

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних занять з дисципліни
“Комп’ютерне моделювання”
для студентів спеціальності
152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
денної і заочної форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни “Комп’ютерне моделювання” для студентів спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка денної і заочної форм навчання / Укл.: О.В. Василенко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 72 с.

Укладач: О.В. Василенко, доц., канд. техн. наук

Рецензент: Г.В. Сніжной, доц., докт. фіз.-мат. наук

Відповідальний за випуск: А.В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
мікро- та наноелектроніки

Протокол №5
від “20” 10 2020 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол № 3
від “22” 10 2020 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 «ПРОГРАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ (ІВС)».....	7
1.1 Поняття моделювання.....	7
1.2 Каузальне та акаузальне моделювання.....	9
1.3 Порівняльний аналіз програм.....	10
1.4 Етапи виконання роботи.....	17
1.5 Контрольні питання.....	19
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРФЕЙСІВ І МОЖЛИВОСТЕЙ ЕСAD».....	20
2.1 Структура ЕСAD.....	20
2.2 Види аналізу в ЕСAD.....	21
2.3 Основні функції постпроцесора.....	23
2.4 Етапи виконання роботи.....	24
2.5 Контрольні запитання.....	24
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 “МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ІВС”.....	25
3.1 Моделі RLC-елементів.....	25
3.2 Моделювання трансформатора.....	25
3.3 Моделі діодів.....	27
3.4 Моделі БТ та тиристора.....	28
3.5 Моделювання польових транзисторів.....	31
3.6 Етапи виконання роботи.....	34
3.7 Контрольні запитання.....	35
4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 “МОДЕЛІНГ ТА СИМУЛЯЦІЯ АНАЛОГОВИХ І ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ”	36
4.1 Макромоделі операційного підсилювача (ОП).....	36
4.2 Макромоделі цифрових пристроїв.....	38
4.3 Симуляція аналогово-цифрових пристроїв.....	39
4.4 Етапи виконання роботи.....	41
4.5 Контрольні питання.....	42
5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 «МОДЕЛЮВАННЯ НА СИСТЕМНОМУ ТА СТРУКТУРНОМУ РІВНЯХ АБСТРАКЦІЇ. МУЛЬТИДОМЕННЕ МОДЕЛЮВАННЯ».....	43

5.1 Підходи до моделювання систем на макрорівні	43
5.2 Математичний базис моделювання систем	47
5.3 Вибір класу САПР для проектування систем	48
5.4 Реалізація моделювання систем в програмах ECAD	49
5.5 Етапи виконання роботи	51
5.6 Контрольні запитання	51
6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 «МОДЕЛЮВАННЯ ІВС В САЕ»	52
6.1 Можливості програми 20-sim	52
6.2 Проектувальник регуляторів та редактор лінійних систем в 20-sim	55
6.3 Методика моделювання САК	61
6.4 Методика проведення моделювання та оптимізації	62
6.5 Етапи виконання роботи	63
6.6 Контрольні запитання	63
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	64
Додаток А Математичні процесори для моделювання в електроніці	66
Додаток Б Загальна структура 20-SIM	67
Додаток В Класифікація методів симуляції	68
Додаток Г Процедури етапу компіляції моделі в САЕ	69
Додаток Д Класифікація задач оптимізації	70
Додаток Е Перелік питань до модульного контролю і самостійних робіт	71

ВСТУП

Мета дисципліни «Комп'ютерне моделювання»: підготовка спеціалістів, що зрозуміли і засвоїли основні моделі приладів та пристроїв електроніки та основних алгоритмів моделювання електронних схем. Це дозволить майбутнім спеціалістам приймати оптимальні схемні рішення при автоматизованому проектуванні пристроїв та систем вимірювальної техніки. В результаті вивчення дисципліни студенти мають навчитися вибирати по критеріям необхідне програмне забезпечення для кожного етапу проектування інформаційно-вимірювальних систем, та проводити всебічний аналіз систем автоматичного керування/регулювання (САК/САР) та інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), як частину САК.

Основне завдання дисципліни є освоєння принципів моделювання систем інформаційно-вимірювальної техніки (ІВТ).

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен отримати

загальні компетентності: здатність спілкуватися державною мовою, здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми метрології та інформаційно- вимірювальної техніки, які характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, що передбачає застосування теорій та методів метрології, способів побудови засобів автоматизації та приладобудування.

фахові компетентності: здатність проектувати засоби інформаційно- вимірювальної техніки та описувати принцип їх роботи; здатність, виходячи з вимірювальної задачі, пояснювати та описувати принципи побудови обчислювальних компонент засобів вимірювальної техніки; здатність використовувати сучасні інженерні та математичні пакети для створення моделей приладів і систем вимірювань

Очікувані програмні результати навчання:

студент має знати:

- ❖ основи моделювання основних типів САК та САР;
- ❖ основи моделювання ІВТ;
- ❖ способи та принципи побудови моделей систем та елементів на різних рівнях абстракції;
- ❖ можливості та підходи до симуляції/дослідження/моделювання в середовищі універсальних

математичних процесорів (CAS) та спеціалізованих математичних процесорах (CAD та CAE);

- ❖ методи аналізу в сучасних програмах автоматизованого проектування.

- ❖ критерії обирання методів та видів аналізу;

- ❖ основні алгоритми моделювання /симуляції;

- ❖ способи підвищення ефективності обчислювальних алгоритмів для симуляції.

вміти:

- ❖ вибирати по критеріях необхідне програмне забезпечення для моделювання САР. САК та ІВТ на різних рівнях абстракції;

- ❖ проводити всебічний аналіз пристроїв та систем вимірювальної техніки за допомогою програм;

- ❖ давати напрямки оптимізації пристрою.

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 (актуатору) під керуючими 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 моделінгу 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 невідомий 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) начального 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 проектування МС використовується MCAD [5], які призначені для твердотілого багатовимірної 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 проектувальникам. Редактор фільтрів і проектувальник 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 символічний або числовий 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 прийнятного 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-диференціальних 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 принципових 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 складати 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.

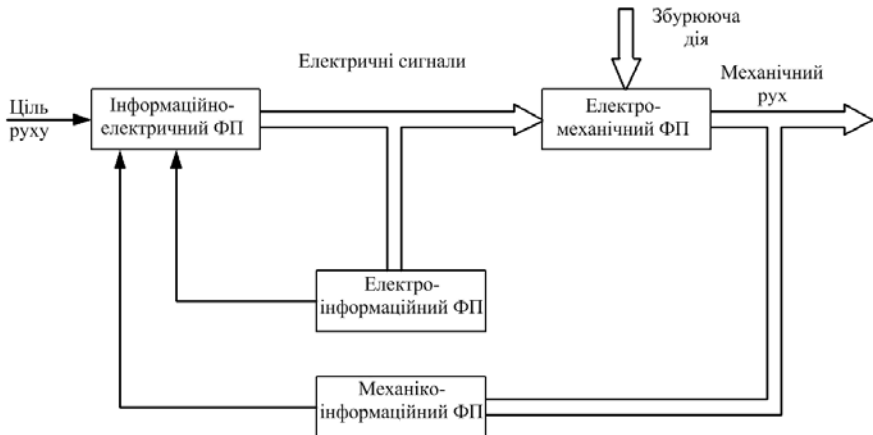


Рисунок 1.1 – Інформаційні й енергетичні потоки в САК

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 CAD, CAS та CAE.

Таблиця 1.1 – 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 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.

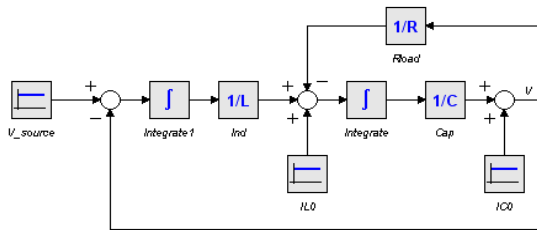


Рисунок 1.2 – Модель через блок-схеми з бібліотеки «Signal»

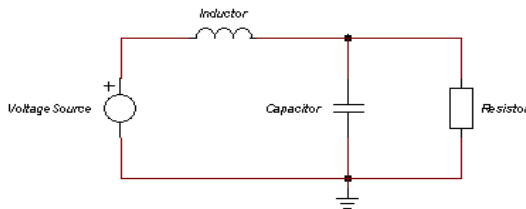


Рисунок 1.3 – Фізична схема (бібліотека «Iconic diagrams»)

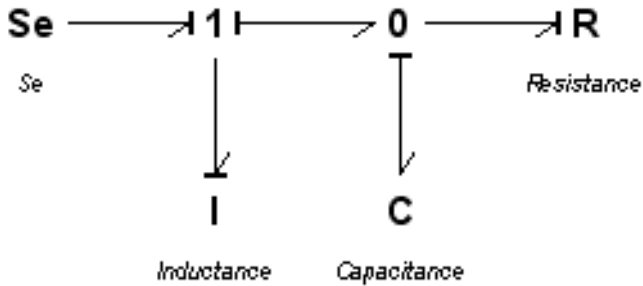


Рисунок 1.4 – Модель в формі зв'язаного графа (бібліотека «Bond Graph»)

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).

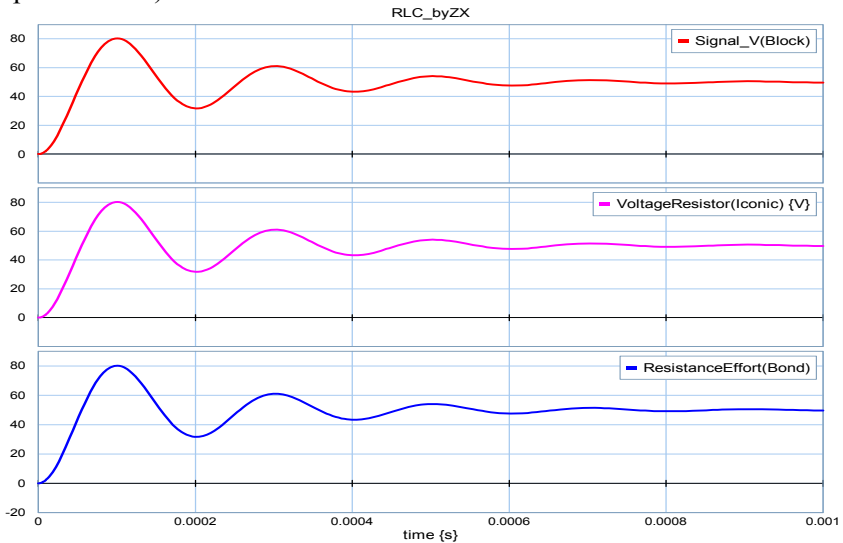


Рисунок 1.5 – Результати симуляції коливальної ланки трьома моделями

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 IBC та САК
9. Переваги та недоліки САЕ для моделювання IBC та САК
10. Переваги та недоліки CAD для моделювання IBC та САК
11. Чому для дослідження САК та IBC можна використовувати ECAD?
12. Методика вибору оптимальної програми для моделювання IBC та САК.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРФЕЙСІВ І МОЖЛИВОСТЕЙ ЕСАD»

Мета: отримати навички виконання і обробки результатів аналізу в середовищі програм автоматизованого моделювання /проектування класу ЕСAD.

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

2.1 Структура ЕСAD

Серед сучасних програмних комплексів, призначених для аналізу електронних пристроїв, є програми проектування і програми моделювання. Схему типової ЕСAD-системи наведено на рисунку 2.1. Блоки, які можуть бути відсутніми у програмах моделювання, позначені пунктиром.

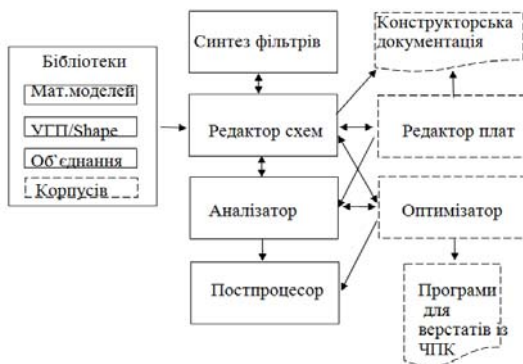


Рисунок 2.1 – Типова структура ЕСAD

Програми проектування (PCAD, OrCad, PROTEUS та ін.) [1-3] дозволяють провести наскрізний цикл проектування, починаючи від введення проекту у вигляді багатосторінкових принципових схем до передвиробничої підготовки друкованих плат. При цьому виконується цифро-аналогове моделювання пристрою, розробка топології, передача інформації в системи 3D-проектування, підготовка технологічних файлів і конструкторської документації.

Програми моделювання призначені для схемотехнічного і функціонального моделювання електронних пристроїв. Наприклад, MicroCap дозволяє аналізувати аналогові і цифрові прилади, створювати нові макромоделі, що полегшує моделювання без втрати важливої інформації про поведінку системи.

2.2 Види аналізу в ECAD

Вид аналізу обирають за класом пристрою, який моделюється, і функціями схеми, за якими схема має бути оптимізована. Доступні види аналізу в програмі MC12 наведено на рис. 2.2.

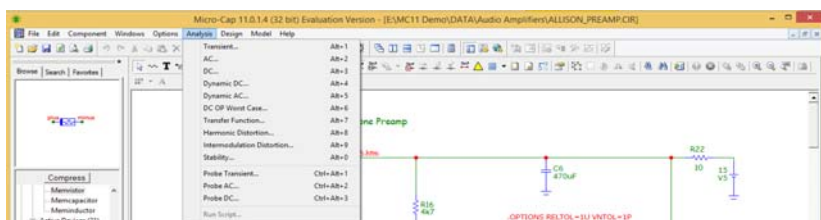


Рисунок 2.2 – Доступні види аналізу в програмі MC12

Перед аналізом необхідно визначити в редакторі SVE [2], або розрахунком режиму по постійному струму початкові умови: потенціали аналогових вузлів, струми індуктивностей і логічний стан цифрових вузлів, інакше вони будуть обнулені автоматично.

Одноваріантний аналіз дозволяє проаналізувати функції схеми при номінальних значеннях внутрішніх і зовнішніх параметрів. Отже, номінали компонентів, значення параметрів моделі, температура й інші параметри залишаються незмінними впродовж всього сеансу моделювання (для непараметричних схем).

До основних одноваріантних видів аналізу відносять:

- розрахунок перехідних процесів – *Transient*;
- розрахунок частотних характеристик – *AC*;
- розрахунок передатних функцій по постійному струму – *DC*.

Аналіз перехідних процесів в *ECAD* є найскладнішим в плані використаного математичного забезпечення, до якого висуваються найжорсткіші вимоги щодо збіжності та стійкості. Модель для цього виду аналізу майже не спрощується, тому і можливості постпроцесору є найширшими. Розрахунок ведеться із автоматично обраним кроком

по часу (хоча можна використовувати і інші аргументи), мінімальне значення якого визначається допустимою відносною похибкою RELTOL. У вікні *Global Setting* RELTOL звичайно $= 10^{-3}$. Якщо максимальний крок не задано, він визначається автоматично: $h_{max} = (T_{max} - T_{min}) / 100$.

Перед аналізом перехідних процесів автоматично розраховується статичний режим схеми (DC Operation Point – робоча точка), якщо початкові умови були обнулені. При аналізі формується система нелінійних алгебро-диференційних рівнянь, які алгебраїзуються (дискретизуються) методами високого порядку (наприклад, Гіра). Отримана в результаті цього система нелінійних алгебраїчних рівнянь (СНАР) лінеаризується методом Ньютона. Для розв'язання отриманої системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) використовують, наприклад, метод LU-перетворення.

Алгоритм розв'язання вихідних систем ММС в залежності від виду аналізу показано на рис. 2.3.

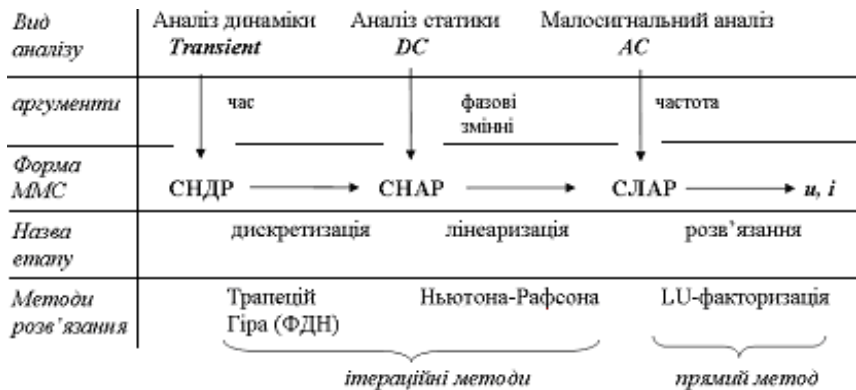


Рисунок 2.3 – Алгоритм формування і розв'язання математичних моделей схем

Спектральний аналіз виконується після розрахунку перехідних характеристик швидким перетворенням Фур'є із розрахунком коефіцієнта нелінійних спотворень.

Багатоваріантні види аналізу призначені для визначення області безпечних режимів і допусків, та для локальної параметричної оптимізації пристроїв електроніки. Вони можуть бути з детермінованим, або випадковим кроком зміни внутрішніх (W) / зовнішніх (Q) / вхідних (X) параметрів (див. рис. 2.4).

В принципі, розрахунок передаточних характеристик по постійному струму можна віднести до багатоваріантних видів аналізу, суть яких полягає в багаторазовому розрахунку пристроїв одноваріантними видами.

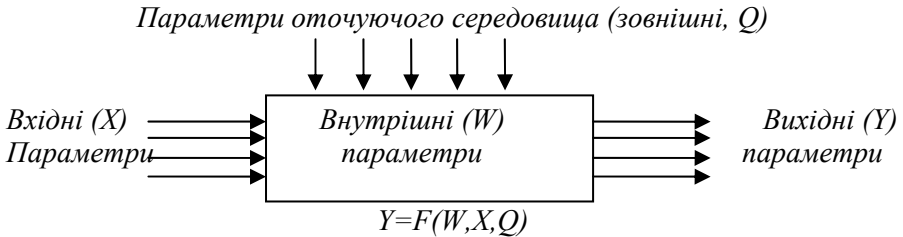


Рисунок 2.4 – Модель системи – «скринька»: схема і функціонал

Розрахунок сімейства функцій схеми при різних значеннях параметру (значення параметра моделі компонента) називають варіацією параметру (*Stepping/Sweep*). Крок варіації, початкове і кінцеве значення обирає користувач. В якості варійованого параметру може бути температура, для цього використовують теплові моделі компонентів. Види аналізу із використанням статистичних випробувань: аналіз чутливості, аналіз за методом Монте – Карло (*Monte Carlo*) та аналіз на найгірший випадок (*Worst Case*). Для розрахунку чутливості та найгіршого випадку використовують результати аналізу Монте – Карло, які теж пов'язані між собою.

Усі види варіації та статистичних випробувань доступні у будь-якому виді одноваріантного аналізу.

2.3 Основні функції постпроцесора

Усі сучасні програми ECAD мають потужні постпроцесори для обробки отриманих результатів: побудови методом лінійної інтерполяції графіків, виділення, панорамування, обробки і допоміжних обчислень над отриманими графіками. Функції постпроцесори відрізняються в залежності від виду аналізу і доступні через контекстне меню, яке активується у вікні завдання функції для аналізу. Майже усі можливості постпроцесора доступні при аналізі перехідних процесів (оскільки в цьому виді аналізу модель системи є найскладнішою, найбільш повною).

2.4 Етапи виконання роботи

1 Ознайомитися і встановити програмне забезпечення для моделювання мікро- та наноелектронних приладів та пристроїв.

2 Виписати у звіт перелік моделей основних аналогових приладів, доступних з бібліотеки ECAD.

3 Засвоїти правила компонування схем/моделей у редакторі схем.

4 Засвоїти правила роботи з вікнами опцій моделей. Виписати і проаналізувати склад опцій моделі елементу R.

5 Дослідити склад меню аналізу і теоретичне підґрунтя одного та багатоваріантних видів аналізу.

6 Дослідити функції постпроцесора.

Примітка: п.п. 4, 5 та 6 виконати на прикладі готових бібліотечних файлів з меню DATA MC12.

2.5 Контрольні запитання

1 Задачі аналізу/моделювання при проектуванні пристроїв електроніки.

2 Структура ECAD.

3 Чим програми моделювання відрізняються від програм проектування?

4 Види аналізу в ECAD.

5 Аналоговий алгоритм симуляції.

6 Що таке наскрізне проектування?

7 Можливості автоматизованого аналізу в ECAD пристроїв ІВТ. Функції постпроцесорів в ECAD.

8 Структура бібліотеки моделей в MC12.

9 Особливості основних одноваріантних видів аналізу.

10 Особливості основних багатоваріантних видів аналізу.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 “МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ IBC ”

Мета: дослідити схеми заміщення і основні рівняння моделей елементів інформаційно-вимірювальної техніки в ECAD.

3.1 Моделі RLC-елементів

До пасивних елементів електронних кіл відносять конденсатори, резистори і котушки індуктивності. Найпростішими математичними моделями (ММ) цих елементів є ідеальні моделі, які співпадають з умовним графічним зображенням елементів (рис. 3.1).

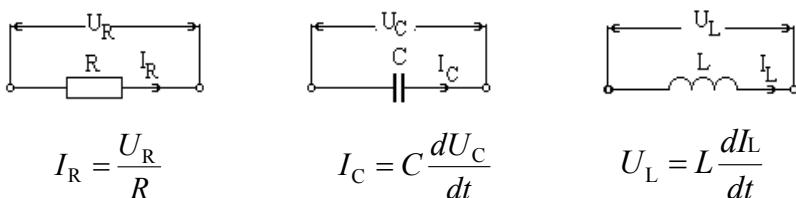


Рисунок 3.1 – Ідеальні ММ пасивних елементів

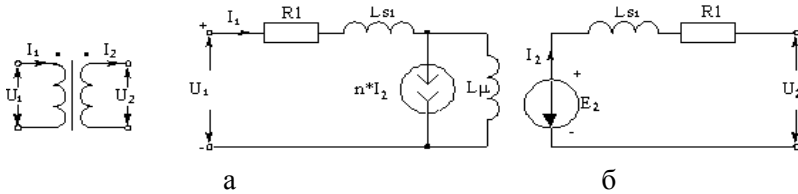
Проте, в залежності від області застосування і необхідної точності, ідеальні ММ потрібно ускладнювати. Так, для височастотних схем необхідно враховувати паразитні ємності та індуктивності виводів у резисторі, втрати енергії, опір розтікання, індуктивність і опір виводів в конденсаторі, паразитну міжвиткову ємність та опір котушки індуктивності. Чим більше нелінійностей враховує модель, тим вона універсальніша, і тим більшу кількість електронних приладів можна змоделювати на її базі. Однак складність моделі при цьому зростає, а економічність знижується.

З пасивних елементів складається схеми фільтрів, які є значущою складовою в САК.

3.2 Моделювання трансформатора

Найчастіше в електронних приладах застосовують імпульсні трансформатори, які працюють на лінійній ділянці кривої намагнічування, щоб зберегти плоску вершину імпульсу. У бібліотеці моделей програм схмотехнічного моделювання є декілька моделей

двохобмоточного трансформатора. Класичну модель двухобмоточного трансформатора наведено на рисунку 3.2, б. Її широко використовують у програмах схемотехнічного моделювання (PSpice, MC, EWB, OrCAD9.2 і т.д.).



а – умовне схемне позначення; б – еквівалентна схема
Рисунок 3.2 – Двохобмоточний трансформатор

На рис. 3.2: R_1 , L_{s1} – моделюють омичний опір та індуктивність розсіювання первинної обмотки, а R_2 , L_{s2} – опір та індуктивність розсіювання вторинної обмотки, I_μ – струм намагнічування осердя трансформатора, $n \cdot I_2$ – джерело струму, яке враховує вплив струму вторинної обмотки на первинну, E_2 – наведене у вторинній обмотці джерело напруги.

Математична модель трансформатора описується наступними рівняннями:

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 + L_{s1} \frac{\partial I_1}{\partial t} + L_\mu \frac{\partial I_\mu}{\partial t}; \quad L_\mu = \frac{\mu \cdot s \cdot w_1^2}{l}$$

$$U_2 = E_2 - I_2 \cdot R_2 - L_{s2} \frac{\partial I_2}{\partial t};$$

$$I_1 = I_\mu + n \cdot I_2; \quad n = \frac{w_2}{w_1},$$

де: U_1 , U_2 , I_1 , I_2 – напруги і струми первинної і вторинної обмоток;

μ – магнітна проникність матеріалу осердя;

s , l – площа перетину і довжина осердя трансформатора;

w_1 , w_2 – кількість витків первинної та вторинної обмоток;

n – коефіцієнт трансформації.

3.3 Моделі діодів

Напівпровідниковий діод – найбільш розповсюджений в електронній апаратурі нелінійний елемент [3,8]. Розрізняють лавинні, імпульсні та випрямні діоди. Напівпровідникові діоди використовують як у дискретній, так і в інтегральній схемотехніці. Застосування дискретних діодів характеризується широким діапазоном перетворених сигналів, як по потужності, так і по швидкодії. На рис. 3.3 наведено універсальну нелінійну модель, яка базується на рівняннях Еберса-Молла [8], що описують електричні процеси в діоді в статичному і динамічному режимах при прямому і зворотному зміщенні, за винятком області теплового пробію p - n переходу.

Схема заміщення (рис. 3.3) складається з ідеального діода, зображеного у вигляді нелінійного залежного джерела струму $I(V)$, ємності p - n -переходу C і об'ємного опору RS .

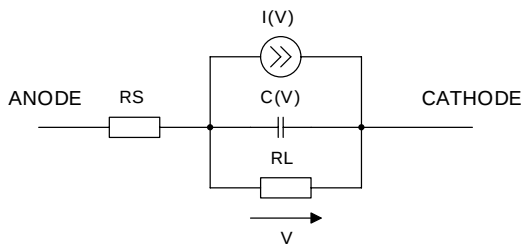


Рисунок 3.3 – Схема заміщення SPICE - моделі діоду

Струм діоду представляється у вигляді різниці струмів прямого і зворотного:

$$I = I_{fwd} - I_{rev}.$$

Залежність

$$I_{fwd} = I_n K_{inj} + I_{rec} K_{gen}$$

апроксимує ВАХ діода при позитивній напрузі на переході V . Тут K_{inj} – коефіцієнт інжекції, K_{gen} – коефіцієнт генерації:

$$K_{inj} = \begin{cases} \sqrt{IKF / (IKF + I_n)} & npi \\ 1 & IKF \leq 0 \end{cases}$$

$$K_{gen} = [(1 - V/VJ)^2 + 0,005]^{M/2}$$

I_{fwd} – прямий струм діода;

I_{rev} – зворотний струм діода $I_{rev} = I_{rev.high} + I_{rev.low}$;

$I_n = IS \{ \exp[V/(NR V_t)] - 1 \}$ – нормальна складова прямого струму I_{fwd} ;

$I_{rec} = ISR \{ \exp[V/(NR V_t)] - 1 \}$ – струм рекомбінації.

Струм діода при негативній напрузі на переході характеризує явище пробою. Він має дві складові:

$$I_{rev.high} = IBV \exp[-(V + BV)/(NBV \cdot V_t)],$$

$$I_{rev.low} = IBVL \exp[-(V + BV)/(NBVL \cdot V_t)],$$

де $V_t = kT/q$ – температурний потенціал переходу (0,026 В при номінальній температурі 27°C).

Ємність переходу C дорівнює

$$C = C_t + C_j,$$

де C_t – дифузійна ємність переходу;

$$C_t = TT \cdot G;$$

C_j – бар'єрна ємність переходу;

$G = d(K_{inj} I)/dV$ – диференційна провідність переходу для поточних значень I та V .

Значення параметрів IS , V_t , VJ , CJO , KF , AF , EG беруться для номінальної температури T_{nom} ; для кремнію $EG_0 = 1,16$ еВ, температурний коефіцієнт струму насичення $X_{TI} = 3$ для діодів з p - n -переходом і $X_{TI} = 2$ для діодів з бар'єром Шотткі.

Значення номінальної температури T_{nom} встановлюється за допомогою опції T_{nom} (за умовчанням 27°C).

У ECAD для діода і стабілітрона використовують одну універсальну модель. Область теплового пробою не моделюється.

3.4 Моделі БТ та тиристора

Найбільш розповсюдженим в ECAD для моделювання малопотужних біполярних транзисторів (БТ) є різновид моделі Еберса-Молла. На рис. 3.4 наведено структуру БТ із зображенням відповідних елементів схеми заміщення.

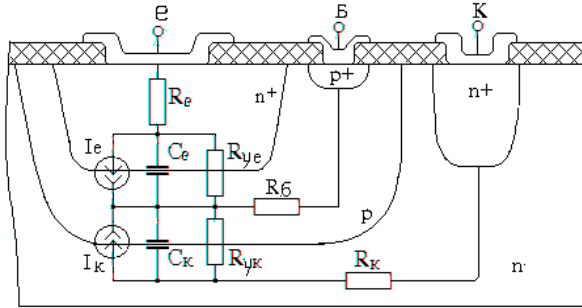


Рисунок 3.4 – Структура планарного n-p-n БТ з моделюючими елементами

Система рівнянь моделі переносу має вигляд:

$$I_e = (1 - \frac{1}{\beta_N}) I_N - I_I + C_e \frac{dU_e}{dt} + \frac{U_e}{R_{ye}};$$

$$I_\kappa = (1 - \frac{1}{\beta_I}) I_I - I_N + C_\kappa \frac{dU_\kappa}{dt} + \frac{U_\kappa}{R_{y\kappa}};$$

$$I_N = I_S (\exp \frac{U_e}{\phi_m} - 1); \quad I_I = I_S (\exp \frac{U_\kappa}{\phi_m} - 1);$$

$$C_{eб} = \frac{C_{e0}}{\sqrt{1 - \frac{U_e}{\phi_{ке}}}}; \quad C_{ед} = \frac{\tau_N}{\phi_m} (I_N + I_S); \quad C_{\kappaб} = \frac{C_{\kappa0}}{\sqrt[3]{1 - \frac{U_\kappa}{\phi_{кк}}}}; \quad C_{\kappaд} = \frac{\tau_I}{\phi_m} (I_I + I_S),$$

де I_e, I_κ – струми емітера і колектора;

I_N, I_I – струми переносу, які збираються переходами в прямому та інверсному включенні транзистора;

β_N, β_I – нормальний та інверсний коефіцієнти передачі по струму у схемі із загальним емітером;

U_e, U_κ – напруга на емітерному і колекторному переходах;

I_S – струм насичення;

$C_{eб}, C_{ед}, C_{\kappaб}, C_{\kappaд}$ – бар'єрна і дифузійна ємності емітерного та колекторного переходів відповідно;

ϕ_m – тепловий потенціал;

τ_N, τ_I – постійна часу накопичування зарядів в емітерному і колекторному переходах;

$\phi_{ке}, \phi_{кк}$ – контактна різниця потенціалів емітерного і колекторного переходів.

Тиристори типів SCR, PUT, TRIAC моделюють на основі так званої двохтранзисторної макромоделі, яка отримується наступним чином. Провівши уявно розріз (рис.3.5), можна представити типову тиристорну структуру (типу SCR) у вигляді сполучення NPN і PNP транзисторів, де колектор одного транзистора буде базою іншого, і навпаки [8].

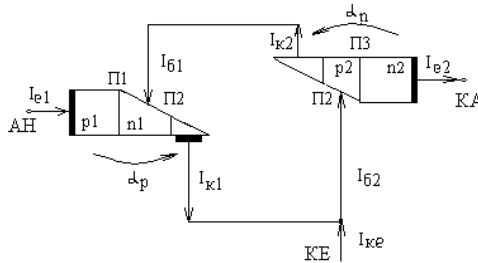


Рисунок 3.5 – Уявлення тиристора як поєднання двох транзисторів

Резистори, які шунтують емітерні переходи транзисторів, моделюють зниження α на малих струмах. Двотранзисторна еквівалентна схема тиристора дозволяє моделювати із достатньою точністю статичні і динамічні характеристики тиристора, якщо для транзисторів використовуються моделі, які враховують залежність передачі α від режиму (зарядокеровані).

Двотранзисторну макромодель для малопотужного тиристора досить часто застосовують у Spice-сумісних програмах (рис.3.6). Система параметрів і рівняння моделі тиристора, схему заміщення якого має вигляд:

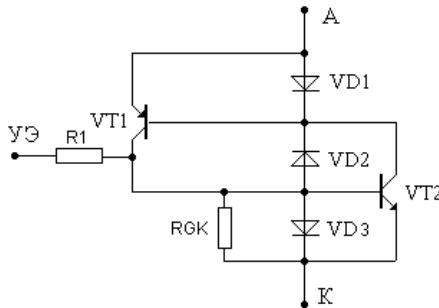


Рисунок 3.6 – Макромодель тиристора в MC

RGK : якщо $(IGT/IH) > .36$,
 $RGK = (IGT/IH) \cdot (.75/IGT)$;
 якщо $(IGT/IH) \leq .36$, $RGK = (IGT/IH) \cdot (.75/((.36 \cdot IH)))$;
 $TF1 = (BF1 \cdot BF2 - 1) \cdot Trise / (1.8 \cdot BF1)$;
 $TR1 = 1.25 \cdot K2 \cdot TQ$;
 $Trise = 2 \cdot TON / 3$;
 $AF1 = 1 + (IGT / (.9 \cdot IH))$;
 $BF2 = 9$; $BF1 = (AFT) / (1 - (AFT))$;
 AFT : якщо $(.5 < AF1 \leq .9)$ $AFT = (AF1 \cdot AF1)$,
 якщо $(AF1 > .9)$, $AFT = (AF1 \cdot 0.9)$;
 якщо $(AF1 \leq .5)$, $AFT = (AF1 \cdot 0.5)$;
 $IS1 = 10^{(VTMIN + .74) / .11}$; $IS2 = IS1$;
 $CJC2 = IH \cdot 0.21 / (K1 \cdot \sqrt{TON / DVDT})$;
 $CJE1 = (CJC2) \cdot .75$,

де RGK – опір розтікання затвор (керуючий електрод) - катод;
 IGT , IH – струми вмикання і утримання керуючого електрода;

$TF1$ – тривалість переносу заряду через базу у нормальному режимі;

$BF1$, $BF2$ – коефіцієнт передачі β струму транзисторів VT1, VT2;

$AF1$, AFT – коефіцієнт передачі α струму транзисторів;

$IS2$, $IS1$ – струм насичення транзисторів VT1, VT2;

$CJC2$ – ємність колекторного переходу транзистора VT2;

$CJE1$ – ємність емітерного переходу транзистора VT1;

$Trise$, TON – тривалість наростання струму, тривалість вмикання;

$DVDT$ – максимальна швидкість наростання напруги dV / dt ;

$VTMIN$ – мінімальна напруга затримки;

$RE1$ – опір розтікання емітера : $RE1 = 5e^{-3} \Omega$;

TQ – тривалість розсмоктування залишкового заряду;

$K1$, $K2$ – емпіричні коефіцієнти.

Модель оформлено як макрос, який викликається так:

$SCR(IH, IGT, TON, VTMIN, VDRM, DVDT, TQ, K1, K2)$.

3.5 Моделювання польових транзисторів

Транзистори, які управляються полем, розподіляють на два підкласи: транзистори з ізольованим затвором – МОПТ (MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor – Field-Effect-Transistor), і транзистори, які

управляються зворотнозміщеним р-n переходом – ПТКП (JFET: Junction FET) і CIT (SIT: Static-Induction-Transistor). У силовій електроніці переважають МОНТ з індукованим каналом (в іноземній літературі – *MOS FET* збагаченого типу). Транзистори цього типу характеризуються межевою напругою, при якій виникає провідність каналу. В області малої напруги між стоком і витіком (відкритий транзистор) їх можна представити еквівалентним опором (на відміну від насиченого біполярного транзистора – джерела напруги). Довідкові дані на ключові транзистори цього типу включають значення опору стік-витік у відкритому стані, який помітно збільшується при збільшенні максимально допустимої напруги стік-витік [11].

Елементарну комірку ПМОНТ (МОНТ із подвійною дифузією) наведено на рисунку 3.6.

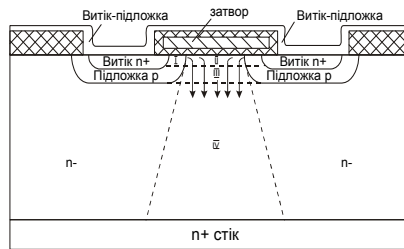


Рисунок 3.7 – Елементарна комірка польового транзистора

В останніх професійних версіях ECAD представлені більш 20 моделей для МОНТ, як емпіричних (electrical), так і фізичних (geometrical) різного ступеню складності, який залежить від рівня абстрагування від властивостей реального приладу.

Моделі МОНТ (Ходжеса, Хофстайна) [8] враховують роботу транзистора в усіх областях ВАХ, окрім теплового пробою. Вони базуються на схемі заміщення (рис.3.7), де C_{3C} і C_{3B} – ємності затвор-стік і затвор-витік, R_C і R_B – об'ємні опори областей стоку і витіку, J_C – залежне джерело струму, яке моделює статичні характеристики транзистора, D_C і D_B – діоди, які моделюють р-n переходи стік-підкладка, витік – підкладка.

При аналізі електронних схем, як правило, не враховують опори R_{3C} , R_{3B} , R_C , R_B , а закриті діоди D_C і D_B представляються їхніми

бар'єрними ємностями $C_{СП}$ і $C_{ВП}$. Різні моделі відрізняються виглядом залежності $J_C = f(U_{CB}, U_{ЗВ})$.

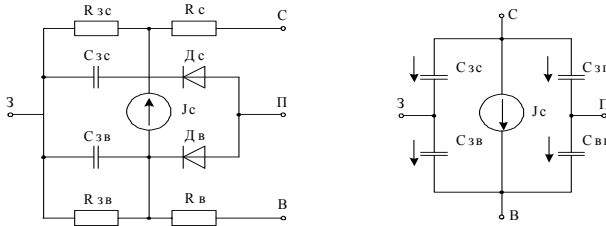


Рисунок 3.8 – Еквівалентні схеми моделей МОНТ

Нижче наведені вирази для триступінчастого джерела струму J_C у моделі Ходжеса.

Для активної області I:

$$J_C = Be \cdot U_c \left[\left(U_z - U_{зпор} + \frac{2}{3} \eta \cdot U_n \right) - \frac{1}{2} (1 + \eta) \cdot |U_{св}| \right] + G_c \cdot U_{св},$$

$$\text{якщо} \quad |U_{св}| \leq \frac{U_z - U_{зпор} + \frac{2}{3} \eta \cdot U_{ne}}{1 + \eta}.$$

Для області насичення II:

$$J_C = \frac{1}{2} \cdot \frac{Be}{1 + \eta} \cdot \left(U_z - U_{зпор} + \frac{2}{3} \eta \cdot U_n \right)^2 \cdot \text{Sign}(U_c) + G_c \cdot U_c,$$

$$\text{якщо} \quad |U_{св}| > \frac{U_z - U_{зпор} + \frac{2}{3} \eta \cdot U_{ne}}{1 + \eta}.$$

Для області відсікання III:

$$J_C = 0, \text{ якщо} \quad U_z \leq U_{зпор} - \frac{2}{3} \eta \cdot U_{ne},$$

де J_C – струм стоку МОНТ у статичному режимі;

$U_C, U_z, U_{П}, U_{зпор}$ – напруги стік-витік, затвор-витік, підкладка-витік, напруга порога відповідно;

Be, G_c – питома крутість і внутрішня провідність МОНТ;

η – коефіцієнт, який враховує вплив підкладки.

Вхідними даними для геометричних моделей є система фізико-топологічних параметрів приладів, яка надається деякими виробниками (зокрема, IRF) у форматі Spice - підпрограм.

3.6 Етапи виконання роботи

1. Відкрити файл TRANS.cir в програмі MC, ознайомитися зі способами моделювання трансформатора. Здійснити моделювання за допомогою Transient та AC – аналізу, занести в звіт і проаналізувати отримані характеристики.
2. Зібрати в середовищі ECAD-програми (MC, Multisim тощо) схему для вимірювання ВАХ діода (рис. 3.9).

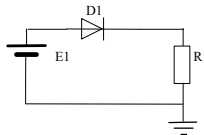


Рисунок 3.9 – Схема для вимірювання ВАХ діода

Провести моделювання на постійному струмі, приєднавши вимірювальні прилади (тестер, амперметри, вольтметри) і отримати ВАХ. На отриманих характеристиках визначити характерні точки (напругу пробою, контактну різницю потенціалів). За характеристиками визначити диференційний опір у прямому і зворотному включення діода (змінити напругу пробою в моделі діода на значення 2 В). Отримані результати занести в звіт.

3. Зібрати в середовищі ECAD-програми (MC, Multisim тощо) схему для вимірювання ВАХ БТ (рис. 3.10), або використати з бібліотеки MC готовий файл *ivbjt.cir*.

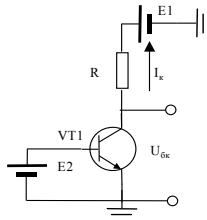


Рисунок 3.10 – Схема для вимірювання ВАХ БТ

Провести моделювання, отримати вихідні і вхідні ВАХ, визначити на них ділянки, відповідні активному режиму і насиченню. Занести в звіт.

4. Відкрити в програмі *MC* файл *THY1.cir*, в режимі *Transient* отримати ВАХ для використаних типів тиристорів, проаналізувати їх, занести результати в звіт.

5. Зробити висновки (спільне та відмінне в функціонуванні та моделюванні напівпровідникових приладів).

6. Зібрати в середовищі ECAD-програми (MC, Multisim тощо) схему для вимірювання ВАХ МОНТ. Ознайомитися із системою параметрів моделі Шіхмана-Ходжеса, виписати основні параметри в звіт. Провести моделювання, отримати вихідні та прохідні ВАХ, визначити на них ділянки, відповідні активному режиму і насиченню, визначити порогову напругу за прохідною характеристикою.

3.7 Контрольні запитання

1 Принципи побудови зосереджених моделей на мікрорівні (схемотехнічному рівні).

2 Моделі пасивних елементів. Компонентні рівняння для пасивних двохполюсників, топологічні рівняння, теореми комутації.

3 Класифікація, принципи дії трансформаторів.

4 Моделі трансформаторів, дроселів.

5 Класифікація, принцип дії діодів. Класифікація моделей діодів.

6 Зобразити структуру діода і нанести на неї на відповідні ділянки елементи схеми заміщення моделі Еберса-Молла.

7 Які елементи схеми заміщення «відповідають» за динамічні властивості діоду? За статичні?

8 Особливості моделювання БТ.

9 Пояснити функціонування тиристора на базі двотранзисторної макромоделі.

10 Переваги та недоліки польових приладів порівняно із біполярними, галузі використання.

11 Модель Шіхмана-Ходжеса: система рівнянь для МОНТ.

12 Класифікація моделей польових транзисторів в MC12.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

“МОДЕЛІНГ ТА СИМУЛЯЦІЯ АНАЛОГОВИХ І ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ”

Мета: дослідити макромоделі операційних підсилювачів (ОП) макромоделі основних логічних елементів та принципи подійного алгоритму.

4.1 Макромоделі операційного підсилювача (ОП)

Макромоделі аналогових схем будують, як правило, по блоках, що відповідає структурі самих схем. Сучасні аналогові ІМС відрізняються регулярністю структури. Це дозволяє виділити як типові наступні каскади: диференціальний підсилювач, віддзеркалювач струму, вихідний підсилювач, проміжний підсилювальний каскад за схемою зі спільним емітером. Для типових каскадів розробляють відповідні моделі з врахуванням режимів їхньої роботи. Моделі типових каскадів спільно з рядом керованих джерел, утворюють базовий набір макроелементів, які використовуються для оперативного створення макромоделей аналогових і цифро-аналогових приладів. Типову структуру макромоделі інтегральних аналогових схем схемотехнічного рівня наведено на рис. 4.1.

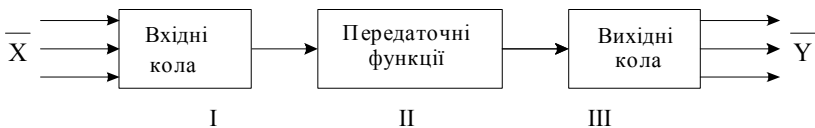
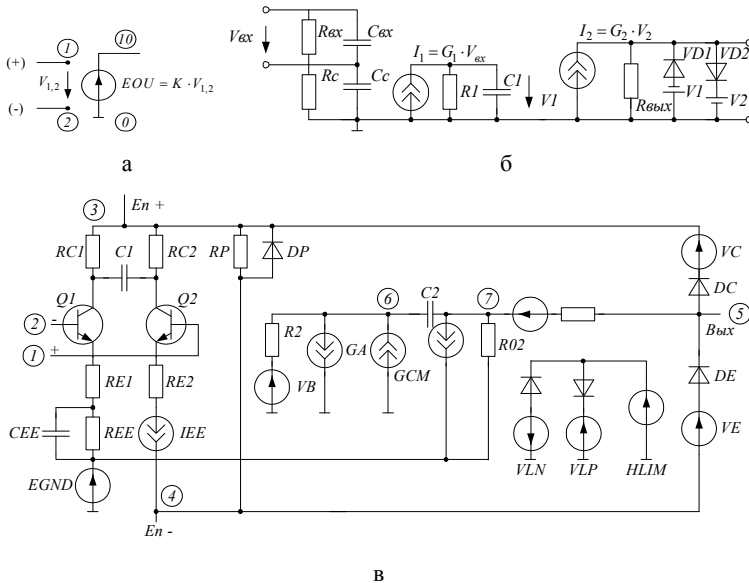


Рисунок 4.1 – Типова структура макромоделі

У бібліотеці SPICE-сумісної програми MC використовують макромоделі трьох рівнів складності [6]:

- LEVEL1 – найпростіша лінійна модель, представлена джерелом струму, що керується напругою (рис. 5.2, а);
- LEVEL2 – лінійна трикаскадна макромодель, так звана «двополюсна», яка імітує два полюси передатної функції операційного підсилювача, обмеження швидкості наростання вихідної напруги, кінцевий коефіцієнт підсилення із частотою зрізу та кінцевий вихідний опір (рис. 4.2, б);

- LEVEL3 – нелінійна макромодель, яка враховує не тільки обмеження швидкості наростання вихідної напруги, а й значення вихідного опору на постійному і змінному струмах, струм і напругу зміщення, «запас» по фазі на частоті одиничного підсилення, постійність коефіцієнта площі підсилення на АЧХ, коефіцієнт придушення синфазного сигналу, реальний діапазон вихідної напруги (рис.4.2, в).



- а – ОП як ідеальне джерело напруги, кероване напругою;
 б – двополусна макромодель ОП з нелінійною передаточною характеристикою;
 в – макромодель ОП з вхідним диференціальним каскадом (модель Бойля)

Рисунок 4.2 – Макромоделі ОП

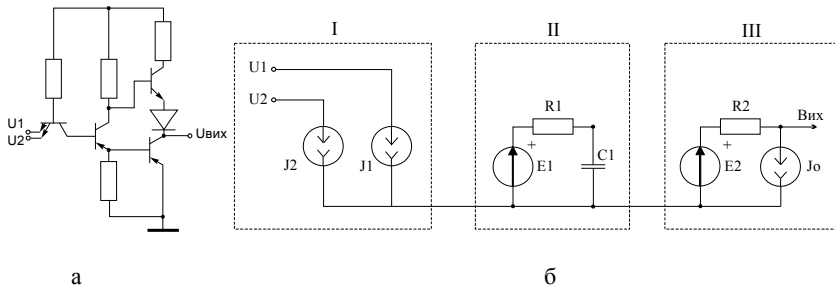
До набору параметрів моделі першого рівня входять значення коефіцієнта підсилення і вихідного опору. До набору параметрів моделі третього рівня входять, крім перелічених вище параметрів, значення ємності, напруги живлення, залежності параметрів вхідного каскаду від температури тощо – усього 23 параметри [8].

4.2 Макромоделі цифрових пристроїв

Пристрої цифрової електроніки поділяють на *комбінаційні* (сигнал на виході залежить від комбінації сигналів на входах) і *послідовнісні* (від слова „послідовність”), сигнал на виході яких залежить не тільки від комбінації сигналів на входах, але й від попереднього стану пристрою, тобто пристрій має пам'ять.

При розробці макромоделей логічних ІМС враховують, що електричні характеристики за зовнішніми виводами ІМС в межах серії або навіть декількох серій ідентичні, так само як ІМС, які виконують різноманітні логічні операції, мають однакові будови вхідних і вихідних кіл. Так для всіх ТТЛ ІМС входами є емітери багатоемітерних транзисторів, а виходами – складні інвертори. Тому вхідне коло в макромоделях ТТЛ і ТТЛШ схем задається спрощеною моделлю багатоемітерного транзистора. Для КМОН-схем модель вхідного кола складається з вхідних опорів та ємностей. Це враховується при побудові універсальних моделей логічних ІМС.

Особливо чітко виділяється описана вище структура у вигляді трьох блоків у макромоделях логічних ІМС. Типовим прикладом таких макромоделей може бути макромодель двовходового ТТЛ-вентиля І-НІ/НАND (рис. 4.3).



а – принципова схема; б – макромодель
Рисунок 4.3 – Двовходовий ТТЛ-вентиль

Тут джерела струму $J1$ і $J2$ відображають вхід 1 і вхід 2 та задаються у вигляді таблиць або діодами. Джерело напруги $E1=f(I1, I2)$ реалізує логічну функцію вентиля, а його інерційні властивості – елементи $R1, C1$. Кероване джерело $E2=f(U_{C1})$ відображає вихідну напругу вентиля, а опір $R2$ – вихідний опір. Генератор струму $J0$ введений для часткового врахування зміни режимів вихідного кола.

В Spice-сумісних програмах макромоделі примітивних вентилів (елементарних комбінаційних пристроїв) описуються на вхідній мові Spice, але для користувача-розробника схем необхідно лише заповнити атрибути моделей та визначити необхідні часові параметри в меню. На вхідних мовах програм ECAD, частіше за все опис макромоделей враховує не тільки алгоритм функціонування, але й структуру об'єкта.

Для опису кожного цифрового елемента використовують макромоделі, яка складаються з моделі I/O – вхід/вихід (задають комплексні опори вхідних та вихідних кіл), макромоделей А/Ц і Ц/А – інтерфейсів (АТОД, DTOA – задають схеми заміщення та алгоритм перетворення аналогових сигналів у цифрові та навпаки)) та моделі динаміки (Timing Model) із логікою і алгоритмом функціонування, часовими параметрами перемикавання приладу. Останні поділяються на синхронні та асинхронні, асинхронні враховують час проходження сигналу зі входу на вихід ІМС (Pin-to-Pin Delay).

Моделі аналогових та цифрових приладів в ECAD-програмах принципово різні. Якщо моделі та макромоделі аналогових пристроїв мають схеми заміщення, по яких формуються компонентні й топологічні рівняння на основі законів Ома і Кірхгофа, моделі цифрових пристроїв представляються тільки реактивними лінійними, або нелінійними схемами заміщення входів і виходів (модель I/O – input/output) для узгодження із аналоговою частиною схеми. Отже, модель цифрового пристрою є алгоритмічною, фактично, це – підпрограма.

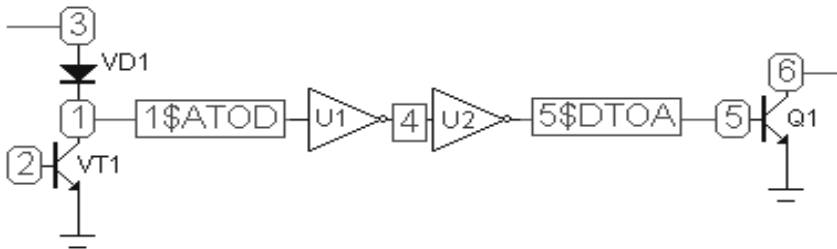
Макромоделі цифрових пристроїв можна назвати функціонально-логічними на відміну від компонентно-топологічних моделей аналогових приладів, загальними рисами яких є наявність схем заміщення та функціональних залежностей.

4.3 Симуляція аналогово-цифрових пристроїв

В сучасних програмах аналогово-цифрові пристрої моделюються по окремим підпрограмам, але в єдиній оболонці, завдяки об'єднуючій ролі універсальних редакторів схем, в яких збираються схеми та компонується моделі, та постпроцесорів, в яких виконується графічна обробка отриманих в результаті аналізу даних. Програма розглядає пристрій як аналогово-цифровий, якщо в описі

схеми присутні макромоделі цифрових елементів і моделі та макромоделі аналогових приладів.

Програмно розрізняються вузли аналогові, цифрові та А/Ц, Ц/А (рисунок 4.4), у останні автоматично додаються прилади сполучення (програмно-інструментальні інтерфейси А/Ц, Ц/А, джерела живлення із дискретними рівнями, заземлення із потенціалом „0” в форматі Integer), які не відображуються на схемі, але забезпечують обмін даними між підпрограмами моделювання електричних процесів в аналоговій частині ланцюга і п'ятизначного моделювання цифрової частини [9].



1-3,5,6 – аналогові вузли, 4 – цифровий вузол;
1\$ATOD, 5\$DTOA – вузли узгодження (інтерфейсні)

Рисунок 4.4 – Приклад позначення різних типів вузлів в МС

Алгоритм будування та розв'язання рівнянь ММС в аналоговій та цифровій частинах теж різний. Для аналогової частини діє традиційний алгоритм послідовної алгебраїзації та лінеаризації вихідної системи диференційних рівнянь ММС, отриманих в неявному вигляді модифікованим методом вузлових потенціалів.

В цифровій частині схеми моделювання виконується *подійне* моделювання за правилами п'ятизначної логіки, де дискретні рівні сигналу приймають значення 1, 0, X, F, R (дозволені рівні сигналу/напруги, або **алфавіт**).

При моделюванні пристроїв мішаного типу, кроки інтегрування в аналоговій та цифровій частинах пристрою обираються незалежно один від одного. Мінімальне значення кроку інтегрування у цифровій частині визначається кроком дискретизації (частота дискретизації, як правило, 10ГГц), або параметром *Pin-to-Pin Delay*. Крок інтегрування у аналоговій частині визначається найменшою постійною часу у

схемі. Загальна кількість кроків залежить від значення максимальної постійної часу в схемі, і в аналогово-цифровій схемі значно вища за кількість кроків у аналогових схемах.

Звичайно, аналогово-цифрові пристрої моделюються в режимі розрахунку перехідних процесів (*Transient*), однак інші режими – по постійному (*DC*) та змінному (*AC*) струму також доступні при певних спрощеннях схеми. Математичні моделі мішаних пристроїв з жорсткими, оскільки відношення постійних часу не менше 10^5 , тому до алгоритмів моделювання висуваються вимоги підвищеної тривкості та збіжності.

4.4 Етапи виконання роботи

1. Занести в звіт схеми заміщення макромоделей операційних підсилювачів (ОП) трьох рівнів.
2. Дослідити принципову схему ОП з бібліотеки МС (файл *UA741.cir*), визначити структурні одиниці, занести в звіт отриману структурну схему.
3. Відкрити в програмі МС файл *OPAMP1.cir*, занести досліджувану схему в звіт.
4. Ознайомитися з наборами вхідних параметрів макромоделей ОП трьох рівнів складності. Занести в звіт параметри ідеалізованої моделі.
5. Провести малосигнальний *AC*-аналіз, визначити відмінності використаних макромоделей з точки зору адекватності отриманих частотних характеристик. Результати і характеристики занести в звіт.
6. Провести *Transient*-аналіз, визначити відмінності використаних макромоделей з точки зору адекватності / точності отриманих перехідних характеристик. Результати і характеристики занести в звіт.
7. Занести в звіт класифікацію моделей цифрових компонентів.
8. Занести в звіт параметри моделей цифрових схем.
9. Скласти таблицю порівняння моделей аналогових та цифрових пристроїв.
10. Дослідити особливості моделювання аналогово-цифрових схем в МС12 (файли *mix.cir*).
11. Визначити особливості представлення результатів моделювання аналогових та цифрових схем в постпроцесорі.

4.5 Контрольні питання

- 1 Операційні підсилювачі: призначення, структурні схеми.
- 2 Принципи побудови макромоделей аналогових інтегральних схем.
- 3 Що таке макромодель?
- 4 Макромоделі ОП: порівняння.
- 5 Особливості АС-аналізу.
- 6 Спектральний аналіз.
- 7 Поняття адекватності і точності моделювання.
- 8 Логічні функції та відповідні їм логічні елементи (NOT, AND, NAND, OR, NOR, XOR, XNOR, buffer).
- 9 Класифікація цифрових пристроїв та їхніх моделей.
- 10 Порівняти моделі цифрових та аналогових компонентів.
- 11 П'ятизначний подійний алгоритм.
- 12 Проблеми моделювання аналогово-цифрових схем.

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

«МОДЕЛЮВАННЯ НА СИСТЕМНОМУ ТА СТРУКТУРНОМУ РІВНЯХ АБСТРАКЦІЇ. МУЛЬТИДОМЕННЕ МОДЕЛЮВАННЯ»

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

5.1 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 5.1), VisSim, SimApp, SamSim, ПК MBTU.

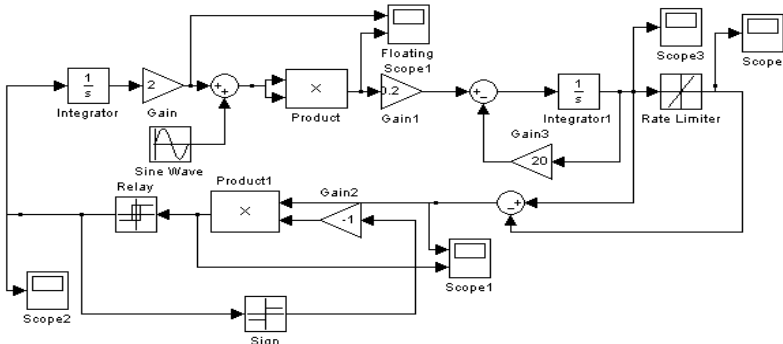


Рисунок 5.1 – Схема для дослідження екстремальної системи в пакеті Simulink

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.

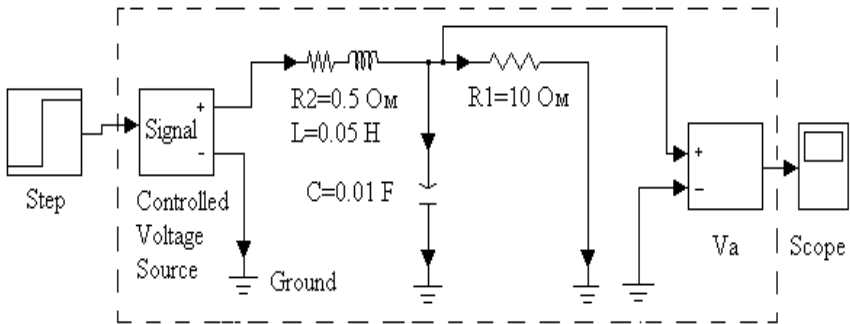


Рисунок 5.2 – Схема для мультидоменового моделювання електричного кола в пакеті SimPowerSystems

Головна відмінність структурного і фізичного мультидоменового моделювання не тільки у формі завдання вихідної інформації, але і в використовуваних 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 принципових 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 наладці 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].

5.2 Математичний базис моделювання систем

Будь-яку динамічну систему, мультидоменну в тому числі, можна описати однією з форм (або їх комбінацією) представлених на рисунку 5.3.

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.

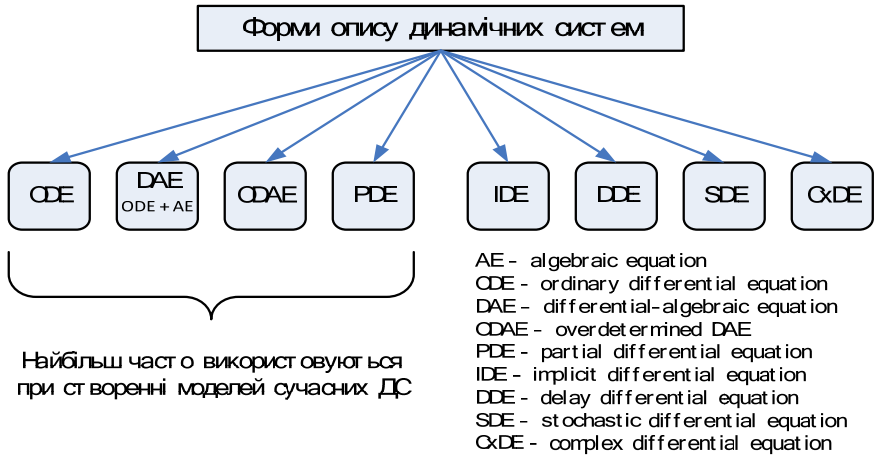


Рисунок 5.3 – Форми опису ДС

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].

5.3 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 проектування:

- САПР функціонального проектування, 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 проектується підсистеми різної фізичної природи як на макрорівні (функціональний рівень для змішаних систем), так і на мікрорівні (схемотехнічний рівень). В CAM від ECAD можуть бути передані програми для станків із ЧПУ, роботів та синтезовані технологічні карти.

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

5.4 Реалізація моделювання систем в програмах ECAD

В бібліотеках CAD та CAE макромоделі ланок, які необхідні для побудови функціональної моделей систем, зокрема, операційні багатополюсники, які можуть виконувати операції інтегрування, диференціювання та всі арифметичні дії та чотирьохполюсники 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 різності, 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 5.4 наведена маромодель елемента з бібліотеки ECAD програми MC12, який реалізує затримку сигналу (в секундах), на рисунку 5.5 – макро модель елемента із передаточною функцією (обмеження, насичення сигналу), вид якої зображено на УГП цього двополюсника.

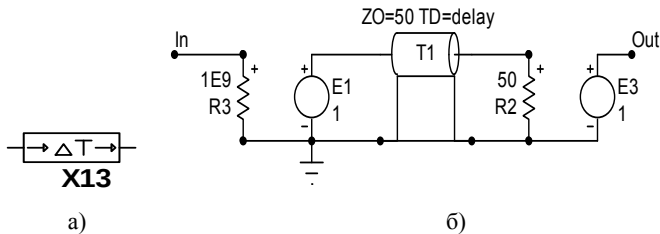


Рисунок 5.4 – Ланцюг Analog delay Macro: а – УГП; б – схема заміщення

CLIP MACRO

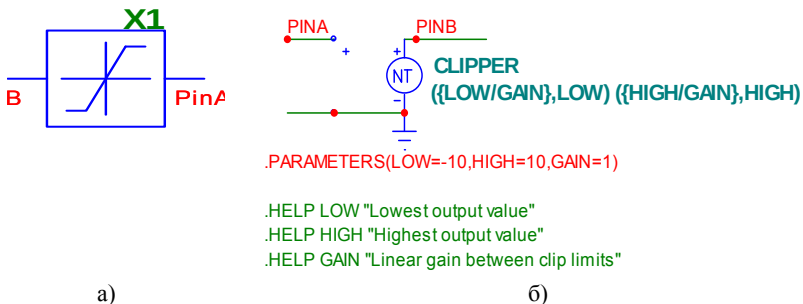


Рисунок 5.5 – Ланцюг CLIP Macro: а – УГП; б – схема заміщення із керованим джерелом, в якому передаточна функція задана таблично (NT)

Інші структурні ланки та блоки з бібліотеки програми MC 12 наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – 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				

5.5 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.

5.6 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.

6 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).

6.1 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 6.1 представлена модель системи, де енергетична частина представлена графом зв'язків, а керуюча – блок-схемою, що включає спрямовані ланки [2].

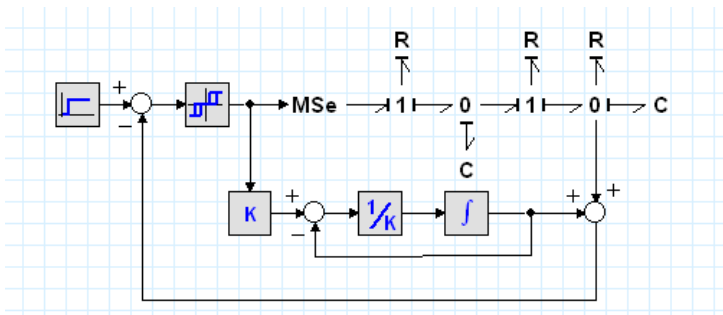


Рисунок 6.1 – Приклад моделі системи в 20-sim

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 проектувальникам, 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-Powell, 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 Боде, годографа Найквіста, графіка Нікольса, діаграм нулів-поліусів, 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 rate). 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 вхід 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.

6.2 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-поліосів 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 6.2).

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

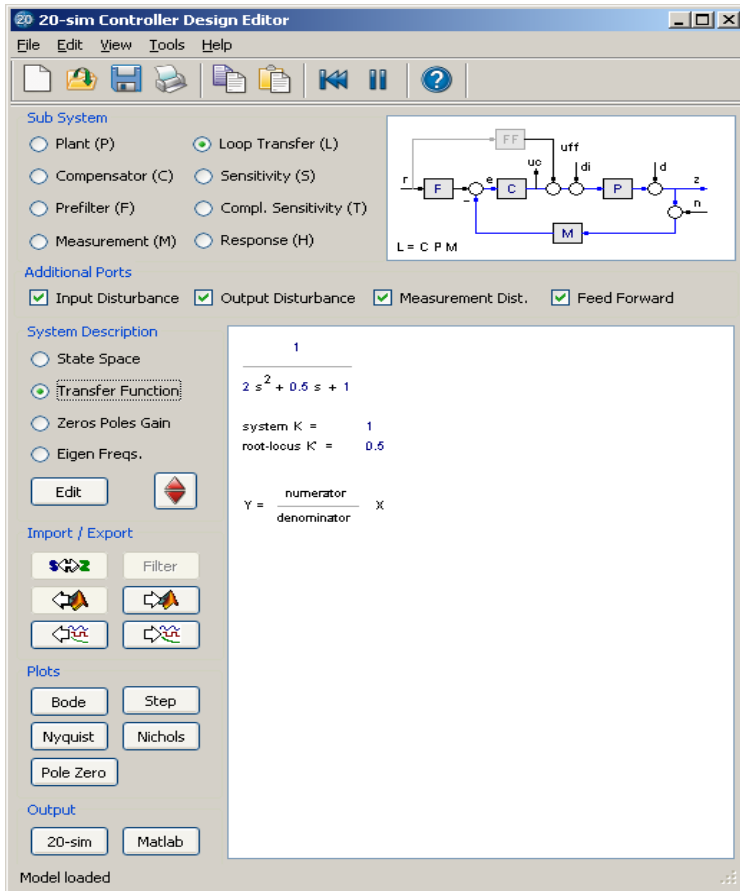


Рисунок 6.2 – Головне вікно CDE

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 6.3, 6.4, 6.5 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 .

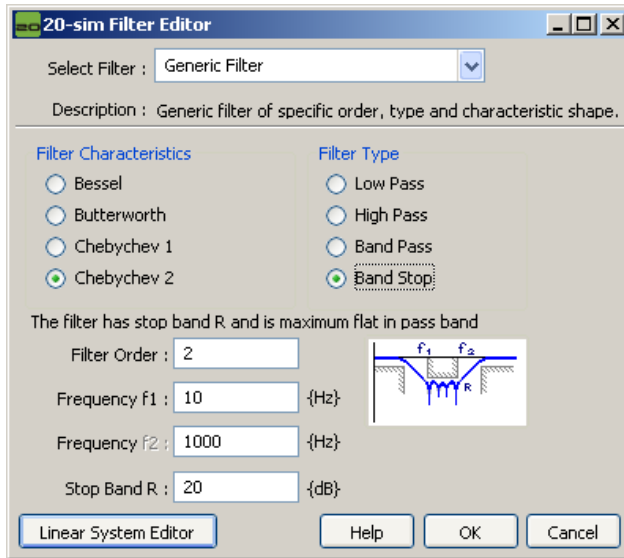


Рисунок 6.3 – Параметри фільтрів загального шаблону

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).

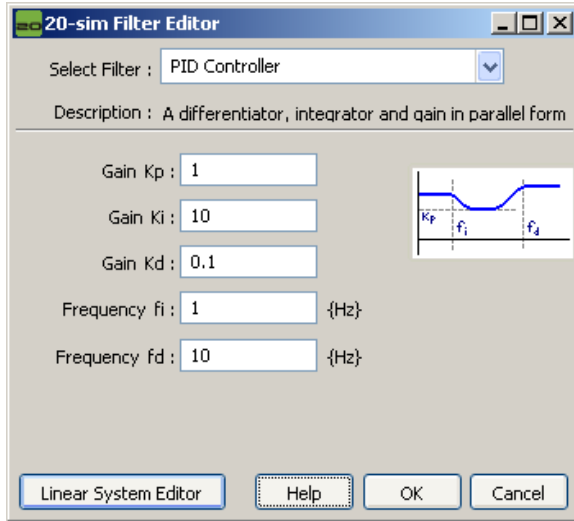


Рисунок 6.4 – Опис паралельного ПІД-регулятора

ПІД-компенсатор (рис. 6.5) 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.

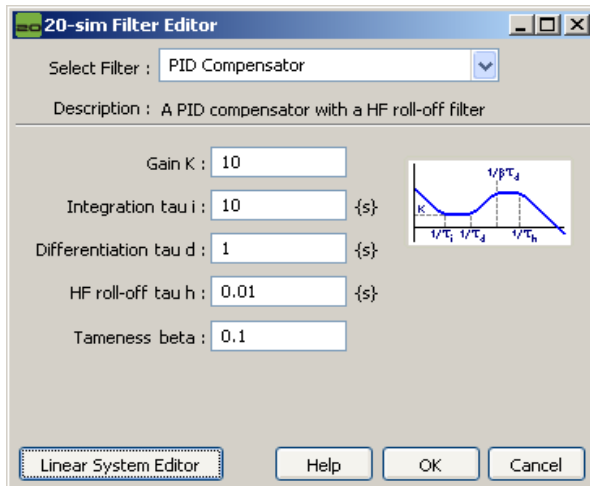


Рисунок 6.5 – Опис ПІД-компенсатора у редакторі фільтрів

Такий компенсатор описується постійними часу інтегруючої (Integration tau i) τ_i та диференціюючої частини (Differentiation tau d) τ_d ; коефіцієнтом підсилення K на інтервалі частот від $1/\tau_i$ до $1/\tau_d$; коефіцієнтом «слухняності» (tameless) або крутизни (нахилу) β , що впливає на поведінку диференціювання, тобто на крутизну АЧХ в зоні $1/\tau_d \dots 1/\beta\tau_d$. Виходячи з передавальної функції ПД-компенсатора, знайденої в [45], можна сказати, що використовується послідовне з'єднання внутрішніх елементів (П-, І-, Д-частин та фільтра).

Синтезу декілька типів ПД-регуляторів з різним набором вхідних параметрів. Проектувальник регуляторів (CDE) дозволяє синтезувати повну структурно завершену САК з контролем проміжних сигналів, використовуючи будь-яку форму опису, представлену в LSE. Структурно повна система в CDE може бути представлена рисунком 6.6.

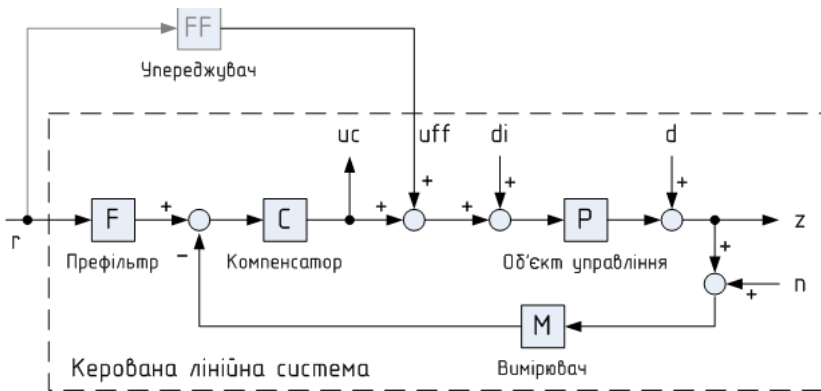


Рисунок 6.6 – Структура САК, що використовується в CDE

Така система складається з об'єкта управління P (Plant), регулятора або компенсатора C (Compensator), префільтра F (Prefilter), вимірювача M (Measurement), упереджувача FF (Feed Forward), та ряду вхідних/вихідних сигналів: r – вхідний вплив на систему або завдання, uc – чистий вихідний сигнал компенсатора, uff – вхідний сигнал від упереджувача, di – вхідне збурення об'єкта управління (input disturbance), d – вихідне збурення об'єкта управління (output disturbance), z – контрольований результуючий вихідний сигнал системи, n – збурюючий вплив з боку вимірювача. CDE також дозволяє оцінити чутливість системи S (Sensitivity), передавальну

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 CAE, 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 6.7.

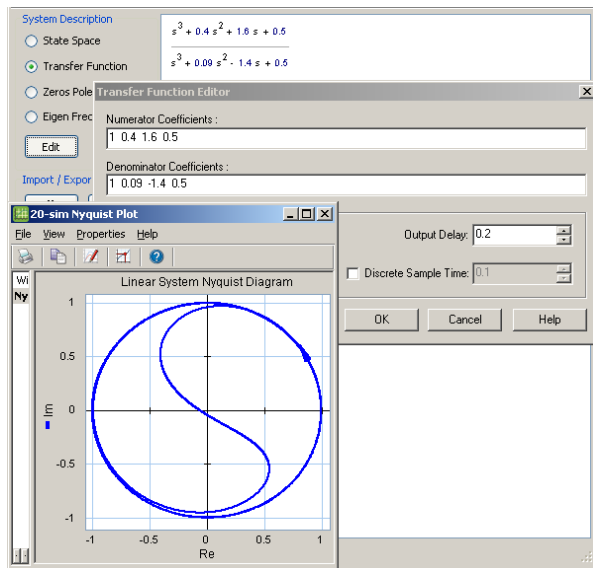


Рисунок 6.7 – ЧХ системи з вихідною затримкою (0,2с), зробленою в LSE

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).

6.3 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).

6.4 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.

6.5 Етапи виконання роботи

1. Дослідити структуру та параметрів в підпрограмі CDE, занести в звіт.
2. Використовуючи редактор LSE, розробити ПД-регулятор, отримати його характеристики.
3. Використовуючи редактор CDE, синтезувати ПД-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.

6.6 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. **Рябенський, В.М.** Основи моделювання систем і процесів в електротехніці: використання пакета прикладних програм MATLAB / Simulink [Текст] / В.М. Рябенський, С.В. Драган, Л.В. Солобута – 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
- ІІК MBTU
- SystemModeler

CAE = Computer Aided Engineering

CAS = Computer Algebra System

CAD = Computer Aided Design

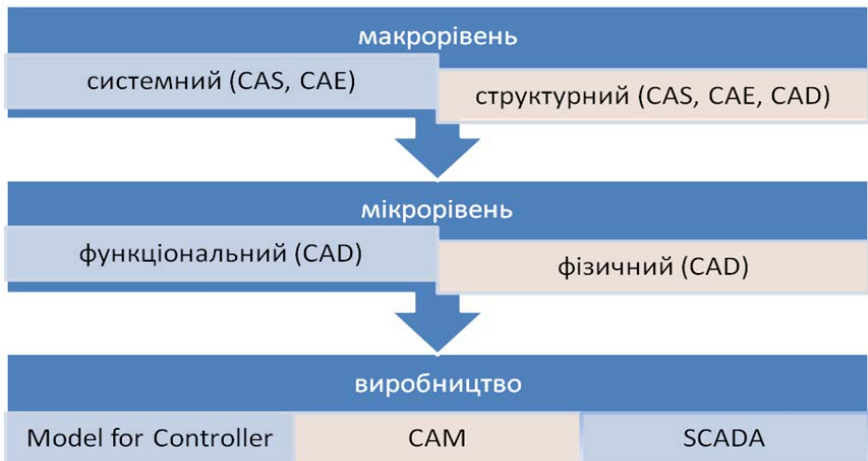
CAS-системи:

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

CAD-системи:

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

НАСКРІЗНЕ ПРОЕКТУВАННЯ/ВІРТУАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

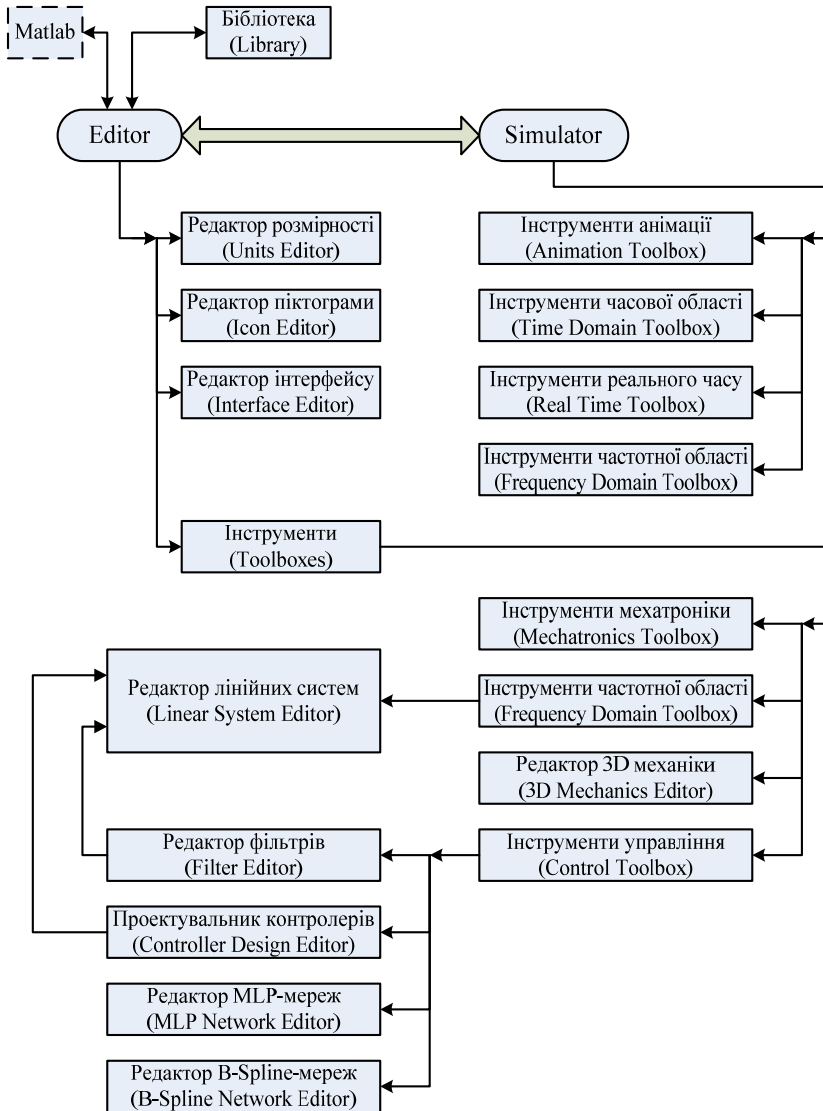


CAM = Computer Aided Manufacturing

SCADA = Supervisory Control and Data Acquisition

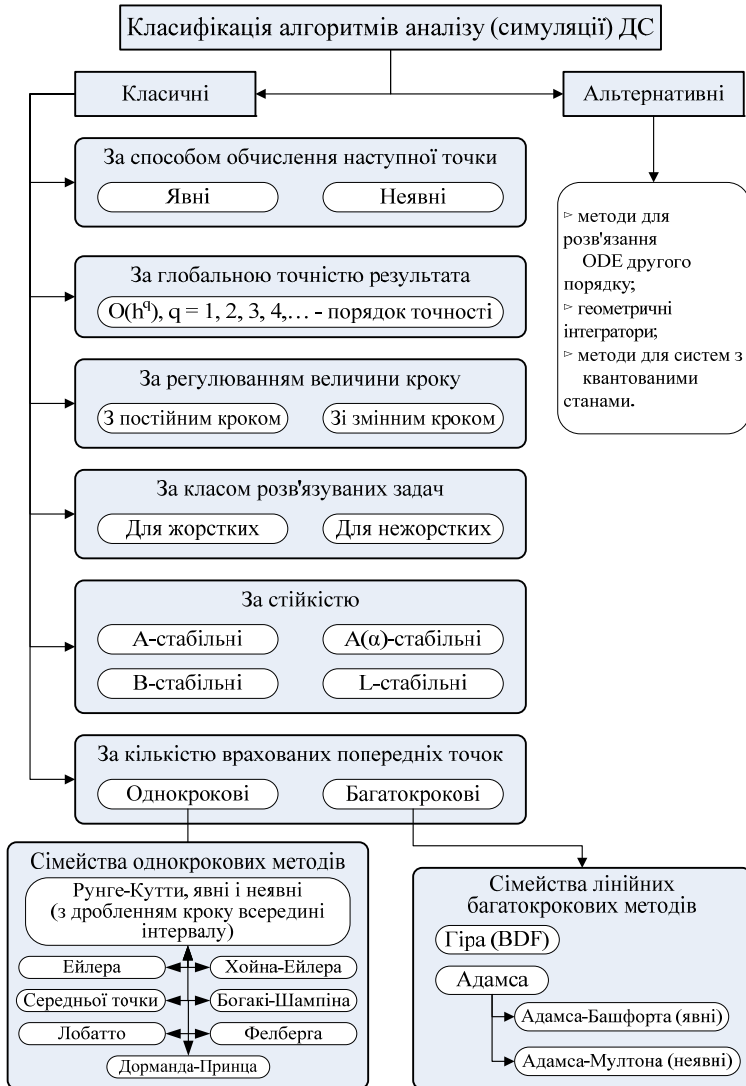
Додаток Б

Загальна структура 20-SIM



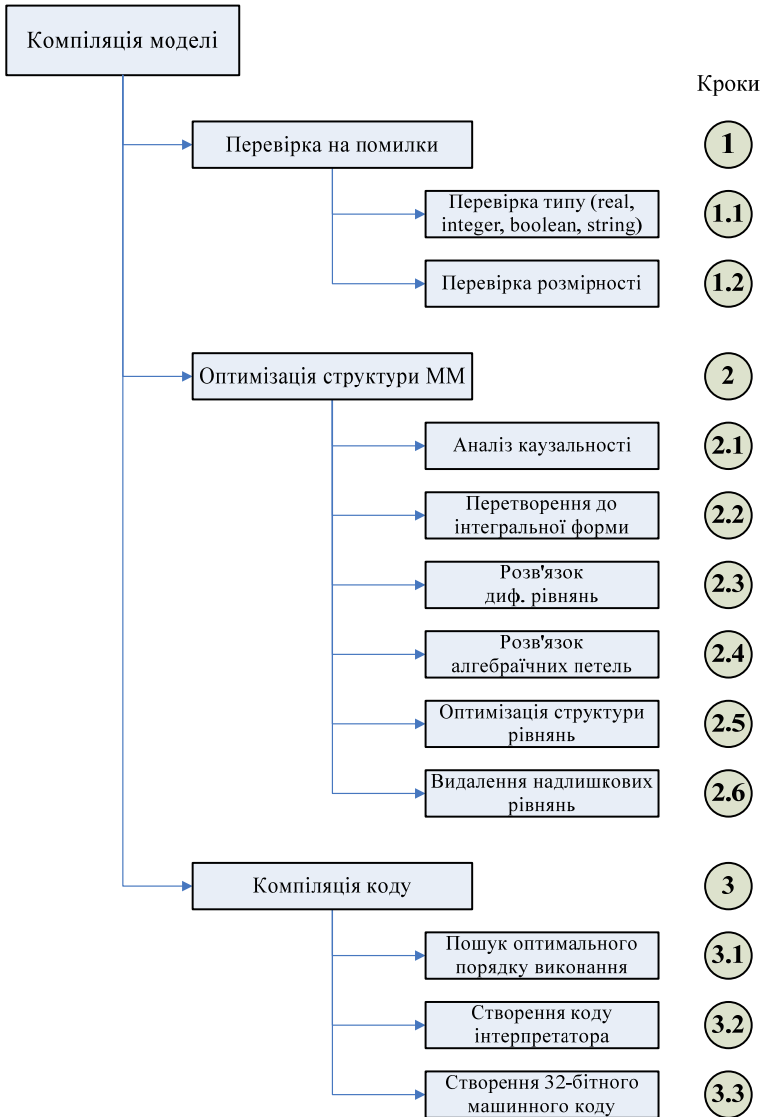
Додаток В

Класифікація методів симуляції



Додаток Г

Процедури етапу компіляції моделі в САЕ



Додаток Д

Класифікація задач оптимізації



Додаток Е

Перелік питань до модульного контролю і самостійних робіт

Перелік питань, які виносяться на перший МК

1. Поняття математичної моделі та моделювання.
2. Що таке моделінг. Що таке симуляція.
3. Доведіть, що САК – це мультидоменна система.
4. Акаузальний та каузальний підходи в моделюванні.
5. Мультидоменне моделювання.
6. Переваги та недоліки CAS, CAE та CAD для моделювання IBC та САК.
7. Оптимальна програма для моделювання САК.
8. Чому для дослідження САК та IBC можна використовувати ECAD?
9. Структура та можливості автоматизованого аналізу пристроїв ІВТ в ECAD.
10. Структура бібліотеки моделей в MC12.
11. Функції постпроцесорів в ECAD.
12. Принципи побудови зосереджених моделей на мікрорівні (схемотехнічному рівні). Моделі пасивних елементів.
13. Класифікація, принципи дії трансформаторів. Моделі трансформатора.
14. Моделі діодів. Які елементи схеми заміщення «відповідають» за динамічні/статичні властивості діоду?
15. Особливості моделювання БТ.
16. Пояснити функціонування тиристора на базі двотранзисторної макромоделі.
17. Модель Шіхмана-Ходжеса для МОНТ.

Перелік питань, які виносяться на другий МК

18. Моделювання на верхніх рівнях абстракції: загальні принципи.
19. Блочний підхід до побудови моделей систем.
20. Що таке макромоделі? Типова структура макромоделі.
21. Макромоделі ОП: порівняння.

22. Логічні функції та відповідні їм логічні елементи (NOT, AND, NAND, OR, NOR, XOR, XNOR, buffer).
23. Класифікація цифрових пристроїв та їхніх моделей.
24. Порівняти моделі цифрових та аналогових компонентів.
25. Проблеми моделювання аналогово-цифрових схем.
26. Підходи, принципи та програми для моделювання систем.
27. Адаптація ECAD для дослідження на системному та структурному рівнях динамічних систем, мультидоменних в тому числі.
28. Принципи дослідження мультидоменних систем.
29. Поняття адекватності та точності моделювання, методи підвищення точності моделювання.
30. Алгоритми симуляції.
31. Методика оптимізації.
32. Програми САЕ для дослідження САК.
33. Автоматизований синтез регуляторів в САЕ.
34. Аналіз САК в САЕ.

Перелік питань, які пропонуються для самостійної роботи

1. Програми для аналізу пристроїв та систем IBT, класифікація.
2. Моделювання пристроїв та систем IBT в середовищі MathCAD.
3. Моделювання пристроїв та систем IBT в MatLab Simulink.
4. Моделювання мехатронних систем.
5. Мови моделювання «всього». Мова BondGraphs.
6. Макромодельовання електронних пристроїв IBT.
7. Синтез нових моделей IBT.
8. Конструкторське проектування і моделювання в Proteus.
9. Методика параметричної оптимізації.
10. Перспективи розвитку моделювання САК та IBT.