

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних занять та самостійної роботи

з дисципліни

„СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ»

для студентів спеціальностей

175 „Інформаційно-вимірювальні технології“

освітня програма: „Інформаційні системи моніторингу і контролю“,

176 „Мікро- та наносистемна техніка“

освітня програма: „Мікро- та нанoeлектронні прилади і пристрої“

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

денної й заочної форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних занять та самостійної роботи з дисципліни “Системи автоматичного керування” для студентів спеціальностей 175 „Інформаційно-вимірювальні технології“ освітня програма „Інформаційні системи моніторингу і контролю“, 176 „Мікро- та наносистемна техніка“ освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“ першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної й заочної форм навчання / Укл.: Ольга ВАСИЛЕНКО. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 49с.

Укладачі: Ольга ВАСИЛЕНКО, канд. техн. наук, доцент

Рецензент: Валентин ПОГОСОВ, проф., д-р фіз.-мат. наук

Відповідальний за випуск: Андрій КОРОТУН, канд. фіз.-мат. наук,
професор

Затверджено
на засіданні кафедри
інформаційної безпеки та
наноелектроніки

Протокол № 5
від “ 22 ” січня 2025 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФІБЕК
Протокол № 7
від “ 29 ” січня 2025 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 «ПРОГРАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ (ІВС)».....	6
1.1 Поняття моделювання.....	6
1.2 Каузальне та акаузальне моделювання.....	8
1.3 Порівняльний аналіз програм.....	9
1.4 Етапи виконання роботи.....	16
1.5 Контрольні питання.....	18
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «МОДЕЛЮВАННЯ НА СИСТЕМНОМУ ТА СТРУКТУРНОМУ РІВНЯХ АБСТРАКЦІЇ. МУЛЬТИДОМЕННЕ МОДЕЛЮВАННЯ».....	19
2.1 Підходи до моделювання систем на макрорівні.....	19
2.2 Математичний базис моделювання систем.....	23
2.3 Вибір класу САПР для проектування систем.....	24
2.4 Реалізація моделювання систем в програмах ECAD.....	25
2.5 Етапи виконання роботи.....	27
2.6 Контрольні запитання.....	27
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 «МОДЕЛЮВАННЯ ІВС В САЕ».....	28
3.1 Можливості програми 20-sim.....	28
3.2 Проектувальник регуляторів та редактор лінійних систем в 20-sim.....	31
3.3 Методика моделювання САК.....	37
3.4 Методика проведення моделювання та оптимізації.....	38
3.5 Етапи виконання роботи.....	39
3.6 Контрольні запитання.....	39
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	40
Додаток А Математичні процесори для моделювання в електроніці.....	42
Додаток Б Загальна структура 20-sim.....	43
Додаток В Класифікація методів симуляції.....	44
Додаток Г Процедури етапу компіляції моделі в САЕ.....	45
Додаток Д Класифікація задач оптимізації.....	46
Додаток Е Перелік питань до контролю і ДКР.....	47

ВСТУП

Системи автоматичного керування – це курс теоретично-практичного спрямування, що поєднує в собі теорію автоматичного керування (ТАК) із її практичним застосуванням при проектуванні оптимальних автоматизованих систем.

Вивчення навчальної дисциплін «Системи автоматичного керування» дозволить студентові приймати обґрунтовані рішення при подальшому проектуванні САК та систем автоматичного регулювання (САР).

До напрямків досліджень відносять:

- розробку Розумних систем (Smart House, Smart Sensors etc.);
- моделювання САР та САК;
- автоматизацію проектування САК;
- застосування проривних технологій для перетворення автоматизованих систем на кібер-фізичні системи.

Вивчення навчальної дисципліни «Системи автоматичного керування» дозволить студентові ознайомитися з принципами синтезу, аналізу та оптимізації систем автоматичного контролю та регулювання (САК та САР).

Завдання дисципліни.

Основні завдання вивчення дисципліни «Системи автоматичного керування» полягають у:

- **Пізнавальні** – освоєння теорії та принципів проектування оптимальної системи автоматичного керування.
- **Практичні** – сформувати практичні навички дослідження систем автоматичного керування.

Мета: одержання студентами знань в галузі проектування систем автоматичного керування: синтезу та оптимізації систем автоматичного регулювання та керування, видів та засобів їх аналізу, області їхнього використання.

У результаті вивчення дисципліни «Системи автоматичного керування» здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти повинен отримати:

загальні компетентності:

Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово. Здатність спілкуватися іноземними мовами. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

спеціальні (фахові) компетентності:

Здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проєктування та застосування мікро- та наносистемної техніки. Здатність виконувати аналіз предметної області та нормативної документації, необхідної для проєктування та застосування приладів та пристроїв мікро- та наносистемної техніки. Здатність використовувати математичні принципи і методи для проєктування та застосування мікро- та наносистемної техніки. Здатність застосовувати відповідні наукові та інженерні методи, сучасні інформаційні технології і комп'ютерне програмне забезпечення, комп'ютерні мережі, бази даних та Інтернет-ресурси для розв'язання професійних задач в галузі мікро- та наносистемної техніки. Здатність ідентифікувати, класифікувати, оцінювати і описувати процеси у мікро- та наносистемній техніці за допомогою побудови і аналізу їх фізичних і математичних моделей. Здатність застосовувати творчий та інноваційний потенціал в синтезі інженерних рішень і в розробці конструктивних елементів геліоенергетики, приладів фізичного та біомедичного призначення. Здатність розв'язувати інженерні задачі в галузі мікро- та наносистемної техніки з урахуванням всіх аспектів розробки, проєктування, виробництва, експлуатації та модернізації.

У результаті вивчення дисципліни «Системи автоматичного керування» здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти повинен

знати:

- ❖ основи теорії автоматичного керування;
- ❖ принципи дослідження САК в програмах CAD та CAE;

вміти:

- ❖ застосовувати на практиці теорію автоматичного керування при синтезі та аналізі САК та САР;
- ❖ синтезувати та аналізувати базові схеми САК;
- ❖ підбирати параметри PID контролера.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 «ПРОГРАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ (ІВС)»

Мета: навчитися обирати оптимальну програму для моделювання ІВС на певному рівні абстракції.

1.1 Поняття моделювання

Моделювання є одним з найважливіших етапів проектування будь-якого технічного об'єкта, що дозволяє замінити або значно скоротити етапи налагодження і натурних випробувань. Роль моделювання особливо висока, коли натурні випробування дуже дорогі або небезпечні, як, наприклад, при роботі з космічними апаратами, хімічними і ядерними реакторами та іншими об'єктами.

Термін «моделювання» має дві складові: *modeling & simulation*:

- «*modeling*» – відноситься, насамперед, до процесу побудови моделей об'єктів і систем;

- «*simulation*» – означає проведення комп'ютерного експерименту з моделлю, з візуалізацією результатів експерименту.

Математично технічні системи можуть описуватися різними способами, в залежності від класу системи:

- безперервні системи, описувані диференціальними рівняннями;
- дискретні системи, описувані кінцево-різницевиими рівняннями;
- системи з розподіленими параметрами, які описуються диференціальними рівняннями в приватних похідних;

- системи з післядією, описувані функціонально-диференціальними рівняннями. Такі системи виникають тоді, коли протікання процесу визначається не тільки станом системи в даний момент, але також і передісторією процесу;

- стохастичні системи, описувані ймовірнісними методами.

Для моделювання на нижніх рівнях абстракції використовують об'єктно-орієнтовані програми CAD (Computer-aided Design) для моделювання в електронному домені – ECAD, electronics CAD).

На верхніх рівнях абстракції використовують CAE (Computer-aided engineering). Також на всіх рівнях абстракції використовують універсальні математичні процесори (наприклад, MatCad). (CAM

(Computer-aided manufacturing) призначені для автоматизації виробництва (див. Додаток А).

Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) та системи автоматичного регулювання/керування (САР/САК) фактично будуються на базі електронних пристроїв. Системи із актуатором (виконавчим органом, механізмом), що перетворює електричну енергію на механічну (рух, зокрема обертовий) є мехатронними системами (МС), це двигуни, клапани, засувки, електромеханічні реле тощо.

МС призначені для реалізації заданого руху й основу їх становить деякий виконавчий механізм та привод – електромеханічний, гідравлічний або якийсь інший. Отже, МС, здатні забезпечувати програмований рух виконавчого органу (актуатора) під керуванням впливами електронної системи управління. Прикладами сучасних мехатронних пристроїв є модулі верстатів і промислових роботів, побутова техніка тощо.

САК (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 САР, або САК, проектуванням якої можуть займатися інженери з електронної техніки.

Моделювання МС вимагає використання програмного забезпечення (ПЗ), 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 моделювання та симуляції (modeling & simulation) [1], які можуть вплинути на якість моделювання МС в цілому.

Об'єктом дослідження в даній лабораторній/самостійній роботі є способи та засоби моделювання мехатронних систем, інформаційно-вимірювальних систем і систем автоматизованого керування, предметом дослідження – програми інжинірингу і автоматизованого проектування технічних систем, універсальні математичні процесори (CAE, CAD и CAS-системи відповідно).

1.2 Каузальне та акаузальне моделювання

Зазвичай, ІВС та САК моделюються на верхньому рівні абстракції (макрорівні), де розрізняють структурний (блочний) і фізичний мультидоменний підходи, кожен з яких має свої переваги та недоліки [4]. При цьому за кожним з двох методів можуть стояти певні особливості математичного ядра обраного програмного забезпечення (ПЗ). Точність моделінгу залежить від кількості врахованих властивостей системи, точність симуляції – від правильно відібраних користувачем інструментів та врахування особливостей використаного ПЗ. Зважаючи на неупинний розвиток як технічних систем, так і засобів їхнього дослідження, аналіз особливостей ПЗ та підходів у моделюванні для підвищення якості прийняття рішень при проектуванні та дослідженні систем вимірювальної техніки [5], є актуальною задачею.

Вимірювальні системи, як частина САР та САК, є одним з видів динамічних систем (ДС), тобто є об'єктами, для яких однозначно визначені поняття стану як сукупності величин у даний проміжок часу, та визначено закон, котрий описує зміни (еволюцію) початкового стану з перебігом часу [4]. Будь-яка система вимагає управління, тобто повинна бути ідентифікована для побудови її моделі з метою створення необхідного керуючого пристрою для неї, завдання якого – забезпечення складних координованих рухів механічної частини [4]. За поведінкою моделі можна, у деякому наближенні, судити про поведінку реальної системи, що через складність або неможливість проведення випробувань на реальній системі має сенс [2-7]. Оскільки САК 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 включає наступні етапи:

- побудову та дослідження математичних моделей (ММ) цифрової та силової електроніки, моделі безперервної (механічної) частини;

- дослідження характеристик системи в цілому (як САР/САК).

Таким чином, необхідно використовувати як доменне моделювання (на першому етапі), так і каузальне (на другому етапі).

1.3 Порівняльний аналіз програм

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]. З CAD-систем для проєктування МС використовується MCAD [5], які призначені для твердотілого 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, IThink, 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 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]. Важливо відзначити, що більшість цих моделей закривають всі аспекти функціонування конкретних мехатронних пристроїв, і з цієї точки зору дуже корисні проєктувальникам. Редактор фільтрів і проєктувальник регуляторів також мають важливе значення при створенні САК та їх аналізі; 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. 20-sim має функції імпортування та експортування редагованої системи в Matlab/Simulink, в текстовий файл, в символічній або числовій формах тощо.

Оскільки моделі можуть бути представлені безпосередньо диференціальними рівняннями, то для прогнозування їх поведінки у часі також можуть бути використані універсальні математичні процесори, CAS (Computer Algebra System), 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 моделінгу та симуляції, які можна узагальнити як підхід. Оскільки ІВС, як варіант ДС є складною агрегативною системою [7], її можна моделювати, використовуючи мультидоменний підхід, але, в той же час, МС будується як САК, які традиційно аналізуються при каузальному підході, тому для ефективного дослідження САК 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 прийняттого ПЗ для досліджень на верхніх рівнях абстракції: системному та структурному.

Як зазначено вище, САК – 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 (системи), а в основі лежить елемент (блок), модель САК буде композицією блоків, які взаємодіють між собою через функціональні зв'язки. Оскільки в енергетичних ланцюгах потік енергії може змінювати напрямок, то для елементів фізичних схем входи і виходи не визначені, а модель будується як перетворюючий енергію ланцюг. При такому підході необхідно обирати програми мультидоменного (**акаузального**) моделювання [2,6-8].

Як показав аналіз таких програм, техніка акаузального моделювання заснована на використанні бібліотеки моделей елементів пристроїв з різних енергетичних доменів (електричних, механічних, гідравлічних і т.д.), з яких можна складати схеми фізичні принципи, а загальна модель є системою алгебро-диференційних рівнянь. Доменний підхід реалізується в більшості ECAD систем, та в деяких САЕ програмах, наприклад, в Simscape, 20-sim, Dymola тощо [2,10-16]. Цей підхід відрізняється від прийнятого в теорії автоматичного керування (ТАК) 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-bond graph [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.

Дослідження математичного забезпечення (МЗ) (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 мехатронних 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 САЕ здатні ці проблеми розв'язувати в автоматичному режимі, що підтверджено аналізом структур із алгебраїчними петлями в середовищі 20-sim [2,10].

Деякі САЕ-системи (20-sim, Maplesim, SystemModeler, Simplorer, Simscape, 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.

ЕСАД призначені, перш за все, для проектування електронних схем (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 ЕСАД для дослідження мехатронних систем і САК є одним з факторів забезпечення адекватності результатів.

В ЕСАД можна також скласти моделі САК на основі стандартних блоків. Однонаправленість сигналу в блоках та елементах САК 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 перетворювачами енергії в САК наведено на рисунку 1.1: тонкі стрілки моделюють інформаційні потоки, товсті – енергетичні.

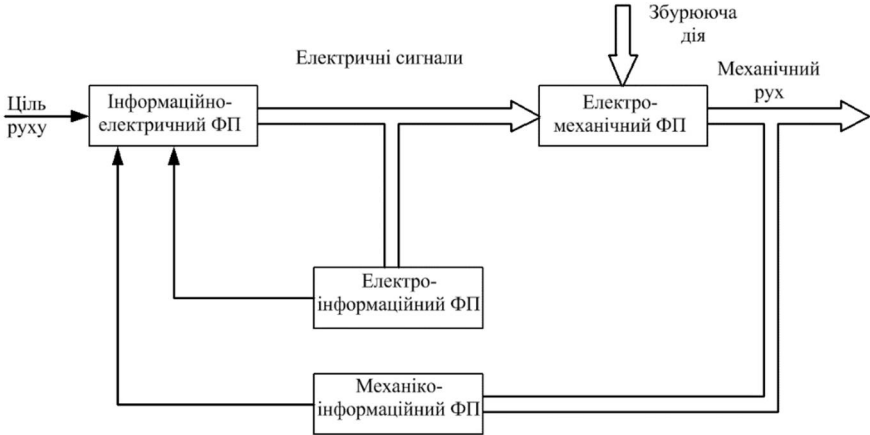


Рисунок 1.1 – Інформаційні й енергетичні потоки в САК

Для прийняття оптимального рішення щодо вибору ПЗ, тобто їхньої придатності для моделювання МС, складено таблицю 1.1, де визначено основні показники для порівняння найбільш популярних систем САД, САС та САЕ.

Таблиця 1.1 – Порівняння можливостей САД / САС / САЕ

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 квазі-каузальний підхід	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+

Критерії для порівняння	MicroCap	Multisim	Spice	MATLAB	MathModelica	MapleSim	Simscape	VisSim	20-sim	Dymola
Мова програмування моделей										
власна	+	+		+	-	+	+	+	+	-
Spice/Modelica	+		+	-	+	+	-	-	-	+
Бібліотеки										
блок-схеми (Control/Signal)	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
електронні	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
термічні	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
гідравлічні	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
механічні (1D)	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
автомобільних систем	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+
Взаємодія										
конвертування до інших форматів	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
імпорт із Simulink					-	+		-	-	-
експорт до Simulink					-	+		+	+	+
Безкоштовна версія	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-
Можливості програмування/Розробки власних моделей										
обмежені		●								●
середні	●							●	●	
широкі			●	●	●	●	●			
web-публікації	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-

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 автоматизованого проектування [3], тобто вони можуть не мати менеджера проекту, власного конструктора друкованих плат та редактора проектної документації.

Загальний виявлений недолік CAE та CAS систем – слабкі демо-версії та вища, порівняно із ECAD, вартість професійних версій. Більшість програм класу ECAD не має інструментів оптимізації ПД-регуляторів та зосереджені на моделюванні в електронному домені, однак, поведінкове моделювання та квазікаузальний підхід дозволяють адекватно оцінити основні характеристики на макрорівні.

Для прийняття рішення стосовно вибору ПЗ для моделювання 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 САК. Отже, первинні дослідження на макрорівні із ціллю оптимізації топології САК/МС та параметрів регулятора можна рекомендувати проводити в CAE-системах, зокрема в 20-sim, або в VisSim.

2. Якщо для подальших досліджень необхідно зберегти специфіку фізичних процесів в підсистемах, 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 – САК, вони не є придатними.

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

- здатність обраного ПЗ досліджувати модель САК;

- ергономічність та потужність ПЗ: можливість вибору підходу, способу моделінгу, метода інтегрування та оптимізації, простота отримання демо-версій та оновлень ПЗ та МЗ.

1.4 Етапи виконання роботи

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 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/САК, для цього складемо її моделі в САЕ-програмі 20-sim [10,11] трьома способами: блок-схемою (рисунок 1.2), емулюємо фізичною схемою у вигляді електричного фільтра другого порядку ($V_source=50$, $L=0.0001$, $C=0.00001$, $R=10$) (рисунок 1.3) та зв'язаним графом (рисунок 1.4). Параметри схем однакові, початкові умови – нульові.

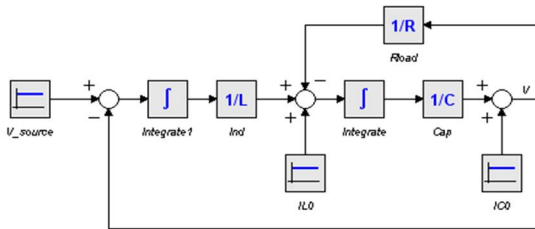


Рисунок 1.2 – Модель через блок-схеми з бібліотеки «Signal»

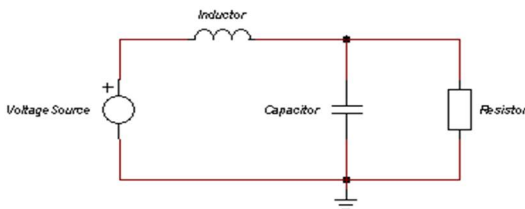


Рисунок 1.3 – Фізична схема (бібліотека «Iconic diagrams»)

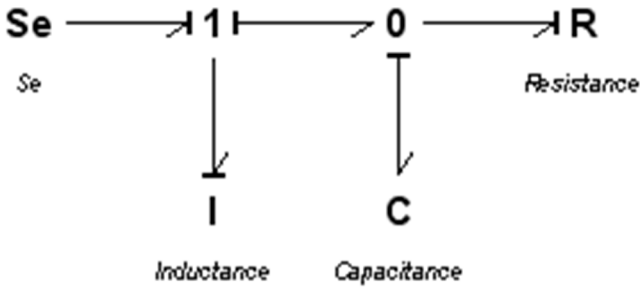


Рисунок 1.4 – Модель в формі зв'язаного графа (бібліотека «Bond Graph»)

Експеримент із коливальною ланкою показав, що найбільш компактною формою представлення ММ є зв'язаний граф. Фізична схема оперує традиційними компонентами для даного домену (електричного), а блок-схема детально зображує каузальні зв'язки і є графічною аналогією формули, перебудованої відповідним чином, яка описує поведінку системи. Математична еквівалентність представлених схем підтверджується результатами симуляції, тобто часовими діаграмами на рисунку 1.5 (Signal, Iconic та Bond відповідно до рис. 1.2-1.4).

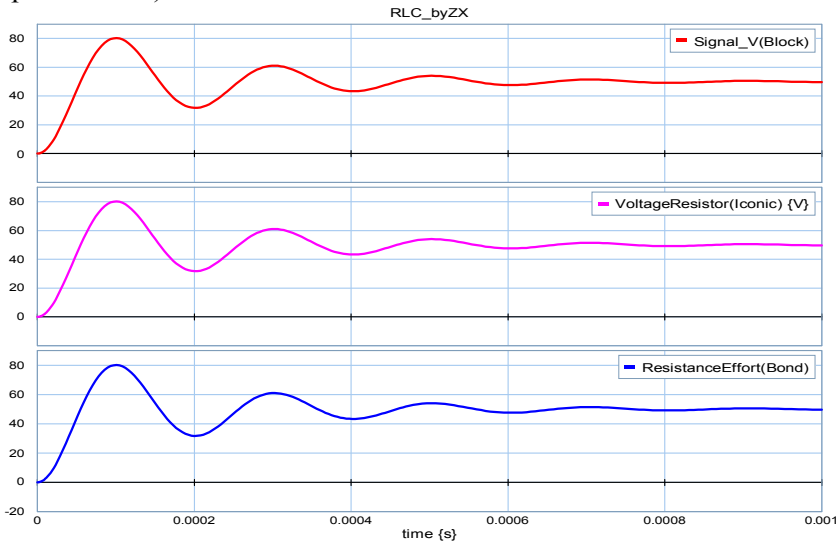


Рисунок 1.5 – Результати симуляції коливальної ланки трьома моделями

Результати симуляції в САЕ 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.

Таким чином, користувач має сформувати 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.

1.5 Контрольні питання

1. Поняття математичної моделі.
2. Що таке моделінг.
3. Що таке симуляція.
4. Доведіть, що САК – це мультидоменна система (на прикладах).
5. Акаузальний підхід в моделюванні.
6. Каузальний підхід в моделюванні.
7. Мультидоменне моделювання
8. Переваги та недоліки CAS для моделювання ІВС та САК
9. Переваги та недоліки САЕ для моделювання ІВС та САК
10. Переваги та недоліки САД для моделювання ІВС та САК
11. Чому для дослідження САК та ІВС можна використовувати ЕСАД?
12. Методика вибору оптимальної програми для моделювання ІВС та САК.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «МОДЕЛЮВАННЯ НА СИСТЕМНОМУ ТА СТРУКТУРНОМУ РІВНЯХ АБСТРАКЦІЇ. МУЛЬТИДОМЕННЕ МОДЕЛЮВАННЯ»

Мета: ознайомитися із принципами моделювання на системному та структурному рівнях абстракції та мультидоменного моделювання.

2.1 Підходи до моделювання систем на макрорівні

Засоби моделювання мультидоменних систем повинні допускати спільне моделювання цих частин на єдиній методологічній основі, даючи можливість будувати і досліджувати багатоаспектні моделі [15]. Реалізувати це можливо двома способами. По-перше, можна перейти до єдиної системи диференціальних рівнянь. У цьому випадку всі фізичні особливості окремих частин системи будуть загублені. Варіантом такого підходу є **структурне** моделювання, де всі змінні є скалярними сигналами і їх можна з'єднувати (як у структурній схемі). Недолік підходу – великий обсяг попередніх перетворень (у випадку системи рівнянь), або одержання схеми, що мало нагадує реальну систему.

Інший варіант – використання систем моделювання, які здатні на єдиній методологічній основі моделювати механічні, електричні й інформаційні компоненти, тобто поєднувати їх у єдину схему, зберігаючи при цьому звичні для фахівців у предметних областях способи завдання вихідної інформації (**системний**, мультидоменний підхід).

Сучасні пакети візуального компонентного моделювання використовують один з двох методів представлення інформації про досліджувану систему – структурне (блочне) моделювання і фізичне мультидоменне моделювання [8]. При цьому за кожним з двох методів можуть стояти певні особливості математичного ядра.

Структурним моделюванням (**каузальним**) називається техніка моделювання, заснована на використанні моделей у вигляді блоків, для яких визначені входи і виходи. Відповідно, блоки розглядаються як перетворювачі вхідних сигналів у вихідні. При моделюванні лінійних систем зв'язки між вхідними та вихідними сигналами

встановлюються за допомогою завдання передавальних функцій. Для нелінійних систем ці зв'язки задаються нелінійними алгебраїчними або диференціальними рівняннями. Оскільки структурні блоки мають виражені входи і виходи, побудовані згідно з цією технікою моделі іноді називають спрямованими (орієнтованими) сигнальними графами. Структурне моделювання використовується, наприклад, в пакеті Simulink (рисунок 2.1), VisSim, SimApp, SamSim, ПК МВТУ.

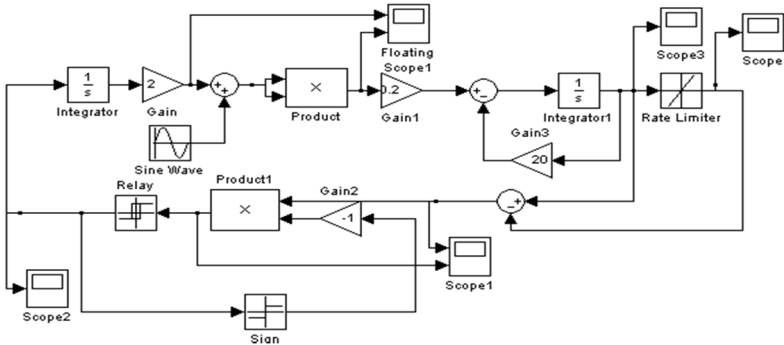


Рисунок 2.1 – Схема для дослідження екстремальної системи в пакеті Simulink

Фізичним мультидоменним (**акаузальним**) моделюванням називається техніка моделювання, заснована на використанні бібліотеки моделей елементів фізичних пристроїв, з яких можна скласти схеми фізичні принципи [24]. Оскільки в енергетичних ланцюгах потік енергії може змінювати напрямок, то для елементів фізичних схем входи і виходи не визначені. Окремим випадком даної техніки моделювання є використання графів зв'язків (bond graph, BG). Ідеологія фізичного мультидоменного моделювання полягає в тому, що модель будь-якого технічного пристрою будується як перетворюючий енергію ланцюг.

У розпорядження користувача надається бібліотека елементів фізичних пристроїв. В залежності від рівня ієрархії це можуть бути бібліотеки різних енергетичних доменів (електричних, механічних, гідравлічних і т.д.) або більш складних функціональних вузлів, наприклад, механічних ланок і кінематичних пар в механічних моделях, підсилювачів, трансформаторів, перетворювачів, двигунів – у електричних і електромеханічних моделях.

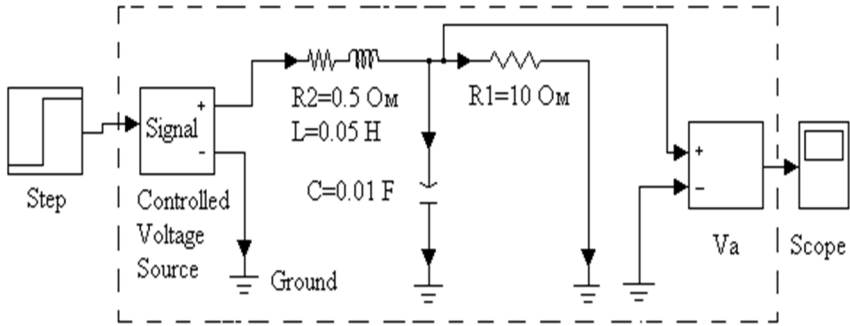


Рисунок 2.2 – Схема для мультидоменового моделювання електричного кола в пакеті SimPowerSystems

Головна відмінність структурного і фізичного мультидоменового моделювання не тільки у формі завдання вихідної інформації, але і в використуваних методах чисельного інтегрування диференціальних рівнянь. Зазвичай зі структурним моделюванням пов'язують явний солвер, який являє собою бібліотеку класичних підпрограм чисельного інтегрування, що реалізують явні методи інтегрування.

З фізичним мультидоменим моделюванням зазвичай пов'язують ітераційний солвер. Ітераційний солвер реалізує неявний метод моделювання, при якому на кожному кроці спочатку формується повна нелінійна система алгебраїчних рівнянь, яка далі вирішується ітераційним методом. Важливою особливістю неявних методів (крім усього іншого) є те, що не потрібно штучно розривати систему, щоб організувати потік обчислень.

Але явні і неявні методи інтегрування не прив'язані жорстко до структурного та фізичного мультидоменового моделювання. Деякі сучасні САЕ-системи, незалежно від підходу до моделювання, використовують неявні та явні методи інтегрування [25], а також дозволяють моделювати в часовій області як об'єкти, задані структурними схемами, тобто з використанням спрямованих ланок, так і об'єкти представлені у вигляді фізичних принципів схем (наприклад, 20-sim, Maplesim, SystemModeler, Simplorer, Simscape, Amesim).

При завданні вихідної інформації у вигляді принципової схеми в математичне ядро може бути включена процедура перетворення

мультидоменної інформації до форми спрямованої структури, а потім можуть бути використані ті ж самі методи явного чисельного інтегрування, що й у звичайному структурному моделюванні. Саме так зроблено в пакетах Simmechanics і Simpowersystems, які є підсистемами Simulink [2].

У результаті, отриманий деякий проміжний варіант, основним достоїнством якого є форма завдання вихідної інформації. При цьому сам перехід до структури в загальному випадку неоднозначний. У простих випадках машина може виконувати його самостійно, без звертання до користувача. У більш складних, користувач повинен допомогти програмі сформуванню найбільш раціональну, з погляду витрат на інтегрування, структуру.

Таким чином, реалізувати моделювання мультидоменних систем на верхніх рівнях абстракції можливо двома способами. По-перше, можна перейти до єдиної системи диференціальних рівнянь. У цьому випадку всі фізичні особливості окремих частин системи будуть загублені. Варіантом такого підходу є структурне моделювання, де всі змінні є скалярними сигналами і їх можна з'єднувати (як у структурній схемі). Недолік підходу – великий обсяг попередніх перетворень (у випадку системи рівнянь), або одержання схеми, що мало нагадує реальну систему. Інший варіант – використання систем моделювання, які здатні на єдиній методологічній основі моделювати механічні, електричні й інформаційні компоненти, тобто поєднувати їх у єдину схему, зберігаючи при цьому звичні для фахівців у предметних областях способи завдання вихідної інформації.

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.) і зв'язані компонентними рівняннями. Саме цей підхід стає домінуючим останнім часом для дослідження МС. При цьому основу моделювання МС становить моделювання механічних конструкцій – найбільш складна й трудомістка справа. Саме компоненти механічних конструкцій описуються найбільш складними математичними моделями. Вони зазвичай багатовимірні й пред'являють найбільш жорсткі вимоги до інструментальних засобів моделювання [1].

У процесі проектування й експлуатації сучасних технічних об'єктів і систем дослідник постійно змушений мати справу з

побудовою та дослідженням моделей цих об'єктів. Зараз моделювання являє собою основний науковий інструмент, застосовуваний як для чисто теоретичних, так і для практичних цілей.

Моделювання є важливою стадією проектування технічної системи і дозволяє скоротити час та матеріальні засоби при налазці та випробуваннях. А коли натурні випробування неможливі за якихось причин, то моделювання стає єдиним засобом для відпрацювання поведінки системи. Термін «моделювання» достатньо багатогранний. Стосовно технічних систем, в тому числі мехатронних систем (МС), під моделюванням буде розумітися процес, що складається у виявленні основних властивостей досліджуваного об'єкта, побудові моделей та їх застосуванні для прогнозування поведінки об'єкта [2]. Моделювання складних динамічних систем (ДС), наприклад, мехатронних, було і є одним з найбільш потужних інструментів системних досліджень. Моделюванням слід користуватися з достатньою мірою обережності та уважності: необхідно не просто отримати результати досліджень, проведених за допомогою тих чи інших моделей, важливо ретельно вивчити досліджувану систему, скласти її опис, підібрати методи відтворення вхідних впливів, побудувати адекватну модель, спланувати і провести експерименти, обробити і вірно інтерпретувати результати [3].

2.2 Математичний базис моделювання систем

Будь-яку динамічну систему, мультидоменну в тому числі, можна описати однією з форм (або їх комбінацією) представлених на рисунку 2.3.

Якщо поведінку безперервної системи можна описати відразу лише алгебраїчними рівняннями (АЕ) без попередніх спрощень, то вона не є динамічною (не відображає динаміку). Це властиво лише деяким абстрактним системам. Отже, саме математичний опис буде визначати вибір інструментальних засобів і технологій проектування систем. При цьому на сучасному етапі особлива увага приділяється проектуванню технічних систем, характерною особливістю яких є різке підвищення їх логічної складності, жорсткості вимог якості проектування і зниження часу і вартості розробки.

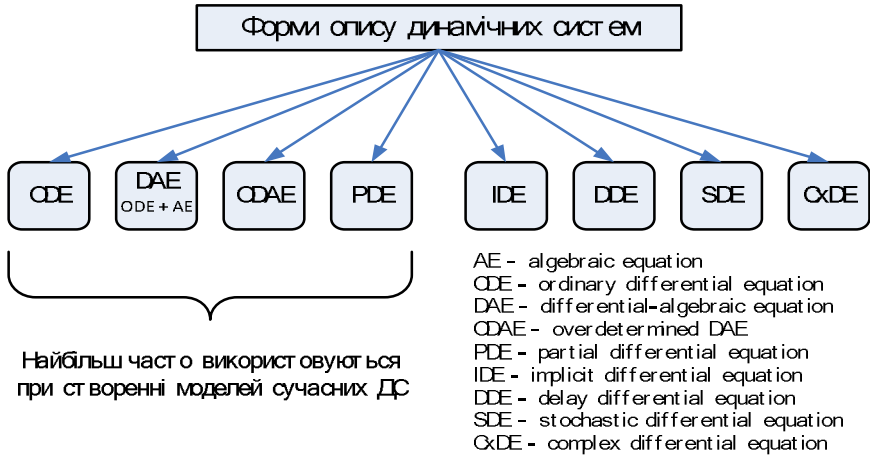


Рисунок 2.3 – Форми опису ДС

Вирішити зазначені протиріччя, що виникають при проектуванні технічних систем, особливо засобів і систем управління (ЗСУ), на сучасному етапі можливо тільки через розробку і впровадження систем автоматизованого проектування (САПР). Вміння застосовувати такий інструментальний засіб проектування ЗСУ, як САПР, ґрунтується на розумінні того, яким чином будується САПР, її структура та окремі підсистеми, на знанні ММ, методів їх формування, методів і алгоритмів аналізу та синтезу, які покладені в основу цих підсистем [5].

2.3 Вибір класу САПР для проектування систем

Класифікацію систем автоматизованого проектування (САПР) здійснюють за низкою ознак, наприклад, за цільовим призначенням, масштабами (комплексності вирішуваних завдань), характером базової підсистеми – ядра САПР. Класифікація фіксує місце об'єкта в системі, яка вказує на його властивості. Класифікація створює умови для розробки технічно обґрунтованих норм забезпечення процесу створення, функціонування та стандартизації в області САПР. За сферою використання найбільш представницькими та широко використовуваними є наступні групи САПР (див. Додаток А):

- для застосування в галузях загального машинобудування. Їх часто називають машинобудівними САПР або MCAD-системами (Mechanical CAD).

- для радіоелектроніки – ECAD (Electronic CAD) або EDA (Electronic Design Automation) системи.

- в області архітектури і будівництва.

За цільовим призначенням розрізняють САПР для різних аспектів проєктування:

- САПР функціонального проєктування, інакше CAE-системи (Computer Aided Engineering).

- конструкторські САПР, часто звані CAD-системами (Computer Aided Design);

- технологічні САПР, інакше звані автоматизованими системами технологічної підготовки виробництва або CAM-системами (Computer Aided Manufacturing) [7].

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). В CAD проєктуються підсистеми різної фізичної природи як на макрорівні (функціональний рівень для змішаних систем), так і на мікрорівні (схемотехнічний рівень). В САМ від ECAD можуть бути передані програми для станків із ЧПУ, роботів та синтезовані технологічні карти.

В системах віртуального виробництва ланка CAE → CAD → САМ утворює наскрізний цикл під керуванням програми – менеджера даними про виріб (PDM- Product Data Manager), (див. Додаток А).

2.4 Реалізація моделювання систем в програмах ECAD

В бібліотеках CAD та CAE макромоделі ланок, які необхідні для побудови функціональної моделі систем, зокрема, операційні багатополіусники, які можуть виконувати операції інтегрування, диференціювання та всі арифметичні дії та чотирьохполіусники із складними передатними функціями. Перелічимо деякі з них:

- ланцюг абсолютного значення - Absolute Value Macro;
- ланцюг підсилення - Amplifier Macro;
- ланцюг затримки - Analog delay Macro;
- ланцюги суматорів із різним напрямком та кількістю входів

для сумування, наприклад, 2-Input Summer Macro;

- ланцюги для обчислення різниці, результатів множення та ділення сигналів - Subtraction Macro, Multiplier Macro, Divider Macro;
- ланцюги інтегрування та диференціювання Integrator Macro, Differentiator Macro;
- ланцюг із зоною нечутливості Slip Macro;
- тригер Шмидта (ланцюг гістерезису) Schmitt Macro.

Розглянемо умовну графічну позначку (УГП) та схеми заміщення деяких макромоделей. На рисунку 2.4 наведена маромодель елемента з бібліотеки ECAD програми MC12, який реалізує затримку сигналу (в секундах), на рисунку 2.5 – макромодель елемента із передаточною функцією (обмеження, насичення сигналу), вид якої зображено на УГП цього двополюсника.

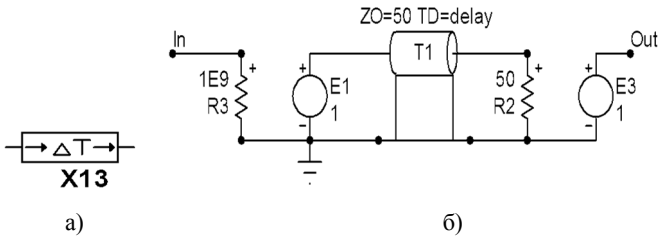


Рисунок 2.4 – Ланцюг Analog delay Macro: а – УГП; б – схема заміщення

CLIP MACRO

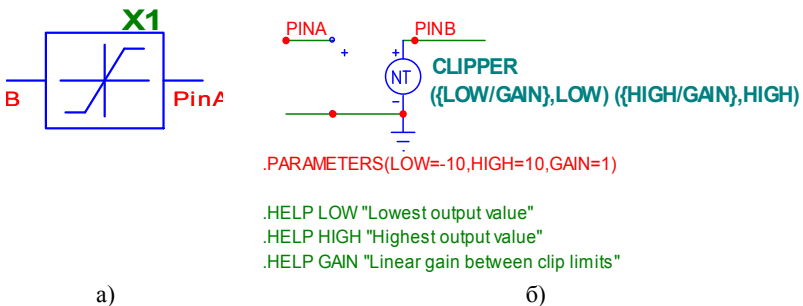


Рисунок 2.5 – Ланцюг CLIP Macro: а – УГП; б – схема заміщення із керованим джерелом, в якому передаточна функція задана таблицно (NT)

Інші структурні ланки та блоки з бібліотеки програми MC 12 наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація ланок та блоків в програмі MC 12

По рівню абстракції		По функціональному призначенню		
Структурні	Функціональні	Математичні операції	Передаючі функції	Генератори сигналів
ABS	Comparator	ABS	Clip	Monostable
AMP	Delay	Dif	Comparator	Noise
Clip	FSK, PSK, VCO	Div	AM	VCO
Delay	Noise	Int	AMP	555
Dif	Schmitt	Int_Res	F	
Int, Int_Res	Relay	Mult	FSK	
Monostable	Motors	Sub	Resonant	
Mult, Div	Resonant	Sum	PSK	
Resonant	Wideband	Sum3	Slip	
Slip	Modulators (FSK, PSK, PWM etc)		Wideband	
Sub, F	Limiters		Формувачі	
Sum, Sum3				

2.5 Етапи виконання роботи

1. Відкрити файл *system2.cir* з бібліотеки *MC12*, занести в звіт схеми заміщення макромоделей ланок, які складають його структуру, дослідити перехідні характеристики в заданих вузлах.

2. Відкрити файл *system1.cir* з бібліотеки *MC12*, провести необхідні види аналізу, зробити висновки по принципам аналізу на системному рівні, описати концепцію роботи даної системи.

3. Відкрити в програмі *MC12* файл *Stepper_One_Phase_On.cir*, занести досліджувану мультидоменну систему та результати аналізу в звіт. Описати принципи каузального та акаузального моделювання.

2.6 Контрольні запитання

1. Підходи, принципи та програми для моделювання систем.
2. Принципи дослідження мультидоменних систем.
3. Класифікація блоків САК в САД для моделювання систем.
4. Особливості каузального, акаузального, системного та структурного підходів моделювання САК.
5. Адаптація ЕСАД для дослідження на системному та структурному рівнях динамічних систем, зокрема, мультидоменних.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 «МОДЕЛЮВАННЯ ІВС В САЕ»

Мета: ознайомитися із принципом моделювання інформаційно-вимірювальної техніки в програмах автоматизованого інжинірингу (САЕ).

В САЕ програмі 20-sim існує можливість автоматизованого синтезу регуляторів на базі редакторів лінійних схем та фільтрів (регулятор також є фільтром і може бути лінеаризованим для певних стаціонарних станів).

3.1 Можливості програми 20-sim

Пакет 20-sim призначений для моделювання динаміки технічних систем – механічних, електричних, гідравлічних, а також складних систем, що містять елементи всіх перелічених. Пакет підтримує візуальне компонентне моделювання – модель вводиться звичайним для пакетів такого типу методом – компоненти вибираються з бібліотеки, переносяться на робочий стіл і з'єднуються зв'язками. 20-sim дозволяє працювати як з орієнтованими блоками, так і з не орієнтованими, що дуже зручно при моделюванні систем управління фізичними об'єктами і установками.

Бібліотеки базових компонентів: типових одновимірних направлених ланок (Signal) – джерел, вимірників, перетворювачів, блоків математичних операцій і т.д.; елементів графів зв'язків (Bond Graph), як найпростіших універсальних енергетичних компонентів; механічних, електричних, гідравлічних, теплових елементів (Iconic Diagram). В якості прикладу на рисунку 3.1 представлена модель системи, де енергетична частина представлена графом зв'язків, а керуюча – блок-схемою, що включає спрямовані ланки [2].

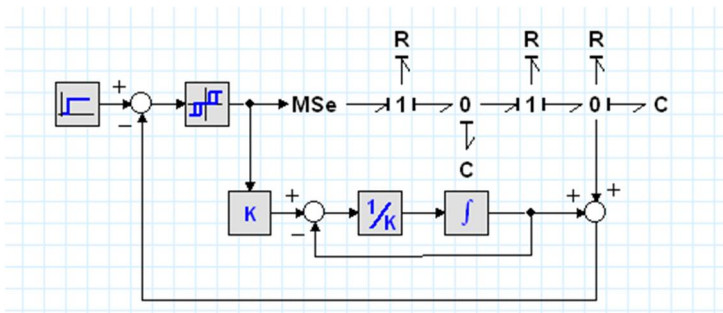


Рисунок 3.1 – Приклад моделі системи в 20-sim

Пакет 20-sim має ряд розширень, одним з яких є Mechatronics Toolbox, що включає в основному моделі різних електромеханічних пристроїв. Важливо відзначити, що більшість моделей, представлених в даному розширенні, відносяться до конкретних мехатронних пристроїв, що підтримуються і супроводжуються виробниками технічних засобів. Вони точні, докладні, закривають всі аспекти функціонування пристроїв і з цієї точки зору дуже корисні проєктувальникам, що займаються розробкою МС.

В якості внутрішньої мови опису моделей використовується мова, подібна мові Modelica або мові середовища Maple, але є більш зрозумілою і простою у вивченні. 20-sim має розвинуті засоби анімації, в тому числі 3D, потужний вирішувач, що дозволяє отримувати чисельне рішення як ODE, так і диференціально-алгебраїчних рівнянь (DAE), використовуючи однокрокові і багатокрокові методи різних порядків: Euler, Backward Euler, Adams-Bashford 2, Runge-Kutta 2 та 4 порядків, Runge-Kutta-Dormand-Prince 8, Runge-Kutta-Fehlberg, Vode Adams, Backward Differentiation Formula (BDF), Modified Backward Differentiation Formula (MBDF).

Також програма має 8 алгоритмів оптимізації (2 прямих, 6 градієнтних): Perpendicular Search, Line Climber, Steepest Descent, Continuous Descent, Newton-Raphson, Davidson-Fletcher-Powel, Broydon-Fletcher- Goldfarb-Shanno, Polack-Ribiere.

20-sim має широкі можливості щодо моделювання (modeling) та дослідження САК, також має інтуїтивно зрозумілий і не перевантажений інтерфейс. Привабливою програму також роблять можливість фізичного мультидоменного моделювання та різноманітність форм представлення моделей систем: рівняння у рядковій математичній нотації, орієнтовані блок-схеми, акаузальні традиційні (Iconic) схеми (принципові) та ненаправлені зв'язані графи (графи зв'язків-BG).

Програма має три види версій або редакцій (з ліцензіями Academic та Corporate): Viewer, Standard, Professional. Причому версія Viewer безкоштовна, завантажується з сайту виробника без авторизації (легкодоступна) та не має обмежень (на відміну від Standard), тобто володіє повною функціональністю (як Professional) [33]. Мінімальні ціни 20-sim Standard та 20-sim Professional – \$700 та \$1400 відповідно (для академічної ліцензії), в той час як для корпоративної ліцензії вартість цих редакцій збільшена в 6 разів (\$4200 та \$8400 відповідно).

Програма має деякі переваги та особливості:

- 32-бітний розрахунковий машинний код, що дозволяє в кілька раз підвищити швидкість розрахунків при симуляції;

- принцип відкритості, забезпечуваний механізмами підключення зовнішніх програм (Matlab/Simulink) і можливістю вільно переглядати, редагувати існуючі й створювати нові бібліотеки моделей;
- принцип вкладеності або ієрархічності структур (глибина вкладеності не обмежена), що особливо актуально при моделюванні складних ДС;
- значний обсяг бібліотеки моделей, що в багатьох випадках дозволяє сформулювати математичну модель динаміки складної технічної системи без необхідності створення нових спеціалізованих ММ;
- дуже проста в освоєнні Modelica-подібна мова опису моделей SIDOPS+, яка використовує математичну нотацію для запису рівнянь;
- присутній потужний інструментарій частотної області, що включає FFT-аналізатор, лінеарізатор моделей і редактор лінійних систем;
- універсальний редактор лінійних систем, який дозволяє редагувати систему (модель) як простір станів, передатну функцію, нулі-полюса й перетворювати їх між собою, а також містить опції показу діаграм Бode, годографа Найквіста, графіка Нікольса, діаграм нулів-полюсів, реакції системи на функцію Хевісайда;
- можливість транслювати будь-яку модель у Сі-код для використання в Matlab/Simulink або автономний Сі-код для використання в С и С++ програмах;
- наявність вичерпної контекстної довідкової системи у формі типової довідки WINDOWS для кожної моделі стандартної бібліотеки й елемента інтерфейсу.

20-sim дозволяє використовувати кілька форм представлення ДС при побудові моделей (в тому числі моделювати у змішаній формі):

- форма на основі диференціальних рівнянь (текстова модель);
- блок-схеми (BD);
- традиційні (функціональні) схеми декількох доменів (ID);
- графи зв'язків (BG);
- автомати станів (SM) (за підтримки розвинутої мови програмування SIDOPS+);
- передавальні функції (transfer function, TF).

В 20-sim дозволяється моделювання як безперервних систем, так і дискретних, а також змішаних (або гібридних), які представляють комбінацію двох перших. За замовчуванням, моделі в 20-sim є безперервні; аналіз проводиться за допомогою безперервних (continuous-time) методів інтегрування. Однак, 20-sim автоматично визначає дискретні частини в моделі і проводить симуляцію з фіксованим темпом або кроком (fixed gate). Входи та виходи (з'єднання) дискретних елементів моделі позначаються у головному редакторі зеленим кольором, а самі дискретні елементи ідентифікуються появою спеціальних функцій у їх описі («sample», «hold»,

«next», «previous», «sampletime»). Для з'єднання безперервних та дискретних елементів застосовуються функції «sample» та «hold» (перша має дискретний вихід та безперервний вихід, а друга - навпаки).

Будь-яка головна модель в 20-sim може бути описана за допомогою композиції підмоделей (submodel) більш низького рівня, які у свою чергу знову можуть складатися з підмоделей. Найнижчий рівень ієрархії завжди представляє собою елементарні підмоделі на основі рівнянь на мові SIDOPS+. 20-sim не має обмежень на рівень вкладеності моделей і дозволяє інкапсулювати будь-яку частину системи та розгортати її назад за допомогою функцій графічного редактора («implode\explode»).

Нажаль, демо-версія програми не дозволяє зберігати відпрацьований файл для подальшої роботи.

3.2 Проектувальник регуляторів та редактор лінійних систем в 20-sim

Редактор фільтрів і проектувальник регуляторів мають важливе значення при створенні САК та їх аналізі; вони мають зв'язок з редактором лінійних систем (Linear System Editor, LSE), який у свою чергу дає можливість синтезувати динамічні ланки чотирма способами: за допомогою простору станів (State Space), передавальної функції (Transfer Function), нулів-полюсів ПФ (Zeros Poles Gain), власних значень частот (Eigen Frequencies). Редактор лінійних систем (LSE) дозволяє перетворювати дискретну (discrete-time) ланку в безперервну (continuous-time) та навпаки; також має функції імпортування та експортування редагованої системи в Matlab/Simulink, в текстовий файл в символічній або числовій формах тощо.

Фактично, проектувальник регуляторів (CDE) має інтерфейс і всі можливості LSE, а додатково ще опції «Sub System» та «Additional Ports» (інтерфейс – на рисунку 3.2).

LSE безпосередньо дозволяє аналізувати і досліджувати розроблену САК, використовуючи вбудовану можливість відтворення діаграм Бode, Найквіста, Нікольса та відображення карти нулів-полюсів і h-функції (Step Response).

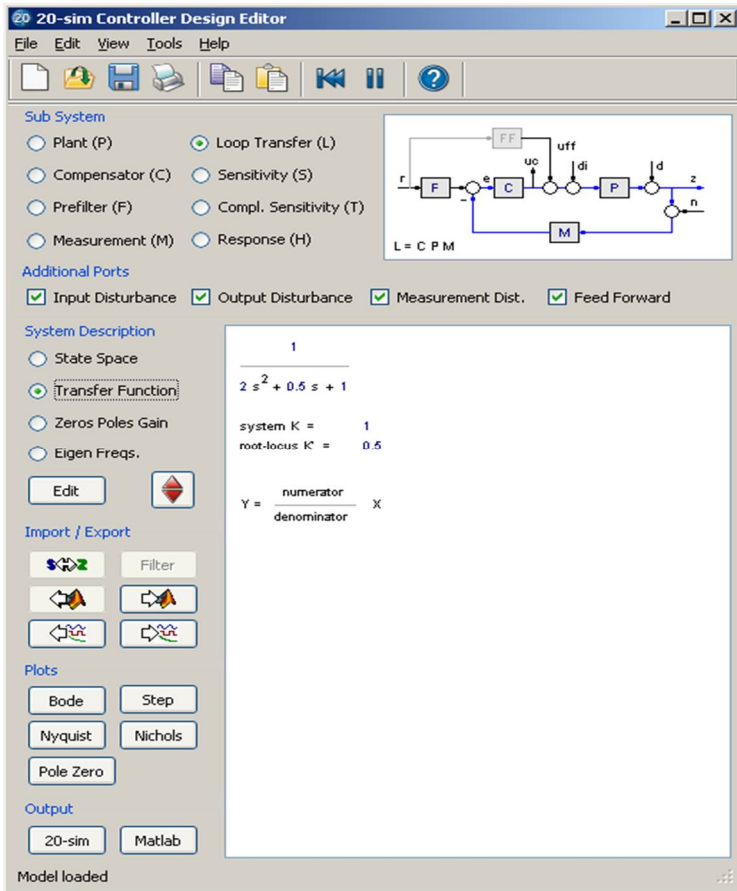


Рисунок 3.2 – Головне вікно CDE

Редактор фільтрів дозволяє створювати різні типи фільтрів (Беселя, Батерворта, Чебишева, ФНЧ та ФВЧ першого і другого порядків, смуговий, режекторний) та регуляторів (П, І, Д, ПІ, ПД, послідовний та паралельний ПД, ПД-компенсатор), використовуючи інформацію про їх бажані частотні та часові характеристики, наприклад: частоти спряження, порядок фільтру, коефіцієнти передачі, добротність, коефіцієнт «слухняності» (tameness), постійні часу.

Рисунки 3.3, 3.4, 3.5 показують опції редактора фільтрів для деяких типів регуляторів або фільтрів.

Наприклад, для опису універсального режекторного фільтру другого порядку, що складається з одного нуля та полюса (рис.4.12), застосовується наступні параметри:

- коефіцієнт підсилення K ;
- резонансні частоти f_z та f_p для нуля (zero) і полюса (pole) ПФ відповідно;
- коефіцієнти демпфування d_z та d_p .

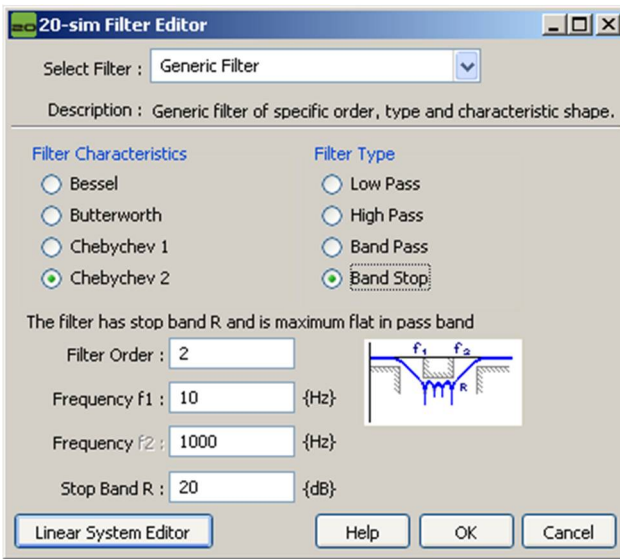


Рисунок 3.3 – Параметри фільтрів загального шаблону

Вікно для параметризації ПД наведено на рисунку 4.13; регулятор описується трьома коефіцієнтами підсилення (для зони НЧ – K_i , ВЧ – K_d та у смузі пропускання K_p) та двома частотами спряження (інтегруючої частини f_i та диференціюючої – f_d). Ілюстрація сенсу коефіцієнтів – на рисунку у правому куті вікна.

З цього ж вікна можна перейти до редактора лінійних систем LSE, для продовження синтезу регулятора (параметризації).

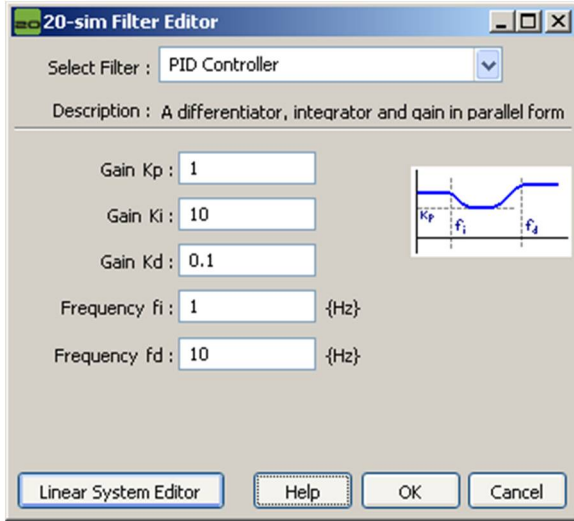


Рисунок 3.4 – Опис паралельного ПІД-регулятора

ПІД-компенсатор (рис. 3.5) має у своїй структурі (окрім самого регулятора) фільтр із спадаючою АЧХ в області ВЧ після значення $1/\tau_h$ (параметр «HF roll-off tau h»), всі частоти з більшим значенням відфільтровуються.

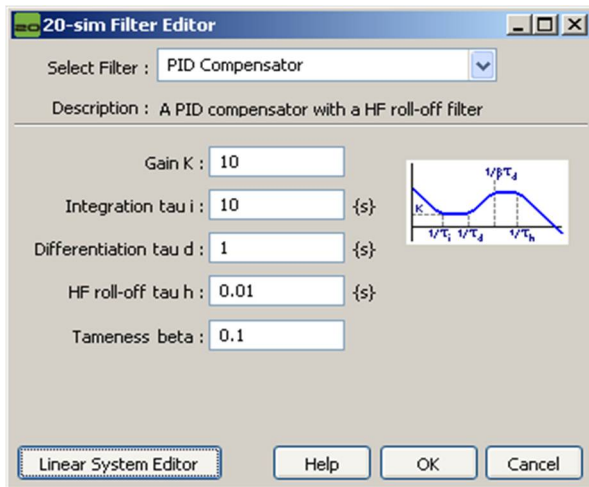


Рисунок 3.5 – Опис ПІД-компенсатора у редакторі фільтрів

функцію замкнутого контуру L (*Loop Transfer*), комплексну чутливість T (*Compl. Sensitivity*), відгук цілої системи H (*Response*).

CDE дозволяє працювати з лінійними системами, а якщо є необхідність розглядати модель нелінійної системи, то її потрібно попередньо лінеаризувати у робочій точці за допомогою інструментів частотної області (FDT). Також в CDE можна моделювати ланку чистого запізнення (її ПФ: $W(p)=e^{-\tau p}$). Взагалі, моделі з часовими затримками не можуть бути лінеаризовані, тому що немає прямого відношення (зв'язку) між входами і виходами моделі. Однак, для систем з контурами управління корисно було б побачити, як затримки цих контурів неминуче впливають на поведінку моделі. Тому в LSE (та CDE) до моделі можна додати вихідну затримку.

Практично всі САЕ, розглянуті вище (окрім, наприклад, SamSim), дозволяють працювати з ланкою чистого запізнення тільки в часовій області, але не можуть відпрацьовувати її у частотному домені. Приклад частотних характеристик моделі з вихідною затримкою, розробленою в редакторі лінійних систем 20-sim, приведено на рисунку 3.7.

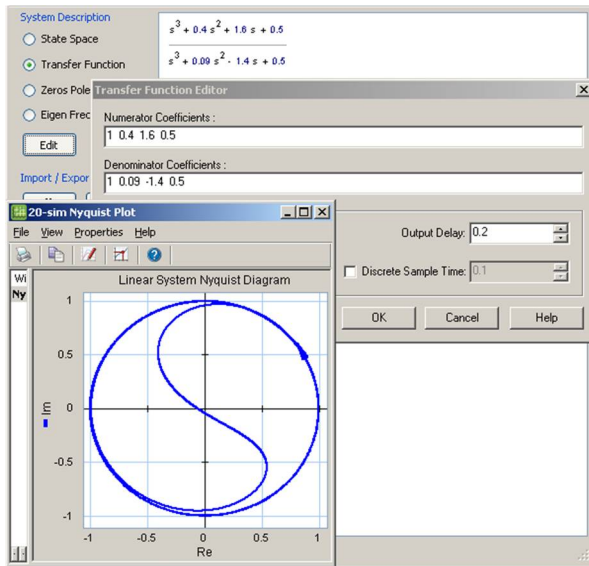


Рисунок 3.7 – ЧХ системи з вихідною затримкою (0,2с), зробленою в LSE

Треба відмітити, що вихідна затримка не зберігається після передачі лінійної системи з LSE до головного редактора. Таким чином, ЧХ моделі з ланкою затримки можна побудувати лише в LSE та CDE, а часові діаграми – також і в симуляторі (після побудови моделі з ланкою чистого запізнення у головному редакторі).

3.3 Методика моделювання САК

Для дослідження САК треба спочатку побудувати її модель. Для цього треба, по-перше, ідентифікувати об'єкт, тобто визначити його складові частини, їх параметри, ММ, тощо. Процедура компіляції моделі наведена в додатку Г.

Рекомендується етап побудови моделі (modeling) в програмному середовищі (мова йде, зокрема, про 20-sim) умовно розділяти на кілька частин:

- а) вибір форми представлення моделі;
- б) вибір компонентів моделі;
- в) топологічне з'єднання компонентів моделі;
- г) апріорна корекція моделі;
- д) компонентно-топологічна (апостеріорна) корекція моделі.

Етап симуляції в 20-sim можна розділити на три складові:

- а) вибір алгоритму моделювання та його параметрів;
- б) обирання фазових змінних для моніторингу;
- в) запуск симуляції та використання постпроцесора.

Треба відмітити, що задача вибору методу симуляції (алгоритму моделювання) дуже комплексна, багатокритеріальна, залежить від багатьох факторів. Класифікація методів симуляції наведена в Додатку В.

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 САЕ для моделювання САК (є необхідність у знаходженні оптимальних коефіцієнтів регуляторів при налагодженні САК; дослідження алгоритмів оптимізації розглядається на наступних заняттях).

3.4 Методика проведення моделювання та оптимізації

Методику моделінгу можна представити в наступному вигляді:

- а) вибір підходу та форми представлення моделі;
- б) вибір компонентів моделі з інструментального набору обраного програмного забезпечення (ПЗ);
- в) топологічне з'єднання компонентів моделі (структурний синтез системи);
- г) параметричний синтез та апіорна 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 та аналізу 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) комплексна та залежить від багатьох факторів [2].

Для отримання адекватного результату симуляції, вибір методу інтегрування в 20-sim можна проводити згідно розробленої методики [4].

Етап параметричної оптимізації (див. Додаток Д) 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 ECAD та CAE (наприклад, для знаходження коефіцієнтів регуляторів при налагодженні САК) [2,10].

Скорочено методику проведення оптимізації можна описати наступним алгоритмом:

- 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.

3.5 Етапи виконання роботи

1. Дослідити структуру та параметрів в підпрограмі CDE, занести в звіт.
2. Використовуючи редактор LSE, розробити ПІД-регулятор, отримати його характеристики.
3. Використовуючи редактор CDE, синтезувати ПІД-регулятор із такими самими параметрами, як в п. 1, отримати характеристики.
4. Зберегти отримані характеристики в звіт, проаналізувати та порівняти результати, зробити висновки про адекватність моделювання різними засобами.

3.6 Контрольні запитання

1. Структура та методики моделювання в САЕ.
2. Проектування регуляторів в САЕ.
3. Модель PID регулятора.
4. Проектування фільтрів для САК.
5. Редактор лінійних систем в 20-sim.
6. Методика оптимізації в САЕ.
7. В яких випадках САК можна представити лінійною системою (способи лінеаризації та межі адекватності лінійних моделей САК).

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Карпов, Ю. О.** Комп'ютерні розрахунки та моделювання лінійних електричних кіл. Теоретичні основи електротехніки: навч. посібник. [Текст] / Ю.О. Карпов, С.Ш. Кацев, В.В. Кухарчук – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2016.–210 с.
2. **Павленко, П.М.** Основи математичного моделювання систем і процесів: навчальний посібник: для студ. вищ. навч. закладів, за спец. "Інформаційно-вимірювальні системи" [Текст]/ П.М. Павленко – Київ: НАУ, 2015.–248 с.
3. **Піза, Д.М.** МАЕС-П. Схемотехнічне моделювання електронних пристроїв: навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.: рек. МОНУ. [Текст] / Д.М. Піза, А.К. Тімовський, С.П. Гулін, В.М. Журавльов – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 132 с.
4. **Рябенький, В.М.** Основи моделювання систем і процесів в електротехніці: використання пакета прикладних програм MATLAB / Simulink [Текст] / В.М. Рябенький, С.В. Драган, Л.В. Солобуто – Львів: Новий Світ-2000, 2012. – 385 с.
5. **Василенко, О. В.** Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Моделювання в електроніці” для студентів спеціальності 6.050801 “Мікро- і наноелектроніка” денної і заочної форм навчання [Текст] / О.В. Василенко, А.В. Коротун. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – 64 с.
6. Micro-Cap 11, Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual, Spectrum Software [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.spectrum-soft.com/down/rm11.pdf/document> (in English)
7. Simulation Tools [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
8. MathWorks Documentation Center, Solver Pane [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mathworks.com/help/simulink/gui/solver-pane.html>
9. Simulation Tools [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
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 НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2013. – С. 48-49.
11. Differ Ir. H. G. 20-sim 4.3: Reference Manual/Ir.C. Kleijn,

- Ir.M.A. Groothuis, Ir.H.G.–Differ Controllab Products B.V., 2012.–1099 с.
12. VisSim Product Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vissim.com/products/vissim.html>
13. Dymola Dynamic Modeling Laboratory User's Manual, Version 5.3a [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/Lect/MMPS/Refs/Dymola5 Manual.pdf>
14. Differential Algebraic System Solver [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://acronyms.thefreedictionary.com/DASSL>

Додаток А

Математичні процесори для моделювання в електроніці

CAE-системи:

- MATLAB\Simulink
- MATLAB\Simscape
- Maple\MapleSim
- EASY5
- AMESim
- Dymola
- PSIM
- SamSim
- SimApp
- SimulationX
- Simplorer
- VisSim
- 20-sim
- ПІК MBTU
- SystemModeler

CAE = Computer Aided Engineering

CAS = Computer Algebra System

CAD = Computer Aided Design

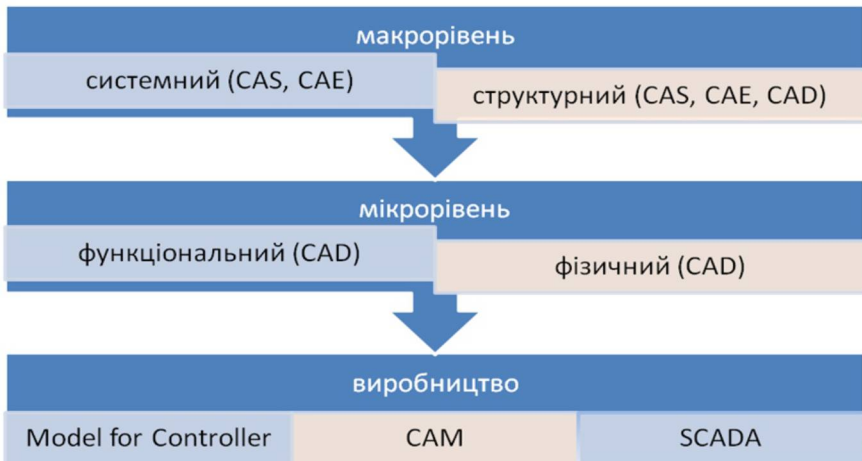
CAS-системи:

- Maple
- MATLAB
- Mathcad
- Mathematica
- Maxima
- SymPy
- O-Matrix
- Octave
- NumPy
- Python(x,y)
- MuPAD

CAD-системи:

- MicroCap
- Spice
- Multisim
- Proteus
- Saber
- OrCAD
- PCAD
- TCAD/SYNOPSIS
- CADENCE

НАСКРІЗНЕ ПРОЄКТУВАННЯ/ВІРТУАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

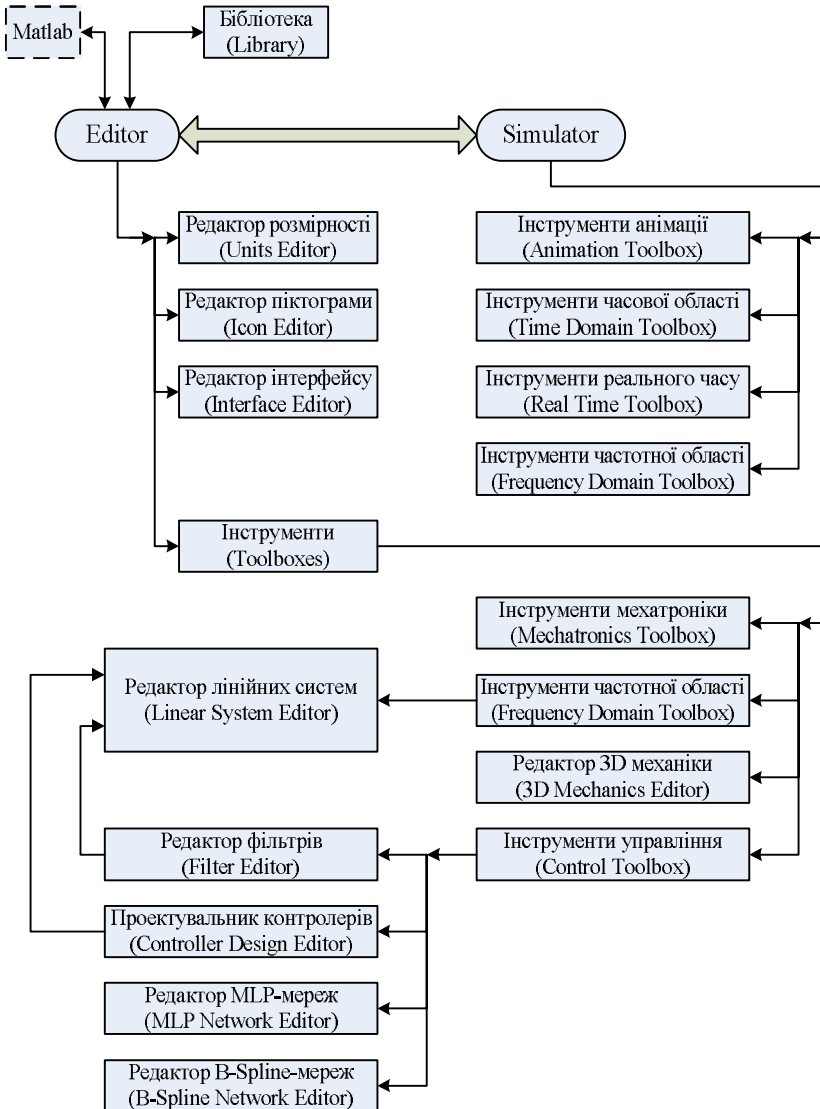


CAM = Computer Aided Manufacturing

SCADA = Supervisory Control and Data Acquisition

Додаток Б

Загальна структура 20-SIM



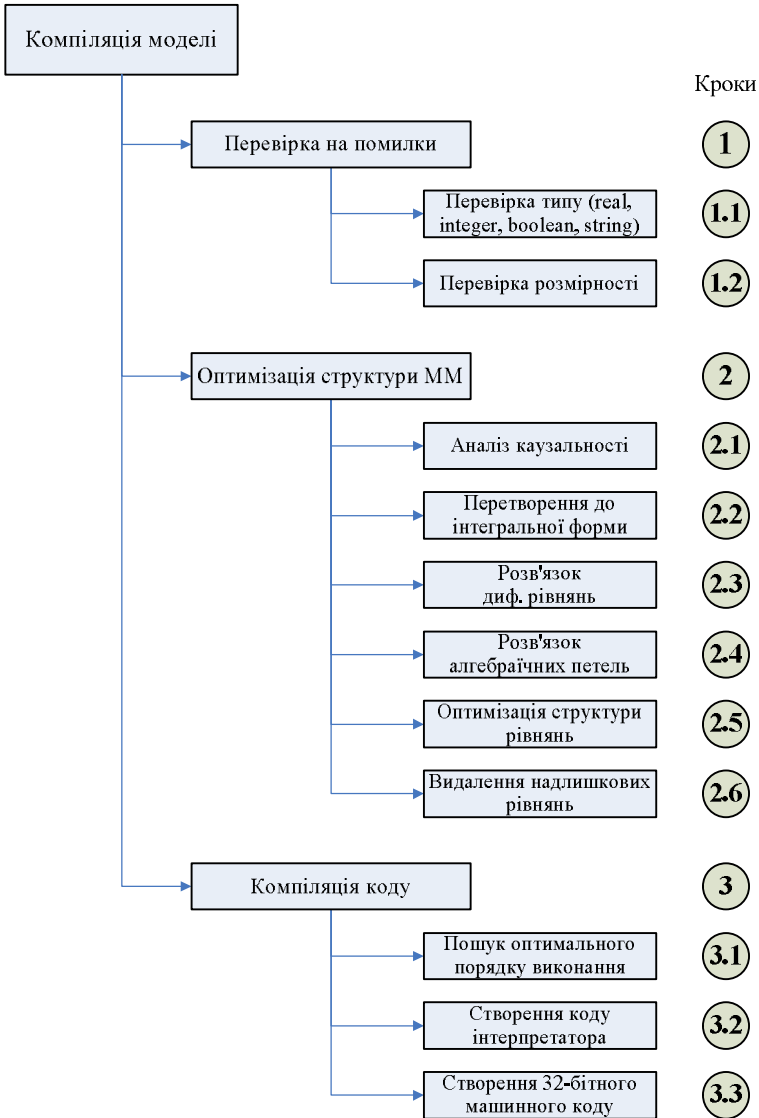
Додаток В

Класифікація методів симуляції



Додаток Г

Процедури етапу компіляції моделі в САЕ



Додаток Д

Класифікація задач оптимізації



Додаток Е

Перелік питань до контролю

Перелік питань, які виносяться на залік

1. САК як динамічні, мехатронні системи.
2. Класифікація САР та САК.
3. Структурні схеми САК.
4. Принципи керування.
5. Задачі синтезу та аналізу САК.
6. Математичний опис САК.
7. Поняття та приклади динамічних систем.
8. Форми представлення моделей ланок САК (приклад).
9. Принципи вибору програми для дослідження САК.
10. Способи моделінгу САК.
11. Рівняння, якими описуються динамічні системи (САК в тому числі).
12. Статичні характеристики основних ланок САК.
13. Стійкість САК. Робастні системи.
14. Мультидоменне моделювання САК.
15. Каузальне та акаузальне моделювання ІВС (переваги та недоліки).
16. Огляд САЕ систем.
17. Огляд CAS систем.
18. Структура САК (приклад).
19. Структура ІВС (приклад).
20. Критерії для вибору програми для проектування САК.
21. Проектувальник регуляторів в 20-sim (CDE).
22. Редактор лінійних систем в 20-sim.
23. Структура САК, що використовується в CDE.
24. Параметри ПІД регулятора, його призначення та характеристики.
25. Частотні характеристики ПІД-регулятора.
26. Склад мехатронної системи.
27. САК 3D принтеру. Структура 3D принтера.
28. Які типи актуаторів використовуються в САК.
29. Чим САК відрізняється від САР.
30. Типи датчиків в САК/САР.

31. Смарт-сенсор, його структура.
32. Структура ІВС при використанні смарт-сенсорів.
33. Дати визначення «Розумний будинок».
34. З яких підсистем складається «Розумний будинок»?
35. Використання Інтернету речей при побудові САК ІВС.
36. Які проривні технології використовуються в сучасних САК?
37. Функції системи безпеки/охорони, підсистеми обмеження доступу.
38. Імплементация технологій Штучного інтелекту при побудові САК.
39. Напрями розвитку САК в концепції Індустрія 4.0.
40. Структура САК в кібер-фізичних системах.

Перелік питань, які виносяться на ДКР1

41. Структурні схеми САР та САК.
42. Вхідні та вихідні величини елементів систем регулювання.
43. Елементи та сигнали в САР та САК.
44. Вхідні та вихідні величини елементів автоматики.
45. Коефіцієнт перетворення. Коефіцієнт підсилення. Коефіцієнт стабілізації.
46. Похибка (абсолютна, відносна, зведена).
47. Поріг чутливості та причини, що його викликають. Зона нечутливості.
48. Динамічні характеристики елементів автоматики.
49. Характеристики точності приладів і засобів автоматизації.
50. Характеристики похибки та її систематичної і випадкової складових.
51. Варіація збурення і реакція актуатору.
52. Поняття зворотного зв'язку як одного з основних понять автоматики. Коефіцієнт зворотного зв'язку.
53. Додатний і від'ємний зворотний зв'язок.
54. Лінійні та нелінійні елементи.
55. Статичні характеристики елементів. Коефіцієнти передачі елементів.
56. Динамічні характеристики елементів.

57. Визначення нелінійних систем. Особливості нелінійних систем. Типові суттєво нелінійні елементи, їх характеристики.
58. Типові вхідні сигнали та реакція на них елементів.
59. Перехідна функція, імпульсна перехідна функція.
60. Графіки Боде (АЧХ, ФЧХ).

Перелік питань на ДКР2

61. Постановка задачі корекції автоматичних систем.
62. Вплив структури системи та параметрів елементів системи на стійкість та якість.
63. Корекція САР шляхом включення послідовних і паралельних ланок, включення додаткових зворотних зв'язків.
64. Застосування методу логарифмічних частотних характеристик під час синтезу САР.
65. Способи підвищення якості САР у системах із запізненням.
66. Інваріантні САР.
67. Умови інваріантності лінійних САР. Умови фізичної реалізації інваріантних САР.
68. Комбіновані та адаптивні САК.
69. Системи взаємозв'язаного регулювання.
70. Вплив властивостей об'єкта регулювання і автоматичного регулятора на характер процесу регулювання.
71. САР як частина кібер-фізичних систем.
72. Розвиток САР та САК в концепції Індустрії 4.0.