

АНАЛІЗ ПРОГРАМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

Розв'язано задачу розробки методичного забезпечення для моделювання мехатронних систем на структурному і функціональному рівнях абстракції. Об'єктом дослідження був процес моделювання мехатронних систем і систем автоматизованого управління. Предмет дослідження складають програми інжинірингу і автоматизованого проектування технічних систем, універсальні математичні процесори (CAE, CAD і CAS-системи відповідно). Ціль роботи: підвищити ефективність процесу прийняття рішень по вибору оптимального програмного і математичного забезпечення для моделювання мехатронних систем інженерами-електроніками.

Дослідження мехатронних систем дозволили виявити їх особливості як мультидоменних об'єктів, і загальні риси – як підсистем автоматизованого управління, на основі чого сформовані основні вимоги до програм моделювання. Аналіз математичного і програмного забезпечення CAE, CAD і CAS та експерименти по моделінгу й симуляції при каузальному і мультидоменному підходах, дозволили визначити критерії для порівняльного аналізу та сформувавши рекомендації по вибору програми для моделювання, оптимальної для досягнення визначених цілей дослідження мехатронних систем. На основі аналізу програм, розроблено універсальну методику моделювання та оптимізації мехатронних систем в циклі їхнього автоматизованого проектування.

Ключові слова: мехатроніка, системи автоматичного управління, моделінг, симуляція, методика моделювання.

НОМЕНКЛАТУРА

BG – bond graph;
 CAE – Computer Aided Engineering;
 CAS – Computer Algebra System;
 ECAD – Electronics Computer Aided Design;
 MCAD – Mechanical Computer Aided Design;
 delta – відхилення поточного положення «вхід →» від уставки «вхід +»;
 h_value – поточне положення штока клапана;
 S_value – площа просвіту поточного вікна клапана;
 Win – частота обертання ведучої шестерні редуктора;
 Wout – частота обертання веденої шестерні редуктора;
 ДС – динамічна система;
 ММ – математична модель;
 МС – мехатронна система;
 ПЗ – програмне забезпечення;
 САР – система автоматичного регулювання;
 САУ – система автоматичного управління;
 ТАУ – теорія автоматичного управління;
 ФП – функціональний перетворювач.

ВСТУП

Електронні пристрої часто використовуються в мехатронних системах, які здатні забезпечувати рух виконавчого органу під керуючими впливами електронної системи управління. МС є синергетичним поєднанням механічної підсистеми та підсистем силової й інформаційної електроніки, отже, при проектуванні МС необхідно використовувати принципи системотехніки, при одночасному детальному аналізі фізичних явищ в кожній з підсистем. Зрозуміло, що такий аналіз вимагає притягнення інженерів із відповідних галузей, але на верхньому рівні абстракції, МС можна представити системою автоматичного регулювання, або управління, проектуванням якої можуть займатися інженери з електронної техніки. Специфічний погляд на МС, як на об'єкти досліджень та моделювання для спеціаліста з електроніки представлений в даній статті.

Моделювання МС вимагає використання програмного забезпечення, що здатне забезпечити дослідження

на різних ієрархічних рівнях – це програми автоматизованого проектування (CAD), інжинірингу (CAE) та універсальні математичні процесори (CAS) [1–3]. Кожна з цих систем накладає свої особливості на процес моделінгу та симуляції (modeling & simulation) [1], які можуть вплинути на якість моделювання МС в цілому.

Незважаючи на наявність публікацій по темі моделювання МС, вони представляють собою або суто теоретичні матеріали, або стосуються тільки інженерів-механиків та системотехників [4]. Наразі для дослідників з електронної галузі відсутні об'єктивні рекомендації по вибору найбільш придатного ПЗ для моделювання МС, отже їхня розробка є актуальною задачею. Тому цілком даної роботи є розвиток методичного та математичного забезпечення автоматизованого проектування МС, а саме вироблення методики та практичних рекомендацій для вибору оптимального програмного і математичного забезпечення, зокрема обґрунтування можливості використання ECAD, тобто систем автоматизованого проектування в електроніці для моделювання МС на основі нового підходу в моделінгу.

Об'єктом дослідження є процес моделювання мехатронних систем і систем автоматизованого управління, предмет дослідження – математичне забезпечення CAE, CAD та CAS-систем, придатне для моделінгу та симуляції МС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення поставленої цілі необхідно дослідити специфічні та загальні риси МС як різновиду динамічних технічних систем, визначити способи їхнього моделінгу та вимоги, що висувають обрані підходи до математичного забезпечення на прийнятому рівні абстракції, зокрема, на симуляцію в програмах моделювання електронного домену, тобто в ECAD.

Для порівняльного аналізу програм необхідно сформулювати вектор критеріїв якості, ранжувати їх. Експерименти, проведені в різному ПЗ при різних підходах, та результати аналізу програм різного класу (CAE, CAD та CAS), дозволяють узагальнити підходи у моделюванні МС як САУ на рівні методики, визначити область адекватності такого моделювання.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Мехатронні системи, як один з видів ДС [4] призначені для реалізації заданого руху й основу їх становить деякий виконавчий механізм та привод – електромеханічний, гідравлічний або якийсь інший. Прикладами сучасних мехатронних пристроїв є модулі верстатів і промислових роботів, побутова техніка тощо.

Зазвичай, МС моделюються на верхньому рівні абстракції (макрорівні), де розрізняють структурний (блочний) і фізичний мультидоменний підходи, кожний з яких має свої переваги та недоліки [4]. При цьому за кожним з двох методів можуть стояти певні особливості математичного ядра обраного програмного забезпечення. Точність моделювання залежить від кількості врахованих властивостей системи, точність симуляції – від правильно відібраних користувачем інструментів та врахування особливостей використаного ПЗ. Зважаючи на невідомий розвиток як МС, так і засобів їхнього дослідження, аналіз ПЗ та підходів у моделюванні [5], є актуальною задачею, розв'язання якої буде сприяти підвищенню якості прийнятих рішень при проектуванні МС.

Будь-яка МС вимагає управління (тобто є САУ), і повинна бути ідентифікована для побудови її моделі з метою створення необхідного керуючого пристрою який забезпечує складний координований рух механічної частини [4]. За поведінкою моделі певної МС можна, у деякому наближенні, судити про поведінку реальної системи, що через складність або неможливість проведення випробувань на реальній системі має сенс [2–7]. Оскільки МС включають в себе електромеханічні перетворювачі з електронною комутацією (актуатори), датчики, силові напівпровідникові перетворювачі, мікроконтролери та персональні комп'ютери, це гарантує широкий спектр досліджень для спеціаліста з електронної техніки.

Моделювання МС включає наступні етапи:

- побудову та дослідження моделей цифрової та силової електроніки, моделі безперервної (механічної) частини;
- дослідження характеристик системи в цілому (як САУ/САУ).

Таким чином, необхідно використовувати як доменне моделювання (на першому етапі), так і каузальне (на другому етапі). Проведений літературний огляд показав, що рекомендується використовувати MCAD [4, 5], CAE [8–16], CAS [17], теорію графів (системний рівень абстракції, при якому система не розбивається на структурні елементи-підсистеми) та ланцюги Маркова [6, 7, 9]. Авторами представлені різні способи класифікації програм, наприклад – поділ на програми статичного та динамічного моделювання [6].

Більшість робіт мають теоретичне значення, опис програмних продуктів (CAS та CAE) [1, 8, 9] призначений в основному для спеціалістів із системотехніки. Можливість використання ECAD для моделювання МС не розглядається. Однак, на нашу думку і спеціалістам з електроніки необхідні чіткі рекомендації по вибору доступних ПЗ, в якому МС при прийнятному підході моделюється адекватно. З CAD-систем для проектування МС використовується MCAD [5], які призначені для твердотільного багатовимірного моделювання механічних систем. При цьому основу моделювання становить дослідження механічних конструкцій.

CAE системи дозволяють досліджувати системи на макрорівні, тобто аналізувати та оптимізувати систему із ціллю прийняття рішення щодо топології (структурний підхід) та функціональних можливостей в цілому (системний підхід). На даний момент існує багато програм CAE, які дозволяють моделювати ДС різної природи (біологічні, економічні, соціальні, технічні), причому деякі є вузькоспеціалізованими, а інші – більш універсальними: Vensim, PThink, Dynamo, Stella, Powersim, MedModel, Arena, GPSS, Stratum, Scilab, Berkeley Madonna, NI MATRIX, ACSLx, Modular Modeling System (MMS), Virtual Test Bed (VTB), JModelica.org, Yenka (Crocodile Technology), MATLAB\Simulink, Simscape, MapleSim, Dynast, Multisim, Dymola, PSIM, SamSim, SimApp, SimulationX, Simplorer, VisSim, SystemModeler, 20-sim, ПК MBTU та інших, опис яких може бути знайдено у [1, 2, 10–16].

В деяких CAE, зокрема в 20-sim, є бібліотеки, що включають моделі різних електромеханічних пристроїв (Mechatronics Toolbox) [10, 11]. Більшість цих моделей закривають всі аспекти функціонування конкретних мехатронних пристроїв, і з цієї точки зору дуже корисні проектувальникам, що займаються розробкою МС. Редактор фільтрів і проектувальник регуляторів також мають важливе значення при створенні САУ та їх аналізі; наприклад, в 20-sim вони мають зв'язок з редактором лінійних систем (Linear System Editor), який у свою чергу дає можливість синтезувати та перетворювати динамічні дискретні та безперервні ланки.

Оскільки МС можуть бути представлені безпосередньо диференціальними рівняннями, то для прогнозування їх поведінки у часі також можуть бути використані математичні пакети CAS, які можуть розв'язувати диференціальні рівняння (чисельно чи у символічній формі): Maple, MATLAB, Mathcad, Mathematica, Maxima, SymPy, O-Matrix, SciPy, Octave, NumPy, Python(x,y), MuPAD, Sage та інші [1, 17].

Незважаючи на те, що розглянуті програми (крім CAS) є об'єктно-орієнтованими, їх поєднують певні принципи моделювання та симуляції, які можна узагальнити як підхід. Оскільки МС, як варіант ДС є складною агрегативною системою [7], її можна моделювати, використовуючи мультидоменний підхід, але, в той же час, МС будується як САУ, які традиційно аналізуються при каузальному підході, тому для ефективного дослідження МС постає задача вибору оптимального підходу та такого ПЗ, що його підтримує. Розглянемо ці підходи з точки зору спеціаліста з електроніки для формування критеріїв по вибору найбільш прийнятної ПЗ для досліджень на верхніх рівнях абстракції: системному та структурному.

Як зазначено вище, МС – є ієрархічною конструкцією з елементів, поєднаних у підсистеми різних рівнів, які можуть бути різної фізичної природи (з різних доменів). Оскільки на структурному рівні моделювання структура моделей відповідає структурі досліджуваного об'єкта, модель МС буде композицією блоків, які взаємодіють між собою через функціональні зв'язки. Оскільки в енергетичних ланцюгах потік енергії може змінювати напрямки, то для елементів фізичних схем входи і виходи не визначені. При такому підході необхідно обирати програми акаузального (мультидоменного) моделювання [2, 6–8].

Як показав аналіз таких програм, техніка акаузально-го моделювання заснована на використанні бібліотеки моделей елементів пристроїв з різних енергетичних доменів (електричних, механічних, гідравлічних і т. д.), з яких можна скласти схему заміщення у вигляді фізичної принципової схеми, яка описується системою алгебро-диференціальних рівнянь. Доменний підхід реалізується в більшості ECAD систем, та в деяких CAE програмах, наприклад, в Simscare, 20-sim, Dymola тощо [2, 10–16]. Цей підхід відрізняється від прийнятого в ТАУ тим, що в ММ використовуються не абстрактні сигнали, а величини, що безпосередньо характеризують фізичний стан об'єкта (струми, потенціали, тиски, сили й т. п.).

Сутність іншого підходу полягає в тому, що на етапі моделінгу (розробки ММ) можна перейти до набору диференціальних рівнянь (після процедури каузалізації), після чого всі фізичні особливості окремих частин системи будуть загублені. Варіантом такого підходу є каузальне моделювання, де блоки можна розглядати як перетворювачі вхідних сигналів у вихідні, при цьому зберігається причинно-наслідковий зв'язок. Каузальні моделі використовуються на системному (найвищому) рівні абстракції для оцінки працездатності системи. Оскільки структурні блоки мають входи і виходи, побудовані згідно з цією технікою моделі іноді називають спрямованими сигнальними графами. Окремим випадком даної техніки моделювання є використання графів зв'язків (BG) [5]. Каузальне моделювання використовується, наприклад, в пакетах Simulink, VisSim, SimApp, SamSim. Недолік цього підходу – великий обсяг попередніх перетворень, крім того структура моделі не нагадує реальну систему, або взагалі може не мати схеми заміщення і являти собою набір рівнянь.

Сформуємо критерії по вибору оптимального ПЗ шляхом аналізу особливостей та якості моделювання при вищезазначених підходах до моделінгу з урахуванням особливостей математичного забезпечення МЗ програм різного класу (CAE, ECAD, CAS).

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Дослідження моделей, засобів симуляції та постпроцесорів [3] різних програм показало, що з каузальним моделюванням частіше за все пов'язаний явний вирішувач (solver) для симуляції, який являє собою бібліотеку класичних підпрограм чисельного інтегрування, що реалізують явні методи інтегрування. Як відомо, явні методи, можуть втрачати стійкість для жорстких математичних моделей (які властиві мехатронним системам), крім того, можливі алгоритмічні збої за причин топологічних вироджень [2, 3]. Отже, можна зробити висновок, що результати моделювання будуть неадекватними для систем із великим розкидом постійних часу, а при наявності структурних сингулярностей – моделювання взагалі стає неможливим. Деякі сучасні CAE здатні ці проблеми розв'язувати в автоматичному режимі, що підтверджено аналізом структур із алгебраїчними петлями в середовищі 20-sim [2, 10].

CAE-системи 20-sim, Maplesim, SystemModeler, Simplorer, Simscare, Amesim [1, 11, 12], незалежно від підходу до моделювання, можуть використовувати неявні та

явні методи інтегрування, що дозволяє моделювати в часовій області об'єкти, задані як каузально, так і у вигляді фізичних принципів схем, для чого в математичний опис додається процедура каузалізації, після якої можна використовувати методи явного інтегрування, як це реалізовано в пакетах Simmechanics і Simpowersystems (підсистеми Simulink [17]).

З фізичним мультидоменним моделюванням зазвичай пов'язують ітераційний вирішувач, який реалізує неявні методи інтегрування, при якому на кожному кроці інтегрування спочатку формується нелінійна система алгебраїчних рівнянь, яка далі розв'язується ітераційним методом (наприклад, Ньютона). Виявленими особливостями неявних методів є те, що не потрібно штучно розривати систему, щоб організувати потік обчислень, крім того, вони мають велику область стійкості [3], що забезпечує надійність симуляції.

ECAD призначені, перш за все, для проектування в електронному домені (на схемотехнічному рівні), але коли вони збагатилися можливостями поведінкового (behavioral) моделювання спочатку для цифрових схем, а потім й для аналогових, це дозволило підвищити рівень абстракції до функціонального та, навіть, системного рівня [2], і розширити клас об'єктів для моделювання. На відміну від поведінкових моделей цифрових пристроїв (написаних для подійного детермінованого алгоритму симуляції), поведінкові моделі безперервних об'єктів спираються на алгоритм неявного чисельного інтегрування, що лежить в основі симуляції при акаузальному підході та надають можливості побудови досить складних алгоритмів для емуляції функціонування об'єктів. Таким чином, використання ECAD для дослідження МС і САУ є одним з факторів забезпечення адекватності результатів.

В ECAD можна також скласти моделі МС на основі стандартних блоків САУ. Однонаправленість сигналу в блоках та елементах САУ досягається гальванічним розв'язком входів і виходів через джерела струму і напруги, що керуються напругою, отже каузальну за характером модель можна побудувати в акаузальній по суті програмі, що можна назвати квазікаузальним підходом у моделюванні. Зв'язки між ФП в МС, представлені як САУ, наведено на рисунку 1: тонкі стрілки моделюють інформаційні потоки, товсті – енергетичні.

Для прийняття оптимального рішення при виборі ПЗ для оцінки придатності програми для моделювання МС, складено таблицю 1, де визначено основні показники для порівняння найбільш популярних систем CAD, CAS та CAE. Знаки в графі «Отримання безкоштовної версії» означають ступінь легкості отримання та працездатність безкоштовних (студентських/пробних) версій, тобто ергономічність.

В розділі ECAD представлені програми моделювання, а не проектування [3], тобто вони можуть не мати менеджера проекту та конструктора друкованих плат. Загальний виявлений недолік CAE та CAS систем – слабкі демоверсії та вища, порівняно із ECAD, вартість професійних версій. Більшість програм ECAD не має інструментів оптимізації регуляторів, однак, поведінкове моделювання та квазікаузальний підхід дозволяють адекватно оцінити основні характеристики МС та САУ на макрорівні.

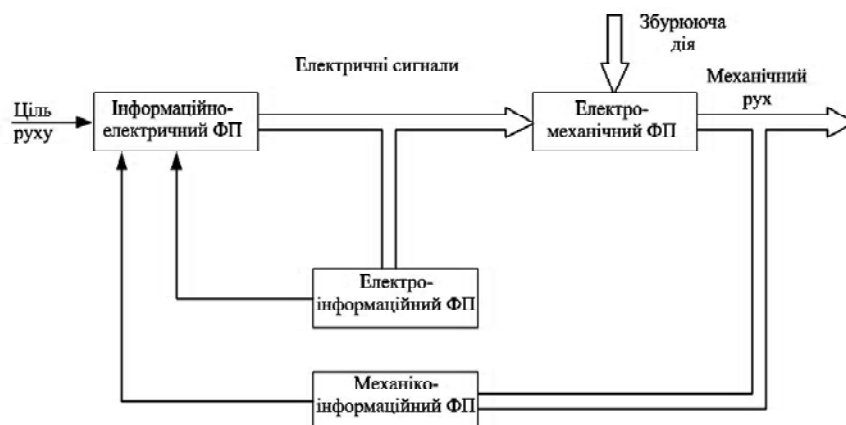


Рисунок 1 – Інформаційні й енергетичні потоки в САУ мехатронної системи

Таблиця 1 – Порівняння можливостей CAD / CAS / CAE

Критерії для порівняння	ECAD			CAS				CAE		
	MicroCap	Multisim	Spice	MATLAB	MathModelica	MapleSim	Simscape	VisSim	20-sim	Dymola
Моделювання (modeling)										
на основі рівнянь	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
каузальний	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
акаузальний підхід та/або квазікаузальний підхід	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+
Мова програмування моделей										
власна	+	+		+	-	+	+	+	+	-
Spice/Modelica	+		+	-	+	+	-	-	-	+
Бібліотеки										
електричні/електронні	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
термічні	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
гідрравлічні	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
механічні (одновимірні)	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
автомобільних систем	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+
Взаємодія										
конвертування до інших форматів	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
імпорт із Simulink					-	+		-	-	-
експорт до Simulink					-	+		+	+	+
Отримання безкоштовної версії	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-
Можливості розробки моделей										
обмежені		•								•
середні	•							•	•	
широкі			•	•	•	•	•			
Інтерактивні веб-публікації	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-

Для прийняття рішення стосовно вибору ПЗ для моделювання МС можна керуватися наступними практичними порадами:

1. Оскільки кожна мехатронна система має об'єкт та пристрій управління, система для моделювання повинна володіти широкими можливостями щодо синтезу, аналізу та оптимізації САУ. Отже, первинні дослідження на макрорівні із ціллю оптимізації топології САУ/МС та параметрів регулятора можна рекомендувати проводити в САЕ-системах, зокрема в 20-sim, або в VisSim.

2. Якщо для подальших досліджень необхідно зберегти специфіку фізичних процесів в підсистемах МС, рекомендується застосовувати програми фізичного мультидоменного моделювання, які забезпечують природну форму представлення моделі та стійкість процесу симуляції. Для спеціаліста з галузі електронної техніки можна рекомендувати підхід, який можна назвати квазікаузальним, або фізичний підхід, в якому механічну частину емулювати поведінковими елементами з електронного домену ECAD [2, 3].

3. Після виконання аванпроекту і генерації технічного завдання можна продовжити моделювання в ECAD та в MCAD. Оскільки MCAD мають суто специфічні риси твердотільного багатовимірного моделювання механічних систем, тому для дослідження мехатронних систем на верхньому рівні абстракції, а тим більше – САУ, вони не є придатними.

Отже, вибір програми моделювання МС для інженера-електронника здійснюється за такими критеріями:

- здатність обраного ПЗ представляти і досліджувати модель МС як САУ;
- ергономічність та потужність ПЗ: можливість вибору підходу, способу моделінгу, метода інтегрування та оптимізації, простота отримання демо-версій та оновлень ПЗ та МЗ.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для прийняття вибору щодо підходу та засобу моделювання необхідно провести моделювання тестової задачі та порівняти результати. Також необхідно визначити область адекватності моделей, побудованих за різними підходами для різних програм. Отже, для опису однієї і тієї ж реальної мехатронної системи може бути використаний різний математичний апарат, в залежності від цілей дослідження і вимог точності та адекватності. Розглянемо різні способи моделінгу на прикладі коливальної ланки, яка може емулювати динамічну підсистему МС/САУ, для цього складемо моделі в САЕ-програмі 20-sim [10, 11] трьома способами: блок-схемою (рисунок 2); фізичною схемою у вигляді електричного фільтра другого порядку із параметрами: напругою (V_source) 50 В, індуктивністю (Inductor) 0,0001 Гн, ємністю (Capacitor) 0,00001 Ф, опором (Resistor) 10 Ом (рисунок 3); зв'язаним графом (рисунок 4) із елементами, що емулюють втрати (Resistance), накопичення кінетичної (Inductance) та потенційної енергії (Capacitance), генерацію потенціалу (Stimulus). Початкові умови – нульові.

Обґрунтуємо експериментально можливість використання ECAD для дослідження МС. Використовуючи квазікаузальний підхід, складемо в ECAD-програмі MC9 математичну модель САР для клапану, моторизованого асинхронним двигуном АВЕ-042-4М (рисунок 5).

Модель контуру складається з наступних ланок з бібліотеки макросів:

- ланка визначення величини помилки, реалізована на алгебраїчному суматорі (вихід: delta), при цьому уставку можна задавати джерелом імпульсної напруги);

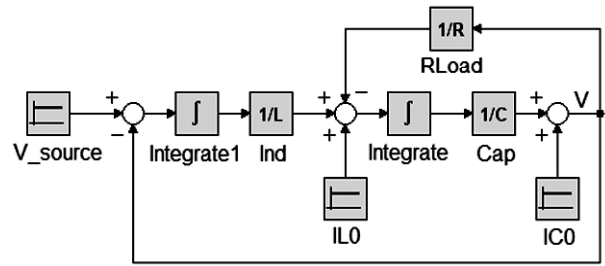


Рисунок 2 – Блок-схема (бібліотека «Signal»), що представляє ММ коливальної ланки

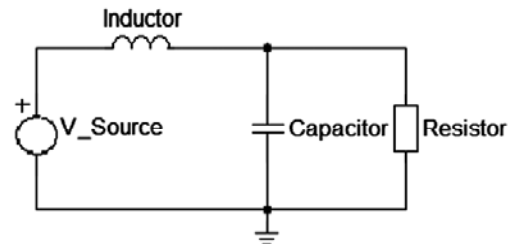


Рисунок 3 – Фізична схема (бібліотека «Iconic diagrams») фільтра

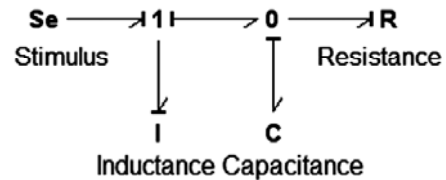


Рисунок 4 – Модель ланки в формі зв'язаного графа (бібліотека «Bond Graph»)

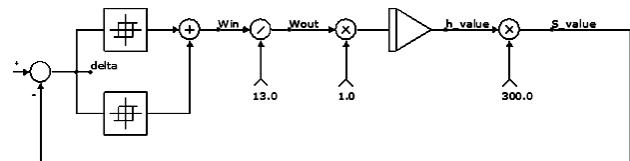


Рисунок 5 – Структурна схема моделі САР клапану в MC9

- ланка зони нечутливості (вихід: Win до 1300 об/мін, або 21,6 об/с), реалізована на двох тригерах Шмідта (ланки гістерезису) із сполученими межами петель;
- ланка редуктора як блок ділення на передаточне число 13:1 (вихід Wout 100 об/мін);
- ланка інтегратора, яка моделює обертально-поступальну передачу із передаточним числом 1 мм/об, вихідна величина – h_value (мм);
- ланка множення на 300 для розрахунку вихідної величини S_value (мм²).

Моделі ланок САР складаються з поведінкових елементів та джерел, що керуються напругою, які забезпечують направленість сигналу через гальванічний розв'язок. Отже, програма класу ECAD має інструментальні можливості для формування моделей САР та мехатронних систем, завдяки наявності поведінкових елементів та можливості реалізації на їхній основі квазікаузального підходу.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Математична еквівалентність схем рис. 2–4 підтверджується результатами симуляції, а саме розгортками процесу в часі (аргумент – time), представленими на рисунку 6.

Блок-схема детально зображує каузальні зв'язки і є графічною аналогією формули, побудованою з елементів з бібліотеки Block із вихідним сигналом Signal_V (верхня крива). Фізична схема оперує компонентами з електричного домену (бібліотека Iconic), а аналізованою функцією є напруга на резисторі VoltageResistor (середня крива). Експеримент із коливальною ланкою показав, що найбільш компактною формою ММ є зв'язаний граф (бібліотека Bond) із вихідною функцією ResistanceEffort (нижня крива рис. 6).

Вочевидь, що результати симуляції моделей різних форм є ідентичними, отже можна використовувати будь-яку форму подання моделі, але необхідно враховувати, що відмінність структурного і фізичного мультидоменного моделювання полягає не тільки у формі завдання вихідної інформації на етапі моделінгу, але і в використовуваних методах чисельного інтегрування диференціальних рівнянь на етапі симуляції.

Внаслідок обмежень формату статті, ми не можемо навести тут всі результати проведених досліджень [2, 10], представимо тільки загальні висновки: користувач повинен сформулювати найбільш раціональну, з погляду на алгоритм симуляції обраного ПЗ, концепцію моделі, при цьому слід враховувати можливість запобігання алгоритмічних збоїв. Тобто на перше місце пропонуються брати до уваги особливості методів симуляції, а не моделінгу. Для спеціаліста з електроніки важливими критеріями є наявність в бібліотеках моделей з електронного домену та процедур синтезу регуляторів.

Результати аналізу моторизованого клапану в МС9 представлені на рисунку 7.

Функції емулюються через напругу у відповідних вузлах: площа просвіту – $V(S_value)$ (верхня крива) та частота обертання двигуна – $V(WIN)$ (нижня крива).

За результатами моделювання видно роботу ланки зони нечутливості, яка переводить клапан в переривчастий режим

роботи при швидкості зміни уставки, меншій за швидкість позиціонування штока клапана. Зміна частоти та напрямку обертання двигуна від 0 до 21,6 об/с також моделюється адекватно, отже використання ECAD-програм для дослідження МС є принципово можливим. Клас підсистем МС можна розширити на системи із перетворенням частоти (для систем плавного пуску), управління кроковими двигунами тощо.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Можна рекомендувати ECAD, а демо-версії ECAD – в межах дисциплін учбового процесу при підготовці спеціалістів напрямку «Електроніка» для дослідження мультидоменних МС та САУ. Для акаузального моделювання ECAD має обмеження, через необхідність емуляції об'єктів неелектричної природи через їхні поведінкові моделі в базисі: генератори потенціалу та потоку, ємність, індуктивність, електричний опір та гіратор. Цей базис є універсальним та складається з елементів, що абстрактно моделюють основні фізичні поняття (подібно до мови BG – це градієнт потенціалу (зусилля), потік, інерційні елементи, розсіювач енергії та гіратор). Квазікаузальне моделювання в більшості ECAD-систем обмежується задачами дослідження САР без мікроконтролерів.

Незалежно від обраного ПЗ, можна використовувати загальні підходи в моделюванні МС та САУ в ПЗ, інструменти якого дозволяють відтворити цю модель на прийнятному рівні абстракції, а солвер буде здатний надійно, без алгоритмічних збоїв здійснити симуляцію.

Методику моделінгу можна представити в наступному вигляді:

- вибір підходу та форми представлення моделі;
- вибір компонентів моделі з інструментального набору обраного ПЗ;
- топологічне з'єднання компонентів моделі (структурний синтез);

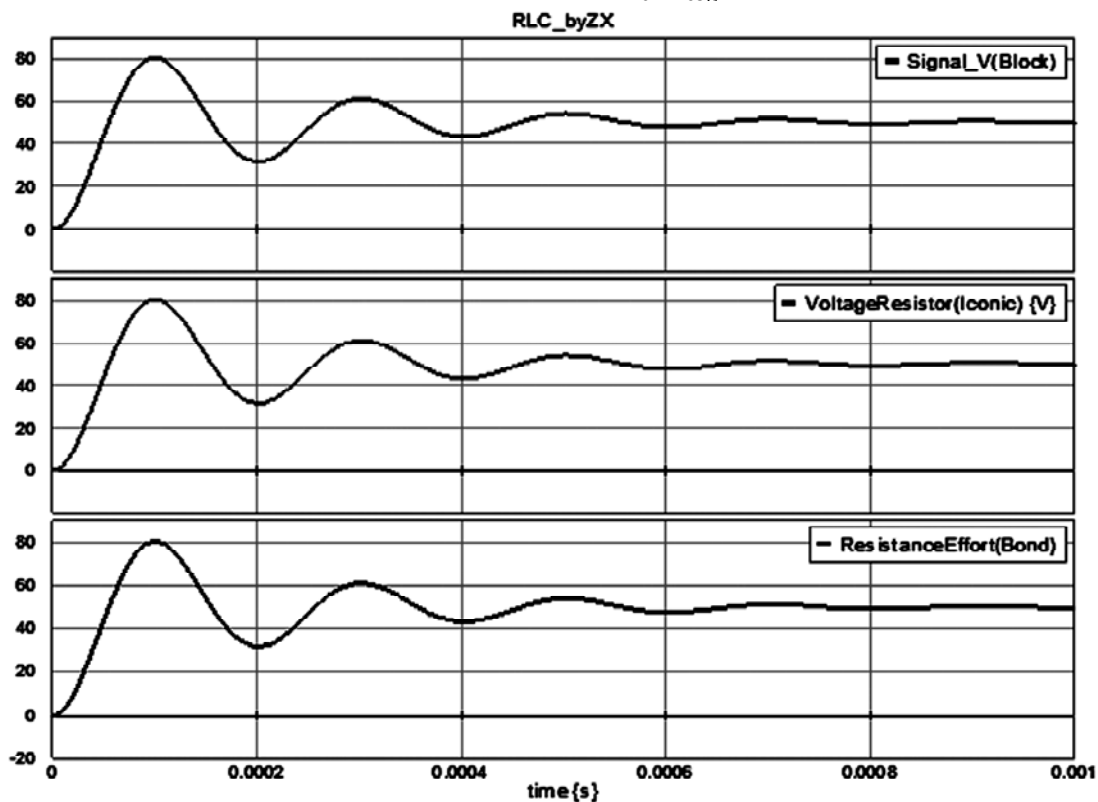


Рисунок 6 – Результати симуляції коливальної ланки трьома моделями

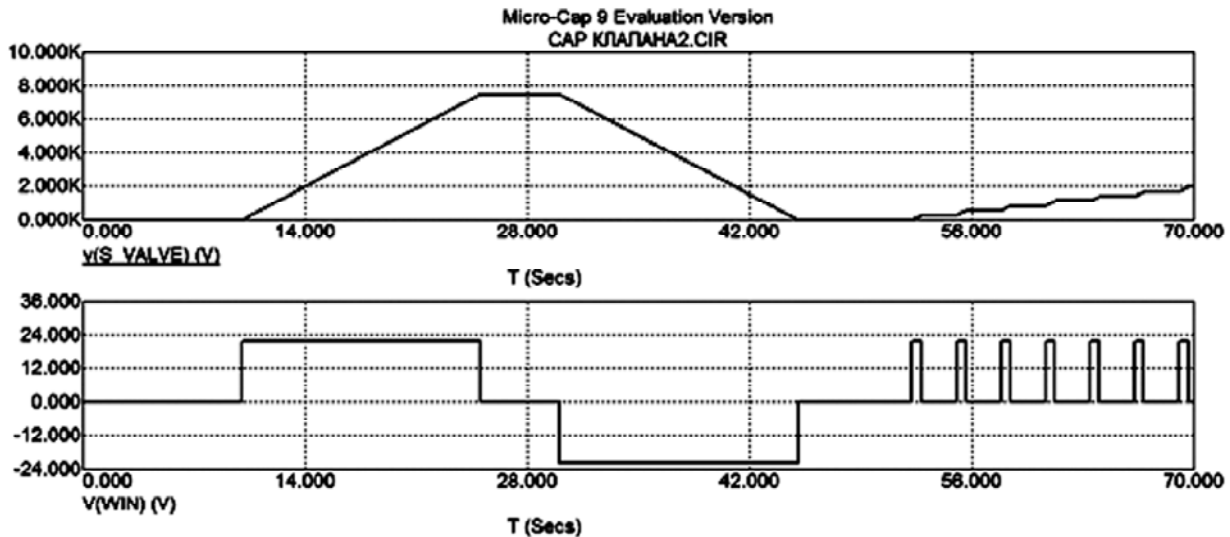


Рисунок 7 – Результати моделювання МС в програмі MicroCap 9.0: зміна просвіту вікна клапана (верхня крива); частота обертання двигуна клапана (нижня крива)

- г) параметричний синтез та апріорна корекція моделі;
- д) компонентно-топологічна (апостеріорна) корекція моделі.

Етап симуляції можна поділити на три складові:

- а) вибір алгоритму моделювання (відповідно до обраного підходу) та його параметрів;
- б) обирання фазових змінних для моніторингу;
- в) запуск симуляції та використання постпроцесора для візуалізації результатів.

Точність моделювання та, як слідство, якість прийнятих рішень залежить не тільки від кількості врахованих факторів на етапі моделінгу та специфіки обраного ПЗ, але й від грамотно підібраних математичних засобів на етапі симуляції та оптимізації. Треба також відзначити, що задача вибору методу симуляції (алгоритму моделювання) дуже комплексна, багатокритеріальна, залежить від багатьох факторів і є темою окремого дослідження [2].

Етап параметричної оптимізації не відноситься до етапу симуляції, але залежить від нього: якщо симуляція призводить до неадекватних результатів, то проводити оптимізацію, у загальному випадку, не має сенсу (окрім випадків, коли варіюється параметр моделі, що відповідає за її жорсткість). Оптимізація є невід'ємною складовою сучасних ЕСАД та САЕ (наприклад, для знаходження коефіцієнтів регуляторів при налагодженні САУ) [2, 10].

Методика проведення оптимізації:

- а) вибір алгоритму оптимізації і його настройка;
- б) вибір параметрів моделі, що потребують оптимізації;
- в) встановлення критерію, або критеріїв оптимізації;
- г) запуск оптимізації та використання постпроцесора.

ВИСНОВКИ

В роботі вперше систематизовано підходи та засоби для моделювання мехатронних систем, що розглядаються як різновид САУ, орієнтовано на дослідника, який є спеціалістом в галузі електроніки. Рекомендовано в якості інструмента моделювання МС використовувати ЕСАД системи, які дозволяють моделювати САР та МС в домені електроніки завдяки наявності інструментів поведінкового моделювання. Запропоновано також квазікаузальний підхід моделювання МС в ЕСАД, теоретично та експериментально визначені його особливості, та область адекватності. Виходячи з вимог цільової групи, визначені специфіка та обмеження при моделюванні МС в САЕ та в САЕ.

Вперше, на основі визначених критеріїв виконано порівняльний аналіз програм САЕ, САЕ та ЕСАД з огляду на їхню застосовність для моделювання МС, на основі чого вироблені рекомендації по вибору програми та універсальна методика моделювання, що має практичну цінність для інженерів-електронників, які проектують системи автоматичного регулювання та управління механічними об'єктами; отримані практичні та теоретичні результати можуть бути використані в процесі навчання студентів напряму «Електроніка», зокрема в курсах «Моделювання систем», «Теорія автоматичного управління».

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні критеріїв якості моделювання на область симуляції та оптимізації й розвитку методичного забезпечення автоматизованого проектування САУ/МС.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в межах науково-дослідної роботи «Теоретичне та експериментальне дослідження мікро- та наноструктурних матеріалів» кафедри мікро- та наноелектроніки Запорізького національного технічного університету.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Simulation Tools [Electronic resource]. – Access mode: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
2. Василенко О. В. Моделювання електронних систем / О. В. Василенко. – Запоріжжя : ЗДІА, 2013. – 128 с.
3. Василенко О. В. Моделювання в електроніці : навчальний посібник / О. В. Василенко, А. В. Переверзев. – Запоріжжя : ЗДІА, 2003. – 160 с.
4. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы применения : учеб. пособие / Ю. В. Подураев. – М. : Машиностроение, 2006. – 256 с.
5. Воронин А. В. Моделирование мехатронных систем : учебное пособие / А. В. Воронин. – Томск : ТПУ, 2008. – 137 с.
6. Клиначев Н. В. Обзор архитектурного построения программ математического моделирования динамических систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/educat/news/klinachev>
7. Норенков И. П. Автоматизированное проектирование / И. П. Норенков. – М. : Логос, 2000. – 188 с.
8. Клиначев Н. В. Введение в дисциплину «Основы моделирования систем» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://model.exponenta.ru/lectures/sml_01.htm
9. Колесов Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учебное пособие / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 224 с.

10. Petrenko Y. I. Research of algorithms and development of modeling and simulation technique of automatic control systems in 20-sim / Y. I. Petrenko // Матеріали XVII науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : ЗДІА, 2013. – С. 48–49.
11. Differ Ir. H. G. 20-sim 4.3: Reference Manual / Ir. H. G Differ. – 2012.– 1099 с. [Electronic resource]. – Access mode: www.controllab.nl/en/products/books.html
12. Simscape Overview [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.mathworks.com/products/simscape/index.html>
13. О программе для моделирования систем автоматического управления SamSim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://samsim2002.chat.ru>
14. SimApp, Ordering Information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simapp.com/order-simapp.php>
15. VisSim Product Overview [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.vissim.com/products/vissim.html>
16. Dymola Dynamic Modeling Laboratory User's Manual, Version 5.3a [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/Lect/MMPS/Refs/Dymola5Manual.pdf>
17. Differential Algebraic System Solver [Electronic resource]. – Access mode: <http://acronyms.thefreedictionary.com/DASSL>

Стаття надійшла до редакції 25.12.2014.

Після доробки 27.02.2014.

Василенко О. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри мікро- і наноелектроніки, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

АНАЛИЗ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Решена задача разработки методического обеспечения для моделирования мехатронных систем на структурном и функциональном уровнях абстракции. Объектом исследования являлся процесс моделирования мехатронных систем и систем автоматизированного управления. Предмет исследования составляют программы инжиниринга и автоматизированного проектирования технических систем, универсальные математические процессоры (CAE, CAD и CAS-системы соответственно). Цель работы: повысить эффективность процесса принятия решений по выбору оптимального программного и математического обеспечения для моделирования мехатронных систем инженерами-электронщиками.

Исследования мехатронных систем позволили выявить их особенности как мультидоменных объектов, и общие черты – как подсистем автоматизированного управления, на основе чего сформированы основные требования к программам моделирования. Анализ математического и программного обеспечения CAE, CAD и CAS и эксперименты по моделированию и симуляции при каузальном и мультидоменном подходах, позволили определить критерии для сравнительного анализа и сформировать рекомендации по выбору программы для моделирования, оптимальной для достижения поставленных целей исследования мехатронных систем. На основе анализа программ, разработана универсальная методика моделирования и оптимизации мехатронных систем в цикле их автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: мехатроника, системы автоматического управления, моделинг, симуляция, методика моделирования.

Vasylenko O. V.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Micro- & Nanoelectronics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

ANALYSIS OF PROGRAMS FOR MECHATRONIC SYSTEMS MODELING

The problem of development of methodological support for simulation of mechatronic systems for structural and functional levels of abstraction has been solved. Object of study is the simulation process of mechatronic systems and automated control systems. The subject of the research are programs of engineering and computer-aided design of technical systems, universal mathematical processors (CAE, CAD and CAS-system, respectively). The purpose of the work is to improve the efficiency of decision-making process for engineers of electronics in selecting the best software and mathematical base for modeling of mechatronic systems.

Mechatronic systems research revealed their features as multidomain objects and features in common – as subsystems of automated control, which are allow forming the main requirements for simulation programs. The analysis of mathematical base and software of CAE, CAD and CAS-systems and results of experiments on modeling and simulation at the causal and multi-domain approaches, made possible to determine the criteria for comparative analysis and to generate recommendations for choosing optimal modeling program for achieving the goals of study of mechatronic system. Based on the analysis of programs, the universal method of modeling and optimization of mechatronic systems in a cycle of computer-aided design has been developed.

Keywords: mechatronic systems, automatic control systems, modeling, simulation, modeling methodology.

REFERENCES

1. Simulation Tools [Elektronic resource]. Access mode: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
2. Vasylenko O. V. Modeljuvannja elektronnyh system. Zaporizhzhja, Zaporiz'ka derzhavna akademija, 2013, 128 p.
3. Vasylenko O. V., Pereverzjev A. V. Modeljuvannja v elektronici: uchbovyj posibnyk. Zaporizhzhja, Zaporiz'ka derzhavna akademija, 2003, 160 p.
4. Poduraev Ju. V. Mehatronika: osnovy, metody primenenija: uchebnoe posobie. Moscow, Mashinostroenie, 2006, 256 p.
5. Voronin A. V. Modelirovanie mehatronnyh sistem: uchebnoe posobie. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2008, 137 p.
6. Klinachev N. V. Obzor arhitekturnogo postroenija programm matematicheskogo modelirovanija dinamicheskikh sistem [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://www.exponenta.ru/educat/news/klinachev>
7. Norenkov I. P. Avtomatizirovannoe proektirovanie. Moscow, Logos, 2000, 188 p.
8. Klinachev N. V. Vvedenie v disciplinu «Osnovy modelirovanija sistem» [Elektronnij resurs]. Access mode: http://model.exponenta.ru/lectures/sml_01.htm
9. Kolesov Ju. B., Senichenkov Ju. B. Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy: Uchebnoe posobie. SPb, BHV-Peterburg, 2006, 224 p.
10. Petrenko Y. I. Research of algorithms and development of modeling and simulation technique of automatic control systems in 20-sim, *Materialy XVII NTK studentiv, magistrantiv, aspirantiv i vykladachiv ZDIA*. Zaporizhzhja, ZDIA, 2013, С. 48–49.
11. Differ Ir. H. G. 20-sim 4.3: Reference Manual, 2012, 1099 p. [Electronic resource]. – Access mode: www.controllab.nl/en/products/books.html
12. Simscape Overview [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://www.mathworks.com/products/simscape/index.html>
13. О программе для моделирования систем автоматического управления SamSim [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://samsim2002.chat.ru>
14. SimApp, Ordering Information [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://www.simapp.com/order-simapp.php>
15. VisSim Product Overview [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://www.vissim.com/products/vissim.html>
16. Dymola Dynamic Modeling Laboratory User's Manual, Version 5.3a [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: <http://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/Lect/MMPS/Refs/Dymola5Manual.pdf>
17. Differential Algebraic System Solver [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://acronyms.thefreedictionary.com/DASSL>