

П.М. Андренко, д-р техн. наук
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
А.Ю. Лебедєв, канд. техн. наук
ТОВ «ХЗТФ «Моторімпекс», Харків, Україна

КОМПЛЕКСНИЙ УНІВЕРСАЛЬНИЙ КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ГІДРАВЛІЧНИХ МАШИН, ГІДРОАГРЕГАТІВ ТА ГІДРАВЛІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

AN INTEGRATED UNIVERSAL CRITERION FOR THE TECHNICAL LEVEL ASSESSMENT OF HYDRAULIC MACHINES, HYDRAULIC UNITS AND HYDRAULIC DEVICES

Метою статті є встановлення універсального комплексного критерію для оцінки технічного рівня гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв.

Методи дослідження. На основі системного аналізу оціночних показників технічного рівня широкої гами елементів систем гідроприводів, а саме гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв синтезовано універсальний комплексний критерій оцінки їх технічного рівня.

Результати досліджень. Отримано універсальний комплексний критерій для оцінки технічного рівня гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв, який дозволяє здійснювати їх оцінку залежно від конструктивних і експлуатаційних показників, базуючись на єдиних методологічних принципах. Запропонований критерій не потребує застосування суб'єктивних експертних оцінок, отриманий у вигляді простого алгебраїчного виразу та дозволяє, крім встановлення технічного рівня гідравлічних машин, гідроапаратів та гідравлічних пристроїв, провести оцінку їх енергетичної ефективності. Доведено ефективність його використання.

Висновки. Запропонований критерій дозволяє визначити технічний рівень гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв за їх каталожними даними або на стадії проектування за технічним завданням.

Ключові слова: технічний рівень, критерій, гідравлічна машина, гідроагрегат, гідравлічний пристрій, енергоефективність.

Вступ

Створення принципово нових машин і устаткування та вдосконалення існуючих на основі ресурсо- та енергозберігаючих технологій є актуальним науково-технічним завданням. Найбільш повно вимогам економної витрати матеріалів і енергоресурсів задовольняють машини та технологічне обладнання з гідравлічним приводом, який завдяки своїм відомим перевагам знайшов широке застосування у різних галузях машинобудування в якості виконавчих механізмів сучасних мехатронних модулів, систем управління виробничими процесами, технологічними та мобільними машинами. При цьому рівень використання гідравлічних приводів та пристроїв у машинах є непрямим показником їх технічного рівня. При проектуванні нових машин та обладнання гостро стоїть питання, на які параметри гідравлічного привода слід орієнтуватися? Розв'язання цього питання лежить в площині встановлення технічного рівня його складових частин, а саме гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв, на основі порівняння їх показників з показниками провідних світових фірм-виробників такого обладнання.

Аналіз літературних джерел

В науково-технічній літературі встановленню оціночних показників технічного рівня окремих елементів систем гідроприводів присвячено достатньо уваги, однак більшість з них стосується об'ємних гідравлічних машин. Оцінка їх технічного рівня здійснюється за наступними показниками [1, 2, 3, 4]:

- маса, яка припадає на одиницю моменту обертання гідромотора (питомий показник моменту)

$$k_M = m/M_{кр}, \text{ кг/Н}\cdot\text{м}, \quad (1)$$

де m — маса гідромотора, кг, $M_{кр}$ — момент обертання на валу гідромотора, Н·м

$$M_{кр} = 0,159 q \Delta p, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2)$$

де q і Δp — відповідно робочий об'єм гідромотора в м³ і перепад тиску на гідромоторі в Па,

- маса, яка припадає на одиницю потужності на виході з гідромотора (питомий показник потужності)

$$k_P = m/P_{(н)}, \text{ кг/Вт}, \quad (3)$$

де P_M і P_H — теоретична потужність гідромотора або насоса, Вт,

$$P_M = M_{кр} n_M, \text{ Вт}, \quad P_H = Q_H p_H, \text{ Вт}, \quad (4)$$

де n_M — частота обертання вала гідромотора, c^{-1} , Q_n — витрата насоса, m^3/c , p_n — тиск на виході із насоса, $Па$,

- маса, що припадає на одиницю об'єму, який займає гідромашина (коефіцієнт компактності),

$$k_w = m/w, \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

де w — об'єм, який займає гідромашина, $м^3$. Зазначимо, що матеріалоемність є непрямым показником економічної ефективності виробу,

- потужність, що припадає на одиницю об'єму, який займає гідромотор (коефіцієнт енергоемності)

$$k_{p/w} = P_M/w, \quad (6)$$

- показник швидкості

$$C_n = n \sqrt[3]{q}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

де n — частота обертання насоса або гідромотора, c^{-1} ,

- коефіцієнт потужності

$$C_p = \Delta p n \sqrt[3]{q}, \text{ Па} \cdot \text{м/с}. \quad (8)$$

Слід зазначити, що кожний з наведених критеріїв окремо недостатньо повно характеризує технічний рівень конструкції гідромашини, тому здійснюють порівняння гідромашин за декількома критеріями або вибирають у якості основного такий, що відображає найбільшою мірою вимоги, які висуваються до конкретної гідромашини. Зазначені показники технічного рівня гідромашин необхідно розглядати водночас з їх ККД.

Розглядаючи втрати потужності в насосі блока живлення літака, в [5] вводиться еквівалентний зазор, тобто такий, в якому втрати потужності дорівнюють однойменним втратам в усіх зазорах гідромашини, що розглядається. Визначено, що величина відносного зазору впливає на величину внутрішніх витоків робочої рідини та втрати на в'язке тертя. Для розповсюджених геометричних співвідношень у ній, виходячи з мінімуму вказаних втрат потужності, величина відносного зазору визначається згідно залежності

$$\delta = \frac{\delta}{d_n} = 10^{-3}, \quad (9)$$

де δ — зазор, d_n — діаметр поршня гідромашини.

Для кількісної оцінки енергетичної ефективності електрогідравлічного привода з дросельним управлінням в [6] запропоновано використовувати наступний критерій

$$I_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{Q}{Q_\tau} dt, \quad (10)$$

де t і T — відповідно час і термін роботи гідравлічного привода, Q і Q_τ — відповідно витрати через гідропривод і їх теоретичне значення.

Для знаходження оптимального значення критерію (10) його розглядають разом з критерієм рівномірності обертання, на підставі яких складають функцію цілі, вигляд якої заздалегідь невідомий [6]. Розв'язання цієї задачі здійснюють методом умовної оптимізації. Треба мати на увазі, що критерій (10) не цілком враховує потужність

привода, оскільки у загальному випадку потужність гідравлічного привода є добутком витрати на тиск [7]. Крім того, порівняння за цим критерієм енергоефективності приводів різних типів не є можливим через те, що термін їх роботи T може суттєво різнитися. Він не дозволяє ні встановити технічний рівень привода, ні провести порівняння приводів різних типів.

В [8] для оцінки якості перехідних процесів гідроагрегатів використовують відносну інтегральну оцінку

$$J_Q = \frac{\int_0^{t_p} |P1(t) - P2(t)| dt}{\int_0^{t_p} P1(t) dt} 100 \%, \quad (11)$$

де як приклад взяли $P1(t)$ і $P2(t)$ — відповідно, потужності гідроагрегата, розраховані за різними математичними моделями, t_p — час перехідного процесу.

Оцінка (11) характеризує відношення значень різниці площ під кривими $P1(t)$ і $P2(t)$ до площі під кривою $P1(t)$ упродовж перехідного процесу та дозволяє порівнювати гідроагрегати за одним критерієм. Аналогічно до (11) приймають вирази для інших змінних. Однак відносна інтегральна оцінка (11) не дозволяє комплексно оцінити характеристики гідроагрегата, встановити його технічний рівень.

Розглядаючи енергоефективність насосного обладнання в [9], пропонують використовувати, відповідно до [10], індекс енергетичної ефективності EEI (Energy Efficiency Index), який визначається за формулою

$$EEI = \frac{P_{L,avg}}{P_{ref}} C_{20\%}, \quad (12)$$

де L_{avg} — середнє значення потужності, що споживається даним насосом з урахуванням стандартизованого профілю навантаження. Розраховується як середнє значення потужності, яка споживається насосом за періоди його роботи,

$$P_{L,avg} = 0,06 P_{L,100\%} + 0,15 P_{L,75\%} + 0,35 P_{L,50\%} + 0,44 P_{L,25\%}, \quad (13)$$

P_{ref} — еталонна потужність, розрахункова величина для циркуляційного насоса визначена для його певного типу, $C_{20\%}$ — законодавчо прийнятий поправочний коефіцієнт, який враховує, що тільки 20 % існуючих циркуляційних насосів задовольняє вимогам $EEI = 0,20$. $C_{20\%} = 0,49$.

Зазначається, що на момент прийняття $EEI = 0,20$ є так званим цільовим орієнтиром, тобто величиною, до якою необхідно прагнути. На законодавчому рівні встановлено, що для циркуляційних насосів потужністю 2500 Вт , які поставляються як окремі агрегати, можлива величина індексу енергетичної ефективності з 2013 року становить $EEI = 0,27$, а з 2015 року $EEI \leq 0,27$.

Для насосів з витратою до $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ шести конструктивних схем — консольних, консольно-моноблочних, консольно-моноблочних з розташуванням патрубків «в лінію», вертикальних багатоступеневих та занурювальних багатоступеневих, відповідно до EN 16480 «Мінімальний

потрібний ККД відцентрових насосів для води» введено показник енергоефективності MEI (Minimum Efficiency Index) — індекс мінімального ККД. Оскільки MEI є десятковим числом, меншим за 1,0, та відображає кількісне співвідношення продукції різного технічного рівня, що представлено на ринку, індекс MEI визначають за методикою, наведеною в [10].

Індекс енергетичної ефективності (12) є нічим іншим, як інтегральним ККД насоса, визначеним для діапазону його роботи при номінальному режимі та режимах, відмінних від номінальних, близьких до нього, і лише частково характеризує його технічний рівень.

В [10] визначають оцінку технічного рівня насоса за трьома точками ККД — q_{PL} (навантаженню при $q = 0,75 q_{BER}$), q_{BER} (в точці максимального ККД) та q_{OL} (перевантаження, при $q = 1,1 q_{BER}$) і надає значення ККД у цих точках («будиночок» ККД), нижче яких фактичні величини ККД насоса знижуватись не можуть.

В [11] запропоновано для оцінки характеристик лабиринтно-гвинтових насосів, форми їх робочих органів та технічного рівня використовувати параметри: питомий напір \tilde{H} , питому витрату \tilde{q} , питому потужність \tilde{P} , питомий ККД $\tilde{\eta}$:

$$\begin{aligned}\tilde{H} &= \frac{H}{z l_B / R_r}, \quad \tilde{q} = \frac{q_{ср}}{z l_B / R_r}, \\ \tilde{P} &= \frac{P}{z l_B / R_r}, \quad \tilde{\eta} = \frac{\eta}{z l_B / R_r},\end{aligned}\quad (14)$$

де H і $q_{ср}$ — напір, m і середня витрата, m^3/c на виході лабиринтно-гвинтового насоса, відповідно, P_r — теоретична потужність, Bm , η — ККД насоса, z — кількість заходів гвинта, l_B — довжина гвинта, m , R_r — гідравлічний радіус гвинтової канавки, m .

Для оцінки конструктивних і експлуатаційних показників гідромоторів в роботі [12] запропоновано використовувати безрозмірний критерій ефективності

$$K = \frac{M_{кр} n_m T}{g m L} = 367,35 \frac{M_{кр} n_m T}{m L}, \quad (15)$$

де $M_{кр}$ — момент обертання на валу гідромотора, $H \cdot m$, n_m — частота обертання вала гідромотора, c^{-1} , T — довгостроковість гідромотора, $год.$, g — прискорення вільного падіння, m/c^2 , m — маса гідромотора, $кг$, L — характерний об'єм гідромотора

$$L = \sqrt{D_M L_M}, \quad m, \quad (16)$$

де D_M і L_M — відповідно діаметр і довжина гідромотора, m .

Однак критерій (15) не враховує такі важливі показники технічного рівня гідромоторів, як загальний ККД, коефіцієнт енергоемності, рівень шуму, спричинений через роботу гідромотора, вібростійкість, надмірне перевантаження (міцність деталей гідромотора).

Урахування цих та інших важливих показників технічного рівня гідромашини дозволяє методика, наведена в [13] де оцінку технічного рівня гідроагрегатів виконують порівнянням сукупності показників якості гідромашин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв, що проектуються, з відповідною сукупністю показників аналога. Важливим показником, який визначає доцільність виробництва і впровадження їх у промисловість, є економічний ефект, його визначають за відомими методиками, наприклад, роботи [14].

Для оцінки технічного рівня гідромашин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв використовують наступні основні показники [15]: класифікаційні для ГА-аналогів, оціночні, згідно яких оцінюють технічний рівень і якість, а саме: призначення, конструктивні, надійності, економного використання матеріалу, економного використання енергії, ергономічні. Зауважимо, що згідно з [15] допускається використання додаткових показників. До класифікаційних показників належать: діаметр умовного проходу, значення номінального та максимального тиску в гідромашині, гідроагрегаті чи пристрої, номінальні витрата та потужність, ККД, номінальний момент обертання, номінальна товщина фільтрації тощо. До оціночних показників належать: рівень тиску та діапазон його регулювання, точність підтримування заданих значень тиску та потужності, час зміни тиску при ступінчастій зміні витрати від номінальної до мінімальної та навпаки, час переключення, зона нечутливості, гістерезис, нелінійність, статична неточність тощо. Для гідромашин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв такі показники технічного рівня, як діаметр умовного проходу, витрата, номінальний та максимальний тиск обираються стандартизовані та визначаються залежно від їх потужності, необхідної для забезпечення їх функціонування. Інші показники залежать від точності підтримування у заданих межах вихідної величини та чутливості до керуючих сигналів.

Для встановлення показників технічного рівня гідромашин, гідроагрегатів чи гідравлічних пристроїв заповнюють таблицю, в першій графі якої вказують найменування основних параметрів (номінальна витрата, номінальний тиск, потужність тощо). У другій — величину показників якості за варіантами (аналог, проект, еталон). У третій — розраховують відносний показник технічного рівня гідромашини, гідроагрегата чи гідравлічного пристрою (відношення показника технічного рівня аналога проекту до показника технічного рівня еталона) [14].

$$I_i = \frac{P_i}{P_i^e}, \quad (17)$$

де I_i — параметричний індекс i -го параметра, P_i та P_i^e — відповідно значення i -го параметра, який характеризує споживчі властивості оцінюваної гідромашини, гідроагрегата чи гідравлічного пристрою і їх еталону.

У четвертій графі записують вагомість показника в балах. У п'ятій — розраховують зведений індекс показника технічного рівня

Таблиця 1 — Технічні характеристики і оціночні показники технічного рівня гідромоторів провідних світових фірм

Параметр, розмірність	Гідромотори		
	Аксіально-поршневий	Радіально-поршневий	Шестеренний
Робочий об'єм, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	32	11	26
Тиск, МПа	35	25	20
Крутний момент, Н·м	229	56	124
Частота обертання, с^{-1}	26,7	0,417	40
Потужність, кВт	110	11	39
Маса, кг	9,5	12	9,5
КПД, %	92	90	86
$I, \text{м} \cdot 10^{-2}$	3,175	2,224	2,96
$k_{p/w}/k_w, \text{вт/кг}$	11578,95	916,667	4105,263
$C_v, \text{м/с} \cdot 10^{-2}$	84,668	0,927	118,4
K	40,762	249,343	9,006

Таблиця 2 — Технічні характеристики і оціночні показники технічного рівня гідророзподільників

Параметр, розмірність	Гідророзподільник		
	П6	В6	P102
Діаметр умовного проходу, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	6	6	10
Тиск, МПа	32	32	20
Витрата, л/хв.	10	16	40
Час спрацювання, с	0,02	0,02	0,03
Маса, кг	1,3	1,3	3,4
Хід золотника, мм	2,5	2,5	3,2
Потужність на виході, Вт	5333,3	8533,3	13333,3
$k_{p/w}/k_w, \text{вт/кг}$	2133,32	3413,32	3921,56
$C_v, \text{м/с} \cdot 10^{-2}$	0,125	0,125	0,107
K	10,449	16,718	37,398

Таблиця 3 — Технічні характеристики і оціночні показники технічного рівня гідроциліндрів

Параметр, розмірність	Діаметр гідроциліндра $D_{\text{гц}}$, мм		
	40	80	160
Тиск, МПа	32	32	32
Час розгону поршня до робочій швидкості, с	0,25	0,35	0,5
Вага, Н	0,819	6,551	53,41
Ефективна сила на штоку, Н	35,68	141,3	5821,7
ККД	0,94	0,94	0,94
Питома ефективна сила на штоку	43,56	21,57	10,39
$k_{\text{p/w}}/k_{\text{w}}$, вт/кГ, вт/кГ	6969,6	4930,29	3324,8
C_v , м/с•10 ⁻²	0,16	0,32	0,32
K	1413,88	500,09	337,24

$$I_k = \sum_{i=1}^n B_i \cdot I_i, \quad (18)$$

де I_i — величина параметричного індексу i -го параметра, B_i — величина вагомості i -го параметра.

Рівень показників технічного рівня гідромашини, гідроагрегата чи гідравлічного пристрою (конкурентоспроможність розробленого гідромашини, гідроагрегата чи гідравлічного пристрою) визначають за формулою

$$K = I_{\text{и}} / I_{\text{он}}, \quad (19)$$

де $I_{\text{он}}$ — зведений індекс показників технічного рівня аналога.

Розрахований зведений індекс показника технічного рівня розробленої гідромашини, гідроагрегата чи гідравлічного пристрою порівнюють зі зведеним індексом показників технічного рівня аналога та встановлюють категорію якості гідромашини, гідроагрегата чи гідравлічного пристрою, що проектується. За класифікацією [13] при $I_{\text{и}} > 0,9$ гідромашина, гідроагрегат чи гідравлічний пристрій відповідає вищій категорії якості за технічним рівнем кращим аналогам.

При використанні даної методики для встановлення технічного рівня гідромашини, гідроагрегата чи гідравлічного пристрою розраховують зведений індекс показника технічного рівня, до якого входять вагомості i -го параметра, його визначення стикається з певними труднощами, що суттєво впливають на значення цього показника. Крім того, отримані результати значною мірою залежать від правильності вибору аналога та еталона. Таким чином, наведена методика потребує уточнення.

У роботі [16] інтегральний показник технічного рівня гідромашини, що є інваріантним рівню кваліметричної моделі, визначається за рішенням системи неоднорідних лінійних рівнянь

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} & -1 \\ 0 & q_{22} & q_{23} & q_{24} & q_{25} & -1 \\ 0 & 0 & q_{33} & q_{34} & q_{35} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & q_{45} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

де q_{ij} — нормовані значення одиничних показників якості гідромашини, U — інтегральний показник технічного рівня конструкції, $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5)$ — стовпець невідомих вагових коефіцієнтів, що не залежать від суб'єкта експертизи та визначаються за розвитком системи рівнянь.

На кожному рівні такої універсальної моделі, що не потребує застосування суб'єктивних експертних методів, можна враховувати нові властивості, які притаманні системі у цілому, а також реалізувати аналіз аналогів та вибір варіантів за єдиним комплексним критерієм технічного рівня. Безперечною перевагою розробленого в [16] метода є його універсальність та отримання «павутини» якості, за груповими показниками якої можна встановити рівні можливості їх покращення.

У роботі [16] безрозмірний критерій ефективності (15) наведено у вигляді

$$K = \frac{60 M_{\text{сп}} n T}{g m L f_m}, \quad (21)$$

де f_m — масштабний безрозмірний коефіцієнт.

Однак у цій роботі у якості показника надійності використовуються взаємозалежні параметри, такі як імовірність безвідмовної роботи та напрацювання до

відмови, які в свою чергу зв'язані із середнім ресурсом і довговічністю, отже є кореляційно залежними. Крім того, розроблені одиничні критерії вібростійкості наведено тільки для об'ємних гідромашин, невизначено значення масштабного безрозмірного коефіцієнта f_m , що містить формули (21), відсутній критерій, який враховує рівень шуму. Слід зазначити, що рівень шуму наразі є одним з основних критеріїв у конкурентній боротьбі виробників компонентів гідравліки, передусім насосів [17]. Причому, як зазначено у статті [18], основними параметрами, що визначають шум насосів, є їх частота обертання і тиск. Так, при зниженні частоти обертання з 30 до 3,3 с⁻¹ рівень шуму зменшується на 15–20 дБА. Розв'язання системи неоднорідних лінійних рівнянь (20) через невизначеність їх вигляду стикається з низкою труднощів.

Відтак, не виявлено комплексного універсального критерію для оцінки технічного рівня складових гідроприводу — гідравлічних машин, гідроапаратів та пристроїв який базується на єдиних методологічних основах. Таким чином, розроблення такого критерію для оцінки технічного рівня гідравлічних машин, гідроапаратів та гідравлічних пристроїв, який враховує максимальну кількість показників та базується на єдиних методологічних принципах, є актуальним науково-технічним завданням. Актуальність такого завдання обґрунтовано також в [19].

Комплексний універсальний критерій оцінки технічного рівня гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв

Запропонований комплексний універсальний критерій оцінки технічного рівня гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв має вигляд

$$K = \frac{l k_{F/w} \eta \tilde{P}(t) k_{ext} k_r K_{пр}}{g C_v L_r k_w D_f \bar{L}_{ш дБА}}. \quad (22)$$

Він дозволяє здійснювати оцінку технічного рівня гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв залежно від їх конструктивних та експлуатаційних показників базуючись на єдиних методологічних принципах за даними наведеними у відповідних каталогах або технічного завдання на розробку виробу, що проектується.

Універсальний комплексний критерій включає l — характерний розмір

$$l = \begin{cases} \sqrt[3]{q} & \text{для гідромоторів та насосів,} \\ D_y & \text{для гідроагрегатів,} \\ \sqrt[3]{A_{гц}} & \text{для гідроциліндрів} \end{cases} \quad (23)$$

де q — робочий об'єм гідромашини, D_y — діаметр умовного проходу гідроагрегата, $A_{гц}$ — площа безштокової порожнини гідроциліндра або його ефективна площа, $k_{р/в}$ — коефіцієнт енергоємності визначається за формулою (6), в яку підставляють відповідно P —

потужність на виході гідромашини, гідроагрегата або гідравлічного пристрою та w — об'єм, який описує, гідромашину, гідроагрегат або гідравлічний пристрій, η — ККД гідромашини, гідроагрегата або гідравлічного пристрою чи їх індекс енергетичної ефективності ЕЕІ,

формула (12), $\tilde{P}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи гідромашини, гідроагрегата або гідравлічного пристрою, k_{ext} — критерій надмірного перевантаження, який розраховують за формулою [16]

$$k_{ext} = \frac{P_{max}}{[n_c] p_n}, \quad (24)$$

де p_{max} і p_n — відповідно, максимальний і номінальний тиски на виході гідромашини, гідроагрегата або гідравлічного пристрою, n_c — коефіцієнт запасу міцності.

C_v — швидкісний показник

$$C_v = \begin{cases} n \sqrt[3]{q} & \text{для гідромашин,} \\ \frac{l_{гц}}{t_{гц}} & \text{для гідроциліндрів гідроагрегатів та гідропристроїв} \end{cases},$$

де n — частота обертання гідромашини, $l_{гц}$ і $t_{гц}$ — відповідно довжина і час переміщення штока гідроциліндра або запірно-регулюючого елемента гідроапарата.

L_r — характеристичний габаритний розмір гідромашини, гідроапарата або гідравлічного пристрою [12]

$$L_r = \sqrt{D_{гц} L_{гц}}, \quad (26)$$

де $D_{гц}$ і $L_{гц}$ — відповідно діаметр і довжина гідромашини, гідроагрегата або гідравлічного пристрою.

k_w — коефіцієнт компактності, який визначається за формулою (5), відповідно, для гідромашини, гідроапарата або гідравлічного пристрою,

D_f — добротність гідромашини, гідроагрегата або гідравлічного пристрою, що характеризує їх вібростійкість та розраховується за формулою

$$D_f = \frac{2 \pi f_0 E}{P_{роз}}, \quad (27)$$

де f_0 — резонансна частота коливань гідромашини, гідроагрегата або гідравлічного пристрою, E та $P_{роз}$ — відповідно, енергія, ресурс якої має коливальна система та потужність, що розсіюється.

$\bar{L}_{ш дБА}$ — відносний рівень шуму гідромашини, гідроапарата або гідравлічного пристрою

$$\bar{L}_{ш дБА} = \frac{L_{ш дБА}}{L_{ш0 дБА}}, \quad (28)$$

де $L_{ш дБА}$ і $L_{ш0 дБА}$ — відповідно

рівень шуму при роботі гідромашини, гідроагрегата або

гідравлічного пристрою і базовий рівень шуму, рівень шуму у конструкторському бюро [19].

Коефіцієнт готовності

$$k_r = T_0/T_0 + T_b, \quad (29)$$

де T_0 і T_b — відповідно середнє напрацювання на відмову і середній час відновлення, год.

Показник уніфікації, який характеризує ступінь насиченості пристрою стандартизованими і уніфікованими деталями — коефіцієнт використання, визначають на підставі даних конструкторської документації за формулою [13]

$$K_{\text{пр}} = (P_d - P_{\text{до}})/P_d \cdot 100, \quad (30)$$

де P_d — загальна кількість деталей, шт., $P_{\text{до}}$ — кількість оригінальних деталей, шт.

Чим більше значення комплексного універсального критерію, тим вище технічний рівень гідравлічної машини, гідроагрегата або гідравлічного пристрою. Отже, якщо будь-який коефіцієнт, що містить формула (22), не вдається визначити, замість нього підставляють для аналога та виробу, що проектується, одиницю, а перед універсальним комплексним критерієм ефективності ставлять коефіцієнт розмірності.

Розрахункові дослідження

Для їх проведення скористуємося даними гідромоторів, які наведено у [12] та гідророзподільників у [21]. Запишемо їх у відповідні таблиці та проведемо за ними розрахунок комплексного універсального критерію технічного рівня за формулою (22).

За результатами розрахункових досліджень гідромоторів встановлено, що найвищий технічний рівень мають радіально-поршневі гідромотори. Це співпадає з результатами, що наведено у роботі [4]. Зазначимо, що таблиця 1 містить мінімальні значення параметрів цих гідромоторів.

Найвищий технічний рівень має гідророзподільник Р102. Однак слід зауважити, що при однакових діаметрах умовного проходу вищий технічний рівень має гідророзподільник В6.

При визначенні технічного рівня гідроциліндрів розглядали одноштокові гідроциліндри, діаметри поршнів яких відповідають стандартному ряду, а саме: 40, 80, 160 мм. Для подальших розрахунків, аналогічно статті [22], визначали його розміри через діаметр поршня — $D_{\text{гц}}$. Зазначимо, що для гідросистем, у яких тиск більший за 10 МПа, діаметр штока становить $d_{\text{шт}} = 0,7 D_{\text{гц}}$. Приймали: ширину поршня $H_{\text{п}} = d_{\text{шт}}$, довжину штока — $l_{\text{шт}} = D_{\text{гц}}$, довжину гідроциліндра — $L_{\text{гц}} = l_{\text{шт}} + H_{\text{п}}$, товщину корпусу та кришок гідроциліндра — $0,05 D_{\text{гц}}$. Вважали, що тиск зливу дорівнює нулю.

Енергетичну ефективність гідроциліндра оцінювали за значенням питомої ефективної сили на його штоку — відношення ефективної сили на штоку $F_{\text{гцеф}}$ до його ваги $G_{\text{гц}}$

$$\overline{F_{\text{гцеф}}} = F_{\text{гцеф}} / G_{\text{гц}}. \quad (31)$$

За результатами розрахунків (таблиця 3), встановлено, що вищі показники технічного рівня має гідроциліндр діаметр поршня якого дорівнює 40 мм. Застосування цього гідроциліндра у системі гідропривода забезпечує її енергоефективність. Цей висновок співпадає з висновком, отриманим у статті [22].

Зазначимо, розрахунок універсального комплексного критерію технічного рівня здійснювався без урахування деяких одиничних критеріїв, що входять до формули (22). Отриманий комплексний універсальний критерій оцінки технічного рівня гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв доцільно використовувати при розробці та запуску до виробництва нових виробів, коли в період доопрацювання отримують значення максимальної кількості одиничних критеріїв.

Висновки

Уперше запропоновано універсальний комплексний критерій для оцінки технічного рівня гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв, який дозволяє їх оцінити залежно від конструктивних і експлуатаційних показників, базуючись на єдиних методологічних принципах. Його синтезовано на основі системного аналізу оціночних показників технічного рівня широкої гами елементів систем гідроприводів. Запропонований критерій не потребує застосування суб'єктивних експертних оцінок, отриманий у вигляді простого алгебраїчного виразу та дозволяє визначити технічний рівень гідравлічних машин, гідроагрегатів та гідравлічних пристроїв за їх каталожними даними або за технічним завданням на стадії проектування, провести оцінку їх енергетичної ефективності. Доведено ефективність використання запропонованого критерію.

Література

1. Докунин, А.В. Радиально-поршневые гидромоторы многократного действия: Конструкция, теория и расчет / А.В. Докунин, А.Я. Рогов, Л.С. Фейфец — М.: Машиностроение, 1980. — 288 с.
2. Дячков, Б.И. Высокомоментные гидромоторы однократного действия / Б.И. Дячков. — М.: Машиностроение, 1979. — 120 с.
3. Пономаренко, Ю.Ф. Высокомоментные радиально-поршневые гидромоторы горных машин / Ю.Ф. Пономаренко — М.: Недра, 1972. — 376 с.
4. Аврунин, Г.А. Объемный гидропривод и гидропневмоавтоматика: учеб. пособ. / Г.А. Аврунин, И.В. Грицай, И.Г. Кириченко, и др. — Харьков: ХНАДУ, 2008 — 412 с.

5. Волков, А.А. Методика испытаний по определению компонента объемных потерь блоков питания / А.А. Волков, В.Ю. Мищенко // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. Вып. № 69. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.mail.ru/science/trudu

6. Щербачев, П.В. Электрогидравлический привод с дроссельным регулированием с повышенной энергоэффективностью / П.В. Щербачев, С.Е. Семенов // *Наука и образование, Электронный научно-технический журнал, МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012. — № 10. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://technomag.edu.ru/465528.html>

7. Лурье, З.Я. К вопросу определения и сравнения КПД объемных насосов различного принципа действия / З.Я. Лурье, П.Н. Андренко // *Промислова гідравліка і пневматика*. — Вінниця ВНАУ, 2013. — №1 (39). — С. — 62—65.

8. Лурье, З.Я. Метод расчета гидродинамической силы на осциллирующем запорно-регулирующем элементе гидроаппарата / З.Я. Лурье, П.Н. Андренко // *Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин: Междунар. науч.-технич. конф., 17-19 ноябр. 2010 г.: сборник докладов*. — Минск, БНТУ, 2010. — С. 47—53.

9. Тердохлеб, И. Современный подход к энергоэффективности насосного оборудования / И. Тердохлеб, А. Костюк, С. Соколов // *Насосы и оборудование*. 4-5/2014. С. 20—21. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.allpumps.kiev.ua

10. Draft EUROPEAN STANDART prEN 16480 Pumps — Minimum required efficiency of rotodynamic water.

11. Andrenko, P. Labyrinth screw pump theory / P. Andrenko, A. Lebedev // *MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences*. — Lublin — Rzeszow. — 2014. — Vol. 16, No 6. — P. 35—42.

12. Аврунин, Г.А. Гидравлическое оборудование строительных и дорожных машин / Г.А. Аврунин, И.Г. Кириченко, В.Б. Самородов, под ред. Г.А. Аврунина. — Харьков: ХНАДУ, 2012 — 464 с.

13. Гидроприводы объемные, пневмоприводы, и смазочные системы. Оценка технического уровня и качества: ОСТ2 Н06—35—84. — [Введен 01.01.85]. — М.: ВНИИТЭМР, 1985. — 39 с.

14. Яковлев, А.И. Соціально-економічна ефективність за умов ринку: навч. посіб. / А.И. Яковлев. — К. : ІСДО, 1994. — 228 с.

15. Система показателей качества продукции. Гидроприводы объемные, пневмоприводы, и смазочные системы. Номенклатура показателей: ГОСТ 4.37-90. [Введен 09.06.90] — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 39 с.

16. Жеглова, В.М. Підвищення технічного рівня сучасних аксіально-поршневих гідромашин : автореф. дис. канд. техн. наук 6 05.02.02. / Жеглова Вікторія Михайлівна. — Одеса, 2015. — 21 с.

17. Иванов, Г. Перспективы применения гидропривода в современных станках / Г. Иванов, В. Свешников // *Гид-*

равлика и пневматика, 2011. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://konstruktor.net/system>

18. Свешников, В.К. Иновации в гидравлике / В.К. Свешников // *«РИТМ»*, 2015. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.ritm-magazine.ru

19. Птицын, Г.В. Предпосылки для пересмотра стандартизованных показателей энергоэффективности гидроприводов / Г.В. Птицын [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2011/K06

20. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. [Введен 01.07.84] — М. : Изд-во стандартов, 1984. — 13 с.

21. Свешников, В.К. Станочные гидроприводы: справочник / В.К. Свешников. — М.: Машиностроение, 1995. — 448 с.

22. Андренко, П.М. Підвищення енергоефективності електрогидравлічного мехатронного модуля руху / П.М. Андренко, О.В. Дмитрієнко, А.Ю. Лебедєв // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. — Харків: НТУ «ХП», 2016. — № 20 (1192). — С. 72—76.

References

1. Dokunin, A.V. Radialno-porshnevyie gidromotory mnogokratnogo deystviya : Konstruktsiya, teoriya i raschet / A.V. Dokunin, A.Ya. Rogov, L.S. Feyfets — М.: Mashinostroenie, 1980. — 288 s.

2. Dyachkov, B.I. Vysokomomentnye gidromotory odnokratnogo deistvia / B.I. Dyachkov. — М.: Mashinostroenie, 1979. — 120 s.

3. Ponomarenko, Yu.F. Vysokomomentnye radialno-porshnevyie gidromotory gornykh mashin / Yu.F. Ponomarenko — М.: Nedra, 1972. — 376 s.

4. Avrunin, G.A. Obemny gidroprivod i gidropnevmavtomatika: ucheb. posob. / G.A. Avrunin, I.V. Gritsay, I.G. Kirichenko i dr. — Kharkov: KhNADU, 2008 — 412 s.

5. Volkov, A.A. Metodika ispytaniy po opredeleniyu komponenta obemnykh poter blokov pitaniya / A.A. Volkov, V.Yu. Mischenko // *Elektronnyi zhurnal «Trudy MAI»*. Vyp. № 69. [Elektronnyi resurs]. — Rezhim dostupa: www.mail.ru/science/trudu

6. Scherbachev, P.V. Elektrogidravlicheskiy privod s drosselnym regulirovaniem s povyshennoy energoeffektivnostyu / P.V. Scherbachev, S.E. Semenov // *Nauka i obrazovanie, elektronnyi nauchno-tekhnicheskii zhurnal, MGTU im. N.E. Bauman*, 2012. — № 10. [Elektronnyi resurs]. — Rezhym dostupa : <http://technomag.edu.ru/465528.html>

7. Lurie, Z.Ya. K voprosu opredeleniya i sravneniya KPD obiomnykh nasosov razlichnogo printsypa deystviya / Z.Ya. Lurie, P.N. Andrenko // *Promyslova gidravlika i pnevmatika*. — 2013. — №1 (39). — S. 62—65.

8. Lurie, Z.Ya. Metod rascheta gidrodinamicheskoy sily na ostsiliruyuschem zaporno-reguliruyuschem elemente

gidroapparata / Z.Ya. Lurie, P.N. Andrenko // *Gidropnevmosistemy mobilnykh i tekhnologicheskikh mashin: mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf.*, 17-19 noyabr. 2010 g.: sbornik dokladov. — Minsk, BNTU, 2010. — S. 47—53.

9. Tverdokhleby, I. Sovremennyy podkhod k energoefektivnosti nasosnogo oborudovaniya / I. Tverdokhleby, A. Kostyuk, S. Sokolov // *Nasosy i oborudovanie*. 4-5/2014. S. 20—21. [Elektronnyi resurs]. — Rezhim dostupa : www.allpumps.kiev.ua

10. Draft EUROPEAN STANDART prEN 16480 Pumps — Minimum required efficiency of rotodynamic water.

11. Andrenko, P. Labyrinth screw pump theory / P. Andrenko, A. Lebedev // *MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences*. — Lublin — Rzeszow. — 2014. — Vol. 16, No 6. — P. 35—42.

12. Avrunin, G.A. Gidravlicheskie oborudovanie stroitelnykh i dorozhnykh mashin / G.A. Avrunin, I.G. Kirichenko, V.B. Samorodov, pod red. G.A. Avrunina. — Kharkov: KhNADU, 2012 — 464 s.

13. Gidroprivody obimnyye, pnevmoprivody i smazochnyye sistemy. Otsenka tekhnicheskogo urovnya i kachestva: OST2 N06—35—84. — [Vveden 01.01.85]. — M.: VNIITEMR, 1985. — 39 s.

14. Yakovlev, A.I. Sotsialno-ekonomichna efektyvnost za umov rynku: navch. posib. / A.I. Yakovlev. — K.: ISDO, 1994. — 228 s.

15. Sistema pokazateley kachestva produktsii. Gidroprivody obimnyye, pnevmoprivody, i smazochnyye sistemy. Nomenklatura pokazateley: GOST 4.37-90. [Vveden 09.06.90] — M. : Izd-vo standartov, 1990. — 39 s.

16. Zheglova, V.M. Pidvischennyya tekhnichnogo rivnya suchasnykh aksialno-porshnevnykh gidromashin: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk 6 05.02.02. / Zheglova Viktoriya Mikhailivna. — Odesa, 2015. — 21 s.

17. Ivanov, G. Perspektivy primeneniya gidroprivoda v sovremennykh stankakh / G. Ivanov, V. Sveshnikov // *Gidravlika i pnevmatika*. — 2011. [Elektronnyi resurs]. — Rezhim dostupa : <http://konstruktor.net/system>

18. Sveshnikov, V.K. Inovatsii v gidravlike / V.K. Sveshnikov // «RITM», 2015. [Elektronnyi resurs]. — Rezhim dostupa : www.ritm-magazine.ru

19. Ptitsyn, G.V. Predposylki dlya peresmotra standartizovannykh pokazateley energoefektivnosti gidroprivodov / G.V. Ptitsyn [Elektronnyi resurs]. — Rezhim dostupa : www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2011/K06

20. GOST 12.1.003-83. Sistema standartov bezopasnosti truda. Shum. Obschie trebovaniya bezopasnosti. [Vveden 01.07.84] — M. : Izd-vo standartov, 1984. — 13 s.

21. Sveshnikov, V.K. Stanochnyye gidroprivody: spravochnik / V.K. Sveshnikov. — M. : Mashinostroenie, 1995. — 448 s.

22. Andrenko, P.M. Pidvyshchennyya energoefektivnosti elektrogidravlichnogo mekhatronnogo modulya rukhu / P.M.

Andrenko, O.V. Dmitrienko, A.Yu. Lebedev // *Visnik NTU «KhPI»*. Seriya: Gidravlichni mashyny ta gidroagregaty. — Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. — № 20 (1192). — S. 72—76.

Надійшла 20.08.2017 року

УДК 621.225

Комплексный универсальный критерий оценки технического уровня гидравлических машин, гидроагрегатов и гидравлических устройств

П.Н. Андренко,
А.Ю. Лебедев

Цель статьи — получение комплексного универсального критерия для оценки технического уровня гидравлических машин, гидроагрегатов и гидравлических устройств.

Методы исследования. На основе системного анализа оценочных показателей технического уровня широкой гаммы элементов систем гидроприводов, а именно: гидравлических машин, гидроагрегатов и гидравлических устройств синтезирован универсальный комплексный критерий оценки их технического уровня.

Результаты исследований. Получен универсальный комплексный критерий для оценки технического уровня гидравлических машин, гидроагрегатов и гидравлических устройств, который позволяет осуществлять их оценку по конструктивным и эксплуатационным показателям, базируясь на единых методологических принципах. Предложенный критерий не требует использования субъективных экспертных оценок, получен в виде простого алгебраического выражения и позволяет кроме установления технического уровня гидравлических машин, гидроагрегатов и гидравлических устройств, провести оценку их энергетической эффективности. Доказана эффективность его использования.

Выводы. Предложенный критерий позволяет установить технический уровень гидравлических машин, гидроагрегатов и гидравлических устройств по их каталожным данным или по техническому заданию на стадии проектирования.

Ключевые слова: технический уровень, критерий, гидравлическая машина, гидроагрегат, гидравлическое устройство, энергоэффективность.

UDC 621.225

An integrated universal criterion for the technical level assessment of hydraulic machines, hydraulic units and hydraulic devices

P. M. Andrenko, A. Yu. Lebedev

Aim. The purpose of this article is to obtain an integrated universal criterion for assessing the technical level of hydraulic machines, hydraulic units and hydraulic devices.

Research methods. Based on the system analysis of a wide range of hydraulic drive systems elements' (namely hydraulic machines, hydraulic units and hydraulic devices) estimated technical level, a universal integrated criterion for assessing their technical level has been synthesized.

The results of the research. Based on the common methodological principles, an integrated universal criterion

for assessing the technical level of hydraulic machines, hydraulic units and hydraulic devices (allowing to assess their design and performance characteristics) was obtained. The proposed criterion does not require the use of subjective expert assessments. It was obtained in the form of a simple algebraic expressions and allows to evaluate the technical level of hydraulic machines, hydraulic units and hydraulic devices as well as to assess their energy efficiency. Its usage efficiency has been proved.

Conclusions. The proposed criterion allows to set the technical level of hydraulic machines, hydraulic units and hydraulic devices based on their catalogue data or on the technical requirements at the design stage.

Keywords: technical level, criterion, hydraulic machine, hydraulic units, hydraulic devices, energy efficiency.