

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.664

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.3-10)

М.М. Підгаєцький, доц., канд. техн. наук, **К.К. Щербина**, доц., канд. техн. наук, **А.М. Кириченко**, проф. д-р. техн. наук, **В.А. Годорожа**, асп., **Т.П. Джус**, магістрант
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kir2912s@ukr.net

Функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини

Одним із важливих питань розвитку машинобудування є підвищення ефективності функціональних показників різного роду механізмів, серед яких гідравлічні шестеренні насоси та мотори. Особливу увагу необхідно звертати на показники об'ємної подачі та крутного моменту. Одним із шляхів є дослідження взаємовпливу вихідних параметрів функціонування шестеренної гідравлічної машини.

Одними із основних параметрів, котрі визначають функціональні показники роботи шестеренної гідравлічної машини є об'ємна подача, потужність та крутний момент, котрі в свою чергу утворюють загальний коефіцієнт корисної дії. Для визначення впливу обумовлених показників на загальний коефіцієнт корисної дії та підвищення ефективності функціонування шестеренної гідравлічної машини необхідно побудувати функціональний портрет. Отриманий функціональний портрет дасть можливість визначити показник оптимізації роботи шестеренної гідравлічної машини, як в режимі насоса, так і в режимі мотору. В свою чергу, він дозволить поєднати кореляційні залежності між собою. Для отримання оптимальних показників для побудови функціонального портрету розроблена схема діагностування шестеренної гідравлічної машини в режимі насос-мотор та приведені алгоритм їх роботи.

В результаті побудови функціонального портрету шестеренної гідравлічної машини в режимі насоса встановлено, що її функціонування не має інерційності та параметри мають стабільний характер. В свою чергу функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини в режимі мотору має зону інерційності, котра в залежності від моменту пуску може мати сталий або не сталий характер.

функціональний портрет, шестеренний насос, шестеренний мотор, об'ємна подача, загальний коефіцієнт корисної дії

Постановка проблеми. Зростання вимог до сучасних сільськогосподарських механізмів та машин різного роду передбачає підвищення функціональних показників їх складових. Значного розповсюдження в сільськогосподарському машинобудуванні набули шестеренні гідравлічні насоси та мотори. Конструкція даних типів механізмів відома вже багато років, але все ще залишаються шляхи підвищення їх функціональних показників за рахунок різного роду досліджень. Одним із шляхів підвищення їх ефективності є дослідження впливу вихідних функціональних характеристик в залежності один відносно одного при роботі в режимі насоса та мотору. Отже, проведення даного дослідження для шестеренних гідравлічних насосів та моторів є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На підставі існуючих методів аналізу та оцінки шестеренної гідравлічної машини, як технічного об'єкту, необхідно дати визначення системи, що розглядається [1,2,3,4,5].

Технічна система (ТС) – замкнена система функціонування технічного об'єкта, яка вмщує вхідні та вихідні параметри, які відповідають можливій зоні експлуатації [1].

Технічний процес (ТП) – замкнений процес функціонування технічного об'єкта,

який вміщує вхідні та вихідні параметри, з обмеженням їх значень, які відповідають конкретному об'єкту в заданій зоні експлуатації [2,3,6,7,8,9,10].

Гідравлічні шестеренні машини, що досліджуються, доцільно розглядати, як у вигляді технічної системи (ТС), так і у вигляді технічного процесу (ТП).

Гідравлічна ТС, як у вигляді насосу, так і у вигляді мотора, характеризується параметрами, в тому числі наступними.

Вхідні параметри:

- модуль зубчатого зачеплення m , мм;
- кількість зубців шестеренні; z , шт;
- ширина зубчатого вінця b , мм.

Вихідні параметри:

- об'єм робочої камери, q , см³.

Гідравлічна машина, як процес (ТП), характеризується параметрами, в тому числі наступними.

Вхідні параметри:

- частота обертання, n , хв-1;
- тиск на виході, P , МПа, (кг/см²);
- в'язкість робочої рідини, μ , сСт;
- температура робочої рідини, t° с;
- кутова швидкість, ω , рад/сек.

Вихідні параметри:

- об'ємна подача, Q , дм³/хв;
- потужність, P , кВт;
- крутний момент, T , Н·м
- загальний коефіцієнт корисної дії, η_3 .

При функціонуванні в режимі насоса загальний коефіцієнт η_3 визначається:

$$\eta_3 = \frac{T \cdot \omega}{Q \cdot p} \quad (1)$$

При функціонуванні в режимі мотора загальний коефіцієнт η_3 визначається:

$$\eta_3 = \frac{Q \cdot p}{T \cdot \omega} \quad (2)$$

Кореляційні залежності між параметрами, які утворюють потужність можуть свідчити про ефективність функціонування ТС(ТП).

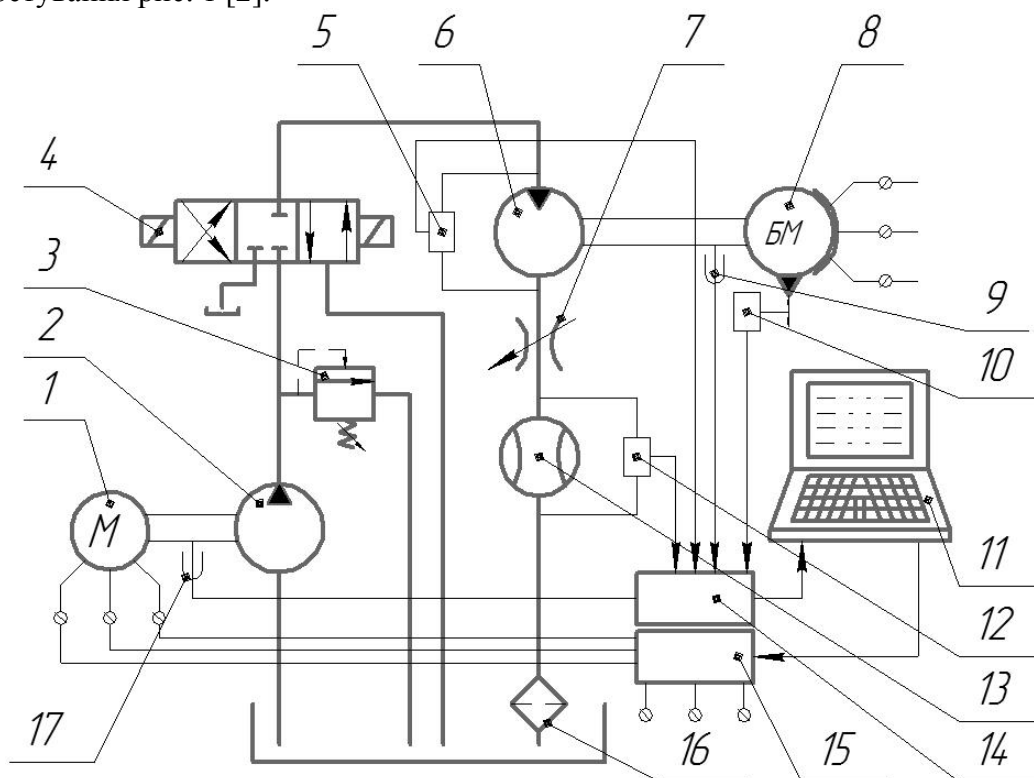
Для визначення параметра оптимізації у вигляді потужності P , необхідно створити функціональний портрет ТС.

Функціональний портрет ТС – це замкнена система показників, яка вміщує кореляційні залежності між окремими параметрами, визначеними в умовах прямого експерименту та параметрами, які визначені на підставі непрямого експерименту із знаходженням розбіжностей між ними [1,5].

Функціональний портрет будується в умовах стійкого режиму експлуатації ТС. Для побудови функціонального портрету здійснюється на підставі реальної схеми ТС(ТП) з визначенням її технічних характеристик, як в статусі ТС, так і в статусі ТП.

Постановка завдання. На підставі проведеного дослідження було запропоновано побудувати функціональний портрет гідравлічної шестеренної машини в режимі насосу та мотору, що дасть можливість здійснити аналіз для підвищення її ефективності.

Виклад основного матеріалу. Для отримання даних необхідних для побудови функціонального портрету гідравлічної шестеренної машини, розробимо схему її діагностування рис. 1 [2].



1 – електродвигун привода; 2 – насос; 3 – запобіжний клапан; 4 – гідророзподільник; 5 – датчик тиску; 6 – мотор; 7 – дросель; 8 – баланс машина; 9 – датчик частоти обертів; 10 – датчик крутного моменту; 11 – дисплей; 12 – датчик об’ємної подачі; 13 – розходомір; 14 – аналого-цифровий перетворювач; 15 – цифро-аналоговий перетворювач; 16 – фільтр; 17 – датчик частоти обертів

Рисунок 1 – Схема діагностування системи гідромашин у складі: НАСОС-МОТОР
Джерело розроблено авторами

Функціональний портрет при роботі в режимі насосу представлено на рис.2 та в режимі мотору на рис.3, що будуть характеризуватися наступними параметрами.

Вхідні параметри при роботі в режимі насосу:

- частота обертання, n , хв-1 (кутова швидкість, ω , рад/сек);
- тиск на виході, P , МПа (кг/см²).

Вихідні параметри при роботі в режимі насосу:

- об’ємна подача, Q дм³/хв.

Кореляційні залежності при роботі в режимі насосу:

- потужність, P , на виході в залежності від об’ємної подачі, Q , та тиску, p .

$$P = \frac{Q \cdot \Delta p}{600 \cdot \eta_3} \quad (3)$$

Вхідні параметри при роботі в режимі мотору:

- об’ємна подача, Q дм³/хв;
- тиск на виході, p , МПа (кг/см²).

Вихідні параметри при роботі в режимі мотору:

- крутний момент, T , Н·м
- частота обертів, n , хв-1 (кутова швидкість, ω , рад/сек);

Кореляційні залежності при роботі в режимі мотору:

- крутний момент, T , від тиску, P на вході, та об'ємної подачі, Q

$$T = \frac{Q \cdot P}{2\pi \cdot \eta_3} \quad (4)$$

Статичну характеристику системи, яка відображається на функціональному портреті можна побудувати двома способами.

Перший спосіб застосовується при послідовному з'єднанні елементів системи. Спочатку її будують у вигляді графіків, в однаковому масштабі елементів системи статичної характеристики, при чому кількість графіків повинна бути не більшою, ніж чотири. Якщо їх отримано більше, то здійснюється попарне об'єднання із доведенням загального числа графіків до чотирьох із наступним хрестоподібним розміщенням.

На рис.2 наведені три статичні характеристики шестеренної гідравлічної машини, яка працює в режимі насоса. У вільному квадранті проведена пряма під кутом 45° . Вона відповідає характеристикам четвертого елемента, у якого коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці, тому він не впливає на статичні характеристики системи. Цей показник є універсальним параметром для функціонування в умовах насоса – це потужність, P , квт.

На рис.3 наведені три статичні характеристики шестеренної гідравлічної машини, яка працює в режимі мотора. Для функціонування в режимі мотора універсальним параметром прийнято крутний момент, T , Н·м.

Отримані на рис. 2 залежності 1,2,3 від $P=f(Q)$, визначені в таблиці 1, залежності 4,5,6 від $Q=f(P)$ наведені в таблиці 2 та залежності 7,8,9 від $P=f(P)$ - в таблиці 3.

Таблиця 1 – Кореляційні залежності від $P=f(Q)$

Поз. Рис.2	n, с-1	Q, дм ³ /хв	P, МПа
1	8.5	7...3	10,0
2	40	40...20	17,0
3	60	50...35	20,0

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Нормативні функціональні залежності $Q=f(P)$

Поз. Рис.2.	n, с-1	P, МПа
4	60	0...20
5	40	0...17
6	8,5	0...10

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – нормативні функціональні залежності $P=f(P)$

Поз. Рис.2	n, с-1	P, МПа	P, квт
7	8,5	0...10	0...3,0
8	40	0...17	0...12,5
9	60	0...20	0...20,0

Джерело: розроблено авторами

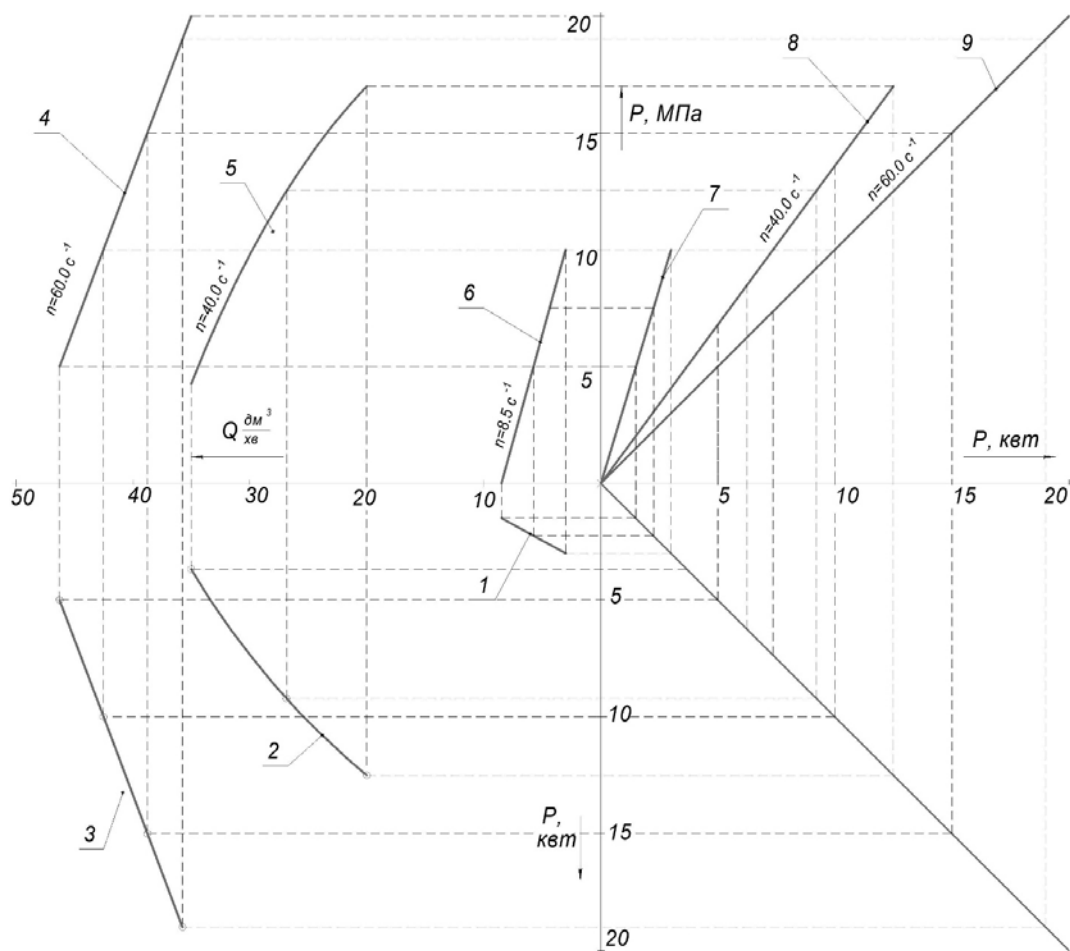


Рисунок 2 – Функціональний портрет шестеренного гідравлічного насосу (об’єм камери $q=16.0 \text{ см}^3$)
 Джерело: розроблено авторами на підставі [6]

Отримані на рис. 3 залежності 1,2 від $M=f(Q)$, визначені в таблиці 4, залежність 3 від $Q=f(n)$ наведено в таблиці 5 та залежності 4,5 від $M=f(n)$ - в таблиці 6.

Таблиця 4 – Кореляційні залежності від $M=f(Q)$.

Поз. Рис.3	$n, \text{с}^{-1}$	$P, \text{МПа}$
1	8,5...60	25,0
2	8,5...60	10,0

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 5 – Нормативні функціональні залежності $Q=f(n)$.

Поз. Рис.3.	$P, \text{МПа}$	$n, \text{с}^{-1}$
3	10...25	8,5...60

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 6 – нормативні функціональні залежності $M=f(n)$.

Поз. Рис.3	$P, \text{МПа}$	$n, \text{с}^{-1}$
4	10,0	8,5...60
5	25,0	8,5...60

Джерело: розроблено авторами

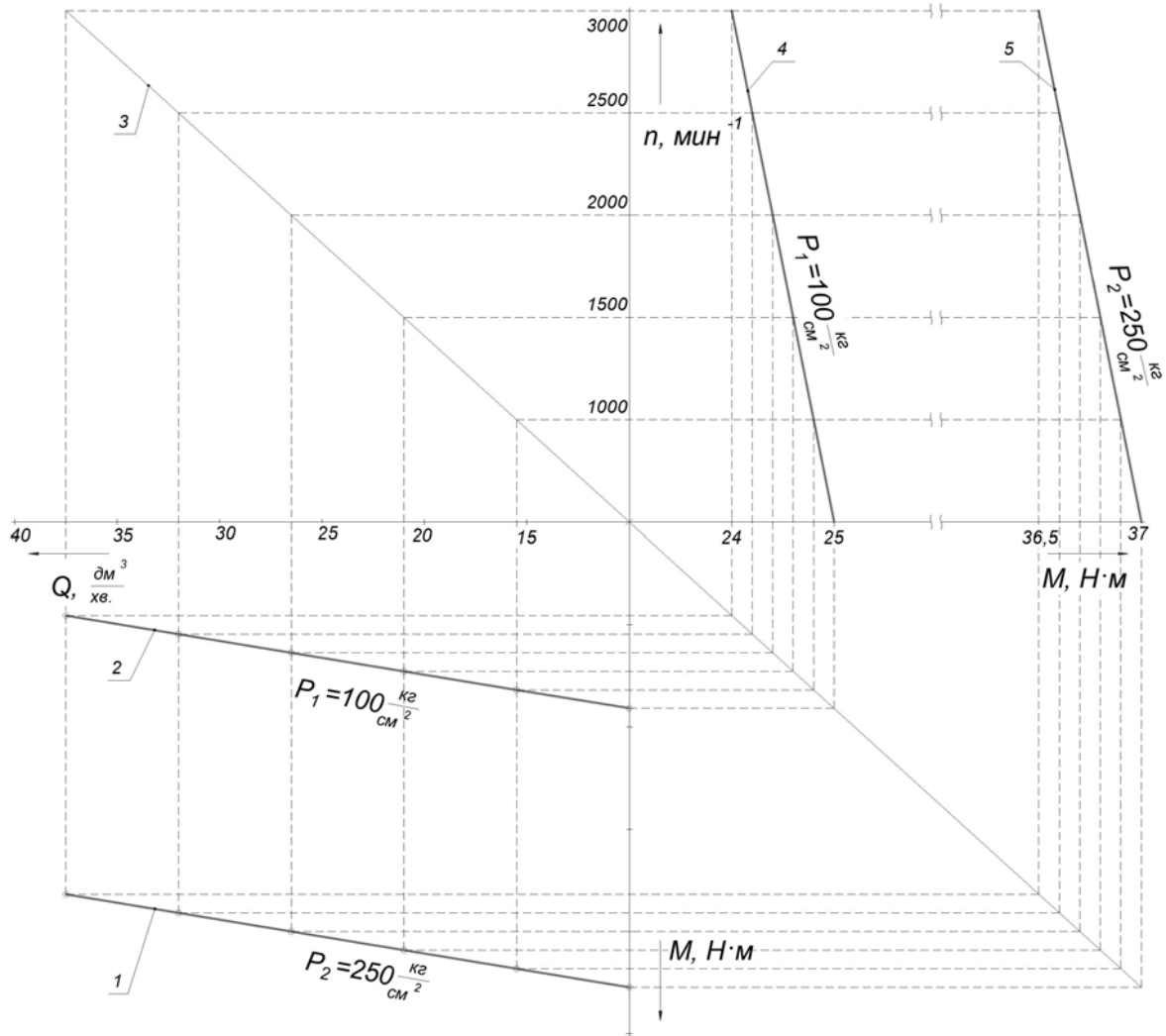


Рисунок 3 – Функціональний портрет шестеренного гідравлічного мотору (об'єм камери $q=16.0$ см³)
 Джерело: розроблено авторами

Отже, на підставі отриманих функціональних портретів маємо, що гідравлічна машина при функціонуванні в режимі насоса не має інертності, з урахуванням чого її функціональні параметри відносно стабільні і залежать від розмірного портрета. Орієнтація торцевих підшипників відбувається при експлуатації в режимі насоса в умовах тертя, ковзання, динаміки, внаслідок чого забезпечується краща герметизація.

В свою чергу, гідравлічна машина при функціонуванні в режимі мотора має інерційність у момент пуску ($Q_0 \cdot \rho_0$), котра буде визначатися співвідношенням:

$$Q_0 \cdot \rho_0 > 0; \quad (4)$$

$$M \cdot \omega = 0. \quad (5)$$

Зона інерційності при роботі в режимі мотора може бути стабільною, а може змінюватися. Орієнтація торцевих підшипників відбувається в умовах тертя ковзання у статиці, внаслідок чого можлива недостатня герметизація, що впливає на інерційність. Лінії 1,2,3 рис.2 та лінії 1,2 рис.3 фіксують виконання нормативних параметрів гідравлічних машин. Ці лінії умовно відповідають значенню ККД, $\eta \rightarrow 1.0$. Про

відхилення їх від номінального значення можуть свідчити фактичні значення ККД і встановлювати зону їх допустимого значення.

Висновки. В результаті побудови функціонального портрету шестеренної гідравлічної машини в режимі насоса встановлено, що її функціонування не має інерційності, а параметри мають стабільний характер. В свою чергу, функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини в режимі мотору має зону інерційності, котра в залежності від моменту пуску може мати сталий або не сталий характер.

Також, на підставі отриманого функціонального портрету можливо припустити, що вірогідною причиною відмовлення шестеренного насоса та мотору при проведенні приймально-здавальних випробувань може бути недостатнє дослідження їх кореляційних залежностей на стадії розробки конструкторської документації.

Список літератури

1. Кузнецов Ю. М., Новосоолов Ю. К., Луців І. В. Теорія технічних систем: підручник. Севастополь : СевНТУ, 2011. 246 с.
2. Підгаєцький М. М., Скібінський О. І. Технологія випробування та сертифікації продукції в машинобудуванні: навч. посіб. Кіровоград : КНТУ, 2014. 144 с.
3. Матвієнко О.О. Математична модель втрат робочої рідини через радіальний зазор шестеренного насоса типу НШ. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2005. Вип. 16. С. 235-240.
4. Підвищення подачі шестеренних насосів засобів транспорту та сільськогосподарської техніки / Кулешков Ю. В. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 4 (36). ч. 1. С. 197–203. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203)
5. Кулешков Ю.В.. Підвищення технічного рівня шестеренного насоса на основі нових фізичних і математичних моделей робочого процесу подачі: дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.05.17 / Націон. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2013. 442с.
6. Кириченко А.М., Щербина К.К., Годорожа В.А. Функціональний портрет шестеренного гідравлічного насоса. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2023)*: матер. XIII міжнар. наук.-практ. конф., 25-26 трав., 2023р. Чернігів: НУ "Чернігівська політехніка", 2023. Т. 1. С. 288-289.
7. Yang Zhou, Bowen Che, Ci Yuan. The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump journal bearing. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10(12) P.1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288>.
8. Zardin B, Natali E, Borghi M. Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*. 2019. Vol. 12(2468). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468>.
9. Fang Guo, Zongde Fang. Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Hindawi. Shock and Vibration*. 2018. P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453>.
10. Gear pump cavitation reduction : пат. 7878781 B2 United States : МПК FOIC 2L/00. № 12/001,279 ; заявл. 11.12.2007 ; опубл. 01.02.2011, Бюл. № 2.

References

1. Kuznietsov, Yu. M., Novos'olov, Yu. K. & Lutsiv, I. V. (2011). *Teoriia tekhnichnykh system [Theory of technical systems]*. Sevastopol : SevNTU [in Ukrainian].
2. Pidhaiets'kyj, M. M. & Skibins'kyj, O. I. (2014) *Tekhnolohiia vyprovuvannia ta sertyfikatsii produktsii v mashynobuduvanni [Technology of testing and certification of products in mechanical engineering]*. Kirovohrad : KNTU [in Ukrainian].
3. Matviienko, O.O. (2005). Matematychna model' vtrat robochoi ridyny cherez radial'nyj zazor shesterennoho nasosa typu NSh [Mathematical model of losses of the working fluid due to the radial clearance of the gear pump type NSh]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation, 16, 235-240* [in Ukrainian].

4. Kuleshkov, Y.V., Krasota, M.V., Rudenko, T.V. et al. (2022). Pidvyschennia podachi shesterennykh nasosiv zasobiv transportu ta sil'skohospodars'koi tekhniki [Increasing the Supply of Gear Pumps for Vehicles and Agricultural Machinery]. *Tsentrал'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian National Technical University. Technical sciences*, 4(36), 1, 197–203 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203) [in Ukrainian].
5. Kulieshkov, Yu.V. (2013). Pidvyschennia tekhnichnoho rivnia shesterennoho nasosa na osnovi novykh fizychnykh i matematychnykh modelej robochoho protsesu podachi [Increasing the technical level of the gear pump on the basis of new physical and mathematical models of the working process of feeding]. *Doctor's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
6. Kyrychenko, A.M., Scherbyna, K.K. & Hodorozha, V.A. (2023) Funktsional'nyj portret shesterennoho hidravlichnoho nasosu [Functional portrait of a gear hydraulic pump]. Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2023): *XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (25-26 travn., 2023r) – XIII International scientific and practical conference* (pp. 288-289). Chernihiv: NU "Chernihivska politekhnika" [in Ukrainian].
7. Yang Zhou, Bowen Che & Ci Yuan. (2018). The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump journal bearing. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 10(12,) P.1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288> [in English].
8. Zardin, B., Natali, E. & Borghi, M. (2019). Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*, 12(2468). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468> [in English].
9. Fang, Guo & Zongde, Fang. (2018). Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. Hindawi. *Shock and Vibration*. P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453> [in English].
10. Gear pump cavitation reduction (United States Patent № 7878781 B2). (2011) [in English].

Mykhailo Pidhaietskyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Kyryl Shcherbyna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kyrychenko**, Prof., DSc., **Viktor Hodorozha**, post-graduate, **Tetiana Dzhus**, master student
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Functional portrait of a gear hydraulic machine

Increasing the efficiency of the functional performance of various mechanisms, including hydraulic gear pumps and motors, is one of the most important issues in the development of mechanical engineering. Special attention should be paid to the indicators of the volume flow rate and the torque. One of the ways is to study the mutual influence of the output parameters of the hydraulic gear machine.

Some of the main parameters that determine the functional performance of a gear hydraulic machine are volume flow, power and torque, which in turn form the overall efficiency. It is necessary to create a functional portrait in order to determine the influence of these indicators on the overall efficiency and to improve the efficiency of the gear hydraulic machine. The resulting functional portrait will make it possible to determine the indicator for optimizing the operation of a gear hydraulic machine, both in pump mode and in motor mode. In turn, it will allow us to combine correlations with each other. In order to obtain the optimal indicators for building a functional portrait, a scheme for diagnosing a gear hydraulic machine in the pump-motor mode has been developed. An algorithm for its operation has been presented.

As a result of the construction of a functional diagram of a gear hydraulic machine in pump mode, it was found that its operation has no inertia and its parameters are stable and dependent on the dimensional diagram. The orientation of the end bearings occurs during operation in pumping mode under frictional, sliding and dynamic conditions, which ensures improved sealing. On the other hand, the functional portrait of a gear hydraulic machine in motor mode has a zone of inertia, which can be stable or not, depending on the starting moment. Also, on the basis of the obtained functional portrait, it can be assumed that the probable cause of the failure of the gear pump and the motor during the acceptance tests may be the insufficient study of their interdependencies at the stage of development of the design documentation.

functional portrait, gear pump, gear motor, displacement, total efficiency

Одержано (Received) 27.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023