

УДК 62-531.4

**О. П. ГУБАРЕВ, О. В. ЛЕВЧЕНКО, А. В. КОРЧОВНИЙ**

### **ДВОРІВНЕВА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ГІДРОПРИВОДУ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ СТРУКТУРОЮ**

Запропоновано дворівневу модель систем гідроприводу з паралельною структурою. Логічна складова моделі описує логічну взаємодію виконавчих пристроїв з урахуванням їх спрацювання в паралельних потоках. Функціональна складова визначає технологічні та експлуатаційні характеристики кожної операції, які є основою для визначення рівня енергоспоживання гідравлічної системи. Додатково розглянуто перспективи подальших досліджень в напрямку визначення та прогнозування енергоефективності системи.

**Ключові слова:** дворівнева модель, гідропривід, паралельна структура, енергоефективність.

**Вступ.** Основною задачею моделювання систем гідроприводу з паралельною структурою є розробка ефективних схем практичних систем з мінімальними енерговитратами в процесі експлуатації на основі прогнозування енергоспоживання за типом схемного рішення.

Розрахунок енерговитрат здійснюється за допомогою наступних характеристик:

- витрата робочої рідини системи;
- тиск робочої рідини системи;
- середня потужність системи за одиничний цикл;
- зміна середньоциклової потужності;
- споживана енергія системи.

Такий підхід дозволяє виконувати моделювання класу систем, що мають різні варіанти схем, фіксовані функції та кількість експлуатаційних дій, однаково послідовність їх виконання, розгалуження робочого циклу у вигляді паралельних гілок, які виконуються одночасно. У відповідності до структури системи виконавчий рівень є спільним для всіх представників класу по кількості виконавчих пристроїв, функціям та умовам експлуатації. Відмінними для них є схемні рішення та технічні засоби керуючого, логіко-інформаційного і енергетичного рівнів.

**Аналіз останніх досліджень.** Результові енергетичні характеристики гідравлічної системи залежать від гідравлічної схеми системи, від типу обладнання, яке використовується для реалізації цієї схеми, та від узгодженості параметрів приводів відповідно до експлуатаційного циклу роботи системи.

Розробка гідравлічних схем гідрофікованих машин і механізмів є однією з основних задач при їх проектуванні. Вирішення цієї задачі на сучасному етапі повинно передбачати проектування систем з підвищеними показниками енергетичної ефективності. Ця науково-технічна задача може бути вирішена шляхом розробки методик проектування, які базуються на прогнозуванні енергетичних витрат продовж часу експлуатації системи.

© О. П. Губарев, О. В. Левченко, А. В. Корчовний, 2016

Як показує аналіз літератури [1, 2], проектування гідроприводів у машинобудуванні проводиться за допомогою різних методик. Накопичено значний досвід і розроблена велика кількість типових гідравлічних схем для вирішення конкретних задач в промисловості. Гідравлічні системи сучасних машин, як правило, складаються з апаратів і агрегатів, які серійно випускаються спеціалізованими заводами. Це дозволяє спростити процес проектування, розробку гідравлічних систем і їх експлуатацію.

Досліджуючи питання підвищення ефективності роботи гідравлічних багатопривідних систем було виявлено, що найбільш вірогідним способом і перспективним напрямком підвищення ефективності є розробка оптимальної структури гідравлічної схеми та способу керування [3, 4].

В процесі розробки схеми гідравлічної системи, для одних і тих же вихідних умов може бути запропоновано декілька варіантів. Їх енергетичні характеристики будуть суттєво відрізнятися, що є наслідком використання різних методик та підходів до побудови схем. Як правило в процесі проектування створюється одна схема, а не розробляється і порівнюється декілька варіантів. Недоліком такого підходу є те, що неможливо оцінити вплив схемних рішень на ряд показників роботи системи, в тому числі й на рівень енергоспоживання.

Таким чином, підвищення енергетичної ефективності систем, в першу чергу, потребує прогнозування рівня енергоспоживання за типом обраного схемного рішення.

В загальному випадку рівень енергоспоживання за існуючими методиками визначається потужністю приводів, які входять до складу системи, та втратами, спричиненими гідравлічним опором, перетоками, стисненням робочої рідини [3]:

$$\sum_{i=1}^n N_{zi}(t) = \sum_{i=1}^n N_{Ki}(t) + \sum_{i=1}^n N_{Bi}(t), \quad (1)$$

де  $N_z$  – затрачена потужність, Вт;  $N_K$  – корисна потужність, Вт;  $N_B$  – втрати потужності в гідравлічній частині системи, Вт;  $n$  – кількість приводів;  $t$  – час роботи привода, с.

Недоліком такого підходу є неврахування змін енергоспоживання в часі з моменту запуску системи та неврахування впливу роботи приводів один на одного, що є характерним безпосередньо для багатопривідних циклових систем об'ємного гідроприводу.

Більшість методик [5] базується на сталій траєкторії енергетичного потоку, тобто послідовності апаратів гідросистеми, через які проходить робоча рідина. Затрачена потужність втрачається на шляху до отримання корисної потужності під час електромеханічного перетворення (в електродвигуні), далі механо-гідравлічного перетворення (в насосі), транспортування робочої рідини (в клапанах і трубопроводах), гідромеханічного перетворення (в виконавчому пристрої); утворюючи, таким чином, енергетичний потік з розгалуженнями на втрати, розділеними по траєкторії свого руху.

**Постановка задачі.** В результаті виконаного аналізу методик визначення рівня енергоспоживання систем гідроприводів та розгляду процесу формування втрат енергії практичних систем виявлена необхідність розробки узагальненої моделі роботи системи з метою побудови схемних рішень з мінімальним рівнем енергоспоживання.

Для отримання вказаного результату необхідно проаналізувати методи визначення енергетичних втрат і приклади практичних систем гідроприводів та розробити узагальнену математичну модель, яка дозволить імітувати експлуатаційний цикл з урахуванням основних чинників втрат енергії і отримувати прогноз щодо енергетичної ефективності систем та порівнювати за рівнем енергоспоживання різні схемні рішення, запропонувати нову методику визначення енергетичної ефективності шляхом прогнозування енергетичних показників експлуатаційного циклу за типом схемного рішення.

**Математична модель.** Відповідно до результатів виконаного аналізу, використання властивості циклічності систем дозволяє прогнозувати певні їх характеристики на строк експлуатації технічного об'єкта, спираючись на показники одиничного циклу. Ці характеристики є інтегрованими для системи в цілому, а разом з вартістю устаткування та обслуговування системи є передумовою визначення ефективності системи за строк експлуатації. Моделювання роботи системи виконується за період строку експлуатації технічного об'єкта.

Модель, яка дозволить виконати оцінку схемних рішень має бути достатньо простою у використанні і потребувати мінімальних витрат часу. Робота розроблюваної системи складається з наперед відомих дій пристроїв, дворівнева модель системи спирається на параметри цих дій. За такою схемою функції приводів в моделі задекларовані відомими залежностями в часі чи в координаті руху. Шаблон декларованої залежності вміщуватиме:

- діапазон змін аргументу (A1, A2);
- початкове значення функції (A3);
- коефіцієнт змін функції (A4);
- коди аргументу та функції (A5, A6);
- бінарні параметри, які фіксують виконання дії та команду до дії (A7, A8).

Тобто, дія, в виконанні якої зайнято групу пристроїв (наприклад, розподільчий клапан, клапан тиску, циліндр, датчик положення), потребує 8 параметрів за декларативною схемою моделі, та більше 100 за типовою моделлю. Зауважимо, що параметри (A7, A8) виключають необхідність функцій, які узгоджують параметри при-

строїв на фізичному рівні, що додатково зменшує розмірність моделі на 20...25 %.

Таким чином застосування деклараційного опису дій та операцій, що їх виконує система, зменшує розмірність масиву вихідних даних приблизно в  $K_{дан} = 15 \dots 20$  разів. Відповідно кількість операцій процесу моделювання зменшується в

$$K_{опер} \approx (K_{дан})^2 \approx 225 \dots 400.$$

Враховуючи, що зміна масштабного виміру алгоритму на 2 порядки приводить до якісно нової системи, спрощення може бути ефективним.

Ядро дворівневої логіко-функціональної моделі багатопрівідної системи має три складові: деклараційний опис дій та операцій, які позначаємо як модель функцій системи  $E_{ск}$ , логічний опис взаємодії пристроїв, що забезпечує порядок їх виконання у експлуатаційному чи технологічному процесі  $\Phi_{ск}$ , інтегральне визначення прогнозованого енергоспоживання та ефективності за цикловими показниками та коефіцієнтами їх змін за термін експлуатації  $P_{ск}$ :

$$M_{лф} = \cup(\Phi_{ск}, E_{ск}, P_{ск}), \quad (2)$$

де  $M_{лф}$  – логіко-функціональна модель;  $\Phi_{ск}$  – логічна складова логіко-функціональної моделі;  $E_{ск}$  – функціональна складова логіко-функціональної моделі;  $P_{ск}$  – енергетична складова логіко-функціональної моделі.

Імітація роботи системи за схемами дворівневої логіко-функціональної моделі включає:

- моделювання окремих функцій (дій та операцій);
- об'єднання функцій в експлуатаційному чи технологічному циклі;
- розрахунок інтегральних показників роботи системи за цикл;
- розрахунок змін інтегральних характеристик протягом періоду;
- визначення показників ефективності схемного рішення.

При побудові структури моделі застосовано підхід «зверху донизу», тобто склад та устрій кожного нижнього рівня моделі будується як необхідний та достатній для забезпечення даними верхнього рівня моделі.

Визначення показників ефективності схемного рішення базується на енергетичних характеристиках системи, обладнання, та втрат, пов'язаних з експлуатацією ( $V_{техн}$ ,  $V_{обсл}$ ,  $V_E$ ), та результатах моделювання: продуктивністю, енерговитратами, витратами на модернізацію та обслуговування системи ( $P_r$ ,  $E_{зат}$ ,  $E_{кор}$ ,  $V_{мод}$ ).

Визначення інтегрованих циклових показників враховує:

- перелік складових функцій циклу;
- порядок виконання функцій в циклі;
- параметри корисної роботи за кожною функцією;
- параметри для перерахунку корисної роботи до характеристик енергетичного потоку ( $P(t)$ ,  $Q(t)$ );
- перерахункові залежності визначення спожитої енергії за типовим схемним рішенням;
- алгоритми розрахунку корисної та споживаної енергії для класу систем.

Порядок виконання функцій в циклі за технічним завданням формалізується до логічних виразів команд керування, складу комплексу пристроїв керування, характеристик пристроїв керування, характеристик пристроїв контролю за виконанням функцій.

Перелік складових функцій циклу задається в технічному завданні та доповнюється функціями пам'яті і зворотними функціями [2]. Відповідно до нього формується склад виконавчих пристроїв та приводів системи.

Параметри корисної роботи за функціями забезпечуються характеристиками виконавчих пристроїв, режимами їх роботи, типом обладнання.

Параметри розрахунку енергетичних характеристик за виконаною корисною роботою складаються з конструктивних параметрів та характеристик виконавчих пристроїв і допоміжного обладнання, включно з гідравлічними лініями енергопостачання (рукава високого тиску, трубопроводи).

Перерахункові залежності визначення спожитої енергії за типовим схемним рішенням будуються для бібліотеки систем класу та враховують коефіцієнти корисної дії, системні втрати потужності, кероване узгодження пристроїв-постачальників та пристроїв-користувачів енергії. Алгоритми розрахунку корисної та споживаної енергії базуються на відпрацьованні логічних виразів виконання функцій та енергопостачальних пристроїв за термін одиничного циклу.

Моделювання одиничного циклу здійснюється за логіко-функціональним принципом, а саме: взаємодія пристроїв та порядок виконання окремих операцій забезпечується логічною складовою моделі (складова  $\Phi_{СК} = \{\Phi\}_{2n}$ ), розрахунок кількісних показників кожної дії у рамках циклу виконується за функціональною складовою (складова  $E_{СК} = \{\Theta\}_{2n}$ ), з використанням попередніх відомостей про застосоване обладнання, навантаження та параметри руху, фізико-енергетичні і конструктивні показники, визначення енергоспоживання та ефективності (складова  $P_{СК}$ ) базується на результатах імітації дій системи (3):

$$M = ((\Phi \cup E), \Pi) = \left\{ \left( \begin{array}{l} Y_1 \leftarrow \Phi_1(\{X_i, X_{\bar{i}}\}_{n_{\Phi M}}) \\ Y_{\bar{1}} \leftarrow \Phi_{\bar{1}}(\{X_i, X_{\bar{i}}\}_{n_{\Phi M}}) \\ \dots \\ Y_m \leftarrow \Phi_m(\{X_i, X_{\bar{i}}\}_{n_{\Phi M}}) \\ Y_{\bar{m}} \leftarrow \Phi_{\bar{m}}(\{X_i, X_{\bar{i}}\}_{n_{\Phi M}}) \\ \dots \\ Y_n^* \leftarrow \Phi_n(\{X_i, X_{\bar{i}}\}_{n_{\Phi M}}) \\ Y_{\bar{n}}^* \leftarrow \Phi_{\bar{n}}(\{X_i, X_{\bar{i}}\}_{n_{\Phi M}}) \end{array} \right) \cup \left( \begin{array}{l} X_1 \leftarrow \Theta_1(Y_1, \{P_{1k}\}_{r_1}) \\ X_{\bar{1}} \leftarrow \Theta_{\bar{1}}(Y_{\bar{1}}, \{P_{\bar{1}k}\}_{r_{\bar{1}}}) \\ \dots \\ X_m \leftarrow \Theta_m(Y_m, \{P_{mk}\}_{r_m}) \\ X_{\bar{m}} \leftarrow \Theta_{\bar{m}}(Y_{\bar{m}}, \{P_{\bar{m}k}\}_{r_{\bar{m}}}) \\ \dots \\ X_n^* \leftarrow \Theta_n(Y_n, \{P_{nk}\}_{r_n}) \\ X_{\bar{n}}^* \leftarrow \Theta_{\bar{n}}(Y_{\bar{n}}, \{P_{\bar{n}k}\}_{r_{\bar{n}}}) \end{array} \right) \right\}, \quad (3)$$

де  $\{P_{1k}\}_{r_1} = \{s, q, M, F, m, v, \omega\}$  – набір параметрів, що визначають дію  $i$ -го привода; \* – позначення пристроїв енергетичного рівня;  $Pr$  – продуктивність роботи багатопривідної системи;  $B_{\text{мод}}$  – витрати на модернізацію системи;  $B_{\text{обсл}}$  – витрати на щоденне обслуговування експлуатаційного обладнання;  $B_{\text{техн}}$  – витрати, пов’язані з реалізацією експлуатаційного циклу;  $B_E$  – додаткові витрати, пов’язані з експлуатацією системи.

Виконання кожної дії в моделі позначається зміною логічних сигналів стану,

$$X_i = 1, X_{\bar{i}} = 0: A_{\bar{i}}^- \leq A_i(t) \leq A_i^+,$$

які використовуються для вироблення команд, що розпочинають моделювання наступних дій. Отримання кількісних значень фізичних показників здійснюється за декларованими функціями роботи пристроїв при виконанні корисної роботи. Функції обраховуються за лінійними залежностями, константами чи за табличними значеннями, що їх у розрахунках замінено поліномами. При розрахунках використано експлуатаційні показники дій:

- корисна робота  $i$ -го приводу в  $j$ -му такті  $A(j)i$ ;
- експлуатаційне навантаження  $F + (j)i$ ;
- швидкість  $V(j)i$ ;
- час виконання функції  $t(j)i$ ;
- коефіцієнт завантаження приводу.

У разі невизначеності параметрів використано середню потужність за такт  $i$ -го пристрою  $N(j)i$ , або функцію змін потужності у часі  $N(t)i$ .

Узгодження енергетичних показників на протязі дії, такту та циклу здійснюється за алгоритмом, що відображає варіант запропонованої схеми енергетичного рівня, та складу модулів виконавчого рівня [4, 5].

На першому кроці інтегровані показники системи визначаються для одиничного експлуатаційного циклу  $(c)$  у загальному вигляді  $D(c)$ . У тому числі корисні  $D^*(c)$  та витрачені  $D(c)$ . До них належать: час циклу  $t(c)$ , кількість тактів  $n(c)$ , енергія витрачена за один робочий цикл  $Ec$ , енергія корисна за один робочий цикл  $E^*(c)$ , кількість корисної роботи  $A^*(c)$ , об’єм виробленої продукції  $Pr(c)$ , середня подача рідини  $Q(c)$ , середня споживана  $N(c)$  та корисна  $N^*(c)$  потужність.

На другому кроці додаються коефіцієнти, що відображають зміни у часі експлуатації  $(t)$ . Коефіцієнти враховують втрати, пов’язані із зносом обладнання – коефіцієнт втрат від зносу обладнання споживчого рівня  $K(t)_{\text{спож}}$ , коефіцієнт втрат від зносу обладнання енергетичного рівня  $K(t)_{\text{енер}}$ , зміни властивостей рідини та інші фактори, аргументом яких є час використання системи або параметри (наприклад, кількість використаної рідини), що можуть бути вирахованими за показником часу роботи системи.

Для узагальненого показника за проміжок часу  $(t_1 \dots t_2)$  застосовано екстраполяційну залежність:

$$D(t_1, t_2) = D_{(c)} \cdot k_D \frac{t_2 - t_1}{t_{\text{од}}}, \quad (4)$$

де  $t_{\text{од}}$  – тривалість одиничного циклу;  $D(t_1, t_2)$  – інтегрований показник за інтервал часу роботи системи;  $D_{(c)}$  – інтегрований показник за час одиничного циклу;  $k_D$  – коефіцієнт змін показника  $D(t_1, t_2)$  у часі.

Коефіцієнт, у разі потреби, замінено функцією, наприклад, для врахування змін властивостей рідини.

На третьому кроці розраховуються прогнозовані значення інтегрованих показників за інтервал часу, рівний ресурсу апарату  $R_C$ , середньому ресурсу гідроапаратів системи  $R'_C$ , терміну експлуатації технічного об'єкта  $T_C$ :

$$K_{ef}(t_2 - t_1) = \Phi(K_{ef}(t_j), (t_2 - t_1)), (t_2 - t_1) \in \{R'_C, R_C, T_C\}. \quad (5)$$

Очікувані кількісні значення витрат та здобутків за час використання системи, є аргументами комплексного показника ефективності за час циклу  $K_{ef}(t_j)$  чи строку експлуатації  $K_{ef}(T_C)$ .

**Висновки.** Запропоновано дворівневу логіко-функціональну модель багатопривідних циклових систем гідроприводів з паралельною структурою, яка дозволяє прогнозувати енергетичну ефективність шляхом вибору схемного рішення з урахуванням енергетичних втрат системи за типом схемного рішення.

Запропоновано використання в якості критерію ефективності роботи гідросистеми комплексний коефіцієнт, який враховує початкові витрати на створення системи, витрати на експлуатацію за період рівний строку експлуатації системи та ресурс окремих пристроїв, які входять до складу гідроприводу.

**Список літератури:** 1. Тимофеев В. Н. Экономическая эффективность машин: основные факторы, резервы повышения, управление: монография. – Харьков, изд-во «Основа» при Харьковском государственном университете, 1990. – 156 с. 2. Яхно О. М., Пастушенко С. И. Повышение эффективности использования энергии в гидравлических механизмах сельскохозяйственных машин // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідравліка і пневматика». – 2004. – Вип. 3. – С. 92 – 98. 3. Левченко О. В. Підвищення ефективності роботи систем гідроприводів циклічної дії // В кн. : Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: машинобудування. – 2012. – Вип. 65. – С. 125 – 130. 4. Левченко О. В. Особливості оцінки ефективності багатопривідної гідравлічної системи // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Гірничо-електромеханічна». – 2012. – Вип. 2 (24). – С. 142 – 149. 5. Ebel F., von Terzi M. Festo Didactic. Mechatronics. : Festo Didactic GmbH&Co., D73770 Denkendorf, 2000. – 108 S.

**References:** 1. Timofeev, V. N. *Yekonomicheskaya yeffektivnost' mashin: osnovnye faktory, rezervy povysheniya, upravlenie: monografiya* [Economic efficiency of machines: main factors, reserves for improvement, management]. Kharkov, izd-vo "Osnova" pri Har'kovskom gosudarstvennom universitete Publ., 1990. 156 p. 2. Jahno, O. M. and Pastushenko, S. I. *Povyshenie yeffektivnosti ispol'zovaniya yenerгии v gidravlicheskih mekhanizмах sel'skokhozyaystvennykh mashin* [Improving energy efficiency in hydraulic mechanisms of agricultural machinery]. *Vseukrayins'kiy naukovotekhnichnyy zhurnal "Promyslova gidravlika i pnevmatyka"* [Ukrainian Scientific and Technical Journal «Industrial Hydraulics and Pneumatics»]. 2004, vol. 3, pp. 92–98. 3. Levchenko, O. V. *Pidvyshennya efektyvnosti roboty system gidroprivodiv tsyklichnoyi diyi* [Improving the efficiency of hydraulic cyclic systems]. *Visnyk Natsional'nogo tekhnichnogo universytetu Ukrayiny "KPI". Seriya: mashynobuduvannya* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Ser.: Mechanical Engineering]. 2012, vol. 65, pp. 125–130. 4. Levchenko, O. V. *Osoblyvosti otsinky efektyvnosti bagatopryvidnoyi gidravlichnoyi systemy* [The features of evaluating the efficiency of a multi-drive hydraulic system]. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: "Girnycho-elektromekhanichna"* [Research Papers, DonNTU. Ser.: Mining and Electromechanics]. 2012, vol. 2 (24), pp. 142–149. 5. Ebel, F. and von Terzi, M. *Festo Didactic. Mechatronics.* : Festo Didactic GmbH&Co., D73770 Denkendorf, 2000. 108 p.

Надійшла (received) 07.04.2016

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Губарев Олександр Павлович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (044) 454-96-14; e-mail: gubarev@ua.fm.

**Губарев Александр Павлович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (044) 454-96-14; e-mail: gubarev@ua.fm.

**Gubarev Alexander Pavlovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv; tel.: (044) 454-96-14; e-mail: gubarev@ua.fm.

**Левченко Олег Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (067) 765-18-99; e-mail: tudasuda@ua.fm.

**Левченко Олег Васильевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (067) 765-18-99; e-mail: tudasuda@ua.fm.

**Levchenko Oleg Vasylovich** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv; tel.: (067) 765-18-99; e-mail: tudasuda@ua.fm.

**Корчовний Андрій Васильович** – магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (067) 187-72-11; e-mail: andru\_sokol@ukr.net.

**Корчовний Андрей Васильевич** – магістрант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (067) 187-72-11; e-mail: andru\_sokol@ukr.net.

**Korchovniy Andriy Vasylovich** – magistrant, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv; tel.: (067) 187-72-11; e-mail: andru\_sokol@ukr.net.