

**О. В. ЛЕВЧЕНКО, О. П. ГУБАРЕВ**

### **ФУНКЦИОНАЛЬНА СТРУКТУРА СИСТЕМИ ГІДРОПРИВОДУ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ**

Розглянуто структуру систем промислового гідроприводу з великою кількістю виконавчих пристроїв з метою визначення енергетичної ефективності системи шляхом моделювання її роботи протягом терміну експлуатації. Запропоновано узагальнену структуру гідравлічної системи з розподілом її на логічну та експлуатаційну складові. Представлено загальну компоновку у вигляді операційних блоків, які відповідають за технологічні операції, та рівнів забезпечення алгоритму роботи системи та її енергозабезпечення. Детально проаналізовано логічний рівень системи з розподілом на рівні складності реалізації алгоритму гідравлічної системи. Встановлено, що логічна взаємодія приводів може призводити до одночасного спрацювання виконавчих пристроїв і як наслідок збільшення рівня енергоспоживання системи в певні проміжки часу її роботи. Додатково встановлено, що в гідравлічних системах з паралельними та альтернативними гілками роботи може відбуватись зміщення часу одночасної роботи декількох виконавчих пристроїв від одного робочого циклу до іншого внаслідок зміни експлуатаційних характеристик одночасно працюючих виконавчих пристроїв. Встановлено необхідність проведення моделювання багатопривідних систем промислового гідроприводу з метою визначення рівня енергетичного споживання. Визначено особливості моделювання систем промислового гідроприводу різних рівнів складності.

**Ключові слова:** гідропривід, енергетична ефективність, експлуатаційний режим, функціональна структура, моделювання, логічний рівень.

**О. В. ЛЕВЧЕНКО, А. П. ГУБАРЕВ**

### **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ГИДРОПРИВОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ**

Рассмотрена структура систем промышленного гидропривода с большим количеством исполнительных устройств с целью определения энергетической эффективности системы путем моделирования ее работы в течение срока эксплуатации. Предложена обобщенная структура гидравлической системы с распределением ее на логическую и эксплуатационную составляющие. Представлена общая компоновка в виде операционных блоков, отвечающих за технологические операции, и уровней обеспечения алгоритма работы системы и ее энергообеспечения. Детально проанализированы логический уровень системы с делением на уровни сложности реализации алгоритма гидравлической системы. Установлено, что логическое взаимодействие приводов может приводить к одновременному срабатыванию исполнительных устройств и как следствие увеличению уровня энергопотребления системы в определенные промежутки времени ее работы. Дополнительно установлено, что в гидравлических системах с параллельными и альтернативными ветвями работы может происходить смещение времени одновременной работы нескольких исполнительных устройств от одного рабочего цикла к другому вследствие изменения эксплуатационных характеристик одновременно работающих исполнительных устройств. Установлена необходимость проведения моделирования многоприводных систем промышленного гидропривода с целью определения уровня энергетического потребления. Определены особенности моделирования систем промышленного гидропривода различных уровней сложности.

**Ключевые слова:** гидропривод, энергетическая эффективность, эксплуатационный режим, функциональная структура, моделирование, логический уровень.

**O. LEVCHENKO, O. GUBAREV**

### **FUNCTIONAL STRUCTURE OF THE HYDRAULIC SYSTEM BY MODELING ITS OPERATING MODES**

The structure of industrial hydraulic systems with a large number of actuators is considered in order to determine the energy efficiency of the system by modeling its operation during its lifetime. The generalized structure of the hydraulic system with its distribution into the logical and operational components is proposed. The general layout in the form of operational units responsible for technological operations, and levels of maintenance of the algorithm of system operation and its power supply are presented. The logical level of the system with distribution on the complexity of implementation of the algorithm of the hydraulic system is analyzed in detail. It is established that the logical interaction of drives can lead to the simultaneous operation of the actuators and as result of increasing the energy consumption of the system at certain intervals of its operation. It is further established that in hydraulic systems with parallel and alternative branches of work there may be a shift in the time of simultaneous operation of several actuators from one working cycle to another due to the change in the performance of simultaneously operating actuators. The necessity of modeling multifunctional systems of industrial hydraulic drive with the purpose of determining the level of energy consumption is established. The features of modeling of systems of the industrial hydraulic drive of various levels of complexity are determined.

**Keywords:** hydraulic system; energy efficiency, operational mode, functional structure, modeling, logical level.

**Вступ.** В загальному випадку ефективність представляє собою відношення корисного ефекту (результату) до витрат на його одержання. Ефективність гідравлічної системи, так само як і ефективність будь-якої іншої системи чи окремого апарату, може визначатись в залежності від обраних критеріїв оцінювання ефективності. Для технічних систем, до яких відноситься і гідравлічна система, прийнято розглядати питання ефективності з точки

зору рівня енергетичного споживання, тобто зводиться до визначення енергетичної ефективності [1–8].

Енергетична ефективність (коефіцієнт корисної дії) системи гідроприводу може бути визначений відношенням корисної роботи, виконаної виконавчими пристроями системи до затраченої енергії, спожитої гідравлічною насосною станцією. Таким чином, при визначенні енергетичної

ефективності, постає питання максимально точного визначення корисної роботи та рівня енергоспоживання гідравлічної системи. Корисна робота системи може бути визначена через експлуатаційні характеристики виконавчих пристроїв з урахуванням особливостей пов'язаних з їх спільною роботою та взаємний вплив для систем з великою кількістю виконавчих пристроїв. Затрачена енергія може бути визначена по експлуатаційним характеристикам насосної станції з аналогічним врахуванням спільної роботи і взаємного впливу для систем з кількістю гідравлічних насосів два і більше.

**Аналіз літературних джерел.** За відомими прикладами визначення енергетичної ефективності може бути зведено до моделювання окремо виконавчої частини гідравлічної системи і моделювання роботи насосної станції з подальшим їх співвідношенням [9–14].

Проте енергетична ефективність системи на даному етапі розвитку техніки не є визначальною з точки зору економіки роботи підприємств, які використовують гідравлічні системи в виробничому процесі. Тобто при визначенні енергетичної ефективності не враховується велика кількість таких факторів і показників системи, як наприклад, економічні, технологічні, технічні тощо, які в значній мірі впливають на ефективність гідравлічної системи в цілому [15–20].

Таким чином, пропонується і є актуальним визначення експлуатаційної ефективності гідравлічної системи, яка б враховувала як енергетичну, так і економічну ефективність, тобто не лише витрату енергоносіїв, а й вартість обладнання, вартість експлуатації, розподіл часу за режимами, обслуговування, ремонтів та інших експлуатаційних факторів роботи гідравлічної системи.

**Основна частина.** Для моделювання виконавчої частини попередньо необхідно представити загальну структуру гідравлічної системи. Гідравлічна система має фіксовану кількість експлуатаційних операцій, які виконуються в заданій послідовності у відповідності до робочого циклу та які мають відповідні експлуатаційні характеристики. Експлуатаційні операції виконуються операційними блоками, які представляють собою комплект гідравлічного обладнання, призначений для виконання конкретної технологічної чи експлуатаційної операції.

Таким чином, за реалізацію заданої послідовності виконання експлуатаційних операцій, тобто реалізацію фіксованої послідовності спрацювань операційних блоків, відповідає логічна складова системи, а за дотриманням експлуатаційних характеристик кожної з операцій відповідає експлуатаційна складова (рис. 1).

Дотримання експлуатаційних характеристик кожної операції гідравлічної системи реалізується кожним операційним блоком, а апарати логічної складової реалізують послідовність спрацювання операційних блоків. Узагальнена структура гідравлічної системи може бути представлена на рис. 2.

Операційні блоки виконують конкретну технологічну або експлуатаційну операцію і мають різномірний склад. Структура кожного операційного блоку може бути представлена в вигляді рівнів апаратів в залежності від їх призначення (рис. 3).

Таким чином, всі апарати гідравлічної системи розподіляються на п'ять рівнів в залежності від їх призначення, причому апарати 3-х рівнів (виконавчого, керуючого та інформаційного) входять до складу кожного з операційних блоків. Апарати логічного рівня є спільними для всіх операційних блоків, а апарати енергетичного рівня можуть бути як спільними для всіх операційних блоків, так і бути окремими для кожної операції в залежності від рівнів тисків і витрат цієї операції та варіанту реалізації системи підготовки робочої рідини (рис. 3).



Рис. 1. Складові гідравлічної системи



Рис. 2. Взаємодія логічної і експлуатаційної складової системи

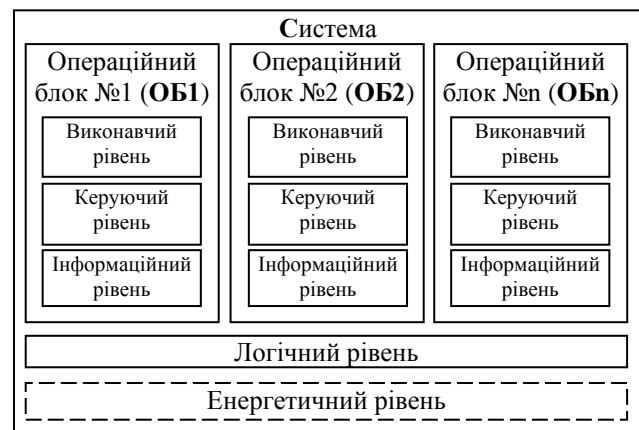


Рис. 3. Структура системи і операційних блоків

Вочевидь, експлуатаційна та логічна складові є залежними між собою та безпосередньо впливають одна на одну. Цей вплив і зв'язок обох складових реалізується двома видами потоків: інформаційним і енергетичним (рис. 4).

До сигналів інформаційного потоку, в загальному випадку, відносимо всі сигнали, які не використовуються для безпосереднього виконання експлуатаційної чи технологічної операції. До цих сигналів відносяться наступні типи сигналів:

1. Сигнали стану:

а) сигнали стану виконавчого пристрою;

б) сигнали стану експлуатаційних параметрів робочої рідини;

в) сигнали пульта керування (операторної панелі).

2. Сигнали логічні:

а) для апаратів керуючого рівня;

б) для апаратів енергетичного рівня;

в) для пульта керування.

Сигнали стану виконавчого пристрою в гідравлічній системі – це сигнали (гідравлічні або електричні), які генерують пристрої інформаційного рівня, а саме датчики контролю стану виконавчого пристрою. Для гідравлічних виконавчих пристроїв може бути застосовано три типи контролю і відповідно три типи датчиків стану:

1. Контроль по положенню робочого органу (застосовується, як правило, для виконавчих

пристроїв лінійного руху) – датчик положення, потенціометр, енкодер.

2. Контроль по тиску в робочій камері (як варіант непрямого контролю по зусиллю або крутному моменту) – датчик тиску, реле тиску (для реалізації контролю по зусиллю – тензодатчик, електронний динамометр).

3. Контроль по часу (як варіант непрямого контролю по лінійній або кутовій швидкості) – реле витримки часу. В гідросистемах також може бути використане реле або датчик витрати.

До сигналів стану експлуатаційних параметрів робочої рідини відносяться сигнали апаратів інформаційного рівня, які виконують контроль основних параметрів роботи гідросистеми, таких як:

1. тиск – датчик і реле тиску;

2. витрата – датчик і реле витрати;

3. рівень робочої рідини – датчик і реле рівня;

4. температура – датчик і реле температури.

Всі апарати контролю експлуатаційних параметрів робочої рідини ділимо на дві категорії:

1. Індикатори – пристрої призначені для контролю і відображення вимірюваної величини. Ці пристрої не впливають як на сам параметр, так і на роботу системи в цілому. До цієї категорії відносяться індикатори тиску (манометри, вакуумметри, мановакуумметри), індикатори витрати (витратоміри), індикатори рівня (вказівні колонки, оглядові вікна), індикатори температури (термометри).

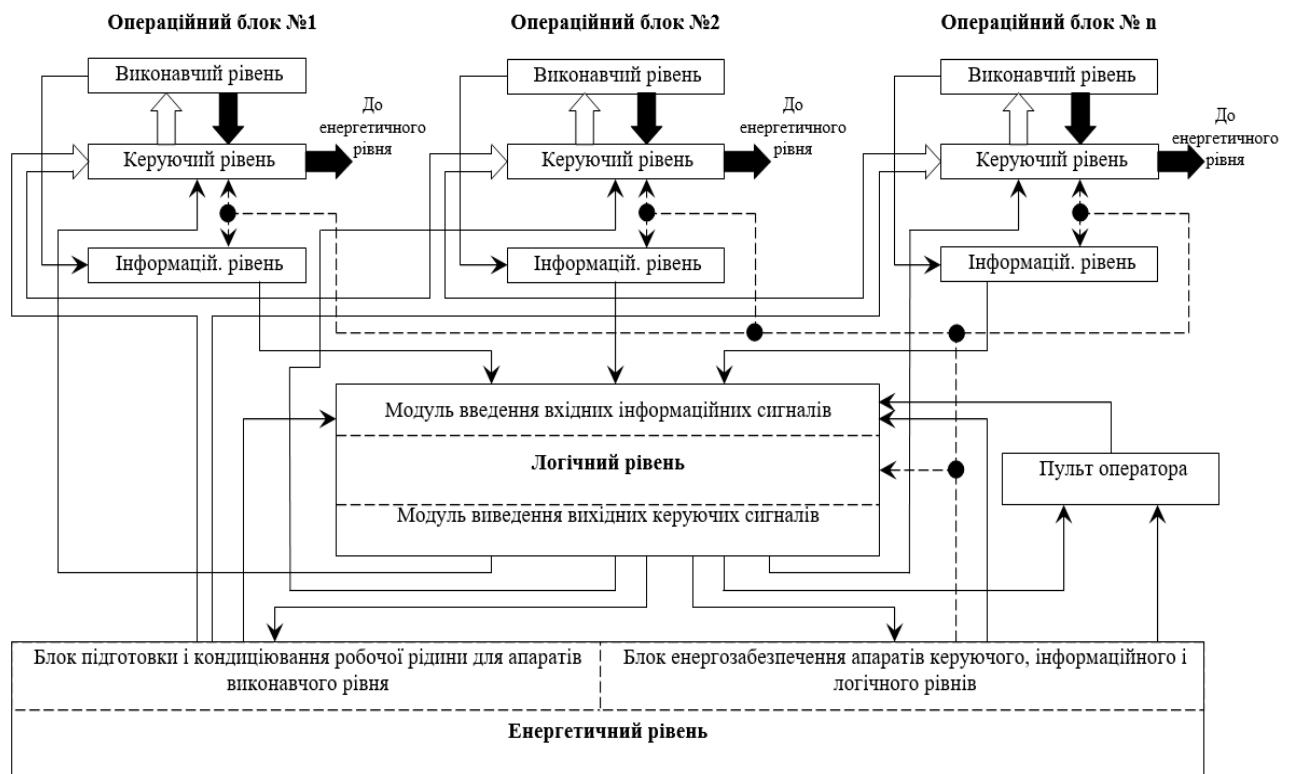


Рис. 4. Енергетична і інформаційна взаємодія апаратів різних рівнів:  
 ⇨, ⇨, ⇨ – енергетичний потік; ⇨ – інформаційний потік

2. Реле – пристрої призначені для контролю вимірюваної величини. Як правило, ці апарати не відображають значення вимірюваної величини, але можуть впливати і змінювати як її, так і роботу системи в цілому. До цієї категорії відносяться такі пристрої, як реле тиску, реле витрати, реле рівня і реле температури.

Дуже часто, сучасні пристрої контролю експлуатаційних параметрів робочої рідини можуть поєднувати в одному апараті функції як індикатора, так і реле. До цього типу відносять такі апарати, як наприклад, електроконтактні манометри, електронні реле тиску з індикацією, електронні манометри, які можуть мати ще більше функцій, таких як, датчик тиску, декілька реле тиску та манометр в одному апараті.

До сигналів пульта керування (операторської панелі) відносяться сигнали інформаційного рівня, які генеруються пультом керування в залежності від дій оператора. Ці сигнали, як правило, електричні (хоча можуть бути і гідравлічні) і передаються від кнопок пульта або текстових чи графічних операторських панелей до апаратів логічного рівня.

Логічні сигнали апаратів керуючого рівня генеруються пристроями логічного рівня і передаються на керуючі пристрої кожного операційного блоку (гідравлічні клапани) і можуть бути як гідравлічні, так і електричні, в залежності від способу реалізації логічного рівня.

Логічні сигнали апаратів енергетичного рівня призначені для керування експлуатаційними характеристиками насосного апарату та підтримання заданих значень робочої рідини (тиск, витрата, температура, рівень).

До логічних сигналів пульта керування відносяться всі сигнали стану виконавчих пристроїв та сигнали експлуатаційних параметрів робочої рідини та гідросистеми, які необхідні оператору для правильного та безпечного вибору режиму роботи та експлуатації гідравлічної системи.

До енергетичних сигналів відносяться сигнали, призначені для енергозабезпечення і виконання безпосередньо експлуатаційної чи технологічної операції і характеризуються, як правило, значно більшою потужністю в порівнянні з сигналами інформаційного потоку. До цих сигналів відносяться наступні типи сигналів:

а) апаратів керуючого (виконавчого) рівня;

б) апаратів керуючого, інформаційного рівня, логічного рівня та пульта оператора.

До сигналів енергозабезпечення апаратів керуючого (виконавчого) рівня відноситься направлений потік робочої рідини з надлишковим тиском, створюваний основним гідравлічним насосом (насосами) і призначений для безпосереднього виконання виконавчим пристроєм експлуатаційної чи технологічної операції.

Сигнали енергозабезпечення апаратів керуючого, інформаційного, логічного рівня та пульта керування можуть бути як гідравлічні, так і електричні і призначені для забезпечення працездатності апаратів

цих рівнів. Гідравлічні сигнали цього рівня можуть генеруватись як окремими джерелами живлення, так і використовувати частину основного потоку локально по місцю розташування відповідного апарату. Електричні сигнали формуються підсистемою електрозабезпечення енергетичного рівня (блоки живлення, випрямлячі, трансформатори тощо).

*Керуючий рівень.* Логічний рівень гідравлічної системи на даному етапі розвитку виробництва може бути реалізованим 4-ма основними варіантами:

Механічна реалізація – за допомогою спеціальних важелів, направляючих, барабанів з прорізами або виступами. На сьогоднішній день при автоматизації виробництва фактично не використовується.

Гідравлічна реалізація – за допомогою гідравлічних клапанів та гідравлічних логічних елементів («І», «АБО», «НІ») шляхом певної послідовності їх взаємного підключення. Ще має достатньо активне застосування в гідроприводах мобільних машин.

Електрична реалізація – у вигляді електро-релейних схем, виконаних шляхом паралельного та послідовного підключення груп контактів електромагнітних реле, кнопок, кінцевих вимикачів тощо.

Електронна реалізація – за допомогою програмованих логічних контролерів (ПЛК) шляхом написання керуючої програми роботи системи.

Причиною вибору того чи іншого варіанту реалізації логічного рівня системи може бути велика кількість різних факторів, таких як складність алгоритму функціонування системи, кількість виконавчих пристроїв, пожежо- та вибухонебезпечність приміщень та виробництва, необхідність частішої зміни чи корегування алгоритму роботи системи тощо.

Зазвичай для систем з нескладними алгоритмами роботи системи, невеликою кількістю виконавчих пристроїв (до 5), які працюють в умовах пожежо- та вибухонебезпеки та не потребують частішої зміни логіки роботи системи застосовується гідравлічна реалізація логічного рівня системи.

Для систем з більш складними алгоритмами роботи системи, більшою кількістю виконавчих пристроїв (до 10), але які не працюють в умовах підвищеної пожежо- та вибухонебезпеки може бути застосований електричний варіант реалізації логічного рівня гідравлічної системи.

Системи з складними алгоритмами, великою кількістю виконавчих пристроїв (більше 10) та необхідністю частішої переналадки або зміни алгоритму системи використовують електронну реалізацію логічного рівня системи.

Дуже важливу роль на вибір варіанту реалізації системи впливає саме складність гідравлічної системи, клас якої не залежить від кількості виконавчих пристроїв, а залежить від порядку їх спрацювання та типу (наприклад, однорежимні чи багаторежимні). По критерію складності виділяємо шість основних типів складності системи:

1. Системи 1-го класу складності – це системи, в яких в кожному такті виконується лише одна експлуатаційна чи технологічна операція і в циклі застосовуються лише однорежимні операції.

Однорежимними називаються операції, які впродовж одиничного циклу спрацьовують один раз (під одним спрацюванням виконавчого пристрою мається на увазі виконання однієї прямої та зворотної дії).

Приклад робочого циклу системи 1-го класу складності може мати наступний вигляд:

$$1-2-\bar{1}-3-4-5-\bar{4}-\bar{3}-6-\bar{2}-7-8-\bar{7}-9-\bar{10}-\bar{10},$$

де  $1, 2, 3$  – прямі дії (виконання корисної роботи) операцій 1, 2 та 3;

$\bar{1}, \bar{2}, \bar{3}$  – зворотні дії (повернення у вихідне положення) операцій 1, 2 та 3.

Під практичним прикладом системи 1-го класу складності розглянемо роботу гідрофікованого свердильного верстату, який працює в автоматичному режимі та має п'ять експлуатаційних операцій (рис. 5).

Робочий цикл верстату має наступний вигляд:

$$1-2-\bar{1}-3-4-\bar{4}-\bar{3}-2-5-\bar{5},$$

де  $1$  – пряма дія 1-ї операції (завантаження заготовки в свердильний верстат – висування гідроциліндра 1-го операційного блоку);

$\bar{1}$  – зворотна дія 1-ї операції (повернення приводу завантаження у вихідне положення – втягування гідроциліндра 1-го операційного блоку);

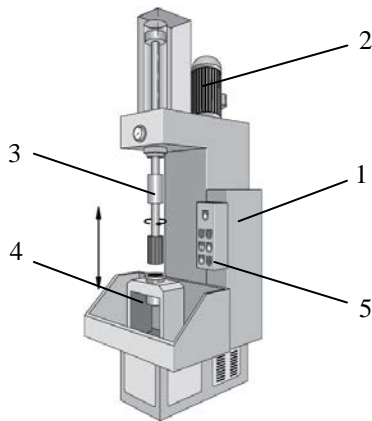


Рис. 5. Гідрофікований свердильний верстат:

1 – станина; 2 – привідний електродвигун; 3 – шпиндель;  
4 – стіл; 5 – пульт керування

$2$  – пряма дія 2-ї операції (затискання заготовки в верстаті – висування гідроциліндра 2-го операційного блоку);

$\bar{2}$  – зворотна дія 2-ї операції (розтискання заготовки в верстаті – втягування гідроциліндра 2-го операційного блоку);

$3$  – пряма дія 3-ї операції (включення шпинделя верстату – запуск гідромотора 3-го операційного блоку);

$\bar{3}$  – зворотна дія 3-ї операції (виключення шпинделя верстату – зупинка гідромотора 3-го операційного блоку);

$4$  – пряма дія 4-ї операції (опускання шпинделя – висування гідроциліндра 4-го операційного блоку);

$\bar{4}$  – зворотна дія 4-ї операції (піднімання шпинделя – втягування гідроциліндра 4-го операційного блоку);

$5$  – пряма дія 5-ї операції (відвантаження готової деталі – висування гідроциліндра 5-го операційного блоку);

$\bar{5}$  – зворотна дія 5-ї операції (повернення приводу відвантаження у вихідне положення – втягування гідроциліндра 5-го операційного блоку).

Робота верстату організована таким чином, що після появи сигналу на запуск робочого циклу починає висуватись гідроциліндр 1-го операційного блоку, тобто відбувається завантаження заготовки в верстат. По закінченню цієї операції відбувається висування гідроциліндра 2-го операційного блоку і виконання затискання заготовки в верстаті. Після того як заготовка буде затиснена, гідроциліндр 1-го операційного блоку повертається у вихідне положення (втягнеться). Далі відбувається запуск шпинделя (включення гідромотора 3-го операційного блоку), після чого гідроциліндром 4-го операційного блоку відбувається опускання шпинделя (операція свердління заготовки). Після закінчення свердління шпиндель повертається у вихідне верхнє положення і за тим зупинка шпинделя шляхом виключення гідромотора. Далі відбувається розтискання деталі в станку і за допомогою гідроциліндра 5-го операційного блоку відвантаження деталі до бункера готової продукції.

2. Системи 2-го класу складності – це системи, в яких в кожному такті виконується лише одна експлуатаційна чи технологічна операція, але в циклі можуть бути застосовані як мінімум одна або більше багаторежимних операцій. Багаторежимними називаються операції, які впродовж одиничного циклу можуть спрацьовувати як мінімум два або більше разів.

В представленому прикладі 2-га операція є багаторежимною (впродовж одиничного циклу роботи системи спрацьовує три рази):

$$1-2-\bar{1}-3-4-\bar{2}-5-\bar{4}-2-\bar{3}-6-\bar{2}-7-8-\bar{2}-\bar{7}-9-\bar{9}-2-\bar{10}-\bar{10}.$$

3. Системи 3-го класу складності – це системи, в яких в робочому циклі є як мінімум один або більше тактів, в яких виконується як мінімум дві або більше експлуатаційних чи технологічних операцій одночасно. В робочому циклі систем 3-го класу складності також можуть бути застосовані можуть бути також застосовані багаторежимні операції.

$$1,2-\bar{1}-3,4,2-5-\bar{5}-4,2,3,6-\bar{6}-2-7-8-\bar{8}-2,7,9-\bar{9}-2,10-\bar{10}.$$

Як видно з прикладу системи 3-го класу складності в тактах 1, 3, 6, 12, 14 відбувається одночасне спрацювання двох і більше виконавчих



7. Kozlov L., Bogachuk V., Bilichenko V., Tovkach A. Determining of the optimal parameters for a mechatronic hydraulic drive. *Proceedings SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*. 2018. doi: 10.1117/12.2501528
8. Polishchuk L., Kozlov L., Piontkevych O. Study of the dynamic stability of the conveyor belt adaptive drive. *Proceedings SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*. 2018. doi: 10.1117/12.2501535
9. Губарев А. П., Козинец Д. А., Левченко О. В. MAS-1.0 – Упрощенное моделирование многоприводных гидропневматических систем циклического действия. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2005. № 4 (10). С. 72–77.
10. Губарев А. П., Козинец Д. А., Левченко О. В. Проверка логики функционирования цикловых систем гидравлических и пневматических приводов. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2004. № 3. С. 64–69.
11. Parr A. *Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide*. Butterworth-Heinemann Ltd, 2011. 248 p.
12. Hooper J. *Basic Pneumatics: An Introduction to Industrial Compressed Air Systems and Components*. 2015. 110 p.
13. Brian E. *Compressed Air Operations Manual*. McGraw-Hill Education, 2006. 407 p.
14. Krivts I., Krejnin V. *Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment: Structure and Design*. 2006. 368 p.
15. Wu P., Lai Z., Wu D., Wang L. Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2014. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493
16. Miller R., Liberi T., Scioscia J. Analyzing Pump Energy through Hydraulic Modeling. *Pipelines*. 2015. P. 869–877.
17. Peña O., Leamy M. An efficient architecture for energy recovery in hydraulic elevators. *International Journal of Fluid Power*. 2015. Vol. 16, no. 2. P. 83–98.
18. Subramanya K. *Fluid Mechanics and Hydraulic Machines: Problems and Solutions*. 2010. 617 p.
19. Bin Zhang, Jien Ma. Analysis of the flow dynamics characteristics of an axial piston pumpbased on the computational fluid dynamics method. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 11, no. 1. P. 86–95.
20. Festo.com / Festo Didactic SE Rechbergstr.3, DE-73770 Denkendorf. URL: <http://www.festo-didactic.com/int-en/> (дата звернення: 01.04.2016).
4. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Synthesis of control schemes for hydroficated automation objects*. GmbH & Co, 2018. 214 p.
5. Guana L., Chen G. *Pumping Systems: Design and Energy Efficiency*. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*. 2015.
6. Karvonena M., Heikkilä M., Huovaa M., Linjamaa M. Analysis by Simulation of Different Control Algorithms of A Digital Hydraulic Two-Actuator System. *International Journal of Fluid Power*. 2014, vol. 15, no. 1, pp. 33–44.
7. Kozlov L., Bogachuk V., Bilichenko V., Tovkach A. Determining of the optimal parameters for a mechatronic hydraulic drive. *Proceedings SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*. 2018. doi: 10.1117/12.2501528
8. Polishchuk L., Kozlov L., Piontkevych O. Study of the dynamic stability of the conveyor belt adaptive drive. *Proceedings SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*. 2018. doi: 10.1117/12.2501535
9. Gubarev A. P., Kozinets D. A., Levchenko O. V. MAS-1.0 – Упрощенное моделирование многоприводных гидропневматических систем tsiklicheskogo deystviya [MAS-1.0 – Simplified Modeling of Multi-Drive Hydropneumatic Cyclic Action Systems]. *Promyslova hidravlika i pnevmatika*. 2005, no. 4 (10), pp. 72–77.
10. Gubarev A. P., Kozinets D. A., Levchenko O. V. Proverka logiki funktsionirovaniya tsiklovykh sistem gidravlicheskikh i pnevmaticheskikh privodov [Check the logic of the functioning of cyclic systems of hydraulic and pneumatic drives]. *Promyslova hidravlika i pnevmatika*. 2004, no. 3, pp. 64–69.
11. Parr A. *Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide*. Butterworth-Heinemann Ltd, 2011. 248 p.
12. Hooper J. *Basic Pneumatics: An Introduction to Industrial Compressed Air Systems and Components*. 2015. 110 p.
13. Brian E. *Compressed Air Operations Manual*. McGraw-Hill Education Publ., 2006. 407 p.
14. Krivts I., Krejnin V. *Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment: Structure and Design*. 2006. 368 p.
15. Wu P., Lai Z., Wu D., Wang L. Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2014. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493
16. Miller R., Liberi T., Scioscia J. Analyzing Pump Energy through Hydraulic Modeling. *Pipelines*. 2015, pp. 869–877.
17. Peña O., Leamy M. An efficient architecture for energy recovery in hydraulic elevators. *International Journal of Fluid Power*. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 83–98.
18. Subramanya K. *Fluid Mechanics and Hydraulic Machines: Problems and Solutions*. 2010. 617 p.
19. Bin Zhang, Jien Ma. Analysis of the flow dynamics characteristics of an axial piston pumpbased on the computational fluid dynamics method. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2017, vol. 11, no. 1, pp. 86–95.
20. Festo.com [Festo Didactic SE Rechbergstr.3, DE-73770 Denkendorf]. Available at: <http://www.festo-didactic.com/int-en/> (accessed 01.04.2016).

#### References (transliterated)

1. Cherkashenko M. V., ed. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 46 (1322), 83 p.
2. Cherkashenko M. Synthesis of discrete drives control systems hydraulic machines and hydrounits. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 46 (1322), pp. 4–9.
3. Cherkashenko M., Krutikov G. Influence of time delay in the control system on positioning process of pneumounit working body. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010, no. 1, pp. 11–15.
4. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Synthesis of control schemes for hydroficated automation objects*. GmbH & Co, 2018. 214 p.
5. Guana L., Chen G. *Pumping Systems: Design and Energy Efficiency*. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*. 2015.
6. Karvonena M., Heikkilä M., Huovaa M., Linjamaa M. Analysis by Simulation of Different Control Algorithms of A Digital Hydraulic Two-Actuator System. *International Journal of Fluid Power*. 2014, vol. 15, no. 1, pp. 33–44.
7. Kozlov L., Bogachuk V., Bilichenko V., Tovkach A. Determining of the optimal parameters for a mechatronic hydraulic drive. *Proceedings SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*. 2018. doi: 10.1117/12.2501528
8. Polishchuk L., Kozlov L., Piontkevych O. Study of the dynamic stability of the conveyor belt adaptive drive. *Proceedings SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*. 2018. doi: 10.1117/12.2501535
9. Gubarev A. P., Kozinets D. A., Levchenko O. V. MAS-1.0 – Упрощенное моделирование многоприводных гидропневматических систем tsiklicheskogo deystviya [MAS-1.0 – Simplified Modeling of Multi-Drive Hydropneumatic Cyclic Action Systems]. *Promyslova hidravlika i pnevmatika*. 2005, no. 4 (10), pp. 72–77.
10. Gubarev A. P., Kozinets D. A., Levchenko O. V. Proverka logiki funktsionirovaniya tsiklovykh sistem gidravlicheskikh i pnevmaticheskikh privodov [Check the logic of the functioning of cyclic systems of hydraulic and pneumatic drives]. *Promyslova hidravlika i pnevmatika*. 2004, no. 3, pp. 64–69.
11. Parr A. *Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide*. Butterworth-Heinemann Ltd, 2011. 248 p.
12. Hooper J. *Basic Pneumatics: An Introduction to Industrial Compressed Air Systems and Components*. 2015. 110 p.
13. Brian E. *Compressed Air Operations Manual*. McGraw-Hill Education Publ., 2006. 407 p.
14. Krivts I., Krejnin V. *Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment: Structure and Design*. 2006. 368 p.
15. Wu P., Lai Z., Wu D., Wang L. Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2014. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493
16. Miller R., Liberi T., Scioscia J. Analyzing Pump Energy through Hydraulic Modeling. *Pipelines*. 2015, pp. 869–877.
17. Peña O., Leamy M. An efficient architecture for energy recovery in hydraulic elevators. *International Journal of Fluid Power*. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 83–98.
18. Subramanya K. *Fluid Mechanics and Hydraulic Machines: Problems and Solutions*. 2010. 617 p.
19. Bin Zhang, Jien Ma. Analysis of the flow dynamics characteristics of an axial piston pumpbased on the computational fluid dynamics method. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2017, vol. 11, no. 1, pp. 86–95.
20. Festo.com [Festo Didactic SE Rechbergstr.3, DE-73770 Denkendorf]. Available at: <http://www.festo-didactic.com/int-en/> (accessed 01.04.2016).

Надійшла (received) 25.05.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Левченко Олег Васильович (Левченко Олег Васильевич, Levchenko Oleg Vasylovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», доцент кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-9009>; e-mail: [tudasuda@ua.fm](mailto:tudasuda@ua.fm)

**Губарев Олександр Павлович (Губарев Александр Павлович, Gubarev Oleksandr Pavlovich)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», професор кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0924-4103>; e-mail: [gubarev@i.ua](mailto:gubarev@i.ua)