

**О. В. ЛЕВЧЕНКО, О. П. ГУБАРЕВ**

### **ПРИКЛАДНА ПРОГРАМА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПРОМИСЛОВОГО ГІДРОПРИВОДУ**

Розроблено програмне забезпечення для визначення рівня енергетичної ефективності систем промислового гідроприводу з різними варіантами організації процесу роботи системи шляхом спрощеного моделювання. Запропоновано узагальнену структуру систем промислового гідроприводу з великою кількістю виконавчих пристроїв з метою визначення енергетичної ефективності системи шляхом моделювання роботи протягом одиничного робочого циклу або впродовж певного терміну експлуатації. Структура розподілена на функціональну та логічну складову. Виконано програмну реалізацію логічного рівня керування системою з відтворення алгоритму функціонування гідравлічної системи. Реалізована можливість введення функціональних характеристик виконавчих пристроїв декількома способами: спрощене представлення шляхом введення потужності та тривалості прямої та зворотної дії пристрою; вибір стандартних виконавчих пристроїв за каталогами виробників з характеристиками привода за замовчуванням; розширений опис основних конструктивних та експлуатаційних характеристик виконавчого пристрою гідравлічної системи. Запропоновано введення логічної складової систем у вигляді структурованих текстових послідовностей на основі запропонованої системи кодування. Передбачено отримання в якості результатів моделювання роботи гідравлічної системи візуалізації поточної роботи виконавчих пристроїв системи, циклограми спрацювання виконавчих пристроїв, діаграми зміни робочого тиску та витрати робочої рідини за одиничний цикл роботи системи, діаграми корисної потужності та інтегральних оцінок рівня енергоспоживання системи.

**Ключові слова:** гідропривід, енергетична ефективність, моделювання, програмне забезпечення, виконавчий пристрій, енергоспоживання.

**О. В. ЛЕВЧЕНКО, А. П. ГУБАРЕВ**

### **ПРИКЛАДНАЯ ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ГИДРОПРИВОДА**

Разработано программное обеспечение для определения уровня энергетической эффективности систем промышленного гидропривода с различными вариантами организации процесса работы системы путем упрощенного моделирования. Предложена обобщенная структура систем промышленного гидропривода с большим количеством исполнительных устройств с целью определения энергетической эффективности системы путем моделирования работы в течение единичного рабочего цикла или в течение определенного срока эксплуатации. Структура разделена на функциональную и логическую составляющие. Выполнено программную реализацию логического уровня управления системой по воссозданию алгоритма функционирования гидравлической системы. Реализована возможность введения функциональных характеристик исполнительных устройств несколькими способами: упрощенное представление путем введения мощности и продолжительности прямого и обратного действия устройства; выбор стандартных исполнительных устройств по каталогам производителей с характеристиками привода по умолчанию; расширенное описание основных конструктивных и эксплуатационных характеристик исполнительного устройства гидравлической системы. Предложено введение логической составляющей систем в виде структурированных текстовых последовательностей на основе предложенной системы кодирования. Предусмотрено получение в качестве результатов моделирования работы гидравлической системы визуализации текущей работы исполнительных устройств системы, циклограммы срабатывания исполнительных устройств, диаграммы изменения рабочего давления и расхода рабочей жидкости за единичный рабочий цикл работы системы, диаграммы полезной мощности и интегральных оценок уровня энергопотребления системы.

**Ключевые слова:** гидропривод, энергетическая эффективность, моделирование, программное обеспечение, исполнительное устройство, энергопотребление.

**O. LEVCHENKO, O. GUBAREV**

### **APPLIED PROGRAM FOR MODELING THE ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL HYDRAULIC DRIVE SYSTEM**

The software for modeling of energy efficiency level of industrial hydraulic drive systems with different levels of complexity of system logic is developed. A generalized structure of industrial hydraulic drive systems with a large number of actuators is proposed. This was done to determine the energy efficiency of the system by modeling its operation during a single operation cycle and throughout its lifetime. For this purpose, the system was divided into functional and logical parts. The program implementation of the logical level of the system with the division into the levels of complexity of the implementation of the hydraulic system algorithm is performed. It is possible to introduce the functional characteristics of each actuator in different ways: simplified representation by introducing the power and duration of the forward and reverse actions of technological operations; choice of standard executive devices of world manufacturers with characteristics of actuators by default; complete introduction of the basic constructive and operational characteristics of each actuator of the hydraulic system. It is proposed to introduce a logical component of the system of all levels of complexity in the form of text sequences based on the developed coding system. It is intended to obtain as a result of the simulation of the hydraulic system dynamic visualization of the actuators of the system, cyclogram of the actuators, the diagram of the change of the working pressure and the flow rate of the working fluid for a single cycle of the system operation, the diagram of the useful power and integral estimates of the level of energy consumption of the system.

**Keywords:** hydraulic system, energy efficiency, modeling, software, actuator, energy consumption.

**Вступ.** З огляду на поширене використання в системах промислового гідроприводу мікропроцесорного керування, що дозволяє значно покращити точність та якість регулювання виконавчих пристроїв, а також певною мірою

зменшити рівень енергоспоживання, все одно енергоефективність таких систем є не надто високою. Навіть для найефективніших систем гідроприводу цей рівень ледь сягає 50 % [1–8]. Звичайно, в першу чергу це пов'язано з великою кількістю трансформацій

енергії, які відбуваються на шляху від джерела електричної енергії (або ж двигуна внутрішнього згоряння для мобільної техніки) до споживача, тобто виконавчого пристрою [9–15]. Але водночас дуже суттєвий вплив на показник енергоефективності гідросистеми має застосована схемна реалізація гідросистеми. Неузгоджене з режимами роботи схемне рішення може призводити до зменшення рівня енергоефективності нижче 10%. Велике розмаїття гідравлічного обладнання та способів керування ставить перед проектувальником достатньо складне завдання – знаходження збалансованого рішення між вартістю на створення нової системи та рівнем енергоспоживання в процесі її подальшої експлуатації.

Цей факт викликає необхідність, на стадії початку розробки проекту, використання спеціалізованого інструментарію, за допомогою якого можна було би отримати та оцінити основні енергетичні характеристики гідросистеми. Таким чином, підґрунтям для проведення моделювання та розробки власного програмного забезпечення є, в першу чергу, задача зрівноваження енергетичних та економічних показників функціонування систем промислового гідроприводу.

Процес моделювання системи для визначення рівня енергетичної ефективності систем промислового гідроприводу є достатньо складним і затратним в часі. Для систем з великою кількістю виконавчих пристроїв (починаючи від 10) та зі складними алгоритмами їх функціонування та взаємодії, фактично є неможливим використання традиційних підходів та методів [16–21]. Використання існуючого спеціалізованого програмного забезпечення, для прискорення та полегшення цього процесу, на жаль, не дозволяє в стислий час з частково невизначеною вхідною інформацією отримати потрібні результати.

В обґрунтування розробки покладено результати розгляду декількох прикладних програм, таких як Automation Studio, FluidSim, Amesim, 20Sim, SimulationX, Simplorer тощо, на предмет можливості визначення рівня енергоефективності систем промислового гідроприводу шляхом моделювання.

Однією з найцікавіших по критерію ціна-якість (орієнтовна вартість ліцензії для однієї робочої станції 600 євро) прикладною програмою для моделювання гідравлічних систем є програма FluidSim Hydraulics версії 5.6 фірми Festo Didactic GmbH.

Перевагами цього програмного забезпечення є можливість візуалізації роботи системи, велика бібліотека приводів, керуючих апаратів та датчиків, наявність спеціалізованої гідравлічної апаратури, такої як пропорційні клапани, блоки керування мобільної гідравліки тощо. В програмі передбачена можливість визначення експлуатаційних характеристик гідроапаратів в часі, таких як зусилля, швидкість, прискорення, тиск, витрата тощо. Приклад головного вікна моделі гідросистеми показаний на рис. 1.

Недоліками цього програмного забезпечення можна вважати те, що непередбачена можливість

визначення корисної та споживаної потужності системи, а, відповідно, стає неможливим визначення рівня енергоспоживання або порівняння ефективності різних схемних рішень.

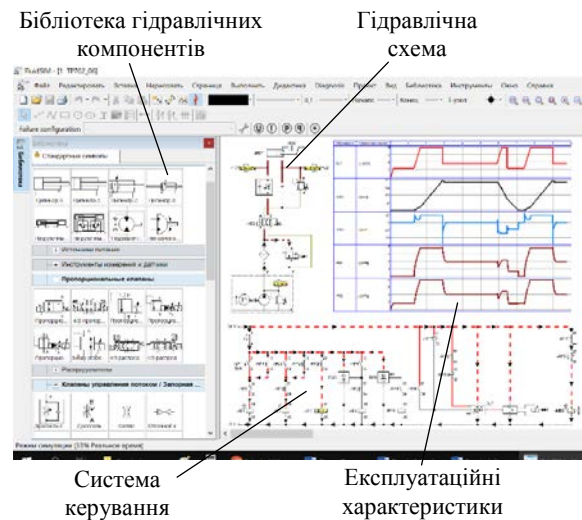


Рис. 1. Програмне забезпечення FluidSim 5.6

Суттєвим недоліком є висока складність побудови схем із значною кількістю виконавчих пристроїв (більше 10), у зв'язку з необхідністю розміщення графічного зображення гідравлічної схеми та системи керування на одному листі проекту. Це в декілька разів збільшує термін підготовчого періоду та викликає численні суто механічні помилки.

Таким чином, дане програмне забезпечення може бути застосоване для моделювання простих гідравлічних систем з невеликою кількістю виконавчих пристроїв. Водночас воно не дозволяє визначати рівень енергоефективності запропонованих схемних рішень.

Найцікавішим, на наш погляд, з точки зору можливостей і водночас найдорожчим програмним забезпеченням (орієнтовна вартість ліцензії для однієї робочої станції з додатковими модулями становить 18000 євро) є прикладна програма Automation Studio v 6.4 від компанії Famic Technologies Inc.

В програмі наявні бібліотеки елементів різного призначення, що відповідають стандартам CETOP, IEC, JIC, NEMA, з яких можна побудувати необхідну схему гідросистеми, рис. 2.

Це програмне забезпечення має найбільшу бібліотеку гідравлічних компонентів, при чому характеристики елементів прив'язані до реальних апаратів основних виробників гідравлічного обладнання. Це дозволяє, в разі позитивного результату моделювання, за специфікаціями проекту програми, виконати замовлення реального гідравлічного обладнання для розроблюваної гідросистеми. Додатковою перевагою цієї програми є наявність достатньої кількості віртуальної вимірювальної апаратури (вольтметрів, амперметрів, манометрів, осцилографів), яка дозволяє отримувати статичні, динамічні, енергетичні та інші характеристики як окремих гідроапаратів, так і всієї гідросистеми в цілому.

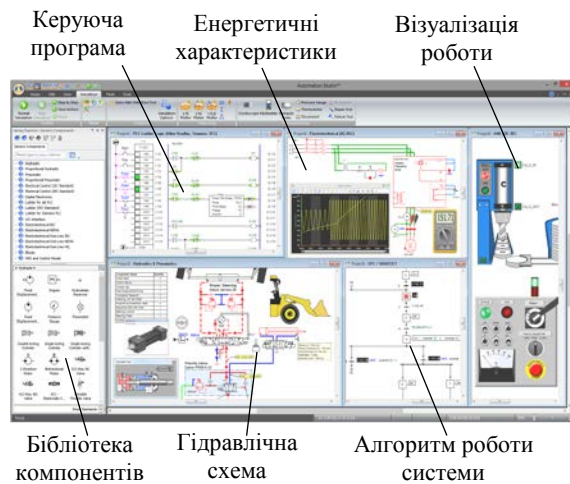


Рис. 2. Вікно програми Automation Studio

З іншого боку, перелічена деталізація в описі системи потребує проведення майже повного проектування на етапі вводу вихідних даних. Це стосується не тільки гідравлічної схеми, а й розробки системи керування (яка теж, до речі, може бути конвертована в робочі проекти для контролерів Siemens та Allen Bradley). Найбільш суттєвим недоліком стосовно поставленої задачі є неможливість порівняння декількох схемних рішень між собою по критерію енергоефективності.

Порівнявши функціональні можливості проаналізованих прикладних програм на можливість їх використання при моделюванні, з метою визначення енергоефективності, було складено перелік основних показників (табл. 1).

**Викладення основного матеріалу.** Завданням роботи є створення методики спрощеного моделювання багатоелементних та багаторежимних систем промислового гідроприводу та створення, на її основі, програмного забезпечення, яке б дозволяло проводити моделювання експлуатаційних процесів гідравлічних систем за схемним рішенням та

порівнювати їх по критерію енергоефективності.

З цією метою було розроблено методику, особливістю якої є розподіл гідравлічної системи на функціональну та логічну складові. Функціональна складова призначена для опису експлуатаційних (технологічних) характеристик кожного виконавчого пристрою, який виконує певну функцію в автоматизованому процесі. Призначення логічної складової полягає в описі алгоритму роботи (впорядкуванні спрацювань) виконавчих пристроїв. В процесі моделювання, у відповідності до логічних умов активізації та виключення із технологічного процесу, відбувається перехід до визначення ефективності дій виконавчих пристроїв при відпрацюванні певних функцій системи. На основі введених даних та експлуатаційних характеристик виконавчих пристроїв, які містяться у вихідних даних опису функціональної частини моделі, за спрощеним алгоритмом відбувається розрахунок енергетичних характеристик корисних дій, виконаних системою за одиничний робочий цикл. До таких характеристик належать діаграма корисної витрати, діаграма змін тиску, діаграма корисної потужності.

В залежності від схемного рішення та налаштувань системи енергозабезпечення відбувається розрахунок характеристик енергоспоживання гідросистеми. Алгоритми розрахунку спираються на відомі методики та залежності, комплект яких під'єднується до розрахунку після вибору варіанту реалізації енергетичного рівня гідросистеми (насосної станції). Таким чином, на основі логічно-функціональної методики, було розроблене спеціалізоване програмне забезпечення, яке отримало робочу назву HESim (Hydraulic Energy efficiency SIMulator). Призначення прикладної програми – вибір раціонального схемного рішення на основі зіставлення енергетичних характеристик мехатронної системи з різними варіантами пристроїв виконавчого і енергетичного рівнів.

Таблиця 1

Перелік основних показників	FluidSim H	Simplorer	Amesim	20Sim	SimulationX	Automation Studio
Необхідність розробки гідравлічної схеми	+	+	-	-	+	+
Необхідність математичного опису системи	-	±	+	+	-	-
Необхідність вибору гідравлічного обладнання	+	+	-	-	+	+
Необхідність розробки системи керування	+	+	+	+	+	+
Можливість отримання діаграм корисної витрати, тиску та потужності	±	-	±	+	±	+
Можливість отримання діаграм спожитої витрати, тиску та потужності	±	-	+	+	+	+
Можливість визначення спожитої енергії за одиничний робочий цикл	-	-	-	-	-	-
Можливість визначення об'єму спожитої енергії за весь термін експлуатації	-	-	-	-	-	-
Можливість порівняння схемних рішень по критерію експлуатаційної ефективності	-	-	-	-	-	-
Час на моделювання системи з 5-ти приводів з електричним керуванням, годин	4	6	25	30	5	4

До базових функцій програмного забезпечення HESim можна віднести:

- моделювання дій систем гідроприводу під час відпрацювання експлуатаційних та технологічних процесів автоматизованих систем;
  - візуалізація процесу відпрацювання системою експлуатаційного циклу;
  - отримання циклових діаграм корисного та спожитого тиску, витрати, потужності;
  - отримання показника енергоспоживання системи гідроприводу за одиничний усталений цикл;
  - спрощений аналіз діаграм (мінімальні, максимальні, середні значення циклових характеристик);
  - тестування логічних послідовностей спрацювання виконавчих пристроїв;
  - визначення енергетичної складової вартості експлуатації системи, визначення часу окупності модернізації існуючої системи;
  - порівняння варіантів системи з незмінною послідовністю виконуваних функцій на основі комплексних критеріїв енергоефективності (ККЕ);
  - доступні мови інтерфейсу англійська/українська.
- Головне вікно програми представлено на рис. 3.

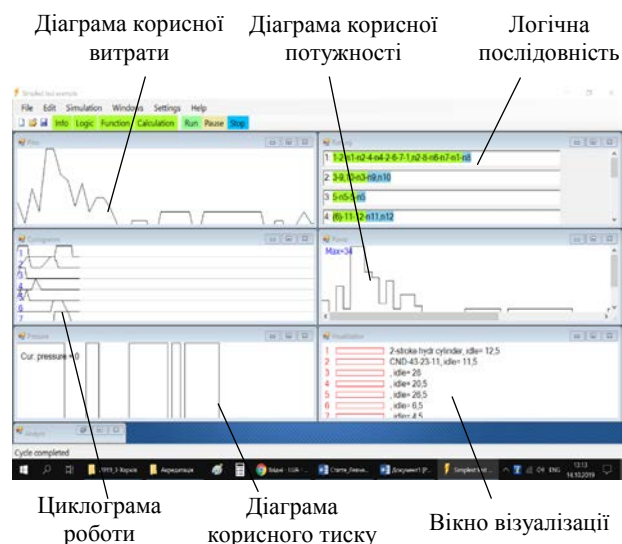


Рис. 3. Головне вікно програми HESim

Основна відмінність запропонованого програмного пакету визначена його практичною спрямованістю – визначення раціонального типу схемного рішення для автоматизації відомого технологічного процесу до розробки схеми системи. По відношенню до перелічених прикладних програм її відрізняють:

- моделювання експлуатаційного циклу при суттєво невизначених технічних засобах;
- мінімальний набір вхідних даних та спрощений спосіб і мінімальний термін їх введення;
- різні варіанти введення вхідних конструктивних і експлуатаційних характеристик дій системи і виконавчих пристроїв;
- можливість вибору характеристик за переліком стандартного обладнання;

- моделювання за допомогою логічної частини з наповненням функціональної частини за замовчуванням.

Програма має внутрішню ієрархічну структуру і відповідну процедуру заповнення вихідних даних. Комплект діалогових вікон є максимально спрощеним, що спрямовано на зосередження користувача на змістовне вирішення задачі. Головне вікно складається з робочої області, панелі керування та панелі меню.

Для моделювання роботи системи користувач повинен розподілити експлуатаційний цикл на впорядковані (послідовні та паралельні) дії та визначити основні параметри їх виконання. Наступним кроком є перехід від локального до системного впорядкування. Користувач формує логічні (логічні умови, що описують логіку взаємодії пристроїв) і функціональні (задають експлуатаційні характеристики операцій та дій виконавчих пристроїв системи) частини системи. Введення здійснюється за допомогою режимів діалогу, керованих кнопками Logic і Function на панелі управління відповідно.

**Крок 1: Введення логічних умов спрацювання пристроїв в експлуатаційному циклі.** Логічна частина може бути введена у текстовому форматі у вигляді послідовності дій або частин операцій, де:

- 1, 2, 3, 4 – прямі дії 1-ї, 2-ї, 3-ї, 4-ї і т. д. операцій;
- n1, n2, n3, n4 – зворотні дії 1-ї, 2-ї, 3-ї, 4-ї і т. д. операцій.

Наприклад:

Послідовність операцій "1 – 2 – n1 – n2" означає, що в першому такті виконується пряма дія першої операції, в другому такті – пряма дія другої операції, в третьому такті – виконавчий пристрій першої операції повертається до початкового стану, в останньому такті – виконавчий пристрій другої операції повертається в початковий стан.

Одночасне виконання дій. Послідовність дій "1 – 2, n1 – n2" означає, що в першому такті виконується пряма дія першої операції, в другому такті – пряма дія другої операції та одночасно зворотня дія першої операції, в останньому такті – виконавчий пристрій другої операції повертається у вихідний стан.

Часткове виконання дій. Послідовність дій "1 – 2 – n1 – 1 – n2 – n1" означає, що основна дія першої операції буде виконуватися в 2 етапи протягом відпрацювання одного робочого циклу системи. Для часткового відпрацювання дії користувач задає ступінь відпрацювання – {57 %} – проміжне положення (відсоток від повного ходу гідроциліндра). Послідовність дій "1 {35 %} – 2 – 1 – n2 – n1" означає, що в першому такті виконується на 35 % пряма дія першої операції, в другому такті – пряма дія другої операції, в третьому кроці – від 35 % до 100 % прямої дії першої операції.

Часова пауза в циклі. У логічних виразах є можливість встановлення часової затримки, тривалості відпрацювання дії операції, виконання технологічних пауз, відстоювання пристрою в проміжних позиціях: <2s> – часовий інтервал у



секундах ( або ms – у мілісекундах).

Міжтактова пауза. Послідовність дій двох операцій "1 – <10s> – 2" означає, що в першому такті виконується пряма дія першої операції, в другому такті відбувається затримка у часі 10 секунд, в третьому такті – відпрацювання прямої дії другої операції.

Термін витримки під час дії. Послідовність дій операцій "1<10s> – 2" означає, що в першому такті виконується пряма дія першої операції протягом 10 секунд, в другому такті відпрацювання прямої дії другої операції.

За результатами відпрацювання користувачем першого етапу введення вихідних даних буде сформовано вікно «Логіка» програми HESim з логічними виразами (рис. 4).

Додавання паралельної гілки процесу. Користувач отримує можливість моделювати відпрацювання системою циклів з паралельними гілками (мультипроцесні системи). Щоб додати паралельну гілку потрібно натиснути "+" праворуч у вікні логічної складової. Після цього необхідно ввести логічний опис доданого паралельного процесу. При необхідності паралель можна видалити натисканням кнопки "-" праворуч від поточної паралелі.

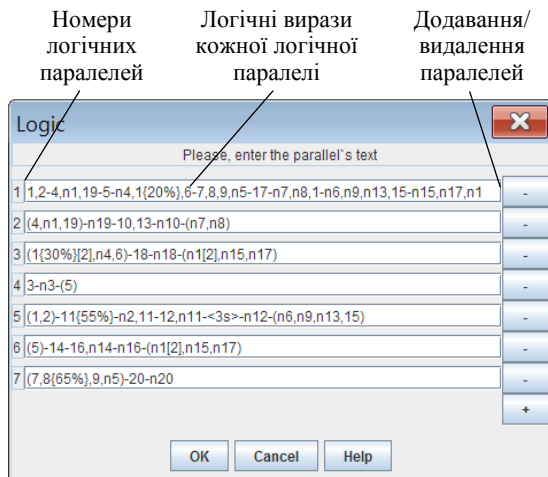


Рис. 4. Вікно «Логічна складова»

Приклад:

Лінія 1: "1 – 2 – n1 – n2"

Лінія 2: "3 – n3".

Логічні послідовності 1 і 2 означають, що в першому такті виконуються прямі дії першої і третьої операцій, другий такт починається залежно від того, яка операція (перша або третя) буде завершена раніше. Обидві паралелі починаються одночасно, але вони працюють і закінчуються незалежно одна від одної та мають власні не синхронні такти.

Лінія 3: "1 – 2 – n1 – n2"

Лінія 4: "(2) – 3 – n3 – (n1)".

Логічні послідовності 3 і 4 означають, що в першому такті виконується пряма дія першої операції, в другому такті – пряма дія другої операції, в третьому такті – перший пристрій повертається до початкового стану і одночасно започатковується відпрацювання паралельної гілки, що позначено (2) – «після 2

попередньої гілки». При цьому відбувається пряма дія третьої операції. Тобто перша операція другої паралелі почнеться після закінчення прямої дії другої операції в першій паралелі. Дія «n1» першої паралелі може початися лише після завершення дії «n3» другої паралелі.

Лінія 1: "1 – 2 – n1 – 1 – n2 – n1"

Лінія 2: "(1[2]) – 3 – n3 – (n1)".

Ці логічні послідовності означають, що пряма дія третьої операції в другій гілці почнеться одночасно з п'ятим тактом першої гілки після завершення другого відпрацювання першої прямої дії першої гілки, чому відповідає позначення (1[2]).

Логіко-функціональний підхід дозволяє ввести в строковому вигляді експлуатаційні цикли систем гідроприводу з послідовними і паралельними діями та з паралельними підпроцесами.

**Крок 2. Введення функціональних параметрів та характеристик пристроїв.** Функціональна складова моделі призначена для опису складових експлуатаційного процесу, на які його було розкладено на першому кроці. Для кожного виконавчого пристрою характеристики розподілено на основні конструктивні (для циліндру: діаметри поршня та штока, хід; для гідродвигуна: робочий об'єм гідромотора), експлуатаційні (зусилля, крутний момент, швидкість, частота обертання) та/або енергетичні (потужність, термін відпрацювання дій та інше).

Початком другого кроку роботи користувача є вхід до діалогового вікна введення функціональних параметрів (рис. 5). Для цього можна скористатися пунктом меню "Редагування" або кнопкою "Функція" на панелі інструментів.

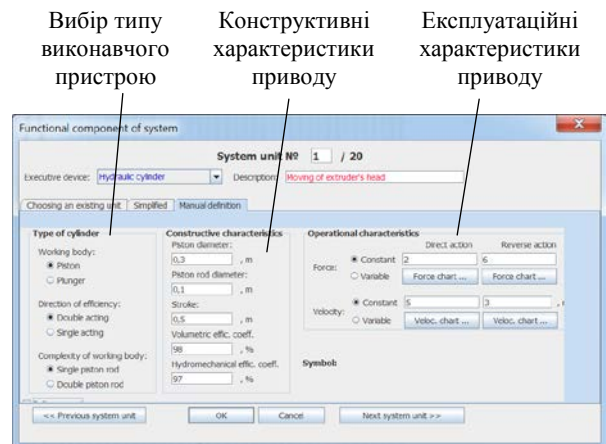


Рис. 5. Конфігурація виконавчого пристрою

Функціональні параметри дій та операцій (для даного варіанту HESim: гідроциліндра, гідромотора і обертального приводу) можна вказати 3-ма способами:

1. Типова конфігурація виконавчого пристрою (тип конструкції, введення основних конструктивних і експлуатаційних характеристик).

2. Спрощена конфігурація виконавчого пристрою (тип конструкції, корисна потужність, тривалість дій).

3. На основі стандартних пристроїв (шляхом

вибору моделі виконавчого пристрою з бібліотеки).

При типовій конфігурації використовується вкладка «Конфігурація виконавчого пристрою» (рис. 5).

При спрощеному конфігуруванні виконавчого пристрою користувач звертається до вкладки «Спрощена конфігурація» (див. рис. 6).

При виборі стандартних виконавчих пристроїв використовується вкладка «Вибрати існуючий привід» (див. рис. 7).

Для навігації по комплекту виконавчих пристроїв користувач звертається до кнопок «Попередня системна одиниця», «Наступна системна одиниця» або здійснює перехід шляхом введення номеру операційного блоку в поле «Системний блок №».

**Моделювання та результати модельного експерименту.** Процес моделювання може бути розпочатий після введення повної інформації логічної та функціональної складових моделі. По натисненню кнопки «Run» моделювання відбувається з одночасним відображенням результатів моделювання у відповідних вікнах програми.

В процесі моделювання, відповідно до логічних умов активації та вимкнення виконавчих пристроїв, з врахуванням поточних налаштувань апаратури, спрацьовує алгоритм розрахунку корисної витрати, тиску та потужності.

При цьому, для кожної дії або операції використовуються вихідні дані, взяті з функціональної складової системи.

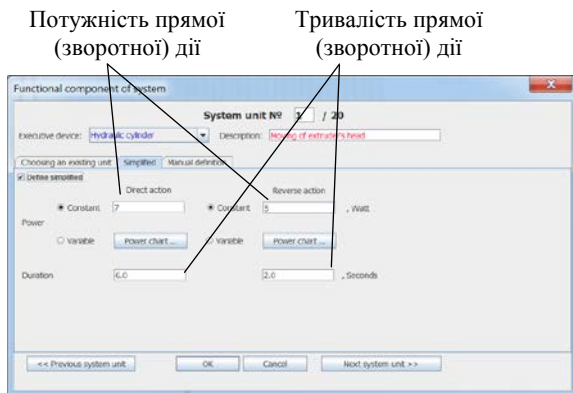


Рис. 6. Спрощена конфігурація виконавчого пристрою

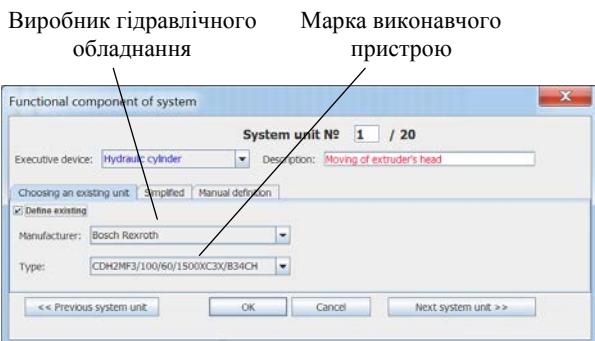


Рис. 7. Вибір стандартного приводу

Наприклад, при прямому ході виконавчого пристрою будуть використані відповідні зусилля та

швидкість з функціональної складової системи. Власне корисна енергія може бути розрахована за формулою:

$$E = \int_{i=0}^t \left( \sum_{j=1}^n F_j \cdot v_j + \sum_{j=1}^n M_j \cdot n_j \right) \cdot dt + \int_{i=0}^z \Delta N(s, t, T) \cdot dt,$$

де  $F$ ,  $v$ ,  $M$ ,  $n$  – експлуатаційні характеристики системи;

$n$  – кількість виконавчих пристроїв;

$t$  – тривалість одиничного циклу системи.

Результати моделювання системи представлені в наступних вікнах:

1. Візуалізація;
2. Виконання текстової послідовності;
3. Циклограма;
4. Діаграма корисного тиску;
5. Діаграма корисної витрати;
6. Діаграма корисної потужності.

Користувач, у вікні «Візуалізація», отримує схематичну візуалізацію поточного стану та роботи виконавчих пристроїв у вигляді прямокутників з відповідним забарвленням спрацювання кожного приводу (рис. 8). Кількість прямокутників відповідає кількості виконавчих пристроїв в системі.

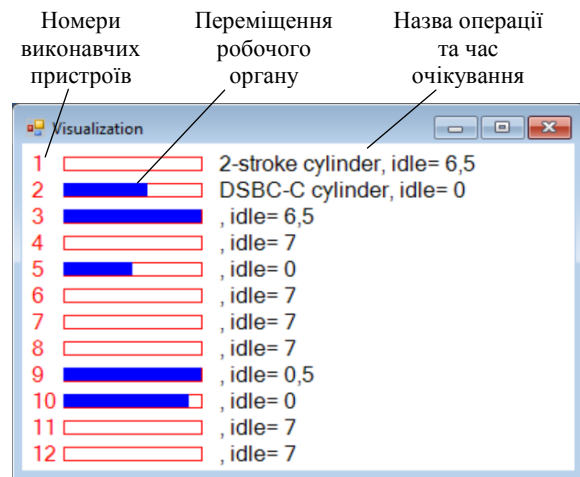


Рис. 8. Вікно «Візуалізація»

Одночасно, у вікні «Виконання послідовності», висвітлено індикацію відпрацювання гілок експлуатаційного процесу. Індикація відбувається з використанням раніш заданого впорядкування дій системи в рядках вікна «Логіка» (рис. 9).

Графічне представлення відпрацювання експлуатаційного циклу здійснено у вікні «Циклограма» (рис. 10).

На відміну від індикації на гілках процесу циклограма надає можливість розгляду дій системи і її окремих пристроїв у часі експлуатації. Циклограма дозволяє орієнтовно визначити тривалість та час завершення чи початку дій та операцій в контексті їх залежності від інших операцій (рис. 10).

Для отримання більш детальної інформації щодо енергетичних показників системи користувач має звернутись до вікон «Тиск», «Витрата» і

«Потужність» (рис. 11). Всі означені вікна надають можливість оцінити діаграми змін корисного тиску, витрати та потужності системи за період відпрацювання одиничного циклу.



Рис. 9. Вікно «Виконання послідовності»

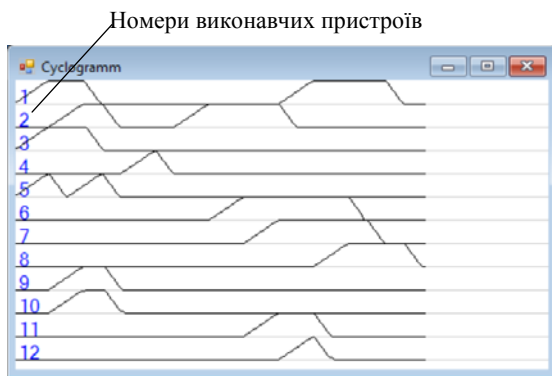


Рис. 10. Вікно «Циклограма»

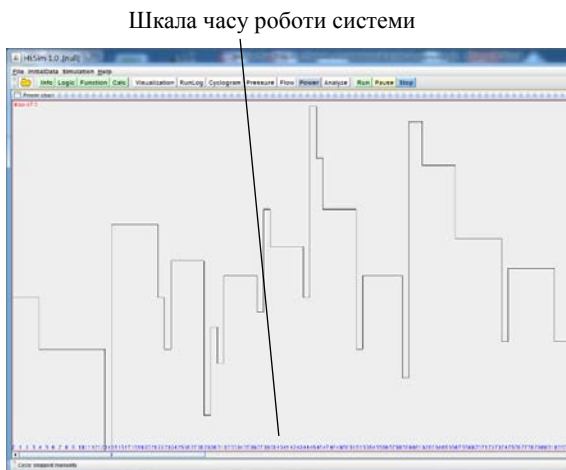


Рис. 11. Діаграма корисної потужності

Після виконання алгоритму моделювання, що засвідчує зупинка відліку часу роботи системи, у вікні «Аналіз» можуть бути розраховані технічні та економічні характеристики системи та розрахований рівень енергоспоживання за один робочий цикл та за визначений проміжок часу роботи гідравлічної системи (рис. 12).

Наприклад, може бути визначений рівень енергоспоживання гідросистеми за певний проміжок часу (одиничний робочий цикл, добу, місяць тощо)

при введенні додаткових даних, таких як кількість робочих циклів, тривалість роботи на добу, кількість робочих днів і т. д.

Поєднання всіх компонент моделювання можна проілюструвати прикладом автоматичної гідрофікованої пакувальної машини тонколистового прокату в рулони.

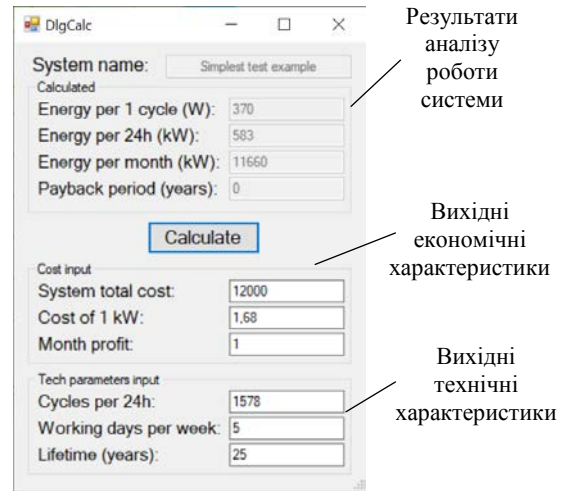


Рис. 12. Вікно «Аналіз»

Вихідними даними для моделювання є технологічний цикл і експлуатаційні навантаження для кожної операції системи. Робочий цикл пакувальної машини об'єднує дії 20 виконавчих пристроїв і вміщує до 6 паралельних гілок процесу (рис. 13).

Функціональні характеристики виконавчих пристроїв можуть бути отриманими з технології пакування. Наприклад, для операції відрізання листа прокату (№ 2) в якості виконавчого пристрою використано одноштоковий гідроциліндр двосторонньої дії, а параметрами прямої дії є зусилля 21,3 кН та швидкість 0,062 м/с.

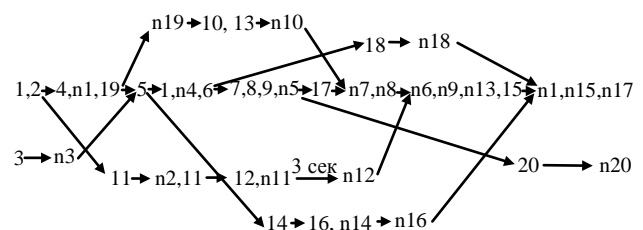


Рис. 13. Робочий цикл пакувальної машини

Робочий цикл системи поділяється на окремі гілки з доданими для деяких операцій додатковими умовами роботи.

Опис процесу складають 7 гілок (7 текстових рядків – послідовностей) у відповідності до робочого циклу:

- 1) 1, 2 – 4, n1, 19 – 5 – n4, 1 {20 %}, 6 – 7, 8, 9, n5 – 17 – n7, n8, 1 – n6, n9, n13, 15 – n15, n17, n1;
- 2) (4, n1, 19) – n19 – 10, 13 – n10 – (n7, n8, 1);
- 3) (1 {30 %} [2], n4, 6) – 18 – n18 – (n1 [2], n15, n17);
- 4) 3 – n3 – (5);

5) (1, 2) – 11{55 %} – n2, 11 – 12, n11 – <3s> – n12 – (n6, n9, n13, 15);

6) (5) – 14 – 16, n14 – n16 – (n1[2], n15, n17);

7) (7, 8{65 %}, 9, n5) – 20 – n20.

На першому етапі потрібно ввести 7 логічних рядків у вікні «Логіка» (рис. 4). На наступному кроці до кожної операції вводяться функціональні характеристики у вікні «Функція», що може бути реалізованим одним з трьох передбачених способів. Наприклад, шляхом введення зусиль та швидкостей прямого та зворотного ходу, а також основних конструктивних характеристик (діаметри поршня та штока, а також хід). Після завершення формування опису системи започатковується процес моделювання – натисканням кнопки «Run». Протягом моделювання в рядку стану відображається модельний час і відображається повідомлення про закінчення процесу моделювання.

Результати моделювання можуть бути отримані натисканням відповідної кнопки на панелі інструментів або вибором відповідного пункту меню: «Візуалізація», «Виконання послідовності», «Циклограма», «Гиск», «Витрата», «Потужність», «Аналіз» (рис. 9–12). Вікна результатів моделювання можна відкрити до запуску моделювання для відстеження змін параметрів з початку роботи системи.

Для наведеного прикладу гідрофікованої пакувальної машини з 20-ма виконавчими пристроями тривалість моделювання, з урахуванням введення вихідних даних логічної та функціональної складової становила менше 2-х годин. Крім того, в традиційних підходах проводиться порівняння можливих варіантів, представлених на ринку гідравлічного обладнання, при виборі конкретного гідроапарату, наприклад, насосу або гідроклапану, але на жаль не проводиться порівняння схемних реалізацій гідросистем. Відповідно вартість створення гідросистеми є незрівнянно вищою в порівнянні з вартістю окремого гідроапарату і тому такий підхід призводить до створення енергетично неефективних систем.

**Висновки.** За результатами аналізу ефективності сучасного програмного забезпечення для задач модельного визначення енергоефективності систем промислового гідроприводу було встановлено, що воно має ряд недоліків, які не дозволяють в повній мірі проводити визначення рівня енергоспоживання гідросистеми. Тому для передпроектної оцінки розроблюваного схемного рішення, в умовах суттєво невизначеної інформації, запропоновано використати логіко-функціональну модель і розроблену на її основі методику спрощеного визначення енергетичних характеристик. Її використання дозволяє значно скоротити час визначення рівня енергоспоживання (для системи з 20-ма приводами до 2-х годин), та знизити рівень технічної підготовки проектувальника. На основі отриманих характеристик гідросистеми можуть бути сформовані раціональні рішення енергетичного рівня гідросистеми або виконано їх порівняння з іншими варіантами по критерію енергоефективності.

Запропонований підхід не дозволяє отримати високої точності результатів моделювання, так як в ньому не враховано багатьох динамічних та інших характеристик виконавчих пристроїв, енергетичних пристроїв, втрат по довжині трубопроводів, втрат в місцевих гідравлічних опорах тощо. Це було зроблено свідомо, по-перше, з метою спрощення моделювання і можливості порівняння декількох схемних рішень для однієї гідросистеми, а по-друге, так як ці втрати є фактично однаковими для будь-якого схемного рішення, тому що залежать виключно від технологічного циклу системи і не можуть бути змінені проектувальником гідросистеми.

Розроблене програмне забезпечення може бути використане як при розробці, проектуванні та підборі гідравлічного обладнання для нових систем, так і при обґрунтуванні необхідності проведення модернізації існуючих систем. Додатковий ефект може бути отримано в навчальному процесі в вищих навчальних закладах, в яких створення і випробування фізичних макетів подібних систем є неможливим.

Вимоги до кваліфікації користувача та комп'ютера для використання програми HESim: впевнений користувач ОС Windows, CPU 1,2 GHz, RAM 1 GB, HDD 4 GB.

Представлена методика та програмне забезпечення пройшли апробацію на підприємствах металургійної галузі, таких як Криворізький металургійний комбінат «Арселор Міттал», Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча, Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь» тощо, де показало свою ефективність та можливість зменшення рівня енергоспоживання при модернізації існуючих гідросистем до 25 %, та ефективність обґрунтування термінів поточної модернізації, про що отримані відповідні акти впроваджень.

#### Список літератури

1. Findeisen Dietmar, Helduser Siegfried. *Ölhydraulik. Handbuch der hydraulischen Antriebe und Steuerungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 1011 p. doi: 10.1007/978-3-642-54909-0
2. Cherkashenko M. V. Synthesis of discrete drives control systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 46 (1322). P. 4–9.
3. Will Dieter, Gebhardt Norbert. *Hydraulik. Grundlagen, Komponenten, Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 515 p. doi: 10.1007/978-3-662-44402-3
4. Watson Ben. *Mobile equipment hydraulics: a systems and troubleshooting approach*. Delmar: Cengage Learning, 2011. 212 p.
5. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Synthesis of control schemes for hydroficated automation objects*. Germany: GmbH & Co Publ., 2018. 214 p.
6. Guana Lisa, Chenb Guangnan. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology. Pumping Systems: Design and Energy Efficiency*. Boca Raton: CRC Press, 2015. 2342 p.
7. 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. P. 33–44.
8. Kozlov Leonid G., Bogachuk Volodymyr V., Bilichenko Victor V., Tovkach Artem O., Gromaszek Konrad, Sundetov Samat. Determining of the optimal parameters for a mechatronic hydraulic drive. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. Vol. 10808*. Wilga, Poland, 2018. doi: 10.1117/12.2501528



- Polishchuk Leonid K., Kozlov Leonid G., Piontkevych Oleh V., Gromaszek Konrad, Mussabekova Assel. Study of the dynamic stability of the conveyor belt adaptive drive. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. Vol. 10808*. Wilga, Poland, 2018. doi: 10.1117/12.2501535
- Губарев А. П., Козинец Д. А., Левченко О. В. MAS-1.0 – Упрощенное моделирование многоприводных гидропневматических систем циклического действия. *Промислова гідроліка і пневматика*. 2005. № 4 (10). С. 72–77.
- Губарев А. П., Козинец Д. А., Левченко О. В. Проверка логики функционирования цикловых систем гидравлических и пневматических приводов. *Промислова гідроліка і пневматика*. 2004. № 3. С. 64–69.
- Parr A. *Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide*. Butterworth-Heinemann Ltd, 2011. 248 p.
- Brian E. *Compressed Air Operations Manual*. McGraw-Hill Education, 2006. 407 p.
- 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
- Miller R., Liberi T., Scioscia J. Analyzing Pump Energy through Hydraulic Modeling. *Pipelines*. 2015. P. 869–877.
- 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. doi: 10.1080/14399776.2015.1055991
- Subramanya K. *Fluid Mechanics and Hydraulic Machines: Problems and Solutions*. 2010. 617 p.
- 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.
- Helduser S. *Grundlagen elektrohydraulischer Antriebe und Steuerungen*. Mainz: Vereinigte Fachverl., 2013. 375 p.
- Scherf H. E. *Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme (mit Matlab- und Simulink-Beispielen)*. München, Wien: Oldenbourg Verlag, 2003.
- Egeland O., Gravidahl J. T. *Modeling and Simulation for Automatic Control*. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002. 639 p.
- Guana Lisa, Chenb Guangan. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology. Pumping Systems: Design and Energy Efficiency*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2015. 2342 p.
- 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.
- Kozlov Leonid G., Bogachuk Volodymyr V., Bilichenko Victor V., Tovkach Artem O., Gromaszek Konrad, Sundetov Samat. Determining of the optimal parameters for a mechatronic hydraulic drive. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. Vol. 10808*. Wilga, Poland, 2018. doi: 10.1117/12.2501528
- Polishchuk Leonid K., Kozlov Leonid G., Piontkevych Oleh V., Gromaszek Konrad, Mussabekova Assel. Study of the dynamic stability of the conveyor belt adaptive drive. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. Vol. 10808*. Wilga, Poland, 2018. doi: 10.1117/12.2501535
- Gubarev A. P., Kozinets D. A., Levchenko O. V. MAS-1.0 – Упрощенное моделирование многоприводных гидропневматических систем циклического действия [MAS-1.0 – Simplified Modeling of Multi-Drive Hydropneumatic Cyclic Action Systems]. *Промислова гідроліка і пневматика*. 2005, no. 4 (10), pp. 72–77.
- Gubarev A. P., Kozinets D. A., Levchenko O. V. Проверка логики функционирования цикловых систем гидравлических и пневматических приводов [Check the logic of the functioning of cyclic systems of hydraulic and pneumatic drives]. *Промислова гідроліка і пневматика*. 2004, no. 3, pp. 64–69.
- Parr A. *Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide*. Butterworth-Heinemann Ltd Publ., 2011. 248 p.
- Brian E. *Compressed Air Operations Manual*. McGraw-Hill Education Publ., 2006. 407 p.
- 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
- Miller R., Liberi T., Scioscia J. Analyzing Pump Energy through Hydraulic Modeling. *Pipelines*. 2015, pp. 869–877.
- 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. doi: 10.1080/14399776.2015.1055991
- Subramanya K. *Fluid Mechanics and Hydraulic Machines: Problems and Solutions*. 2010. 617 p.
- 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.
- Helduser S. *Grundlagen elektrohydraulischer Antriebe und Steuerungen*. Mainz, Vereinigte Fachverl. Publ., 2013. 375 p.
- Scherf H. E. *Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme (mit Matlab- und Simulink-Beispielen)*. München, Wien, Oldenbourg Verlag Publ., 2003.
- Egeland O., Gravidahl J. T. *Modeling and Simulation for Automatic Control*. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics Publ., 2002. 639 p.

## References (transliterated)

- Findeisen Dietmar, Helduser Siegfried. *Ölhydraulik, Handbuch der hydraulischen Antriebe und Steuerungen*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2015. 1011 p. doi: 10.1007/978-3-642-54909-0
  - Cherkashenko M. V. Synthesis of discrete drives control systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 46 (1322), pp. 4–9.
  - Will Dieter, Gebhardt Norbert. *Hydraulik. Grundlagen, Komponenten, Systeme*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2014. 515 p. doi: 10.1007/978-3-662-44402-3
  - Watson Ben. *Mobile equipment hydraulics: a systems and troubleshooting approach*. Delmar, Cengage Learning Publ., 2011. 212 p.
  - Sokol Ye., Cherkashenko M. *Synthesis of control schemes for hydroficated automation objects*. Germany, GmbH & Co Publ., 2018. 214 p.
- Надійшло (received) 05.11.2019

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

**Левченко Олег Васильович (Левченко Олег Васильевич, Levchenko Oleg)** – 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)** – 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)