84575 + 0,0875 \cdot x_1 - 0,052125 \cdot x_2 + 0,0185 \cdot x_3 + 0,04125 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (4)$$

$$y_5(\eta) = 0,784 + 0,04 \cdot x_1 - 0,0425 \cdot x_2 + 0,0535 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (5)$$

Для всіх розрахункових та теоретичних значень критеріїв Фішера виконується умова $F_p < F_T$. Таким чином, отримані рівняння регресії (1...5) адекватно описують досліджуваний процес.

Аналіз рівнянь (2, 4, 5) підтверджує, що зміна діаметрального зазору G в діапазоні $G = 0,02 \dots 0,16 \text{ mm}$ не впливає на зміну перепаду тисків Δp , гідромеханічного η_{mech} і загального η ККД планетарного гідромотора.

Аналіз рівняння (1) зміни частоти обертання в залежності від діаметрального зазору свідчить про те, що при відомих значеннях навантаження, витрати робочої рідини та частоти обертання можна визначити значення діаметрального зазору (а отже, і технічний стан гідромотора в цілому).

Для цього з рівняння (2), попередньо розкодувавши його, визначимо зміну крутного моменту $M_{кр} = f(\Delta p)$:

$$M_{кр} = \frac{40 \cdot \Delta p - 2410 - 3 \cdot Q}{48,125 - 0,0875 \cdot Q} + 60, \quad (6)$$

де Δp – перепад тиску робочої рідини, $8 \leq \Delta p \leq 16 \text{ МПа}$;

Q – витрата робочої рідини, $70 \leq Q \leq 110 \text{ л/хв}$.

Розкодувавши рівняння (5.10) і підставивши в нього рівняння (5.15), визначимо зміну діаметрального зазору $G = f(\Delta p, Q, n)$:

$$G = \frac{21,267372 + 3,36875 \cdot n - 5,59125 \cdot \Delta p + K \cdot Q}{363,94508 \cdot (6,37656 - 0,0103906 \cdot Q) \cdot Q} + 0,09, \quad (7)$$

де n – частота обертання валу гідромотора, $30 \leq n \leq 175 \text{ об/хв}$;

$K = 6,5087947 + 0,006125 \cdot n + 0,046375 \cdot \Delta p - 0,018446 \cdot Q$.

Отримані вирази (6) і (7), при відомих значеннях частоти обертання валу гідромотора, перепаду тиску та витрати робочої рідини, дозволяють визначити технічний стан планетарного гідромотора в умовах експлуатації в заданому діапазоні варіювання перерахованих параметрів.



Таким чином, можна зробити висновок, що отримані математичні моделі (1...5) адекватно описують досліджуваний процес зміни технічного стану планетарного гідромотора в залежності від навантаження, витрати робочої рідини і діаметрального зазору, а також підтверджують нераціональність ККД як параметра, що характеризує технічний стан планетарного гідромотора, а у той же час обґрунтовують діаметральний зазор, як єдиний достовірний діагностичний параметр..

Для визначення (прогнозування) зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора у процесі експлуатації залежно від його технічного стану, зміни навантаження та кількості робочої рідини було проведено експериментальні дослідження. Дослідження проводилися згідно з ДСТУ ISO 4409:2013: Об'ємні гідроприводи. Насоси об'ємні, гідромотори та гідропередачі. Методи випробування та подання основних сталих робочих характеристик. Метою даних досліджень було експериментальне визначення взаємозв'язків між навантаженням $M_{кр}$, витратою робочої рідини Q та діаметральним зазором G між роторами планетарного гідромотора, описаних отриманими рівняннями регресії (1–7). Дослідження проводилися на прикладі планетарного гідромотора PRG-22 з робочим об'ємом $V = 630 \text{ см}^3$, у заданому (умовами експлуатації) діапазоні варіювання навантаження $M_{кр}$, витрати робочої рідини Q та діаметрального зазору G між його роторами.

При проведенні експериментальних досліджень варіювання навантаження проводилося шляхом зміни значень крутного моменту $M_{кр}$ який мав дев'ять дискретних значень $M_{кр} = 140, 280, 420, 560, 700, 840, 980, 1120, 1440 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Зміна витрати робочої рідини Q здійснювалася шляхом дроселювання подачі насоса (з паралельним включенням дроселя) і мали три дискретні значення $Q = 110, 90$ і 70 л/хв . Діаметральний зазор G , як параметр, що визначає технічний стан гідромотора, обмежувався чотирма значеннями $G = 0,02, 0,09, 0,16$ і $0,23 \text{ мм}$ та забезпечувався шляхом заміни внутрішнього ротора.

Аналіз результатів проведених досліджень (рис. 1) підтверджує висновки, отримані в розділах 2 і 3 та показує, що за наявності діаметрального зазору, внутрішній ротор «спливаючи» забезпечує самогерметизацію нагнітальної та зливальної зон.

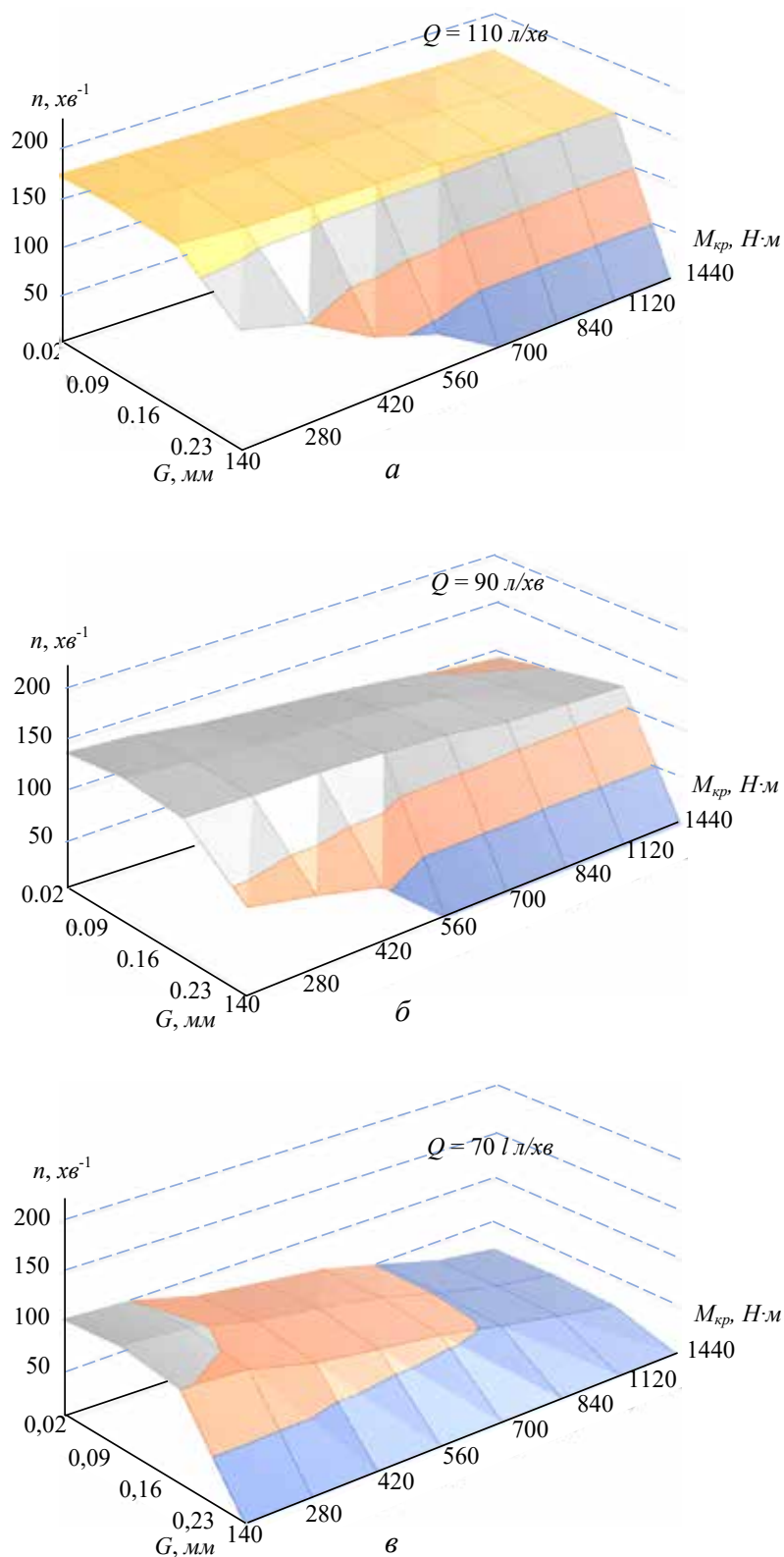
Технічний стан досліджуваного планетарного гідромотора з робочим об'ємом $V = 630 \text{ см}^3$ визначається величиною діаметрального зазору, а його працездатність обмежена значеннями $G = 0,02 \dots 0,16 \text{ мм}$ (рис. 1). У всьому діапазоні зміни крутного моменту $140 \leq M_{кр} \leq 1440 \text{ Н}\cdot\text{м}$, витрати робочої рідини $70 \leq Q \leq 110 \text{ л/хв}$ та діаметрального зазору $0,02 \leq G \leq 0,16 \text{ мм}$, робочий стан планетарного гідромотора представлено як відповідна «площадка».

При значеннях діаметрального зазору $G = 0,23 \text{ мм}$ та витраті Q робочої рідини 110 і 90 л/хв, зі збільшенням навантаження $M_{кр}$ від 560 до 700 Н·м, відповідно, відбувається різке падіння частоти обертання n валу гідромотора. Подальше збільшення навантаження призводить до повної зупинки (втрати працездатності) гідромотора (рис. 1, а, б). При витраті робочої рідини $Q = 70 \text{ л/хв}$ гідромотор повністю втратив працездатність (рис. 1, в).

Проведеними дослідженнями встановлено, що в процесі експлуатації (при зносі) механічний ККД і крутний момент планетарного гідромотора залишаються практично незмінними у всьому діапазоні зміни діаметрального зазору між роторами. Отже, і перепад тиску Δp робочої рідини, в діапазоні зміни крутного моменту буде незмінним, а в умовах експлуатації буде змінюватися, тільки зі зміною навантаження.

Таким чином, можна заключити, що знаючи закономірність зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора при його експлуатації (зносі) залежно від зміни навантаження та витрати робочої рідини можна визначити його технічний стан.

Отримані в роботі результати дозволяють комплексно оцінити вплив експлуатаційних факторів (навантаження, витрати робочої рідини) та технічного стану (діаметрального зазору)



частота обертання: ■ – 0–50; ■ – 50–100; ■ – 100–150; ■ – 150–200

Рис. 1. Зміна частоти обертання валу гідромотора в залежності від навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору



на вихідні характеристики планетарного гідромотора. Побудовані регресійні моделі адекватно описують досліджувані процеси, що підтверджується виконанням критерію Фішера з довірчою ймовірністю 0,95. Це свідчить про статистичну надійність отриманих залежностей і можливість їх використання для інженерних розрахунків та діагностики.

Одним із ключових результатів є встановлення визначальної ролі діаметрального зазору як параметра, що характеризує технічний стан гідромотора. Встановлено, що збільшення діаметрального зазору призводить до інтенсифікації внутрішніх витоків робочої рідини між камерами високого та низького тиску, що зменшує ефективний об'ємний потік і, як наслідок, знижує частоту обертання валу гідромотора. Водночас ефект «спливання» ротора частково компенсує витoki в початковому діапазоні зносу ($G = 0,02 \dots 0,16$ мм), забезпечуючи самогерметизацію робочих камер. Саме цим пояснюється відносна стабільність коефіцієнтів корисної дії у зазначеному діапазоні.

Особливу увагу привертає встановлений факт низької чутливості коефіцієнта корисної дії до зміни технічного стану. Незважаючи на зростання зазору, значення ККД залишаються відносно стабільними в широкому діапазоні. Це суперечить традиційному уявленню про ККД як універсальний показник технічного стану і підтверджує його обмежену придатність для діагностики.

Аналіз залежностей показав, що частота обертання валу є найбільш інформативним параметром, оскільки вона відображає вплив усіх трьох факторів: навантаження, витрати та зазору. Зменшення витрати робочої рідини або збільшення навантаження призводить до зниження частоти обертання, однак саме зростання зазору визначає нелінійний характер цього процесу. При досягненні критичного значення $G \approx 0,23$ мм відбувається різке погіршення характеристик, що проявляється у втраті працездатності гідромотора. Така поведінка свідчить про наявність порогового ефекту, пов'язаного з порушенням умов самогерметизації роторів.

Порівняння отриманих результатів із дослідженнями у сфері героторних машин [6] показує, що, незважаючи на високий рівень опрацювання геометрії та кінематики, ці роботи не враховують зміну параметрів у процесі експлуатації. У даному дослідженні цей недолік усунуто шляхом інтеграції факторного експерименту та математичного моделювання, що дозволило отримати залежності, придатні для практичного використання.

Отримані результати мають важливе прикладне значення. Запропоновані залежності дозволяють визначати технічний стан гідромотора за вимірюваними параметрами без його демонтажу, що відкриває можливість створення систем оперативної діагностики та прогнозування ресурсу.

Водночас слід зазначити певні обмеження дослідження. Отримані моделі справедливі для заданого діапазону варіювання параметрів і конкретної конструкції гідромотора типу PRG–22, що потребує подальшої валідації для інших типорозмірів і умов експлуатації. Крім того, у роботі не враховано вплив температурних режимів, забруднення робочої рідини та динамічних навантажень, що може бути предметом подальших досліджень.

Таким чином, результати дослідження не лише узагальнюють існуючі уявлення про роботу планетарних гідромоторів, але й формують новий підхід до оцінювання їх технічного стану, заснований на аналізі взаємозв'язку експлуатаційних параметрів і конструктивних змін, викликаних зносом.

Висновки. Обґрунтовано вибір діаметрального зазору в циклоїдальному зачепленні як більш інформативного та достовірного діагностичного параметра для планетарних гідромоторів. Встановлено, що діаметральний зазор тісно пов'язаний з вихідними характеристиками гідромотора (частота обертання, крутний момент) та дозволяє більш точно оцінити його технічний стан. Доведено, що в діапазоні зміни навантаження ($M_{кр} = 280 \dots 1440$ Н·м), витрати робочої

рідини ($Q = 20 \dots 110$ л/хв) та діаметрального зазору ($G = 0,02 \dots 0,16$ мм) – ККД гідромотора залишається відносно стабільним ($\eta = 0,9 \dots 0,78$), не відображаючи фактичний ступінь зносу деталей циклоїдального зачеплення.

На основі повного факторного експерименту отримано математичні моделі у вигляді рівнянь регресії, які з довірчою ймовірністю 0,95 адекватно описують взаємозв'язок між експлуатаційними параметрами та вихідними характеристиками планетарного гідромотора. Встановлено, що коефіцієнти корисної дії (об'ємний, механічний і загальний) у діапазоні зміни діаметрального зазору $0,02 \dots 0,16$ мм залишаються відносно стабільними і не відображають реального ступеня зносу, що обмежує їх застосування як діагностичних параметрів.

Дослідженнями доведено, що найбільш чутливим і інформативним параметром технічного стану є частота обертання валу гідромотора, яка відображає вплив навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору і може бути використана для оперативної діагностики. Виявлено критичні режими роботи, за яких при збільшенні діаметрального зазору до значень близько 0,23 мм відбувається різке погіршення характеристик і втрата працездатності гідромотора, що дозволяє визначити граничні стани його експлуатації.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням отриманих моделей на інші типорозміри гідромоторів, урахуванням впливу температури, забруднення робочої рідини та динамічних режимів навантаження, а також інтеграцією отриманих залежностей у системи інтелектуальної діагностики.

Список використаних джерел

1. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Kuvachov, V., Nozdrovicky, L. Theoretical study of transverse offsets of wide span tractor working implements and their influence on damage to row crops. *Agriculture (Switzerland)*, 2019. 9 (7). 144. <https://doi.org/10.3390/agriculture9070144>
2. Панченко А. І., Волошина А. А., Ковязін О. С., Панченко І. А., Волошин А. А. Зміна функціональних параметрів мехатронних систем з планетарними гідромоторами при різних умовах експлуатації. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2025. Вип. 15. Т. 2. С. 127–135. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-15>
3. Voloshina, A., Panchenko, A., Titova, O., Milaeva, I., Pastushenko, A. Prediction of Changes in the Output Characteristics of the Planetary Hydraulic Motor. *InterPartner 2020: Advanced Manufacturing Processes II. LNME. Springer, Cham*, 2021. 744–754. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_72
4. Panchenko, A., Voloshina, A., Sadullozoda, S. S., Panchenko, I., Mitin, V. The Changes in the Output Parameters of Planetary Hydraulic Machines with the Increase in the Gap Between Their Rotors. *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV. LNME. Springer, Cham*, 2023. 540–551. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_51
5. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А. Вплив величини діаметрального зазору на кінематику руху внутрішнього ротора орбітального гідромотора. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2023. Вип. 13. Т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-3>
6. Gamez-Montero, P., Codina, E., Castilla, R. A Review of Gerotor Technology in Hydraulic Machines. *Energies*, 2019. 12. 2423. <https://doi.org/10.3390/en12122423>
7. Egusquiza, E., Valero, C., Presas, A., Huang, X., Guardo, A., Seidel, U. Analysis of the dynamic response of pump-turbine impellers. Influence of the rotor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016. 68–69. 330–341. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.05.034>
8. Krasnikov, S., Rogovyi, A., Mishchenko, I., Avershyn, A., Solodov, V. Vibration reliability of the turbine unit's housing considering random imperfections. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. Springer, Cham*, 2022. 3–12. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_1
9. Barrio, R., Fernández, J., Blanco, E., Parrondo, J., Marcos, A. Performance characteristics and internal flow patterns in a reverse-running pump-turbine. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2012. 226 (3). 695–708. <https://doi.org/10.1177/0954406211416304>
10. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Конструктивные особенности планетарных гидромоторов серии PRG. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2018. № 17 (1293). С. 88–95.



11. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Разработка планетарных гидромоторов для силовых гидроприводов мобильной техники. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 2015. Vol. 17. No 9. P. 29–36.
12. Andrenko, P., Rogovyi, A., Hrechka, I., Khovanskyi, S., & Svyarenko, M. The Influence of the Gas Content in the Working Fluid on Parameters of the the Hydraulic Motor's Axial Piston. In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. *Springer, Cham*, 2021. 97–106. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_10
13. Andrenko, P., Hrechka, I., Khovanskyi, S., Rogovyi, A., Svyarenko, M. Improving the Technical Level of Hydraulic Machines, Hydraulic Units and Hydraulic Devices using a Definitive Assessment Criterion at the Design Stage. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021. 18 (3), 57–76. <https://doi.org/10.24191/jmeche.v18i3.15414>
14. Demenego, A., Vecchiato, D., Litvin, F.L., Nervegna, N., Mancó, S. Design and simulation of meshing of a cycloidal pump. *Mechanism and Machine Theory*, 2002. 37. 311–332. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(01\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(01)00074-X)
15. Bonandrini, G., Mimmi, G., Rottenbacher, C. Theoretical Analysis of an Original Rotary Machine. *Journal of Mechanical Design*, 2010. 132 (2). 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4000698>
16. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А., Нестеренко К. В. Вплив конструктивних особливостей системи роторів планетарного гідромотора на зміну його вихідних характеристик. *Праці ТДАТУ*, 2021. Вип. 21. Т. 4. С. 61–77. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2021-21-2-61-77>
17. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Пастушенко С. І. Дослідження впливу похибки форми виготовлення роторів на вихідні характеристики планетарних гідромоторів. *Праці ТДАТУ*, 2019. Вип. 19. Т. 4. С. 33–48. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-33-48>
18. Ivanović, L., Blagojević, M., Devedžić, G., Assoul, Y. Analytical and Numerical Analysis of Load Gerotor Pumps. *Scientific Technical Review*, 2010. 60 (1). 30–38.
19. Ivanovic L., Miric N., Devedzic G., Ćuković S. Analysis of forces and moments in gerotor pumps. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2010. 224 (10). 2257–2269. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES2041>
20. Hwang, Y.-W., Hsieh, C.-F. Geometric design using hypotrochoid and nonundercutting conditions for an internal cycloidal gear. *Journal of Mechanical Design*, 2007. 129 (4). 413–420. <https://doi.org/10.1115/1.2437806>
21. Hsieh, C.-F., Hwang, Y.-W. Geometric design for a gerotor pump with high area efficiency. *Journal of Mechanical Design*, 2007. 129. 1269–1277. <https://doi.org/10.1115/1.2779887>
22. Choi, T., Kim, M., Lee, G., Jung, S., Bae, J., Kim, C. Design of Rotor for Internal Gear Pump Using Cycloid and Circular-Arc Curves. *Journal of Mechanical Design*, 2012. 134 (1). No: 011005-12. <https://doi.org/10.1115/1.4004423>
23. Ding, H., Lu J., Jiang, B. A CFD model for orbital gerotor motor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2012. 15 (6). No: 062006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/6/062006>
24. Stryczek, J., Bednarczyk, S., Biernacki K. Strength analysis of the polyoxymethylene cycloidal gears of the gerotor pump. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014. 14 (4). 647–660. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.12.005>
25. Stryczek, J., Bednarczyk, S., Biernacki, K. Gerotor pump with POM gears: Design, production technology, research. *Archives of Civil and Mechanical Engineerin*, 2014. 14 (3). 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.12.008>
26. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Надійність конструкції роторів планетарного гідрототора. *Праці ТДАТУ*, 2020. Вип. 20. Т. 1. С. 82–92. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-1-82-92>
27. Altare, G., Rundo, M. Computational Fluid Dynamics Analysis of Gerotor Lubricating Pumps at High-Speed: Geometric Features Influencing the Filling Capability. *Journal of Fluids Engineering*, 2016. 138 (11). No: FE-15-1757. <https://doi.org/10.1115/1.4033675>
28. Kiurchev, S., Luzan, P., Zasiadko, A., Radionov, H., Boltianska, N. Influence of the flow area of distribution systems on changing the operating parameters of planetary hydraulic motors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021. 1021. 012037 (2021). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012037>
29. Voloshina, A., Panchenko, A., Boltyansky, O., Zasiadko, A., Verkholtantseva, V. Improvement of the Angular Arrangement of Distribution System Windows When Designing Planetary Hydraulic Machines. *InterPartner 2021: Advanced Manufacturing Processes III. LNME. Springer, Cham* 2022, 53–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_6

30. Yeremenko, O., Abdullo, M. A., Boltianska, N., Mikhailchenko, S., Verkholtantseva, V. Reducing the Pulsation of the Working Fluid in Planetary Hydraulic Machines by Rational Design of Their Distribution Systems. *DSMIE 2022: Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. LNME. Springer, Cham*, 2022. 2. 133–143. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_13
31. Hutsol, T. European Green Deal: Improving the Efficiency of Using Planetary Hydraulic Machines. *Energies*, 2023. 16 (18). 6481. <https://doi.org/10.3390/en16186481>
32. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Обґрунтування геометричних параметрів розподільних систем планетарних гідромашин. *Праці ТДАТУ*, 2020. Вип. 20. Т. 2. С. 23–35. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-2-23-35>
33. Harrison, J., Aihara, R., Eisele, F. Modeling Gerotor Oil Pumps in 1D to Predict Performance with Known Operating Clearances. *SAE International Journal of Engines*, 2016. 9. 1839–1846. <https://doi.org/10.4271/2016-01-1081>
34. Paffoni, B., Progrid, R., Gras, R. Teeth clearance effects upon pressure and film thickness in a trochoidal hydrostatic gear pump. *The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2004. 218. 247–256. <https://doi.org/10.1243/0954410041872799>
35. Kiurchev, S., Abdullo, M.A., Vlasenko, T., Prasol, S., Verkholtantseva, V. Automated Control of the Gear Profile for the Gerotor Hydraulic Machine. *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV. LNME. Springer, Cham*, 2023. 32–43. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_4
36. Hsieh, C.F. Fluid and dynamics analyses of a gerotor pump using various span angle Designs. *Journal of Mechanical Design*, 2012. 134 (12). 121003. <https://doi.org/10.1115/1.4007703>
37. Ivanovic, L.T., Velic'kovic, S.N., Stojanovic, B.Z., Kandeve, M., Jakimovska, K. The selection of optimal parameters of gerotor pump by application of factorial experimental design. *FME Transactions*, 2017. 45. 159–164
38. Kyurchev, V., Kiurchev, S., Rezvaya, K., Pastushenko, A., Głowacki S. Experimental Evaluation of the Impact of the Diametral Clearance on Output Characteristics of a Planetary Hydraulic Motor. *DSMIE 2023: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. LNME. Springer, Cham*, 2023. 2. 84–94. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_9
39. Kiurchev, S., Kyurchev, V., Fatyeyev, A., Tynyanova, I., Mudryk, K. Influence of the Radius of Curvature of the Teeth on the Geometric and Functional Parameters of the Rotors of the Planetary Hydraulic Motor. *InterPartner 2023: Advanced Manufacturing Processes V. LNME. Springer, Cham*, 2024. 450–461. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_42
40. Panchenko, A., Voloshina, A., Fatyeyev, A., Rezvaya, K., Mudryk, K. Changing the Output Characteristics of a Planetary Hydraulic Motor. *DSMIE 2024: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. LNME. Springer, Cham*, 2024, 304–313. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_26

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



A. Panchenko¹, A. Voloshina¹, O. Koviazin¹, I. Panchenko¹, A. Voloshin³

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²Separated Structural Subdivision "Melitopol Professional College of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University"

PREDICTION OF CHANGES IN OUTPUT CHARACTERISTICS OF A PLANETARY HYDRAULIC MOTOR UNDER OPERATING CONDITIONS

Summary

This paper examines the patterns of change in the output characteristics of a planetary (orbital) hydraulic motor during operation, taking into account its technical condition. The relevance of the study stems from the need to improve the reliability of hydraulic drives in self-propelled vehicles and the lack of effective approaches to



diagnosing hydraulic machines without disassembling them. It has been established that the key factor determining the technical condition of a hydraulic motor is the diametrical clearance between the rotors, which changes due to wear and directly impacts functional parameters of a planetary (orbital) hydraulic motor.

To study the influence of operational factors, a full factorial experiment was used, varying shaft load, hydraulic fluid flow rate, and diametrical clearance. The response functions selected were shaft speed, pressure drop, and volumetric, mechanical, and overall efficiency. Based on the experimental results, mathematical models were developed in the form of regression equations that adequately describe the relationship between the determining factors and the initial hydraulic motor characteristics with a confidence level of 0.95.

It was found that within a diametrical clearance range of 0.02–0.16 mm, efficiency factors remain relatively stable and do not reflect the actual degree of wear, limiting their use as diagnostic parameters. At the same time, the hydraulic motor shaft speed is the most sensitive indicator, decreasing with both increasing load and increasing clearance and decreasing hydraulic fluid flow. Critical operating conditions were identified, in which a significant increase in diametrical clearance (up to 0.23 mm) leads to a sharp drop in speed and loss of hydraulic motor performance.

Based on the obtained dependencies, an approach is proposed for determining the technical condition of a planetary hydraulic motor based on measured operating parameters (rotational speed, flow rate, pressure drop) without dismantling the equipment. The practical significance of these results lies in their potential use in developing diagnostic and resource forecasting systems for hydraulic drives, which will lead to increased operational efficiency and reduced maintenance costs for self-propelled equipment.

Keywords: torque, working fluid flow rate, diametrical clearance, rotational speed, full-factorial experiment.