

УДК 62-932.4

Левченко О.В., к.т.н., доц.; Кузнецов А.В.
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ З ГІДРАВЛІЧНИМ І ПНЕВМАТИЧНИМ СИЛОВИМИ ПРИВОДАМИ

Levchenko O., Kuznetsov A.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

MODELING FEATURES OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH HYDRAULIC AND PNEUMATIC ACTUATORS

Розглянуто існуючі інструментальні засоби, які можуть бути використані побудови і подальшого використання в інженерній практиці моделей багатoprивідних мехатронних систем, реалізованих на гідравлічних і пневматичних елементах силових приводів. Запропоновано новий спосіб моделювання роботи багатомодульної автоматичної системи з дворівневою структурою моделі, де перший рівень відтворює виконання необхідних статичних і динамічних характеристик окремих приводів, об'єктом другого рівня є логічна взаємодія всіх пристроїв, що входять до її складу. Вихідні дані першого рівня запропонованої методики задаються декларативно і задають точність результатів моделювання. Логічний рівень системи представлений керуючими рівняннями для кожного керуючого пристрою системи, які можуть бути отримані за допомогою будь-якої з існуючих методик і представляють собою набір сигналів стану системи, поєднаними логічними функціями. Розроблено пакет прикладних програм для спрощеного моделювання роботи автоматичних систем MAS 2.0 і наведені результати його тестування.

Ключові слова: моделювання; силовий привод; мехатронна система; енергетична ефективність.

Вступ. З огляду на швидкий розвиток промисловості і разом з тим більш стрімке використання автоматизованого виробництва, виникає необхідність, на етапі передпроектної підготовки, мати в наявності інструментальний засіб, придатний для швидкої перевірки працездатності і отримання основних характеристик системи [1, 2].

Практична основа для моделювання та розробки прикладної програми полягає насамперед в економічних показниках автоматичних виробничих систем, що пов'язані зі ступенем і гнучкістю автоматизації різних за змістом технологічних процесів. Суттєве зменшення вартості сенсорних систем контролю і програмованих контролерів привело до їх застосування майже у всіх ланках виробництва і об'єднання в загальну систему контролю і управління. Типовими прикладами таких ланок можна вважати автоматизовані склади, окремі технологічні лінії, ланки вхідного і вихідного контролю продукції, ланки упаковки і відвантаження та інші [3, 4]. Тобто, в одній системі, як правило, виробники прагнуть зосередити повний виробничий цикл. Якщо автоматизована виробнича технологія складається з 5 ... 10 операцій, а в кожній операції задіяно 3 ... 10 виконавчих і допоміжних пристроїв, то вся система буде якомога меншою (до 40) керованих і контрольованих елементів [5-13].

Такі зміни в автоматизованих виробництвах привели до істотного скорочення часу технологічного циклу, зменшення участі людини в безпосередньому виробничому процесі і зменшенні непродуктивних витрат часу, при підвищенні надійності системи. Можна зробити висновок, що автоматика, яка застосовується в машинобудуванні, харчовій промисловості, включає в себе від 10 ... 15 до 100 ... 200 виконавчих пристроїв, а більшість завдань підпадає під інтервал 20 ... 70 [5]. Моделювання роботи циклових багатoprивідних систем з об'ємним гідроприводом в задачах прогнозування енергоефективності є трудомістким і тривалим процесом, так як крім необхідності реалізації робочого циклу, необхідно врахувати ще такі фактори, як одночасна робота декількох виконавчих пристроїв, втрати енергії в апаратах та лініях, реалізація системи енергозабезпечення [6]. Виявити і скорегувати помилки на ранній стадії проектування можливо за допомогою прикладних програм.

Таким чином метою роботи є розробка методології та програми моделювання систем мехатроніки з урахуванням їх особливостей, таких як одночасна робота виконавчих пристроїв, зміна експлуатаційних характеристик впродовж робочого циклу і терміну експлуатації, способів регулювання насосної станції тощо. До розгляду взято кілька програм, придатних для проектування і проведення модельних експериментів з багатoprивідними цикловими системами гідроприводів: FluidSim 4.0, FluidDraw, MatLab (SimuLink), 20 Sim,

Simplorer, Automation Studio з перевіркою можливості врахування таких особливостей, як вартість та об'єм ресурсів, графічна підтримка, зв'язок з експлуатаційним процесом, масштабним показником тощо.

FluidSim Hydraulics. Програма FluidSim Hydraulics версії 4.0 фірми Festo Didactic GmbH призначена для створення моделей гідравлічних (пневматичних) систем і проведення їх моделювання [7]. В системі можливе використання основних типів виконавчих і керуючих пристроїв з можливістю регулювання швидкості і зусилля.

Перевагами програми FluidSim є можливість наочного візуального відтворення, широкий вибір виконавчих, керуючих пристроїв і датчиків, можливість реалізації схем з використанням реле тиску, реле часу, гідроаккумуляторів, коригування параметрів пристрою, інтерактивності, яка полягає в тому, що при моделюванні роботи системи є можливість включати і вимикати перемикачі, кнопки, перемикачі розподільники і т.д.

До недоліків цієї програми можна віднести те, що значна частина часу витрачається на технічну роботу, не пов'язану з функціонуванням системи і складністю моделювання систем з великою кількістю виконавчих пристроїв.

20 Sim. Програмний додаток 20 Sim від компанії ControlLab Products BV призначений для моделювання динамічних систем. Програма 20Sim дозволяє моделювати роботу як окремих пристроїв, так і роботу циклових систем, таких як електричні, механічні, гідравлічні або будь-якої їх комбінації.

Опис елементів та пристроїв забезпечується за допомогою математичних виразів та функцій.

Окрім того користувач повинен мати базові знання з розробки алгоритмів і програм, тобто моделюванню передують не схемні рішення, а розробка і повне проектування системи із визначенням необхідних параметрів [8].

Simplorer. Пакет прикладних програм Simplorer v.7 американської компанії Ansoft Simulation Software являє собою високоєфективний засіб для розробки різноманітних систем для різних областей промисловості [9]. При моделюванні роботи окремих приводів, на робочому столі збирається необхідна схема підключення.

Для задачі прогнозування відсутня можливість визначення рівня енергоспоживання системи та використання типових схемних рішень. Розробка моделі в програмі Simplorer потребує значних затрат часу.

SimulationX. Програмний комплекс для моделювання об'єктів і систем, який розробляється фірмою IPT GmbH з 2000 року [10].

Присутні інтуїтивно зрозумілі елементи інтерфейсу, які дозволяють швидко і без особливих зусиль побудувати необхідну схему потрібної системи.

Але при визначенні параметрів складної системи також потрібно дуже багато часу для створення схеми із подальшим моделюванням її роботи.

Automation Studio v6.1 Пакет програмного забезпечення для розробки механотронних систем середньої і високої складності. Даний продукт був створений фірмою Famic Technologies Inc. [11].

В програмі наявні бібліотеки елементів різного призначення, що відповідають стандартам IEC, JIS, NEMA, з яких можна побудувати необхідну схему, рис.1.

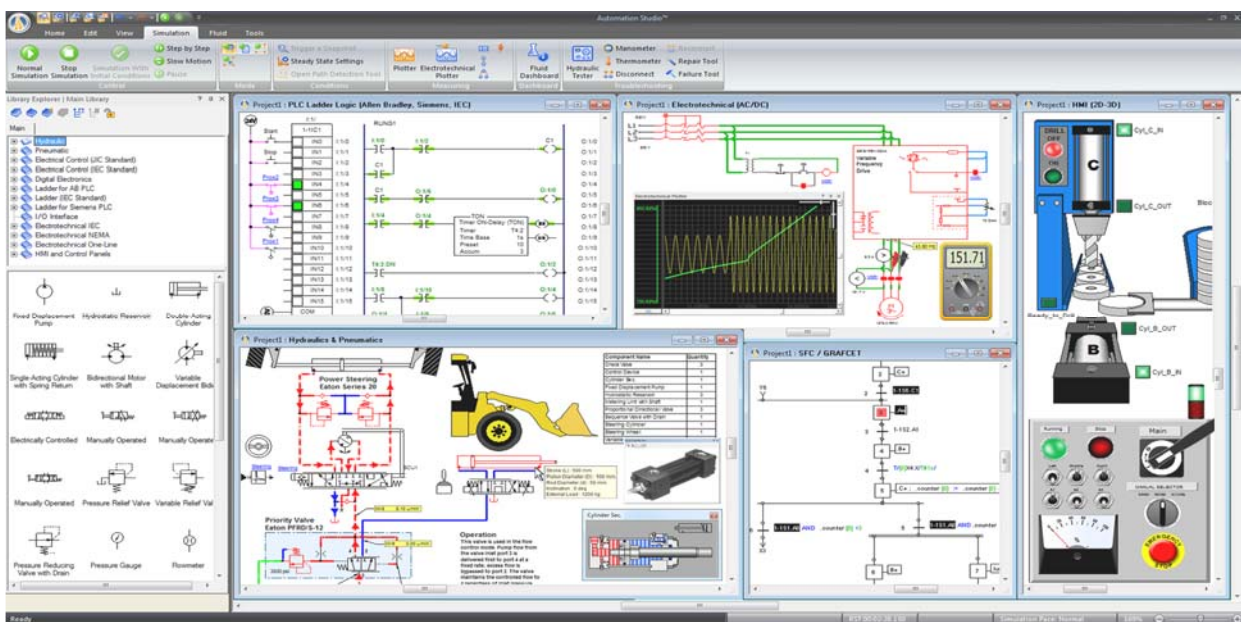


Рис. 1. Вікно програми Automation

При цьому можливо задавати всі характерні експлуатаційні параметри елементів. Основним недоліком є те, що для моделювання роботи системи необхідно створити всю гідросхему із потрібною їй системою керування.

Запропоноване рішення. З метою вдосконалення моделювання багатоприводних систем, пропонується використовувати дворівневу модель, де перший рівень відтворює логічну взаємодію виконавчих пристроїв, а другий рівень – враховує фізичні і динамічні характеристики виконавчих пристроїв (рис.2).

Враховуючи наведені і деякі інші показники практичних систем можна виділити наступні особливості систем механотроніки, які є визначальними в задачах розробки і моделювання виробничих процесів.

Першою особливістю систем промислової механотроніки є необхідність їхньої модернізації в умовах підвищених вимог до надійності і простоти обслуговування та керування.



Рис. 2. Структура дворівневої моделі

додається невизначеність часових характеристик, яка обумовлена гідродинамічними та аеродинамічними показниками апаратури і їх зміною в процесі експлуатації.

Більшість підходів до моделювання багатоеlementних систем не лише не враховують такі зміни, але й не забезпечують надійної роботи при переносі результатів моделювання на технічні засоби реалізації. Наслідком цього є поширення таких рішень, в яких передбачено додавання дублюючих і корегуючих зв'язків із рекурентними процедурами забезпечення надійності дій асинхронної системи [7, 8, 9].

Типовими результатами проектування логіки взаємодії значної кількості приводів є часові і тактові діаграми або їх модифікації. При переході до контролерів – програми, написані в середовищах AWL або STL, які мають також покрокову структуру виконавчих програм. При розробці цього підходу промислові автоматичні системи розглядаються як сукупність декількох рівнів, в склад яких входять пристрої, що мають строго визначене на власному рівні призначення. Умовно елементи автоматичної системи розділені на 4 рівні:

Перший – рівень, в склад якого входять виконавчі пристрої, тобто є пристрої, які приймають безпосередню участь в процесі виробництва і виконують цілком визначені технологічні функції (рис.3). Це можуть бути різного роду захвати, транспортери і тому подібне. В процесі моделювання роботи цих пристроїв потрібно мати певні їхні характеристики, які вводяться перед початком моделювання. Тобто опис роботи даних пристроїв відбувається декларативно, тому достовірність результатів моделювання роботи виконавчих пристроїв залежить лише від наявності і точності вихідних даних;

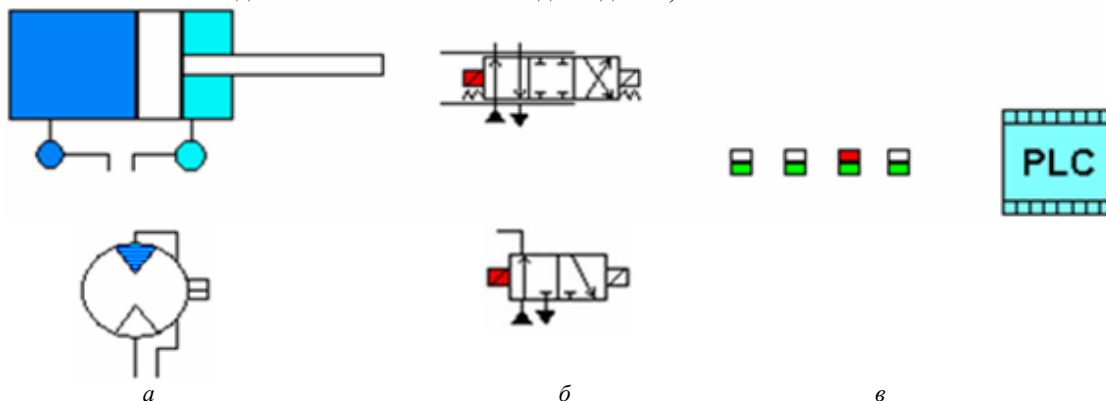


Рис. 3. Основні групи пристроїв: а) виконавчі пристрої, б) керуючі пристрої, в) датчики, г) контролер

Другий – рівень, в склад котрого входять керуючі пристрої, тобто пристрої, які в залежності від наявності керуючого сигналу від контролера (як правило електричного) направляють енергетичний потік (в нашому випадку робочої рідини чи газу) до виконавчого пристрою. В якості керуючих пристроїв можуть виступати різного роду гідравлічні і пневматичні розподільники, клапани, перемикачі. В процесі моделювання пристроїв цього рівня деякі їхні фізичні характеристики можуть бути враховані «за замовчуванням», так як вважається, що ці пристрої підібрані у відповідності до використаних в системі тисків і витратах робочого середовища і не можуть суттєво вплинути на загальні витратні характеристики системи в цілому.

Основним параметром, необхідним для моделювання роботи системи, в яку вони входять є час спрацювання пристроїв цього рівня. Перш за все він залежить від типу використаного пристрою і робочого середовища в системі.

Час спрацювання складається з суми: часу проходження сигналу від контролера в робочий орган керуючого пристрою, часу спрацювання робочого органу керуючого пристрою і часу передачі сигналу від робочого органу керуючого пристрою до виконавчого пристрою. При проходженні робочого середовища через пристрої цього рівня створюються втрати енергії при подоланні місцевого опору, створюваного керуючими пристроями за рахунок зміни напрямку руху робочого середовища. Тому для врахування цієї особливості існує можливість, наприклад, для дроселюючої апаратури, введення в процентному відношенні коефіцієнту втрат.

Третій – рівень, в склад якого входять засоби контролю стану виконавчих пристроїв, тобто пристрої, які фіксують теперішній стан приводу і сигналізують контролеру про виконання технологічної операції. В якості засобів контролю стану можуть виступати різного роду датчики, сенсори, кінцеві перемикачі. Оскільки існує велика кількість засобів контролю, в залежності від потужності і принципу дії (механічні, пневматичні, гідравлічні, електричні, оптичні, емнісні і т. д.), в процесі моделювання роботи цих пристроїв складно врахувати всі їх фізичні характеристики, але для отримання достовірних результатів моделювання потрібно обов'язково враховувати таку характеристику, як час спрацювання;

Четвертий – рівень, в склад якого входять пристрої (контролери), які генерують сигнали команд для керуючих пристроїв, відповідно закладеній логіці. Цей рівень відтворює функцію контролера і алгоритм керуючої програми відповідно сигналам стану виконавчих пристроїв системи і внутрішній інформації, що накопичена в контролері.

За результатами проведеного підходу розроблений пакет прикладних програм MAS 2.0, за допомогою якого реалізована можливість спрощеного моделювання роботи багатопривідної механотронної системи. Вікно введення вихідних даних, необхідних для моделювання роботи автоматичної системи має окремі блоки (згідно рівневого поділу), в які вводиться необхідна інформація (рис.4).

При роботі з програмою існує можливість моделювання роботи систем з нестандартними пристроями (дозатори, форсунки, інжектори), а також систем, в яких для виконання однієї технологічної операції може бути використано кілька різних пристроїв [7, 8].

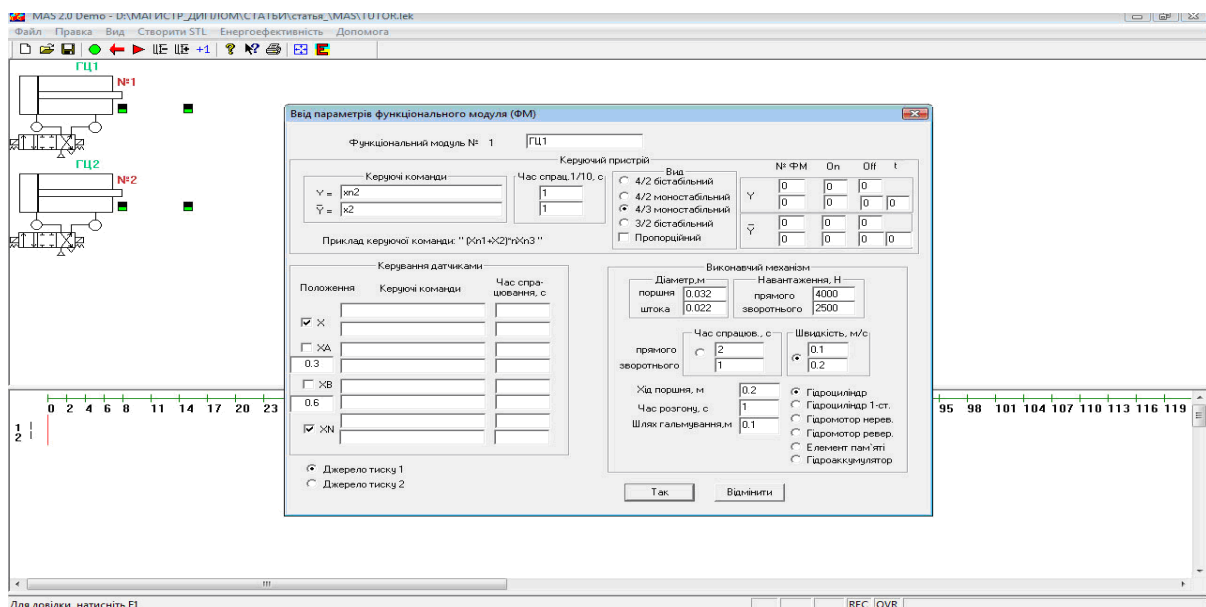


Рис. 4. Робоче вікно розробленої програми для задачі параметрів гідроапаратури та логічних рівнянь команд керування

Використання даної програми при моделюванні роботи автоматичних систем надає можливість візуалізації роботи системи, отримання тимчасової циклограми роботи виконавчих пристроїв системи, діаграми сумарної витрати робочого середовища і потужності.

Вікно візуалізації дозволяє наочно уявити роботу майбутньої системи, відстежити можливі збої в її роботі. Вікно тимчасової циклограми дозволяє перевірити логіку спрацьовування приводів системи, перевірити послідовність виконання операцій за заданим технологічним циклом.

Вікна діаграм сумарної витрати і потужності дозволяють сформулювати вимоги до енергетичних характеристик майбутньої системи, які в подальшому можуть бути використані при підборі основного обладнання та визначенні економічних показників об'єкта в цілому.

Перевірка адекватності роботи програми. Для перевірки правильності роботи програми, а отже коректності отриманих результатів, були проведені експерименти з реальною гідравлічною схемою, яка містить два гідроциліндри, в якості виконавчих пристроїв (рис.5).

Робочий цикл системи виглядає наступним чином: 1-2-N1-N2, тобто спочатку висувається 1-й циліндр, потім другий, після чого відбувається засування, в тій же послідовності.

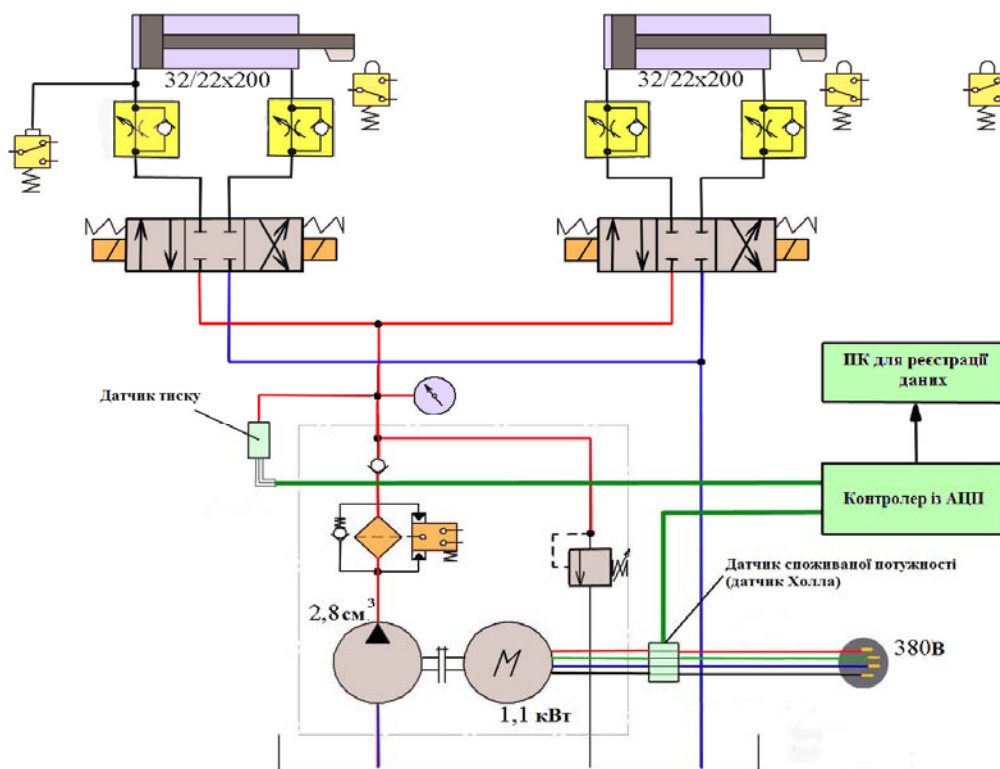


Рис. 5. Схема експериментальної установки

За допомогою регульованих дроселів задається тиск в лінії нагнітання з метою імітації навантаження на циліндр. Як ми бачимо, в ній використовуються два 4/3 розподільники з електричним керуванням.

Відповідно до цієї схеми був зібраний експериментальний стенд, на якому проводилися необхідні досліди. На рис. 6 представлено зібрану на стенді схему.

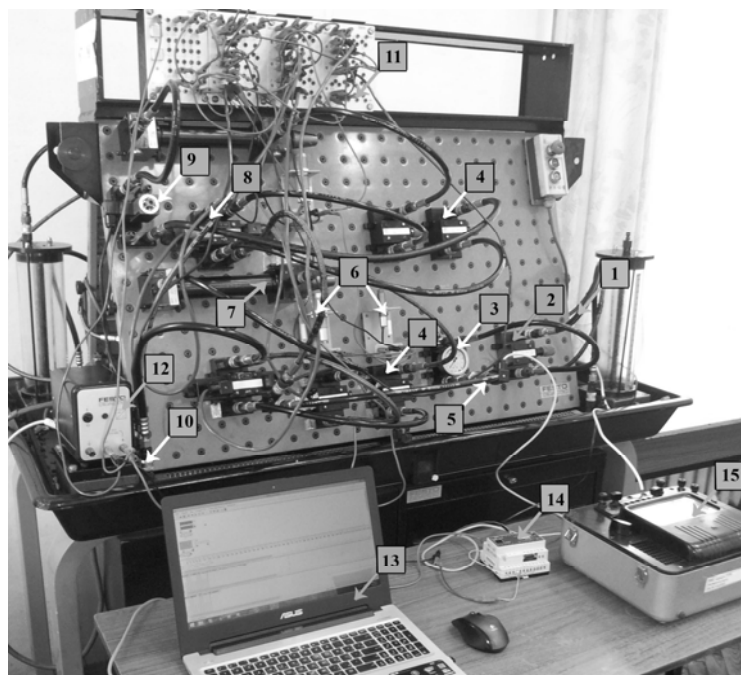


Рис. 6. Експериментальна установка: 1 – лінія підводу тиску; 2 – запобіжний клапан; 3 – манометри; 4 – регульований дросель зі зворотнім клапаном; 5 – датчик тиску; 6 – датчики положення; 7 – гідроциліндр; 8 – розподільник; 9 – реле тиску; 10 – зливна лінія; 11 – схема управління циклом; 12 – джерело живлення (24В, постійний струм); 13 – ПК для реєстрації даних; 14 – контролер із входами АЦП; 15 – аналоговий ватметр

Робочий тиск надходить в систему від насосної станції по трубопроводу 1 (в насосній станції використовується пластинчастий насос об'ємом $2,8 \text{ см}^3$). Шланг 1 підключений до клапана тиску 2, який налаштований на 60 бар і служить для обмеження тиску в гідросистемі. Після клапана тиску, рідина подається на розподільні 4/3 клапани 8, проходячи через манометр 3 з аналоговим датчиком тиску 4, який підключений до входів АЦП контролера.

Розподільні клапани управляють роботою циліндрів 9. При цьому рідина на шляху до циліндра проходить через регульовані дроселі, використувані для імітації навантаження на шток циліндра.

Контроль крайніх положень циліндрів забезпечується кінцевими датчиками 6, а висунуте положення першого циліндра - за допомогою реле тиску.

Зливні лінії розподільників з'єднані з баком, трубопроводом 10. Для завдання робочого циклу застосовуються блоки реле, на яких зібрана схема управління. Живлення даної схеми здійснюється блоком живлення 12 (24В, постійний струм).

Крім цього в системі передбачена можливість вимірювання споживаного струму, за значеннями котрого визначається споживана електрична потужність. Вимірювання забезпечується за допомогою датчика Холла, вихідна напруга котрого лінійно залежить від струму, що протікає по провіднику, на якому встановлений даний датчик.

Виходи цього датчика також підключені до АЦП контролера, який забезпечує передачу даних на комп'ютер.

На рис. 7 зображена залежність тиску на розподільниках з плином часу циклу. Видно, що даний тиск становить 52-54бар (максимальне значення).

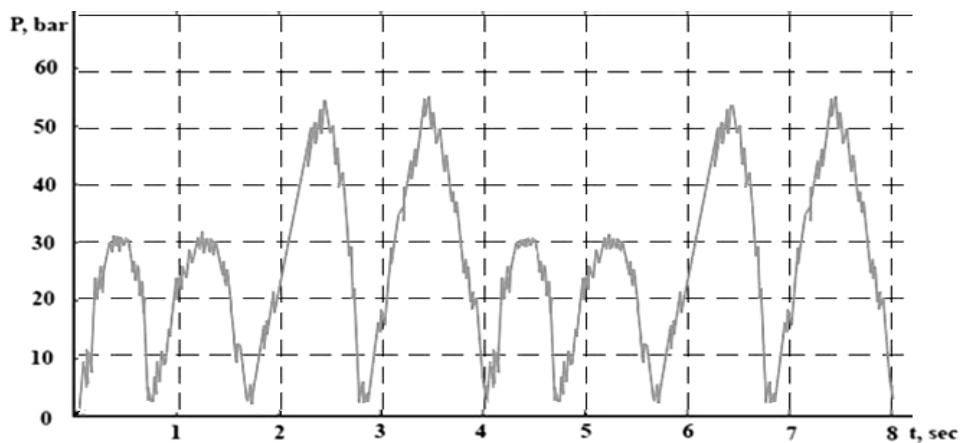


Рис. 7. Залежність тиску в системі від часу (експеримент)

Слід зазначити, що поршень циліндра має діаметр 32мм, шток - 22мм, а довжина ходу становить 200мм. При цьому зусилля, що розвивається в системі для відповідних тисків складає 2400Н (для 30 бар) при висуванні, і 2100Н (для 54 бар), при засуванні (близько 4-5 бар йде на втрати). Заміряна потужність для засування, становить приблизно 300Вт і є максимальним значенням, рис 8.

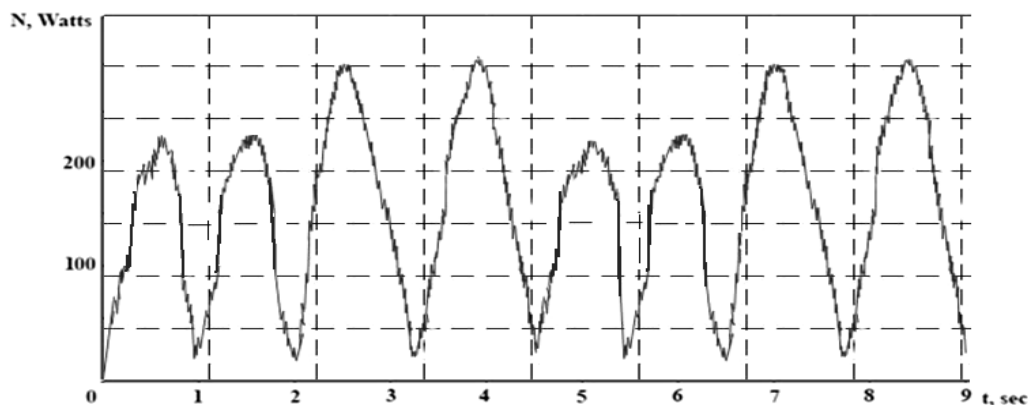


Рис. 8. Експериментальна залежність споживаної потужності від часу

Останнім кроком є порівняння експериментальних даних і даних, які отримані при роботі програми. Для моделювання вводимо в програму функціональні параметри приводів і задаємо логічні рівняння команд для управління роботою системи.

Далі запускаємо роботу програми і визначимо розрахункові значення тиску та потужності (рис.9).

При цьому бачимо, що розрахункові значення потужності складають для висунення 230Вт, а для засування 300Вт. При цьому не враховується ККД насоса і гідроциліндра. З урахуванням цих параметрів величини потужностей будуть порядку 265 і 325 Вт відповідно.

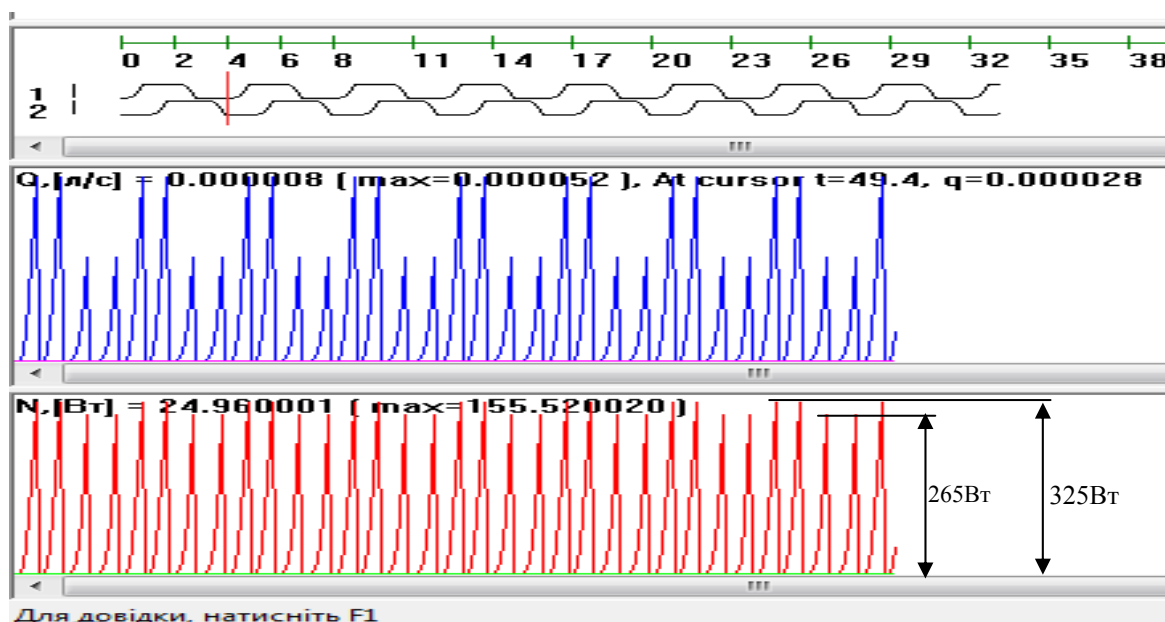


Рис. 9. Результат роботи програми

Висновки. Таким чином, в ході роботи, для врахування особливостей систем гідропривода, таких як одночасна робота декількох виконавчих пристроїв, втрати енергії в апаратах та лініях, реалізація системи енергозабезпечення була створена методика моделювання та прикладна програма, яка дозволяє без великих зусиль і витрат часу прорахувати енергетичну ефективність гідравлічної системи. Дана програма відрізняється тим, що не вимагає побудови всієї схеми, як виконавчої, так і керуючої, що дуже сильно економить час при розробці гідросистеми. Для перевірки правильності роботи програми були проведені експерименти, які показали, що точність прогнозу енергетичної ефективності гідросистеми, з необхідними параметрами, становить приблизно 25-30%. Дана програма дозволить швидко, без додаткових затрат часу, змоделювати роботу мехатронної системи та отримати основні параметри енергоефективності.

Такий підхід дозволить отримати не лише експлуатаційні характеристики промислових мехатронних систем, а й на їх основі прогнозувати їх зміни з урахуванням тривалості експлуатації системи, зміни вартості енергоносіїв, режимів роботи системи і т.д.

Анотація. Особенности моделирования работы мехатронных систем с гидравлическими и пневматическими силовыми приводами.

Проблематика. Рассмотрено существующие средства, которые могут быть использованы для построения и дальнейшего использования в инженерной практике моделей многоприводных мехатронных систем, реализованных на гидравлических и пневматических элементах силовых приводов.

Цель исследования. Разработка методики и программного обеспечения для моделирования многоприводных мехатронных систем.

Методика реализации. Исходные данные первого уровня предложенной методики задаются декларативно и задают точность результатов моделирования. Логический уровень системы представлен управляющими уравнениями для каждого управляющего устройства системы, которые могут быть получены с помощью любой из существующих методик и представляют собой набор сигналов состояния системы, объединенных логическими функциями.

Результаты исследований. Предложено новый способ моделирования работы многомодульной автоматической системы с двухуровневой структурой модели, где первый уровень реализует выполнение необходимых статических и динамических характеристик отдельных приводов, объектом второго уровня является логическое взаимодействие всех устройств, которые входят в ее состав.

Выводы. Разработан пакет прикладных программ для упрощенного моделирования работы автоматических систем MAS 2.0 и приведены результаты его тестирования.

Ключевые слова: моделирование, силовой привод, мехатронная система, энергетическая эффективность.

Abstract. Modeling features of mechatronic systems with hydraulic and pneumatic actuators.

Design/methodology/approach. The tools of creating and models of multidrive mechatronic systems using implemented on the hydraulic and pneumatic elements of actuators are considered.

Findings. The proposed method for simulating the operation of multiple-automated system has a two-tier structure of the model, where the first level plays the necessary static and dynamic characteristics of the individual drives, the object of the second level is the logical interaction of all devices included in the composition.

Originality/value. A software package for the simulation of a simplified automatic MAS 2.0 system had been developed and the results of its testing are represented.

Keywords: modeling, power drive, mechatronic system, energy efficiency.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Stefan Heitziga, Sebastian Sgroa, Heinrich Theissen Energy Efficiency of Hydraulic Systems with Shared Digital Pumps / *International Journal of Fluid Power* Volume 13, Issue 3, 2012, pages 49-57.
2. Wu, P., Lai, Z., Wu, D., Wang, L. (2014). "Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493, 04014094.
3. Miller, R., Liberi, T., Scioscia, J. Analyzing Pump Energy through Hydraulic Modeling / *Pipelines* 2015: pp. 869-877.
4. Oscar R., Peña Michael J. Leamy An efficient architecture for energy recovery in hydraulic elevators / *International Journal of Fluid Power*, Volume 16, Issue 2, 2015, pages 83-98.
5. Lisa Guana, Guangnan Chenb Pumping Systems: Design and Energy Efficiency / *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, Second Edition, 2015.
6. Matti Karvonena, Mikko Heikkilä, Mikko Huovaa, Matti Linjamaa Analysis by Simulation of Different Control Algorithms of A Digital Hydraulic Two-Actuator System / *International Journal of Fluid Power* Volume 15, Issue 1, 2014, pages 33-44.
7. Festo.com [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – [Festo Didactic SE Rechbergstr.3, DE-73770 Denkendorf] – Режим доступу:<http://www.festo-didactic.com/int-en/> (дата звернення 01.04.2016). – Назва з екрана.
8. 20sim.com [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – [Hengelosestraat 500 7521 AN Enschede The Netherlands] – Режим доступу:<http://www.20sim.com/> (дата звернення 01.04.2016). – Назва з екрана.
9. Ansoft.com [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – [Ansoft Corporation John Arnold, 412-261-3200, ext. 160] – Режим доступу:www.ansoft.com/products/em/simplorer (дата звернення 01.04.2016). – Назва з екрана.
10. Simulationx.com [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – [ESI ITI GmbH Zwinger-Forum Schweriner Straße 1 01067 Dresden/ Germany] – Режим доступу:<https://www.simulationx.com/simulation-software> (дата звернення 01.04.2016). – Назва з екрана.
11. Automationstudio.com [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – [Famic Technologies Inc. 350-9999 Cavendish Montréal, QC, H4M 2X5] – Режим доступу:<http://www.automationstudio.com/> (дата звернення 01.04.2016). – Назва з екрана.
12. Губарев А.П., Козинец Д.А., Левченко О.В. MAS-1.0 – Упрощенное моделирование многоприводных гидропневматических систем циклического действия/ Збірник статей, Краматорськ, 2005.
13. Губарев А.П., Козинец Д.А., Левченко О.В. Проверка логики функционирования цикловых систем гидравлических и пневматических приводов/Всеукраїнський науково-технічний журнал "Промислова гідроліка і пневматика" №3.- 2004.- с. 64-69.

References

1. Stefan Heitziga and Sebastian Sgroa, (2012), Heinrich Theissen Energy Efficiency of Hydraulic Systems with Shared Digital Pumps, *International Journal of Fluid Power* Vol. 13, Issue 3, pp. 49-57.
2. Wu, P., Lai, Z., Wu, D. and Wang, L. (2014), "Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493, 04014094.
3. Miller, R., Liberi, T. and Scioscia, J. (2015), Analyzing Pump Energy through Hydraulic Modeling, *Pipelines*, pp. 869-877.
4. Oscar R., Peña Michael, and Leamy J. (2015), An efficient architecture for energy recovery in hydraulic elevators, *International Journal of Fluid Power*, Vol. 16, Issue 2, pp. 83-98.
5. Lisa Guana, and Guangnan Chenb (2015), Pumping Systems, Design and Energy Efficiency, *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, Second Edition.
6. Matti Karvonena, Mikko Heikkilä, Mikko Huovaa, and Matti Linjamaa (2014), Analysis by Simulation of Different Control Algorithms of A Digital Hydraulic Two-Actuator System, *International Journal of Fluid Power*, Vol. 15, Issue 1, pp. 33-44.
7. Festo.com, Festo Didactic SE Rechbergstr.3, DE-73770 Denkendorf, available at: <http://www.festo-didactic.com/int-en/> (Accessed 01.04.2016).
8. Hengelosestraat 500 7521 AN Enschede The Netherlands, 20sim.com, available at: <http://www.20sim.com/> (Accessed 01.04.2016).
9. Ansoft Corporation John Arnold, 412-261-3200, ext. 160. Ansoft.com, available at: www.ansoft.com/products/em/simplorer (Accessed 01.04.2016).
10. ESI ITI GmbH Zwinger-Forum Schweriner Straße 1 01067 Dresden, Germany, Simulationx.com, available at: <https://www.simulationx.com/simulation-software> (Accessed 01.04.2016).
11. Famic Technologies Inc. 350-9999 Cavendish Montréal, QC, H4M 2X5, Automationstudio.com, available at: <http://www.automationstudio.com/> (Accessed 01.04.2016).
12. Gubarev, A.P., Kozynets, D.A. and Levchenko, O.V. (2005), MAS-1.0 – Uprishchennoe modelyrovanye mnohopryvodnykh hydro-pnevmatycheskykh system tsyklycheskoho deystviya. Zbirnyk statey, 1 (1), Kramators'k, Russian. pp. 64-69.
13. Gubarev, A.P., Kozynets, D.A. and Levchenko, O.V. (2004), Proverka lohyky funktsyonyrovaniya tsyklovykh system hydryavlycheskykh, pnevmatycheskykh pryvodov, *Vseukrayinsky naukovy-tekhnichnyy zhurnal "Promyslova hidravlika i pnevmatyka"*, no 3, pp. 64-69.

Подана до редакції 11.04.2016