

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

«АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ»

для студентів спеціальностей

G5 – «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка», освітня програма «Мікро- та нанoeлектронні прилади і пристрої»; G6 – «Інформаційно-вимірювальні технології»,

освітня програма «Інформаційні системи моніторингу і контролю»;

G7 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітні програми «Промислова автоматика» і
«Автоматизація, мехатроніка та робототехніка»

денної та заочної форм навчання

Конспект лекцій з дисципліни «Аналіз електронних систем» для студентів спеціальностей G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка», освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої»; G6 «Інформаційно-вимірювальні технології», освітня програма «Інформаційні системи моніторингу і контролю»; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітні програми «Промислова автоматика» і «Автоматизація, мехатроніка та робототехніка» денної та заочної форм навчання / Укл.: Ольга ВАСИЛЕНКО. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. – 100 с.

Укладач: Ольга ВАСИЛЕНКО, доц., канд. техн. наук

Рецензент: Геннадій СНИЖНОЙ, проф., докт. техн. наук

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

Затверджено
на засіданні кафедри
інформаційної безпеки та наноелектроніки
Протокол № 6 від 13.05.2026 р.

Рекомендовано до видання
НМК факультету інформаційної безпеки
та електронних комунікацій
Протокол № 8 від 15.05. 2026 р.

ЗМІСТ

Перелік скорочень та термінів.....	5
Вступ.....	7
Тема №1. Підходи до аналізу електронних систем.....	9
1.1 Задача аналізу електронних систем.....	9
1.2 Параметри електронних систем і методи аналізу.....	10
1.3 Моделювання як основний інструмент аналізу.....	15
1.3.1 Характеристики математичної моделі.....	17
Контрольні запитання.....	19
Завдання для практичного заняття/самостійної роботи.....	19
Тема №2. Огляд систем автоматизованого проектування.....	20
2.1 Вибір класу САПР.....	20
2.2 Підходи до моделювання систем.....	21
2.3 Критерії вибору та огляд САПР.....	24
2.4 Огляд основних програм для аналізу та проектування ЕС.....	26
2.4.1 MATLAB / Simulink та Simscape.....	26
2.4.2 VisSim/Altair Embed.....	30
2.4.3 Dymola (Modelica).....	34
2.4.4 20-sim.....	36
2.4.5 Micro-Cap 12.....	39
Контрольні запитання.....	41
Завдання для практичного заняття/самостійної роботи.....	42
Тема №3. Аналіз мультидоменних систем.....	43
3.1 Особливості мехатронних систем.....	47
3.2 Склад мехатронної системи.....	48
3.3 Необхідність моделювання мехатронних систем.....	53
Контрольні запитання.....	54
Завдання для практичного заняття/самостійної роботи.....	54
Тема №4. Моделювання САР та САК.....	55
4.1 Структурні елементи САК.....	55
4.2 Моделі для елементів САК в програмі Micro-CAP.....	57
4.3 Приклад побудови САК в програмі Micro-CAP.....	59
4.3.1 Теоретичні аспекти моделювання САК.....	59
4.3.2 Моделювання регулюючих клапанів.....	61
4.4 Моделі ІППН в Micro-Cap.....	64
4.4.1 Моделі ШІМ-контролерів для дослідження САК в	

Spice-сумісних програмах ECAD	65
4.5 Проєктувальник регуляторів та редактор лінійних систем в 20-sim	69
4.6 Методика моделювання САК	75
Контрольні запитання	76
Завдання для практичного заняття/самостійної роботи	76
Тема №5. Імітаційне моделювання	77
5.1 Критерії оптимальності систем	77
5.2 Імітаційне моделювання систем	82
5.3 Способи моделінгу систем	84
Контрольні запитання	87
Завдання для практичного заняття/самостійної роботи	87
Питання до заліку	88
Зміст та об'єм контрольних робіт	89
Перелік джерел посилань	90
Додаток А Структура САЕ	95
Додаток Б Порівняння можливостей САПР	96
Додаток В Умовні зображення блоків для моделювання САК в Micro-Cap та MatLab Simulink	98
Додаток Г Згорнутий алгоритм моделювання САК	100

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

AE – algebraic equation, алгебраїчне рівняння

AMS – Analog and Mixed Signal, аналогові та аналогово-цифрові сигнали

BD – block diagram, блок-схема

BDF – Backward Differentiation Formula, метод диференціювання назад

BG – bond graph, граф зв'язку

BVP – boundary value problem, крайова задача

CAD – Computer Aided Design, автоматизоване проєктування

CAE – Computer Aided Engeneering, автоматизований інжиніринг

CAM – Computer Aided Manufacturing, автоматизоване виробництво

CAS – Computer Algebra System, універсальний мат. процесор

CxDE – Complex Differential Equation, комплексне диф. рівняння

DAE – differential-algebraic equation, диф.-алгебраїчне рівняння

DDE – delay differential equations, диф. рівняння з затримками

ECAD – Electronic CAD, автоматизоване проєктування в електроніці, спеціалізований математичний процесор

EDA – Electronic Design Automation, автоматизоване проєктування в електроніці

FDT – Frequency Domain Toolbox, інструментарій частотної області

FF – feed forward, упереджувач

FFT – Fast Fourier Transform, швидке перетворення Фур'є

ID – iconic diagram, традиційна (функціональна) схема

MCAD – Mechanical CAD, CAD для механіки

ODAE – overdetermined DAE, перевизначені DAE

ODE – ordinary differential equation, звичайне диференціальне рівняння

PDE – partial differential equations, рівняння у приватних похідних

PWM – pulse-width modulation, широтно-імпульсна модуляція

SFG – signal flow graph, сигнальний граф

SM – state machine, автомат станів

SML – Simplorer Modeling Language, мова моделінгу Simplorer

TF – transfer function, передавальна функція

UML – Unified Modeling Language, уніфікована мова моделінгу

VHDL – very high-speed integrated circuit design language, мова програмування логічних інтегральних схем

АС – агрегативні системи
АЧХ – амплітудо-частотна характеристика
АФЧХ – амплітудо-фазо-частотна характеристика
ВДЖ – вторинне джерело живлення
ВС – вимірювальна система
ДС – динамічна система
ЕМП – електромеханічний перетворювач
ЕС – електронна система
ІВС – інформаційно-вимірювальна система
ІВТ – інформаційно-вимірювальна техніка
ММ – математична модель
МС – мехатронна система
ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
ПФ – передавальна (передатна) функція
РРЧ – режим реального часу
САПП – системи автоматизованого проєктування
САК – система автоматичного керування
САР – система автоматичного регулювання
СНП – силовий напівпровідниковий перетворювач
СП – сенсорні пристрої
ТАК – теорія автоматичного керування
ЦФ – цільова функція
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція (сигналу)

ВСТУП

Конспект лекцій призначений для теоретичної та практичної підготовки, самостійних робіт, підготовки до модульного контролю для студентів спеціальностей G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка», освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої»; G6 «Інформаційно-вимірювальні технології», освітня програма «Інформаційні системи моніторингу і контролю»; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітні програми «Промислова автоматика» і «Автоматизація, мехатроніка та робототехніка» денної та заочної форм навчання.

Дисципліна «Аналіз електронних систем» базується на знаннях, отриманих при вивченні дисциплін «Основи алгоритмізації та програмування», «Теорія електронних кіл» та інших дисциплін спеціалізації зазначених вище спеціальностей. Предметом вивчення навчальної дисципліни є: методи, види та принципи аналізу електронних та мультидоменних систем, зокрема автоматизованих систем. Мета: одержання знань в галузі аналізу електронних пристроїв та систем, принципів оптимального вибору видів, методів та засобів аналізу.

Вивчення навчальної дисциплін «Аналіз електронних систем» дозволить вам приймати обґрунтовані рішення при подальшому проектуванні пристроїв електронної техніки. До напрямків досліджень відносять: моделінг та симуляцію електронних систем в спеціалізованих та універсальних математичних процесорах; дослідження напрямів підвищення якості електронних систем через багатоваріантний аналіз.

У результаті вивчення дисципліни «Аналіз електронних систем» здобувач повинен отримати здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, під час професійної діяльності, або у процесі навчання, що передбачає застосування теорій та методів автоматизації та електроніки (інтегральну компетентність) та наступні компетентності:

- здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово;
- здатність спілкуватися іноземною мовою;

- навички використання інформаційних і комунікаційних технологій;
- здатність до пошуку, опрацювання та аналізу інформації з різних джерел.

Очікувані програмні результати навчання:

- вміти знаходити обґрунтовані рішення при складанні структурної, функціональної та принципової схем засобів інформаційно-вимірювальної техніки;
- знати і розуміти основні поняття метрології, теорії вимірювань, математичного та комп'ютерного моделювання, сучасні методи обробки та оцінювання точності вимірювального експерименту;
- розуміти широкий міждисциплінарний контекст спеціальності, її місце в теорії пізнання і оцінювання об'єктів і явищ;
- вміти використовувати інформаційні технології при розробці програмного забезпечення для опрацювання вимірювальної інформації;
- розуміти застосовуванні методики та методи аналізу, проєктування і дослідження, а також обмежень їх використання;
- знати та розуміти сучасні теоретичні та експериментальні методи досліджень з оцінюванням точності отриманих результатів.

У результаті вивчення дисципліни «Аналіз електронних систем» здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти повинен мати уявлення про:

- підходи до аналізу електронних систем;
- принципи аналізу та розрахунку електронних схем;
- зв'язок функцій схем між собою;

Здобувач має знати:

- базові закони та принципи аналізу систем;
- принципи аналізу в програмах CAD, CAS та CAE;

Здобувач має вміти:

- застосовувати на практиці моделювання при аналізі електронних систем;
- оцінювати функціонал схем;
- використовувати правильні види та методи аналізу та трактувати отримані результати.

ТЕМА №1

ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ СИСТЕМ

Перелік питань:

- Задача аналізу електронних систем.
- Параметри електронних систем і методи аналізу.
- Моделювання як основний інструмент аналізу.

1.1 Задача аналізу електронних систем

Аналіз електронних систем (ЕС) – це курс теоретично-практичного спрямування, для підготовки спеціалістів, що зрозуміли і засвоїли основні поняття в галузі аналізу електронних схем: класифікацію методів, видів та засобів аналізу електронних схем, області їхнього використання для перевірки оптимальності прийнятих рішень на всіх етапах їхнього проектування.

Метою аналізу електронних систем є визначення форми й параметрів сигналів: струму, напруги, потужності та інших функцій, які визначають функціонал систем (швидкодію, стійкість і т.п.). Головним інструментом аналізу є математичне (комп'ютерного моделювання). Для цього потрібно вирішувати ряд таких типових завдань моделювання, як розрахунок статичного режиму, перехідних процесів, частотних характеристик електронних систем (ЕС). На основі розв'язання цих завдань можна далі обчислити параметри сигналів (фронт, тривалість, затримку і т.д.), розрахувати спектр вихідного сигналу, чутливість схеми до зміни параметрів її компонентів та зовнішніх параметрів, вирішувати завдання статистичного аналізу схеми та оптимізації її параметрів. Усі ці завдання вирішуються за допомогою програм автоматизованого проектування (CAD) та інжинірингу (CAE).

Витоки сучасних методів аналізу електронних схем а програмах класу CAD – в класичній теорії кіл: компонентні рівняння, топологічні (закони Кірхгофа), теореми комутації та принцип вибору незалежних змінних для мінімізації математичної моделі схеми (ММС).

Спочатку методи аналізу призначалися для ручного розрахунку схем невеликої розмірності. Розвивалися прямі методи: графоаналітичний, розрахунок параметрів схем за статичними та динамічними характеристиками схем, за емпіричними формулами, або за методом

керованого заряду. Із розвитком матричних та матрично-топологічних методів набули поширення лінійні методи аналізу: орієнтованих графів, чотириполюсника, еквівалентних схем, вузлових потенціалів, контурних струмів, змінних стану; методи глобальної та локальної лінеаризації моделей елементів. Із підвищенням розміру схем стали використовувати узагальнені методи формування ММС, діакоптичні методи, засновані на аналізі підсхем, ієрархічні блоки та макромоделі.

Розвиток елементної бази електроніки, особливо приладів із польовим керуванням (MOS FET, IGBT) та необхідність моделювання мультидомених систем стимулював розвиток методів із змішаним координатним базисом, які базуються на перевагах методів вузлових потенціалів та змінних стану (МВП, МЗС), та призначені для аналізу жорстких схем (із великим розкидом постійних часу). Розрідженість топологічних матриць ініціювала розвиток облікових методів зберігання та обробки в обчислювальній математиці. Метод еквівалентних схем, який був самостійним методом аналізу лінійних схем, став складовою частиною методів автоматизованого аналізу ЕС. Коли з'явилася необхідність моделювання аналогово-цифрових та мехатронних систем, змінилися підходи, методи та програми для аналізу.

Дисципліна «Аналіз електронних систем» має своєю задачею викладання принципів аналізу, його видів та методів. Отже, треба розрізнати:

аналіз – сукупність процедур, які дозволяють визначити вторинні параметри схеми для оцінки схемної надійності, функцій систем ті її працездатності в циклі проектування ЕС (синтез, аналіз, оптимізація);

вид аналізу характеризується змінною, за якою відбувається аналіз (час, частота, фазова змінна, зовнішні змінні) та буває одноваріантним та багатоваріантним, перший можна назвати розрахунком;

метод аналізу – спосіб отримання математичної моделі схеми (ММС) в компактному вигляді, зручному для подальшого розв'язання математичними методами (числовими, або аналітичними).

1.2 Параметри електронних систем і методи аналізу

Для аналізу електронних схем на схемотехнічному рівні застосовують не складні методи теорії поля, а методи теорії кіл, які базуються на спрощенні реальної схеми до ідеалізованої моделі. Якщо

можна вважати, що будь-яка зміна часу електричних і магнітних величин передається від елементу до елементу практично миттєво, то можна уявити електричні прилади як ланцюги з зосередженими елементами, а стан цих кіл характеризувати струмами та напругами на окремих ділянках.

ЕС складаються з пасивних та активних елементів та пристроїв – інтегральних мікросхем. У відповідності із **основним методом теорії кіл**, реальні елементи представляються моделями, які складаються з наступних двополюсників: опорів, ємностей, індуктивностей, джерел напруги та струму.

Ідеалізовані двополюсники відбивають тільки одну суттєву особливість електромагнітних процесів в елементі–прототипі. Однак, в кожному реальному елементі мають місце паразитні процеси, внаслідок чого їхні схеми заміщення ускладнюються. Чим вище вимагається точність розрахунку, тим більшу кількість факторів необхідно врахувати, однак це ускладнює розрахунок. Якщо струми та напруги на полюсах елементу пов'язані лінійними рівняннями, то коефіцієнти цих рівнянь повністю характеризують поведінку елементів і називаються їхніми **параметрами**.

Параметри можуть бути постійними величинами або функціями часу. В першому випадку – моделі схеми описуються лінійними диференціальними рівняннями (ЛДР) з постійними коефіцієнтами; в другому випадку – ЛДР із змінними коефіцієнтами. Якщо залежності між струмом і напругою нелінійні, то і схема) описують три типи кіл описується нелінійними диференціальними рівняннями (НДР), а параметри елементів – функціями напруги і струму. Наступні три диференціальні рівняння (системи рівнянь) характеризують різні види схем (систем):

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{d y}{dt} + a_0 y = f(t) \quad (1.1)$$

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{d y}{dt} + a_0 y = f(t) \quad (1.2)$$

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1}(y) \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{d y}{dt} + a_0 y = f(t) \quad (1.3)$$

Рівняння (1.1) – лінійне, із постійними коефіцієнтами $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – характеризує лінійні кола із постійними параметрами.

Рівняння (1.2) – лінійне, в якому хоча б один з коефіцієнтів ($a_{n-1}(t)$) є функцією часу (але не залежить від y), являє собою лінійне рівняння із змінними коефіцієнтами і описує лінійну систему із змінними параметрами (параметричну систему).

Рівняння (1.3), один або кілька коефіцієнтів якого, в даному випадку $a_{n-1}(y)$, є функціями y , – є нелінійним диференціальним рівнянням та характеризує нелінійні кола.

Важливою властивістю лінійних систем, що впливає з лінійності диференціального рівняння (1.1), яке описує поведінку (струм, напруга) системи, є справедливості принципу незалежності або накладення (суперпозиції). Суть цього принципу може бути сформульована наступним чином: при впливі на лінійну систему декількох зовнішніх сил поведінку системи можна визначати шляхом накладення (суперпозиції) розв'язків, знайдених для кожної з сил окремо. Або: в лінійній системі сума ефектів від різних впливів співпадає з ефектом від їхньої суми. При цьому припускається, що система вільна від початкових запасів енергії. Принцип накладення лежить в основі **спектрального і операторного** методів аналізу перехідних процесів в лінійних колах, а також методу **інтегралу накладення** (інтегралу Дюамеля). На підставі принципу накладення будь-які складні сигнали можна при передачі їх через лінійні системи розкласти на прості, більш зручні для аналізу сигнали, наприклад синусні, що використовується при використанні перетворення.

Для нелінійних елементів й кіл (рівняння 1.3) принцип суперпозиції не можна застосовувати. Ця властивість нелінійних систем пов'язана з нелінійністю вольт-амперних/вольт-фарадних та вебер-амперних характеристик нелінійних елементів. При аналізі впливу на нелінійне коло складного сигналу його не можна розкладати на прості складові, необхідно шукати відклик системи на результуючу величину сигналу. Навіть після спрощень та припущень процеси в таких колах описуються декількома нелінійними диференціальними рівняннями, точне рішення яких, як правило, невідомо. Тому виникає задача про те, яким чином можна вирішувати ці рівняння наближеними методами. Для автоматизованого аналізу – це різні види апроксимації та інтерполяції, із обов'язковим використанням чисельних методів лінеаризації ММС, наприклад, методом Ньютона-Рафсона.

Реальні схеми є нелінійними системами із змінними коефіцієнтами, але для спрощення їхнього аналізу приймаються різні припущення, які дозволяють умовно виділити три види рівнянь, які описують математичні моделі електронних систем:

- лінійні схеми з постійними коефіцієнтами (рівняння 1.1);
- параметричні схеми, що описуються ЛДР з змінними коефіцієнтами (рівняння 1.2);
- нелінійні ЕС (можуть бути описані нелінійними диференціальними, або алгебраїчними рівняннями).

Математична модель схеми (ММС) в загальному вигляді являє собою систему нелінійних неоднорідних диференціальних рівнянь та несе інформацію про топологію та компонентний склад схеми.

У процесі проектування й експлуатації сучасних технічних об'єктів і систем, зокрема вимірювальних, які досить часто є невід'ємною частиною САК та САР, дослідник постійно змушений мати справу з побудовою та дослідженням моделей цих об'єктів.

Моделювання є науковим інструментом як для чисто теоретичних, так і для практичних досліджень на різних рівнях абстракції. Моделювання є важливою стадією проектування технічної системи і дозволяє скоротити час та матеріальні засоби при аналізі прийнятих технічних рішень, оптимізації, 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 [1, 2].

САК та САР є динамічними системами (ДС) та досить часто – мультидоменними системами [1, 2]. Моделювання складних ДС, в тому числі, мехатронних, є одним з найбільш потужних інструментів системних досліджень. Основна вимога до результатів моделювання – це точність, оскільки вони мають на меті заміну натурних випробувань.

В залежності від вигляду електричного ланцюга, можна виділити варіанти аналізу (табл.1.1). Крім того, сучасні програми моделювання дозволяють моделювати ці системи при варіації температури оточуючого середовища та внутрішніх параметрів системи.

Таблиця 1.1 – Типові задачі аналізу ЕС

Вид системи	Опис задач аналізу та виду аналізу (в дужках)
Лінійний резистивний та лінійний динамічний: містить хоча б одну ємність або індуктивність	1. Статичні характеристики (для резистивних – DC Analysis, для реактивних – Transient Analysis). 2. Частотні характеристики (малосигнальний аналіз, AC Analysis – за змінним струмом). 3. Перехідні характеристики (Transient Analysis). 4. Аналіз шумових характеристик (AC Analysis). 5. Аналіз допусків (чутливості або найгіршого випадку – багатоваріантний аналіз). 6. Визначення полюсів та нулів передавальної функції, аналіз тривкості / стійкості (Transient та/або AC Analysis, Stability).
Нелінійний резистивний	1. Аналіз робочої точки, початкового статичного стану (DC Analysis, Dynamic DC). 2. Визначення передавальної характеристики (вхід – вихід) (DC Analysis, Transfer Function). 3. Дослідження перехідних процесів (Transient Analysis) при варіації параметрів в тому числі.
Нелінійний динамічний елемент	1. Початкові умови, або аналіз рівноважного стану (всі ємності заміщені розривами, а індуктивності шунтовані) – DC Analysis, DC Operation Point) 2. Аналіз перехідних характеристик при заданих початкових умовах (Transient Analysis). 3. Аналіз стану, що встановився (знаходження періодичного рішення). Steady State Analysis, Transient. 4. Аналіз спектра, гармонік та нелінійних спотворень (Transient Analysis, Harmonic Distortion).

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 модельні експерименти, обробити, візуалізувати та правильно інтерпретувати результати [3].

1.3 Моделювання як основний інструмент аналізу

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 цього експерименту.

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

- безперервні системи, описувані звичайними 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;
- стохастичні системи, описувані імовірнісними рівняннями і методами.

Для опису однієї і тієї ж реальної системи може бути використаний різний математичний апарат, в залежності від цілей дослідження і вимог точності та адекватності. Приклад: ММ електричного фільтра другого порядку з резистивним навантаженням та джерелом постійної напруги реалізована в 20-sim [4] трьома способами: блок-схемою (рисунок 1.1), фізичною або принциповою схемою (рисунок 1.2), зв'язаним графом (рисунок 1.3).

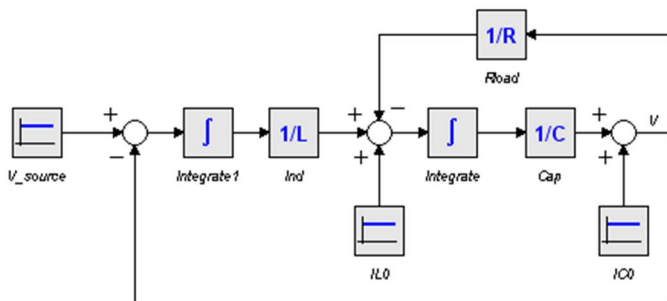


Рисунок 1.1 – Блок-схема (бібліотека «Signal»), що представляє ММ фільтра

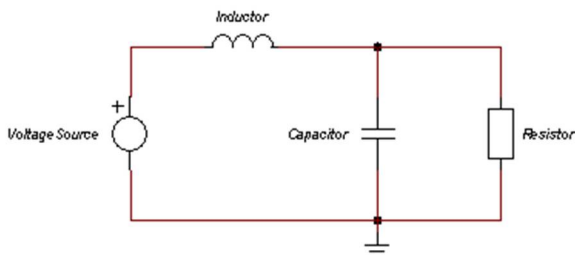


Рисунок 1.2 – Фізична схема (бібліотека «Iconic diagrams») фільтра

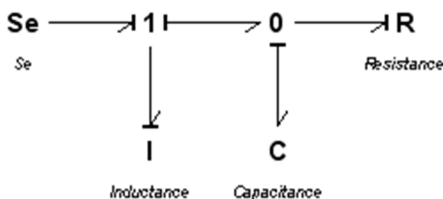


Рисунок 1.3 – Фільтр у вигляді зв'язаного графа (бібліотека «Bond Graph»)

Параметри схем однакові: $V_source=50$, $L=0.0001$, $C=0.00001$, $R=10$, початкові умови дорівнюють нулю. Математична еквівалентність представлених схем підтверджується результатами симуляції графічних моделей, тобто часовими діаграмами на рисунку 1.4.

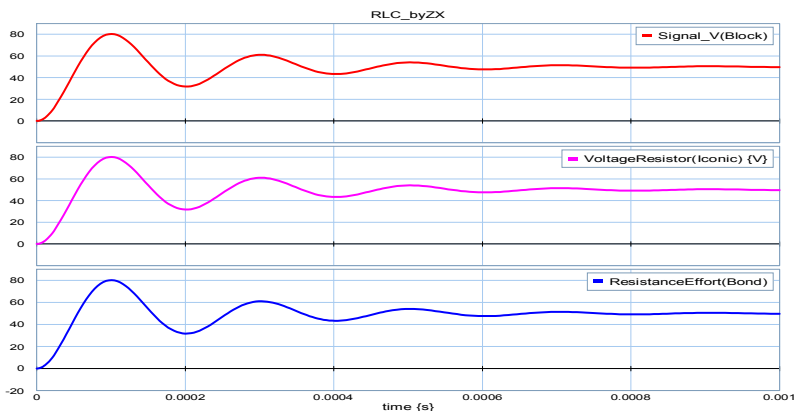


Рисунок 1.4 – Результати симуляції трьох моделей

Можна побачити, що, у загальному випадку, візуально найбільш компактна форма графічного представлення ММ – зв’язаний граф. Фізична схема оперує традиційними компонентами для даного домена (електричного), а блок-схема детально зображує каузальні зв’язки і є графічною аналогією формули, перебудованої відповідним чином, яка описує поведінку системи.

Будь-яку електронну систему можна описати однією з форм (або їх комбінацією) представлених на рисунку 1.5.

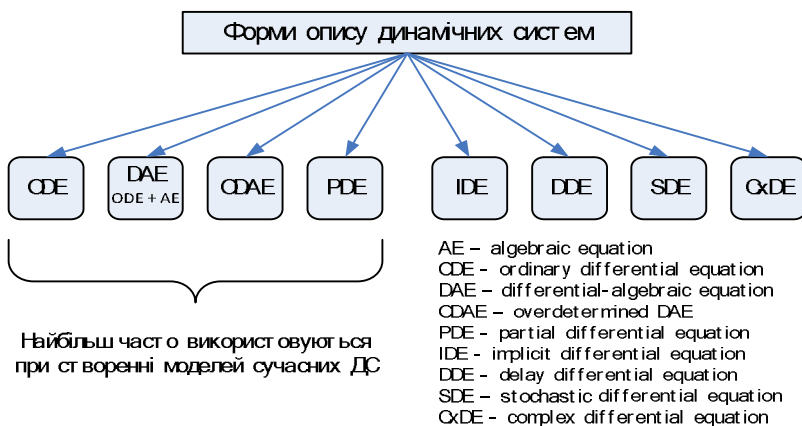


Рисунок 1.5 – Форми опису ЕС

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.

Математичний опис буде визначати вибір інструментальних засобів і технологій проєктування систем, і навпаки: вибір засобу (програми) для дослідження сильно впливає на доступний рівень, підхід та (відповідно) математичний базис до моделювання об'єкту, процесу.

1.3.1 Характеристики математичної моделі

Модель – створювана людиною подоба досліджуваних об'єктів: макети, зображення, схеми, словесні описи, математичні формули, карти і т.д. Більш строго модель можна визначити як фізичну або математичну конструкцію, що певним чином відображає об'єкт і слугує для його вивчення. Модель є заміником реального об'єкта і володіє, принаймні, двома властивостями:

а) вона відображає ті властивості об'єкта, які істотні для даного дослідження;

б) завжди простіше об'єкта.

Модель повинна бути:

- адекватною;
- надійною;
- простою і зрозумілою користувачу;
- спрямованою на досягнення поставлених цілей дослідження;
- зручною у використанні (ергономічною);
- функціонально повною з точки зору можливостей вирішення головних завдань;
- адаптивною, що дозволяє легко переходити до інших модифікацій або оновлювати дані;
- що допускає зміни (в процесі експлуатації вона може ускладнюватися).

Формою графічного представлення інформації про модельовану систему можуть бути [6]:

- операторно-структурні схеми, прийняті в ТАУ;
- функціональні та принципові схеми різних фізичних пристроїв;
- кінематичні схеми механізмів;

- сигнальні графи (SFG);
- графи зв'язків або зв'язані графи (BG);
- блок-схеми алгоритмів та інші графічні моделі.

Процес побудови моделі виявився етапом, що найбільш важко автоматизується. «Ручна» підготовка моделі складного технічного об'єкта пов'язана з великим обсягом перетворень, в яких легко допустити помилку. Використання систем автоматизації моделювання, наприклад Computer Aided Engineering (CAE), дозволило істотно підвищити продуктивність праці, знизити число помилок, фахівець в предметній (прикладній) області може самостійно створювати досить складні моделі. У сучасних системах автоматизованого моделювання, виходячи з міркувань зручності сприйняття людиною, використовуються, як правило, графічні засоби завдання вихідної інформації про модель.

Контрольні запитання

1. Мета аналізу електронних схем.
2. Види систем, рівнянь.
3. Основні задачі аналізу в залежності від типу системи.
4. Застосовність принципу суперпозиції.
5. Параметри електронних схем.
6. Поняття та приклади динамічних систем.
7. Форми представлення моделей (прикладі).
8. Принципи вибору програми для дослідження електронної системи.
9. Способи моделінгу динамічних систем.
10. Характеристики моделі.

Завдання для практичного заняття/самостійної роботи

1. За заданою схемою інформаційно-вимірювальної системи та рівнем абстракції обрати підхід (каузальний, або акаузальний) та клас програм моделювання.
2. Сформувати концептуальну (словесну) модель об'єкта моделювання.

3. Обрати спосіб та рівень моделювання.
4. Обрати математичний базис для опису моделі на етапі моделінгу.
5. Сформувати (синтезувати) модель в обраному базисі (моделінг).

ТЕМА №2

ОГЛЯД СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Перелік питань:

- Принципи проєктування електронних систем.
- Підходи до моделювання систем.
- Огляд програм САПР.

2.1 Вибір класу САПР

Класифікацію 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 сфері САПР. За сферою використання найбільш представницькими та широко використовуваними є наступні групи САПР:

- 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 тощо.

За цільовим призначенням розрізняють САПР для різних аспектів проєктування :

- САПР функціонального проєктування, інакше CAE-системи (Computer Aided Engineering).
- конструкторські САПР, часто звані CAD-системами (Computer Aided Design);
- технологічні САПР, інакше звані автоматизованими системами технологічної підготовки виробництва або CAM-системами (Computer Aided Manufacturing) [7].

CAE-системи дозволяють досліджувати системи на макрорівні, тобто аналізувати та оптимізувати систему з метою прийняття рішення щодо топології (структурний підхід) та функціональних можливос-

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

САПР це фундамент віртуального виробництва, що дозволяє створювати, аналізувати та тестувати цифрові двійники виробів і технологічних процесів до виготовлення реальних фізичних прототипів. Віртуальне виробництво спирається на «безшовну» передачу даних між модулями системи. В системах віртуального виробництва ланка $CAE \rightarrow CAD \rightarrow CAM$ утворює наскрізний цикл під керуванням програми – менеджера даними про виріб (*PDM - Product Data Management*) та технології PLM (*Product Lifecycle Management*), тобто управління життєвим циклом продукту, які зберігають усі зв'язки між проєктом, технологією та виробництвом [5, 7].

2.2 Підходи до моделювання систем

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

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

Для нелінійних систем ці зв'язки задаються нелінійними алгебраїчними або диференціальними рівняннями. Оскільки структурні блоки мають виражені входи і виходи, побудовані згідно з цією технікою моделі іноді називають спрямованими (орієнтованими) сигнальними графами. Структурне моделювання використовується, наприклад, в пакеті *Simulink* (рисунок 2.1), *VisSim/Altair Embed*, *SimApp*, *SamSim* тощо.

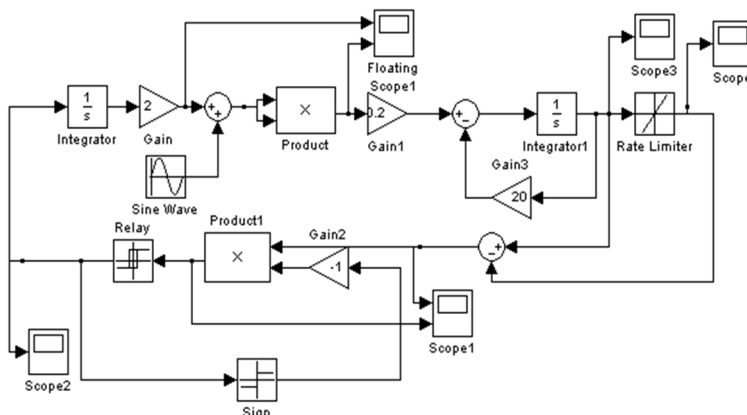


Рисунок 2.1 – Схема для дослідження екстремальної системи в пакеті Simulink

Фізичним мультидоменним (акаузальним) моделюванням називається техніка моделювання, заснована на використанні бібліотеки моделей елементів фізичних пристроїв, з яких можна складати схеми фізичні принципи. 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 (рис. 2.2).

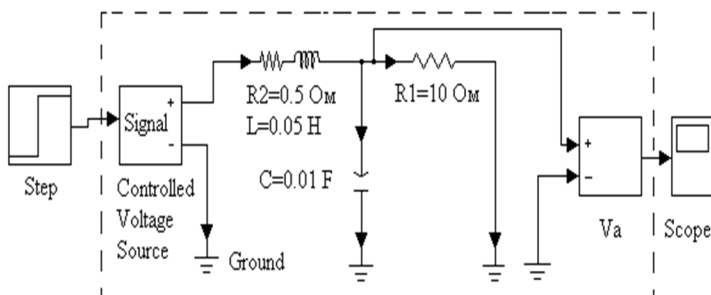


Рисунок 2.2 – Схема для моделювання електричного кола в пакеті SimPowerSystems

У розпорядження користувача програми акаузального моделювання 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. Як правило, акаузальний підхід властивий об'єктно-орієнтованим програмам, так званим CAD.

Головна відмінність структурного і фізичного мультидоменного моделювання не тільки у формі завдання вихідної інформації, але і в використовуваних методах числового інтегрування диференціальних рівнянь. Зазвичай зі структурним моделюванням пов'язують явний розв'язувач (*solver*), який являє собою бібліотеку класичних підпрограм числового інтегрування, що реалізують явні методи інтегрування.

З фізичним мультидоменним моделюванням зазвичай пов'язують ітераційний розв'язувач. Ітераційний розв'язувач 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 мультидоменного моделювання.

Деякі сучасні CAE-системи, незалежно від підходу до моделювання, використовують неявні та явні методи інтегрування [9], 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 числового інтегрування, що й у звичайному структурному моделюванні. Саме так зроблено в пакетах *Simmechanics* і *Simpowersystems*, які є підсистемами *Simulink* [10]. У результаті, отриманий деякий проміжний варіант, основним

достойнством 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.

2.3 Критерії вибору та огляд САПР

Сучасні САПР (структура – в додатку Б) мають наступні відмітні риси [7]:

- підтримка ієрархічного проектування як зверху – вниз, так і знизу – вгору, за рахунок реалізації багаторівневого моделювання і методу локальної деталізації моделі;
- компонентне моделювання на основі використання бібліотек, що містять велику кількість графічних і функціональних описів компонентів, причому ці бібліотеки відкриті для додавання в них нових описів користувачем;
- графічний інтерфейс, що поєднує графічні засоби формування візуального образу досліджуваного технічного пристрою з автоматичною генерацією моделі всієї схеми по її структурному опису;
- наявність інтерактивного робочого середовища проектування (керуючої оболонки, монітора), тобто спеціальної програми, з якої можна запускати всі або більшість інших програм пакета, не звертаючись до послуг штатної операційної системи;
- наявність в сучасних САПР і САЕ постпроцесорів моделювання, що дозволяє не тільки переглядати в зручній для користувача формі результати моделювання, але й обробляти ці результати;
- наявність вбудованих засобів числового моделювання в режимі реального часу або в режимі масштабування модельного часу;
- реалізація механізмів просування модельного часу, заснованих як на принципі Δt , так і на принципі Δz ;
- інтегрованість з іншими пакетами аналогічного призначення, яка забезпечується відповідними програмами – конверторами, що дозволяють імпортувати і експортувати дані з однієї системи в іншу;
- наявність засобів, що забезпечують формування віртуальних аналогів вимірювально-керуючої апаратури.

Якщо САЕ призначена для вирішення дослідницьких завдань, то до перерахованих характеристик додаються можливості активного обчислювального експерименту, зокрема:

- а) візуалізація результатів під час експерименту;
- б) можливість інтерактивного втручання в хід моделювання;
- в) можливість використання 2D і 3D анімації.

CAD системам приділено значну увагу в [11] та навчально-методичному посібнику [3]. Для моделювання на макрорівні частіше використовують математичні процесори та системи автоматизованого інжинірингу (CAS та САЕ відповідно).

На даний момент існує багато програм рівня САЕ (або таких, що його охоплюють, наприклад, *Micro-Cap* [12]), які дозволяють, зокрема, моделювати (*modeling & simulation*) 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 MATRXX*, *ACSLx*, *Modular Modeling System (MMS)*, *Virtual Test Bed (VTB)*, *JModelica.org*, *Yenka (Crocodile Technology)*, *MATLAB\Simulink*, *Simscape*, *MapleSim*, *Dynast*, *Multisim*, *K2.SimKernel*, *Jigrein*, *EASY5*, *AMESim*, *Dymola*, *PSIM*, *SimApp*, *SimulationX*, *Simplorer*, *VisSim/Altair Embed*, *SystemModeler*, *20-sim* та інші, які можуть бути знайдені у [13].

Оскільки ЕС можуть бути представлені безпосередньо диференціальними рівняннями, то для прогнозування їх поведінки у часі також можуть бути використані математичні пакети, 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. Увага буде зосереджена на САЕ-системах для моделювання автоматизованих систем (САК, ІБС тощо).

Нижче розглянуті доступні САЕ-програми, де під словом «доступні» розуміються програми, інформацію про які можна відносно легко отримати з всесвітньої мережі чи інших джерел, або ж програми. Більшість з перелічених програм моделювання технічних динамічних систем розвиваються та підтримуються виробниками. Результати порівняння можливостей САЕ – в додатку В.

Деякі з них, при наявності відповідної інформації, будуть розглянуті за певним шаблоном, який складається з наступних позицій:

- короткий опис програми (можливості, особливості);

- архітектура (структура) програми;
- можливі форми представлення моделей на етапі моделювання (modeling);
- традиційні можливості для дослідження САК;
- перелік методів моделювання (simulation), тобто алгоритмів симуляції або інтегрування;
- перелік алгоритмів параметричної оптимізації;
- ліцензії, вартість та наявність безкоштовних версій.

2.4 Огляд основних програм для аналізу та проєктування ЕС

2.4.1 MATLAB / Simulink та Simscape

Система математичного моделювання *MATLAB / Simulink* (компанії *MathWorks*) є в даний час одним з найбільш популярних інструментів чисельних розрахунків і застосовується в різних областях знань. Головна особливість середовища *MATLAB* – ретельна опрацьованість і налагодженість всього багатого арсеналу засобів і методів. Можливості *MATLAB* перекривають більшу частину потреб розробників систем керування в різних областях техніки. Широкий набір різних чисельних методів у поєднанні з потужними засобами графічної візуалізації робить *MATLAB* універсальним інструментом інженерних розрахунків і наукових досліджень. Серйозними перевагами середовища *MATLAB* є її відкритість і розширюваність. Більшість команд і функцій системи реалізовані у вигляді текстових m-файлів (файлів з розширенням .m) і файлів на мові Cі, причому всі файли доступні для модифікації. Це дозволяє користувачеві створювати не тільки окремі файли, але і цілі бібліотеки файлів, формуючи, таким чином, власне предметно-орієнтоване середовище моделювання.

Найважливішою складовою середовища *MATLAB* є пакет структурного моделювання динамічних систем *Simulink*. Розробку цього пакету можна розглядати як принципову модернізацію середовища *MATLAB*, в результаті якої вона придбала всі риси сучасної САЕ – компонентне моделювання, графічна форма завдання інформації про об'єкт і т.п. *Simulink* настільки органічно інтегрований з системою *MATLAB*, що, розглядаючи сучасні засоби дослідження технічних систем, логічно говорити про середовище візуального компонентного моделювання *MATLAB / Simulink*. На базі пакету *Simulink* розроблені додаткові бібліотеки блоків для різних областей застосування (напри-

клад, *PowerSystem Blockset* – моделювання електротехнічних пристроїв, *Digital Signal Processing Blockset* – набір блоків для розробки цифрових пристроїв, *Control System Toolbox* – пакет для розробки систем керування і т.д.). Можна очікувати, що така політика буде продовжена і в наступних модифікаціях середовища *MATLAB*, з'являться нові предметно-орієнтовані бібліотеки.

При моделюванні в *Simulink* користувач може скористатися досить широкою палітрою методів рішення диференціальних рівнянь, а також вибрати спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком), що дозволяє проводити моделювання для широкого кола систем, що включають безперервні, дискретні і гібридні системи будь-якої розмірності. Приклад математичної моделі САК в *Simulink* наведений на рисунку 2.3.

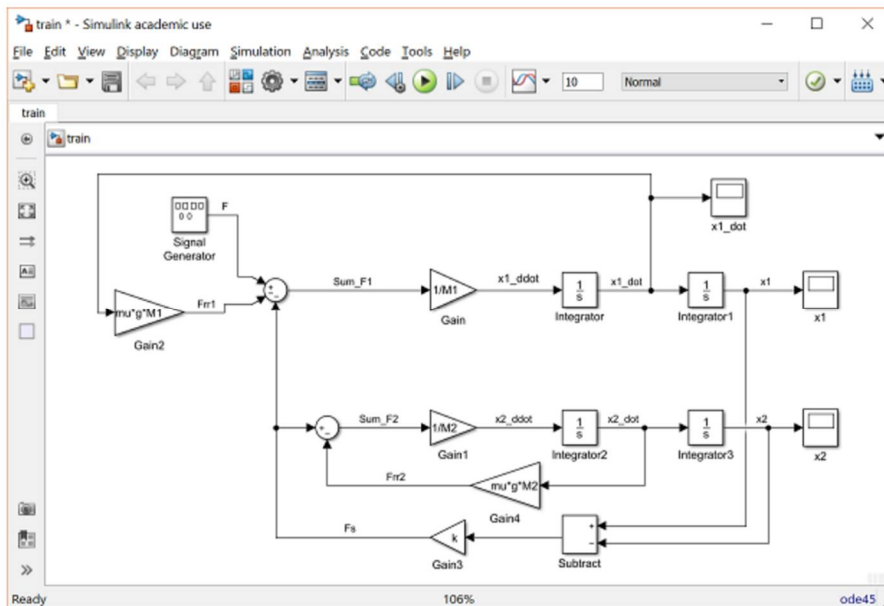


Рисунок 2.3 – Приклад математичної моделі САК в *Simulink*

Окремий напрямок досліджень пов'язаний з можливим переходом в область лінеаризованих систем, де реалізовано весь арсенал методів лінійного аналізу. Засоби візуалізації дають можливість сте-

жити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, що входять до складу бібліотеки *Simulink*. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць.

Базова бібліотека *Simulink* містить більше 200 блоків, що найчастіше зустрічаються при моделюванні різних систем. Додаткові бібліотеки дозволяють розширити можливості *Simulink* для застосування в аерокосмічній галузі, обробці сигналів, зв'язку та в інших додатках. Бібліотеки блоків *MATLAB / Simulink* можуть поповнюватися за рахунок підпрограм, написаних як на мові середовища *MATLAB*, так і на мовах *C++*, *Fortran* і *Ada*. Крім того, в ньому реалізована процедура інкапсуляції, яка є ще одним зручним для користувача засобом розширення бібліотек.

Недоліки *MATLAB / Simulink* є загальними для всіх інструментів структурного моделювання. Як у всіх подібних пакетах при створенні складних моделей доводиться будувати досить громіздкі багаторівневі блок-схеми, що не відображають природної структури модельованої системи. Частково, цей спільний недолік пакетів структурного моделювання усувається використанням додатків, в яких реалізований принцип фізичного мультидоменного моделювання, таких як *SimMechanics* і *SimPowerSystems*, що забезпечують можливість побудови моделей механічних та електричних систем відповідно, а також тим, що розробники більшості сучасних пакетів фізичного мультидоменного моделювання передбачають можливість підключення бібліотек *Simulink* до інших програм.

Програми *Simscape* [20] і *MATLAB \ Simulink* пов'язує одна компанія-виробник – *MathWorks* [21]. Проте, є суттєва відмінність між *Simulink* та *Simscape*, остання володіє широким спектром функцій та можливостей фізичного мультидоменного моделювання. *Simscape* надає середовище для моделювання та симуляції фізичних систем у механічній, електричній, гідравлічній та інших фізичних областях. Вона забезпечує фундаментальними елементами (блоками) з цих областей, які можна зібрати в моделі фізичних компонентів, таких як електричні двигуни, операційні підсилювачі, гідравлічні клапани та інші механізми. Моделі будуть відповідати структурі розроблюваної системи, тому що компоненти *Simscape* використовують фізичне з'єднання.

Моделі *Simscape* можуть бути використані для розробки систем керування і тестування продуктивності системного (структурного) рівня. Бібліотеки елементів можуть бути розширені за рахунок використання основаної на *MATLAB* мови *Simscape*, яка дозволяє текстове редагування та створення фізичних компонентів, доменів і бібліотек. Є можливість параметризації моделі з використанням змінних та виразів *MATLAB*, а також проектування моделі об'єкту керування фізичної системи, система керування якої може бути побудована в *Simulink*. Для розгортання моделі в інших середовищах моделювання *Simscape* підтримує генерацію *Ci*-коду.

Для основних продуктів компанії *MathWorks* (*MATLAB*, *Simulink*, *Simscape*) можливі три типи ліцензій (*Commercial*, *Academic*, *Student*), причому у відкритому доступі цін на продукти з цими ліцензіями немає, а для отримання прайсу потрібно авторизуватися на офіційному сайті та відправити відповідний запит. Для використання *Simscape* обов'язково потрібна наявність і *Simulink*, і *MATLAB*. Враховуючи, що кожна програма постачається за окрему плату, такий набір буде коштувати чималу суму: *MATLAB* (USD \$2,150.00) + *Simulink* (USD \$3,250.00) + *Simscape* (USD \$2,000.00) = USD \$7,400.00. Причому це тільки мінімальна конфігурація, вже не кажучи про додаткові важливі пакети *SimMechanics* (USD \$2,000.00), *SimHydraulics* (USD \$2,000.00), *SimElectronics* (USD \$2,000.00), *SimPowerSystems* (USD \$3,000.00), *Simulink Control Design* (USD \$1,000.00), *SimulinkDesign Optimization* (USD \$1,000.00), *Control System Toolbox* (USD \$1,000.00), *Optimization Toolbox* (USD \$1,000.00), *Global Optimization Toolbox* (USD \$1,000.00). Також треба відмітити, що компанія *MathWorks* не надає безкоштовні пробні версії студентам і приватним особам (*IndividualLicense*).

Навіть якщо продукти компанії *MathWorks* і перекривають усі запити споживачів (інженерів, науковців) в багатьох областях науки і техніки стосовно електронних розрахунків, моделювання, аналізу, оптимізації та інших видів процесінгу в віртуальній лабораторії, то ціна на ці продукти відповідна. Є безкоштовна пробна версія (*free 30-day trial*) програми *Simulink* (включаючи *MATLAB*) [21, 22].

В програмі *MATLAB* широкі можливості щодо рішення ODE; розв'язувачі поділяються на методи зі змінним та постійним кроком. Параметрична оптимізація у *MATLAB* можлива за допомогою додаткового інструментарію *OptimizationToolbox* – прикладний пакет для

розв'язання оптимізаційних задач і систем нелінійних рівнянь. Підтримує основні методи оптимізації функцій ряду змінних:

- безумовна оптимізація нелінійних функцій;
- метод найменших квадратів та нелінійна інтерполяція;
- рішення нелінійних рівнянь;
- лінійне програмування;
- квадратичне програмування;
- умовна мінімізація нелінійних функцій;
- метод Мінімакс;
- багатокритеріальна оптимізація.

Optimization Toolbox реалізує наступні методи гладкої безумовної оптимізації:

- а) метод найшвидшого спуску (*Steepest Descent method*);
- б) квазі-Ньютонівський BFGS-метод (*Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*);
- в) квазі-Ньютонівський DFP-метод (*Davidson-Fletcher-Powell*);
- г) методи, засновані на побудові довірчих двовимірних областей (*trust region*).

Перші три з них віднесені до «*medium-scale*»-методів і призначені для вирішення завдань оптимізації середньої розмірності (не більше 100 змінних), останній – до «*large-scale*»-методів. За замовчуванням, якщо задасться аналітичний вираз для градієнта, запускається метод довірчого інтервалу. В іншому випадку використовується BFGS-метод, але є можливість переключитися і на інші. Метод найшвидшого спуску, як правило, дуже повільний і його не рекомендується використовувати для вирішення практичних завдань.

2.4.2 VisSim/Altair Embed

VisSim/Altair Embed – пакет компонентного візуального моделювання фірми *Visual Solutions*, призначений для розробки і моделювання динаміки безперервних, дискретних та гібридних систем [24]. За своїми функціональними можливостями і способом завдання початкової інформації *Altair Embed* близький до пакету *MATLAB / Simulink*. *Simulink* більш поширений, тим не менш, він має чимало шанувальників і займає помітну частку ринку інженерних пакетів. *Altair Embed* – один з представників систем, що реалізують концепцію структурного (каузального) моделювання. Наразі програма є власністю Siemens.

Основним інструментом створення моделей є типові блоки «вхід-стан-вихід». Подібно до *MATLAB / Simulink* кожен типовий блок *VisSim/Altair Embed* реалізує математичну модель або забезпечує візуалізацію того чи іншого явища, процесу або пристрою. Базова бібліотека *Altair Embed* містить більше 120 лінійних і нелінійних блоків, згрупованих за функціональною ознакою, що дозволяють моделювати складні системи. Більшість бібліотечних блоків-підпрограм написані на мові *C++*, однак пакет надає можливість створювати користувальницькі бібліотеки практично будь-якою процедурною мовою програмування. Процедура інкапсуляції дає можливість створювати нові блоки (підсистеми), ґрунтуючись на вже існуючих блоках.

Як і *Simulink*, *Altair Embed* має широкий набір інструментів оцінки якості, стійкості, синтезу, корекції, оптимізації, лінеаризації, налагодження об'єктів в контурі моделі та програмування цифрових сигнальних процесорів. Вирішувач *Altair Embed* інтерпретуючого типу, функціонує в динамічному режимі з можливістю online-взаємодії з обладнанням реального часу. У складі пакету розв'язувача *Altair Embed* реалізовані як явні, так і неявні методи. Можливості моделювання гібридних систем у пакеті *Altair Embed* приблизно аналогічні *Simulink*. *Altair Embed* призначений насамперед для моделювання безперервних систем. Загальним принципом гібридного моделювання є використання готових гібридних блоків або перемикання заготовлених альтернативних ділянок блок-схем.

Пакет *VisSim/Altair Embed* включає в себе ряд додаткових модулів, що розширюють його можливості у конкретних предметних областях, також є інструменти інтеграції з пакетами *MATLAB*, *Mathcad* і транслятор проєктів програми *Simulink*. В якості обмежень пакету *VisSim/Altair Embed* можна відзначити відсутність альтернатив мови блок-схем. Крім того, *VisSim/Altair Embed* не відповідає вимогам об'єктно-орієнтованого моделювання, не підтримує спадкування, динамічну зміну кількості об'єктів. Тим самим він не дає можливості моделювати систему зі змінною у часі кількістю об'єктів.

Додатковий модуль *State Charts* дозволяє оперувати *UML*-сумісними (*Unified Modeling Language*) графічними діаграмами станів і редагувати та генерувати *Ci*-код для кінцевих автоматів, створених у цьому середовищі. Інші особливості програми наведено в [26].

VisSim/Altair Embed, окрім інших редакцій, випускається у вигляді академічної (приблизна ціна – USD \$2000) та професійної (USD

\$8000) редакцій [27], версія *VisSim 3.0* є безкоштовною (вільно розповсюджується) для персонального використання з обмеженнями [28].

Перевагами програми є спрямованість на створення систем керування (відображення багатьох частотних характеристик, синтез коректуючих ланок), графічне представлення моделей, наявність потужного вирішувача та можливість оптимізації, велика кількість супроводжуючої літератури та широку вживаність програми, взаємодія з поширеними відомими програмними пакетами (*MATLAB*, *Simulink*, *Mathcad*, *Maple*, *Excel*). Модулі *VisSim/Altair Embed* представлено на рисунку 2.4.

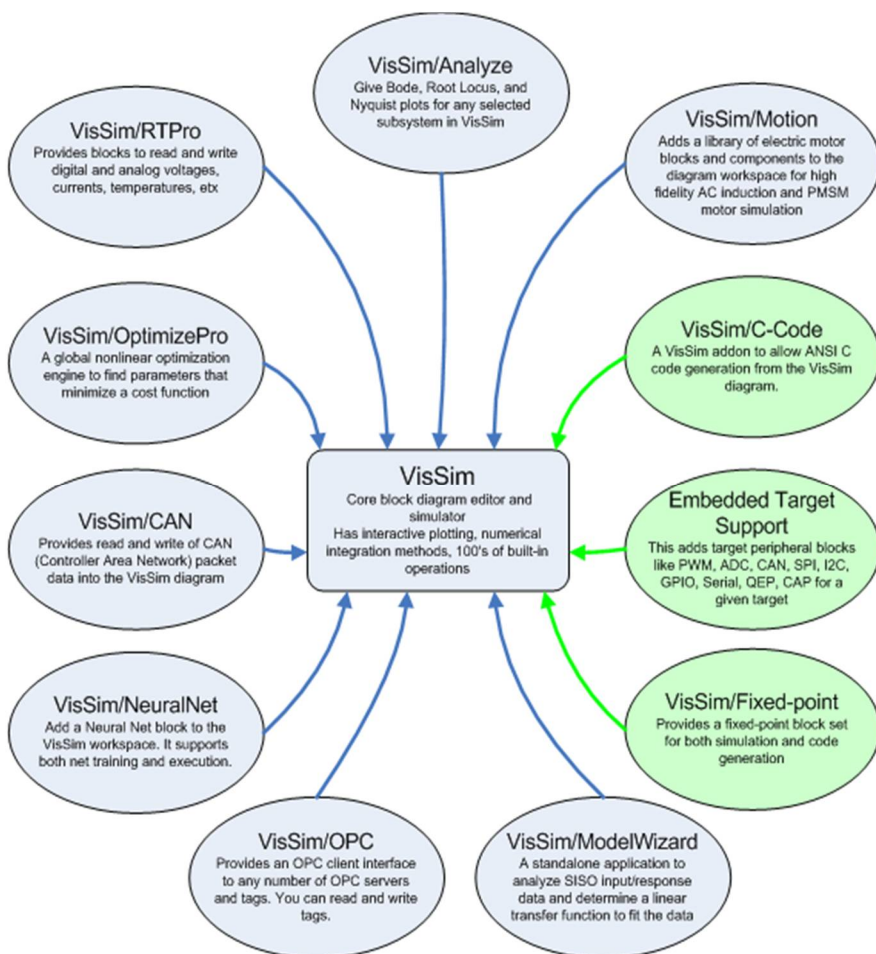


Рисунок 2.4 – VisSim/Altair Embed та додаткові модулі

Altair Embed дозволяє використовувати декілька методів числового інтегрування диференційних рівнянь (методи Рунге-Кутти, Булірша-Стоєра, Адамса-Мултона та ін.) та проводити оптимізацію (методами Пауелла, Полака-Рібєрі та Флетчера-Рівза).

На рисунку 2.5 представлені доступні алгоритми інтегрування, а рисунок 2.6 відображає можливі методи параметричної оптимізації.

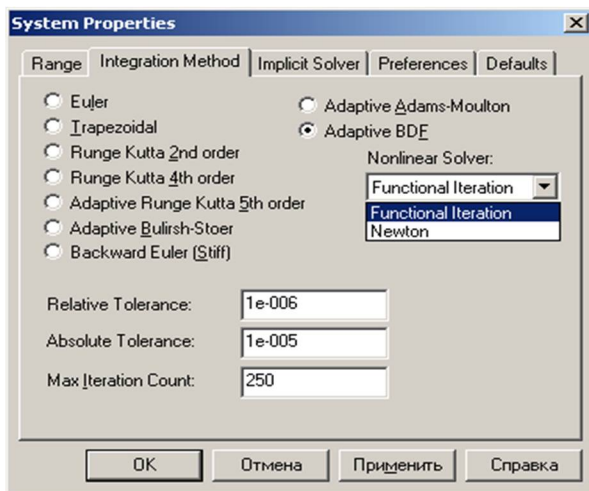


Рисунок 2.5 – Вікно вибору методів інтегрування в VisSim/Altair Embed

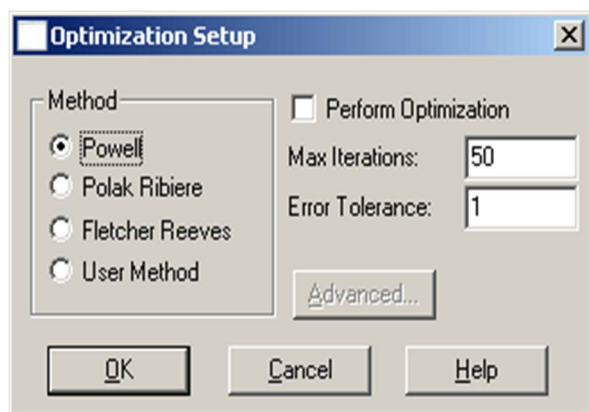


Рисунок 2.6 – Вікно вибору методів параметричної оптимізації в VisSim/Altair Embed

Недоліки *VisSim/Altair Embed*: неможливість автоматичного вирішення проблеми алгебраїчної петлі у багатьох випадках (пропорційна ланка, охоплена від'ємним зворотним зв'язком без інерційності у контурі); невдале виконання способу представлення результатів моделювання (графіків функцій часу та частоти) типу «вікно у вікні», незручні засоби аналізу отриманих результатів; проблема розташування ліній зв'язку між елементами та неможливість ручного редагування їх

положення, що знижує візуальне сприйняття побудованої моделі та може призвести до помилкової подальшої передачі моделі після її подання у вигляді зображення (бо з'єднання більш ніж двох провідників не супроводжується появою вузла), що показано на рисунку 2.7.

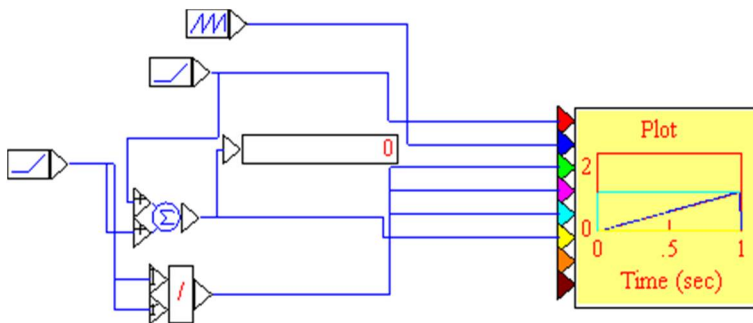


Рисунок 2.7 – Ілюстрація відсутності вузлів з'єднання в VisSim/Altair Embed

Таким чином, візуальне представлення моделей та графічний інтерфейс користувача відіграють суттєву роль при виборі САЕ-програми, де порушуються не тільки питання ергономіки, але й адекватності подальшого перетворення інформації.

2.4.3 Dymola (Modelica)

Dymola являє собою середовище візуального моделювання, що включає універсальну об'єктно-орієнтовану мову *Modelica* для моделювання складних фізичних систем у таких областях як мехатроніка, автоматика, аерокосмічні дослідження та ін. Мова *Modelica*, разом з *ASCEND*, *Smile*, *VHDL-AMS* та ін., належить до групи так званих акаузальних мов, тобто мов фізичного моделювання. Коштує *Dymola* приблизно \$3800.

Стандартна бібліотека *Dymola* включає елементарні компоненти, що відносяться до електротехніки, механіки, гідравліки і т.д. Спеціалізовані бібліотеки містять моделі пристроїв і явищ для конкретної області. Наприклад, *MultiBody Library* містить тривимірні механічні компоненти, призначені для моделювання роботів або транспортних засобів. Це моделі твердих тіл, шарнірів, джерел і засобів анімації.

Архітектура програми представлена на рисунку 2.8 [29].

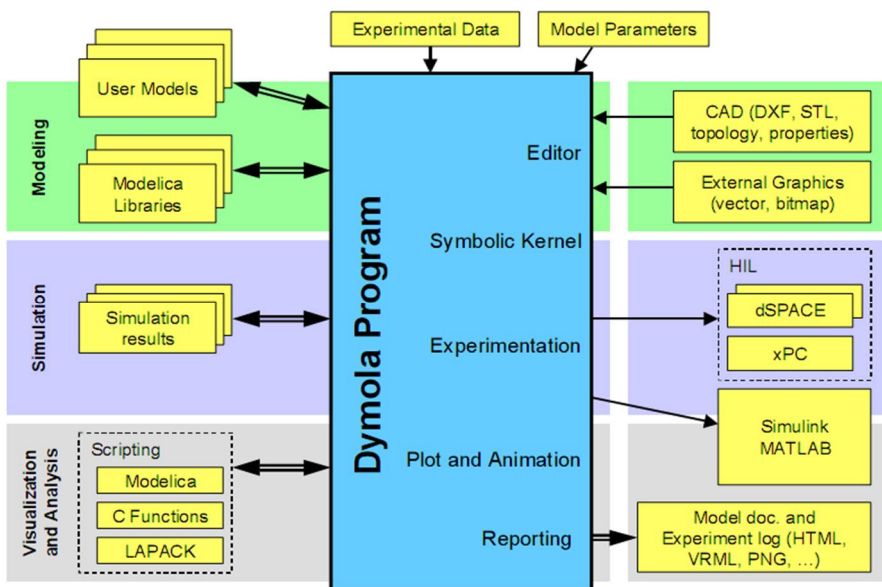


Рисунок 2.8 – Архітектура Dymola

Dymola дозволяє користувачам створювати власні бібліотеки моделей, описуючи їх на внутрішній мові опису блоків, або модифікувати існуючі моделі під свої потреби. Крім власної мови, *Dymola* (*Modelica*) підтримує інтеграцію з такими програмними середовищами, як *Fortran*, *C*, *SIMULINK* (*M-files* та *SimStruct*) і деякими іншими. Можливість взаємодії розроблених моделей з системою *MATLAB* / *Simulink* дозволяє об'єднати сильні сторони структурного та фізичного моделювання. *Dymola* має десять алгоритмів інтегрування зі змінним кроком для трьох можливих типів рівнянь, якими описується модель: ODE, DAE та ODAE (*Overdetermined DAE*).

2.4.4 20-sim

Пакет *20-sim* [30] 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 бібліо-

теки, 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 керування 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 (*BondGraph*), як найпростіших універсальних енергетичних компонентів; механічних, електричних, гідравлічних, теплових елементів (*IconicDiagram*). В якості прикладу на рисунку 2.9 представлена модель системи, де енергетична частина представлена графом зв'язків, а керуюча – блок-схемою, що включає спрямовані ланки.

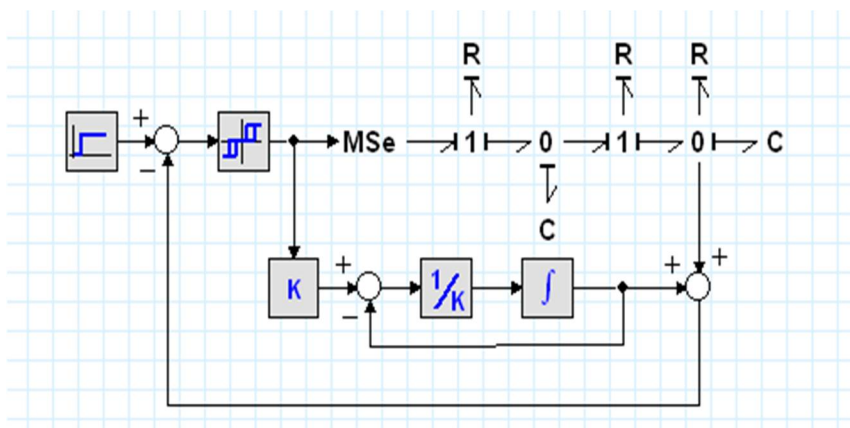


Рисунок 2.9 – Приклад моделі системи в 20-sim

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

В якості внутрішньої мови опису моделей використовується мова, подібна мові *Modelica* або мові середовища *Maple*, але є більш зро-

зумілою і простою у вивченні. *20-sim* має розвинуті засоби анімації, в тому числі *3D*, потужний вирішувач, що дозволяє отримувати чисельне рішення як ODE, так 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 мультидоменого моделювання та різноманітність форм представлення моделей систем: рівняння у рядковій математичній нотації, орієнтовані блок-схеми, акаузальні традиційні (*Iconic*) схеми (принципові) та ненаправлені зв'язані граfi (графfi зв'язків-BG).

Програма має три види версій або редакцій (з ліцензіями *Academic* та *Corporate*): *Viewer*, *Standard*, *Professional*.

Особливості програми:

- принцип відкритості, забезпечуваний механізмами підключення зовнішніх програм (*Matlab/Simulink*) і можливістю переглядати, редагувати й створювати нові бібліотеки моделей;

- принцип вкладеності або ієрархічності структур (глибина вкладеності не обмежена), що особливо актуально при моделюванні складних IBC;

- значний обсяг бібліотеки моделей, що в багатьох випадках дозволяє сформулювати математичну модель динаміки складної технічної системи без необхідності створення нових 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, лінеаризатор моделей і редактор лінійних систем;

- універсальний редактор лінійних систем, який дозволяє редагувати систему (модель) як простір станів, передатну функцію, нулі-полюса й перетворювати їх між собою, а також містить опції показу

діаграм Бode, годoгpафa Найквістa, гpафікa Нікольсa, діaгpам нулів-полюсів, реакції системи на функцію Хевісайда;

- можливість транслювати будь-яку модель у *Ci*-код для використання в *Matlab/Simulink* або автономний *Ci*-код для використання в *C* и *C++* 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»).

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

2.4.5 Micro-Cap 12

Програма Micro-Cap 12 (MC12) від компанії Spectrum Software це SPICE-симулятор для аналізу аналогових, цифрових та змішаних (змішаних аналогово-цифрових) електронних систем. Після закриття компанії у 2019 році, ця програма стала повністю безкоштовною, але залишається одним з найпопулярніших інженерних рішень завдяки зручному графічному інтерфейсу (рис.2.10).

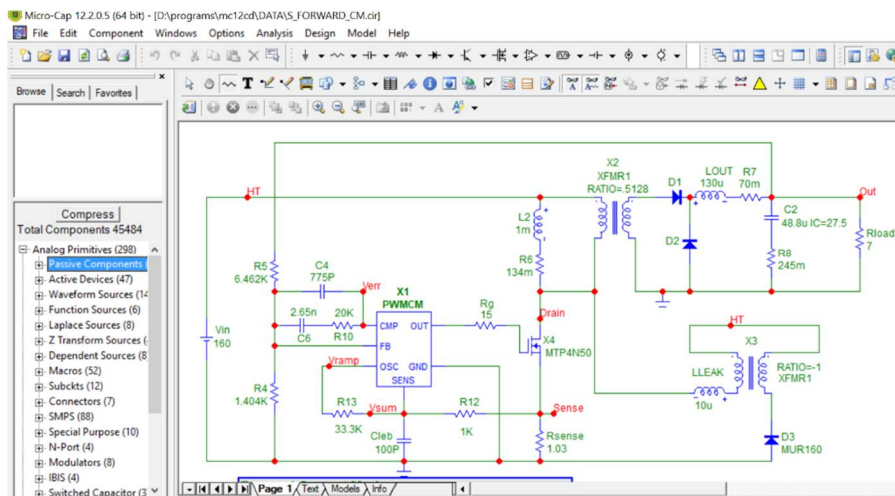


Рисунок 2.10 – Інтерфейс програми MC12

Основні можливості аналізу електронних систем у Micro-Cap 12 наведені нижче.

Аналіз у статичному режимі (DC Analysis). Розрахунок робочої точки схеми за постійним струмом. Автоматично виключає з розрахунку конденсатори (як розриви ланцюга) та закорочує індуктивності. Розраховує передатні характеристики, напруги у вузлах, струми у

вітках, різницю потенціалів та потужність, що розсіюється на елементах.

Аналіз перехідних процесів (Transient Analysis). Дослідження реакції схеми у часовій області (динамічний режим). Дозволяє вивчити поведінку схеми при подачі сигналів різної форми (імпульсні, синусоїдальні, трикутні тощо). Моделює фазові змінні (напругу, струми, потужності, реакцію на збурення, анімацію компонентів, роботу логічних елементів та багато іншого (рисунк 2.11).

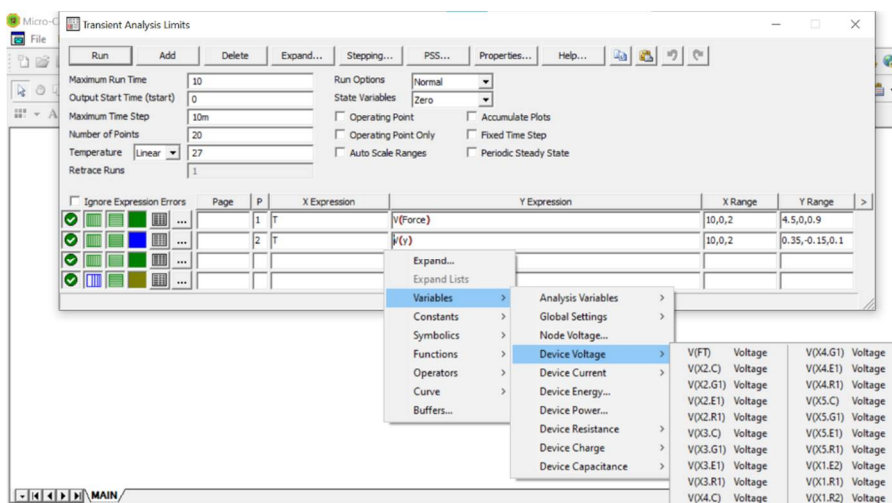


Рисунок 2.11 – Контекстне меню постпроцесора в MC12

Частотний аналіз (AC Analysis). Лінеаризований розрахунок реакції схеми на малий сигнал в частотній області. Розраховує амплітудно-частотні (АЧХ) та фазочастотні характеристики (ФЧХ), груповий час запізнення (ГВЗ), а також будує годографи та діаграми Сміта, що є незамінним при проектуванні підсилювачів, фільтрів та антенно-фідерних трактів.

Аналіз внутрішнього шуму та чутливості (Noise & Sensitivity). Оцінка електромагнітної сумісності та стійкості. Програма вираховує спектральну щільність власних шумів схеми та дозволяє оцінити, як зміна номіналу конкретного резистора чи транзистора (чутливість) впливає на вихідний сигнал.

Спектральний аналіз (Fourier Analysis). Математичне перетворення для розкладання сигналу на гармонійні складові. Оцінка рівня гармонік, коефіцієнта нелінійних спотворень (THD) та побудова амплітудного спектра.

Багатоваріантний та статистичний аналіз.

Parameter Stepping: дозволяє проводити покрокову зміну параметрів будь-якого компонента (наприклад, опору резистора або ємності) для спостереження за динамікою відгуку.

Аналіз за методом Монте-Карло (Monte Carlo): багаторазовий розрахунок схеми з випадковою зміною параметрів компонентів (враховуючи виробничі допуски). Це дає змогу оцінити відсоток браку в серійному виробництві.

Worst Case Analysis: Автоматично обчислює найгірший можливий сценарій поведінки схеми при максимальних відхиленнях номіналів.

Стрес-тестування (Smoke & Stress Analysis). Запобігання виходу компонентів з ладу. У процесі симуляції програма відстежує розсіювану потужність, робочу температуру переходів, струми та напруги, перевіряючи, чи не перевищують вони безпечні граничні значення для компонентів.

Контрольні запитання

1. Огляд САЕ-систем.
2. Огляд CAS систем.
3. Огляд CAD систем.
4. Структура САЕ-системи (приклад).
5. Поняття САПР. Критерії порівняння САПР.
6. Принципи вибору програми для дослідження електронної системи.
7. Критерії вибору програми для аналізу.
8. Головна відмінність структурного і фізичного мультидоменного моделювання.
9. Від чого залежить ефективність системи моделювання.
10. Чим відрізняються програми моделювання від програм проектування.

Завдання для практичного заняття/самостійної роботи

1. За заданою схемою інформаційно-вимірювальної системи та рівнем абстракції обрати підхід та програму моделювання згідно обраних критеріїв.
2. Обрати спосіб представлення моделі згідно інструментально-математичної бази обраної програми.
3. Порівняти програми 20-sim та VisSim/Altair Embed.
4. Дослідити можливість переходу між Matlab та іншими програмами моделювання.
5. Дослідити можливості симуляторів Matlab.

ТЕМА №3

АНАЛІЗ МУЛЬТИДОМЕННИХ СИСТЕМ

Перелік питань:

- Мультидоменна система (МС) як динамічна система (ДС).
- Особливості та структури мехатронних систем.
- Моделювання мехатронної системи (електроприводу).

Система – множина елементів, які знаходяться у зв'язках один з одним, та які створюють певну цілісність, єдність. Елементом системи називають найпростішу складову частину системи, яку умовно розглядають як неподільну. Взагалі існує декілька визначень системи, відмінності між котрими визначається у тому: чи розглядається система як об'єкт існуючий незалежно від спостерігача (визначення наведене вище), чи як метод вивчення й представлення феноменів (приклад: система – комбінація взаємодіючих елементів, організованих для досягнення однієї чи декількох цілей).

Властивості систем: цілісність (діяльність системи підпорядкована певній цілі), синергетичність (гармонійне поєднання і взаємодія всіх елементів і підсистем як єдиного цілого з метою отримання додаткового позитивного ефекту), ієрархічність (кожен компонент системи може розглядатися як система (підсистема) ширшої глобальної системи).

Під динамічною системою розуміють об'єкт або процес, для якого однозначно визначені поняття стану як сукупності величин у даний проміжок часу, та визначено закон, котрий описує зміни (еволюцію) начального стану з перебігом часу. Реальним фізичним системам, модельованим математичним поняттям «Динамічної системи», приписується важлива властивість детермінованості: знаючи стан системи в початковий момент часу, ми можемо однозначно передбачити всю її подальшу поведінку.

Відрізняють динамічні системи з дискретним та неперервним часом. Динамічна система (як з дискретним, так і з неперервним часом) є по суті синонімом автономної системи диференціальних рівнянь, що задана в деякій області і задовольняє там умовам теореми існування і єдності розв'язку диференціального рівняння. Положенням рівноваги динамічної системи відповідають особливі точки дифе-

ренціального рівняння, а замкнуті фазові криві - його періодичним рішенням.

Приклади динамічних систем: LC-контур, механічний маятник, Броунівський рух часток.

В загальному випадку складна система є багаторівневою конструкцією із взаємодіючих елементів, поєднаних у підсистеми різних рівнів.

Зображення модельованого об'єкта у вигляді багаторівневої конструкції із елементів називають структуризацією об'єкта. У структуризованій системі об'єктами матеріального світу є лише елементи та зв'язки.

Основні ознаки складних систем:

- мають багато взаємопов'язаних та взаємодіючих елементів;
- мають складну функцію, яка виконується системою та направлена на досягнення мети функціонування;
- можливість розкладання системи на підсистеми, мета функціонування яких підпорядковуються загальній меті системи;
- наявність керування, розгалуженої інформаційної мережі та інтенсивних потоків інформації;
- наявність взаємодії з зовнішньою середою та функціонування в умовах дії випадкових факторів.

Основні етапи створення складної системи:

- формулювання вимог до системи та складання технічної пропозиції та технічного завдання на проєктування ;
- розробка технічного проєкту;
- створення дослідного зразка;
- випробування;
- виготовлення та ввід у експлуатацію дослідного зразка системи;
- дослідна експлуатація та доробка зразків;
- організація випуску та ввід у експлуатацію серійних зразків;
- модернізація системи.

Проєктування складних систем має дві стадії. Перша відноситься до функціонально-структурних питань та може бути названа макро-проєктуванням або зовнішнім проєктуванням системи.

Друга стадія – мікро-проєктування або внутрішнє проєктування – пов'язана з проєктуванням елементів складної системи як фізичних одиниць обладнання. Мікро-проєктування включає у себе технічні

рішення по основним елементам системи, їх конструкції та параметрам, режимам експлуатації, а також по організації дослідного та серійного виробництва.

Серед задач, що виникають в зв'язку із дослідженням складних систем, можна відокремити два загальних класи:

- задачі аналізу, пов'язані з вивченням властивостей та поведінки системи в залежності від її структури та значень параметрів;
- задачі синтезу, які зводяться до вибору структури та значень параметрів, виходячи з заданих властивостей системи.

На практиці користуються різними неформальними прийомами синтезу складних систем, але всі ці прийоми зводяться до перебору варіантів або «синтезу через аналіз».

Практично будь-яка електронна система може бути описана за допомогою поняття динамічної системи. Динамічна система – математична абстракція, призначена для опису і вивчення систем; являє собою математичну модель деякого об'єкта, процесу або явища; це така система, параметри якої явно чи неявно залежать від часу. В одному з можливих визначень під динамічною системою розуміється структура, в яку в певні моменти часу вводиться щось (речовина, енергія або інформація) і з якої в якісь моменти часу виводиться щось. Вона служить для опису причинно-наслідкових зв'язків з минулого в майбутнє. Таким чином, динамічна система характеризується своїм початковим станом і законом, за яким система переходить з початкового стану в інший.

Структура моделей ДС часто відповідає структурі досліджуваного об'єкта (системи). В основі таких моделей лежить елемент (блок), з прихованою від зовнішнього спостерігача внутрішньою структурою. Блок інкапсулює свої властивості. Структурно складна модель ДС складається з багатьох блоків, взаємодіючих між собою через функціональні зв'язки між видимими ззовні змінними. Структура такої системи зазвичай є ієрархічною. Елементи системи можуть, в загальному випадку, змінюватися в процесі функціонування системи. Як правило, елементи складної системи характеризуються різними фізичними принципами дії, що, врешті-решт, не настільки помітно в підсумковій ММ, але надзвичайно важливо на етапі побудови моделі.

Види та зв'язок ДС, САК та МС (останні складаються з пристрою керування УУ та об'єкта керування ОУ) показане на рисунку 3.1.

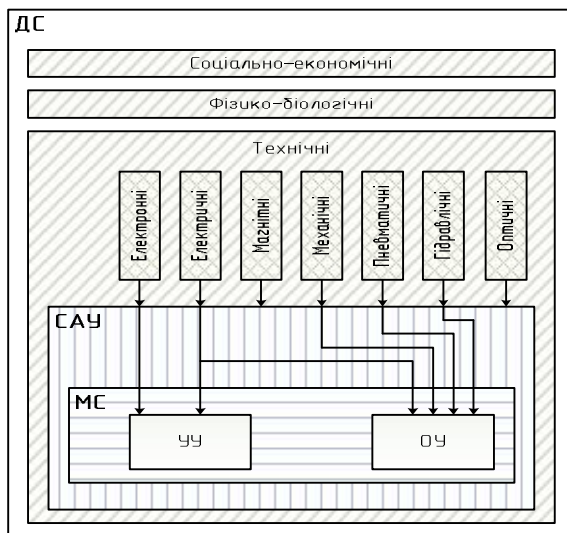


Рисунок 3.1 – Зв'язок ДС, САУ та МС

Прикладами складних ДС можуть бути:

- в галузі технічних систем: електромеханічна слідкуюча система відтворення кута повороту; система стабілізації температури у відсіку космічної орбітальної станції; цифрова система керування рухом літака в режимі заходу на посадку та інші;

- у галузі фізико-біологічних систем: система стабілізації кров'яного тиску людини; система контролю за поширенням інфекційних захворювань; система відтворення запасів риби в деякому районі риболовецького промислу; система підтримки теплового балансу та інші;

- в галузі соціально-економічних систем: система керування галуззю промисловості; система прогнозування купівельного попиту на деяку групу товарів та інші.

Надалі в якості динамічних систем будуть розглядатися тільки технічні системи. Системи керування технічних об'єктів є окремим випадком ДС.

Цілісність, структура, елемент, нескінченність та ієрархічність складають ядро системоутворюючих понять загальної теорії систем і є

основою системного уявлення об'єктів і формування концепцій системних досліджень.

3.1 Особливості мехатронних систем

Слово «Мехатроніка» складається з двох частин – механіка і електроніка, це нова область науки і техніки, присвячена створенню і експлуатації машин і систем з комп'ютерним керуванням рухом, яка базується на знаннях в галузі механіки, електроніки і мікропроцесорної техніки, інформатики і комп'ютерного керування рухом машин і агрегатів.

З аналізу даного визначення випливає:

- МС призначені, для реалізації заданого руху й основу будь-якої МС становить деякий виконавчий механізм;
- необхідною частиною МС є привод – електромеханічний, гідравлічний або якийсь інший;
- важливим компонентом МС є керуючий пристрій, завдання якого – забезпечення координованих рухів механічної частини.

Це дозволяє визначити особливості моделі мехатронних пристроїв, розуміючи під ними об'єкти, для дослідження та проєктування яких використовуються математичні моделі, що відображають взаємний вплив процесів різної фізичної природи – механічних, електричних, інформаційних тощо [31].

МС, що включають в свій склад електромеханічні перетворювачі з електронною комутацією (актуатори), різного виду датчики (сенсори), силові напівпровідникові перетворювачі, мікроконтролери та персональні комп'ютери, широко застосовуються та інтенсивно розвиваються.

В даний час мехатронні пристрої широко використовуються в медицині (штучні органи), в комп'ютерній техніці (приводи дисків, принтери, сканери), в автомобілях (гальмівні системи, системи керування двигуном), в роботах і маніпуляторах, у верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), в аудіо- і відео-техніці, у спеціальних пристроях космічної та військової техніки.

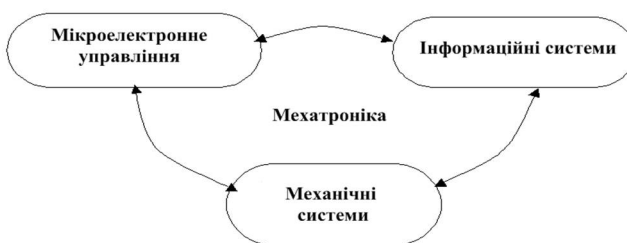
Застосування мехатронного підходу при створенні машин з комп'ютерним керуванням визначає їх основні переваги в порівнянні з традиційними засобами автоматизації:

- відносно низьку вартість завдяки високому ступеню інтеграції, уніфікації й стандартизації всіх елементів і інтерфейсів;

- високу якість реалізації складних і точних рухів внаслідок застосування методів інтелектуального керування;
- високу надійність, довговічність і перешкодозахищеність;
- конструктивну компактність модулів (до мініатюризації в мікромашинах);
- поліпшені масогабаритні й динамічні характеристики машин внаслідок спрощення кінематичних ланцюгів;
- можливість комплексування функціональних модулів у складні МС під конкретні завдання замовника [32, 33].

3.2 Склад мехатронної системи

У мехатронних системах прийнято виділяти три складові частини – механічну, електронну й комп'ютерну, об'єднання яких за допомогою інтерфейсів і утворює систему в цілому. Суть мехатронного підходу полягає в тісному взаємозв'язку зазначених компонентів на всіх етапах життєвого циклу виробу, починаючи зі стадії його проектування і маркетингу та закінчуючи виробництвом і експлуатацією замовником. Як нова область техніки, мехатроніка перебуває на стику мікроелектронного керування, інформаційних систем і механічних систем (рисуюнок 3.2) [33].



Рисуюнок 3.2 – Мехатроніка як міждисциплінарна наука

Мехатронний пристрій має наступні характерні ознаки [32]:

1. Наявність вихідної механічної ланки (*ВМ/Л*), що виконує зовнішні функції мехатронного пристрою; силового електромеханічного привода вихідної ланки; пристрою програмного керування приводом;

інформаційної системи, що контролює стан навколишнього середовища й стан самого мехатронного пристрою.

2. Мінімум перетворень інформації й енергії (наприклад, використання високомоментних або лінійних двигунів без редукторів) – принцип мінімуму перетворень.

3. Використання того самого елемента мехатронного пристрою для реалізації декількох функцій – принцип сполучення функцій.

4. Об'єднання корпусів мехатронного пристрою – принцип сполучення корпусів.

5. Застосування надщільного монтажу елементів.

Мехатронний пристрій може бути або машиною, або вузлом (функціональним елементом, модулем) машини. Прикладами сучасних мехатронних пристроїв є модулі верстатів і промислових роботів, принтери, побутова техніка й т.п. Зв'язки між функціональними перетворювачами (ФП) в МС наведено на рис. 3.3.

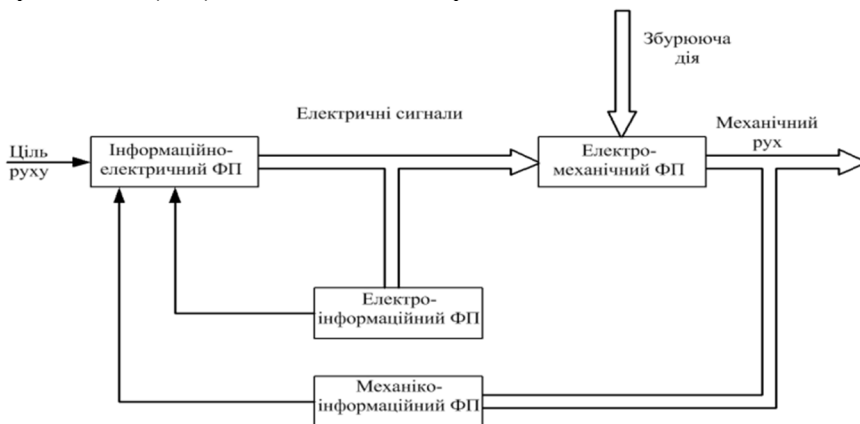


Рисунок 3.3–Інформаційні й енергетичні потоки в мехатронній системі

Тут використано скорочення ФП – функціональний перетворювач; жирними стрілками показані енергетичні потоки, тонкими – інформаційні потоки.

Концептуальну модель робота представлено як результат взаємодії під-систем МС з відповідними складовими кожної підсистеми та областями взаємодії в середовищі Виробництво–Вимоги ринку–Менеджмент (рисунок 3.4). Як бачимо, перетин кожних двох підсистем утворює низку питань для досліджень. Функціональна схема МС

(рисунок 3.5) в загальному вигляді включає три підсистеми: інформаційну, енергоелектронну і електромеханічну [33].

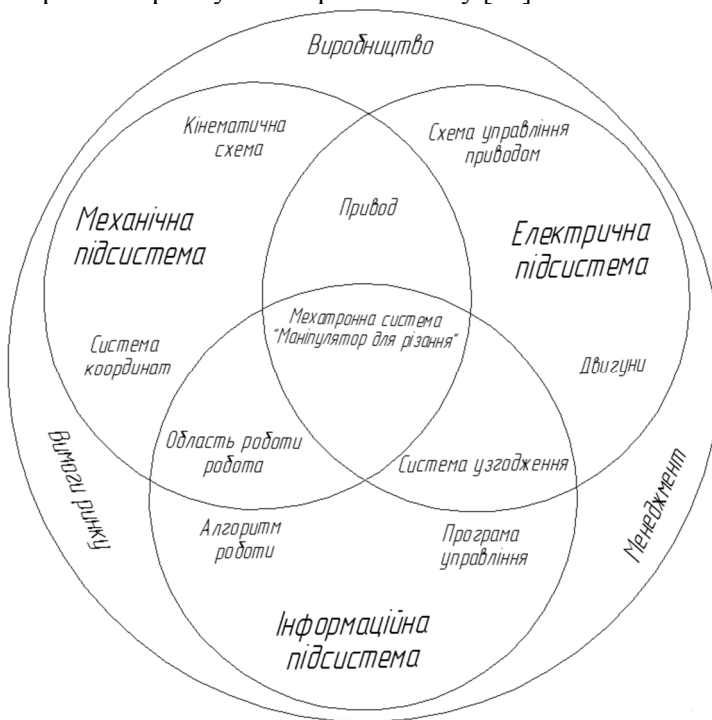


Рисунок 3.4 – Модель мехатронної системи робота-маніпулятора

Електромеханічна підсистема містить об'єкт керування (ОК) і електромеханічний перетворювач (ЕМП). Енергоелектронна підсистема включає силовий напівпровідниковий перетворювач (СНП) та вторинне джерело живлення (ВДЖ). Інформаційна підсистема містить систему керування і діагностики (СКД) і блок сенсорних пристроїв (СП). При комплексному дослідженні МС необхідно розглядати динамічні, статичні, енергетичні, спектральні характеристики тощо.

Прикладом мехатронної системи є металорізальний верстат із числовим програмним керуванням (ЧПК), топологія підсистем та кінематична схема якого наведена на рисунку 3.6. Суппорт верстата встановлений на фундаменті. На ньому є два механічні елементи, які за допомогою електроприводів переміщуються по ступенях рухливос-

ті на величини x , y , z , φ . Керування електроприводами ведеться від керуючих пристроїв, вартість яких досягає 40 % від вартості верстата.

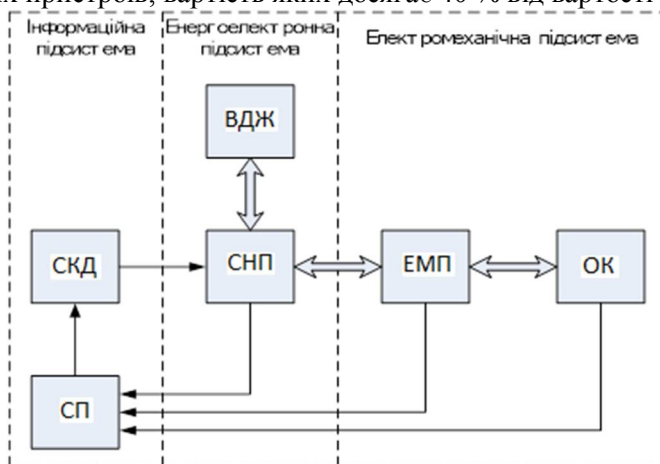


Рисунок 3.5 – Функціональна схема мехатронної системи

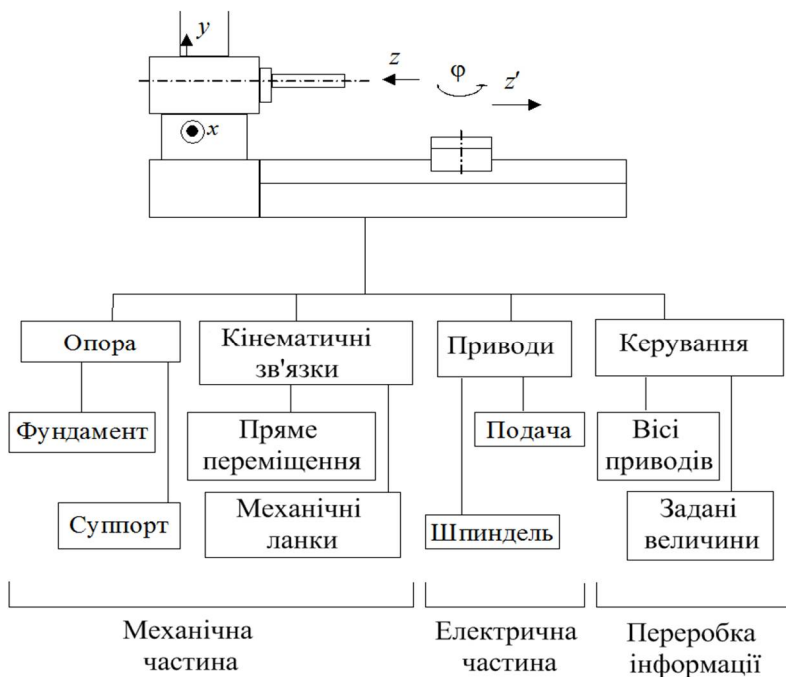


Рисунок 3.6 - Металорізальний верстат як мехатронна система

Слід підкреслити основні особливості МС:

а) об'єкти керування МС безпосередньо не пов'язані з виробництвом. Як правило, вони замінюють людину в умовах, де її можливості обмежені або там, де її здоров'ю та життю загрожує небезпека;

б) об'єкти керування (ОУ) мехатронних систем, як правило, мають змінні параметри. Часто не вдається створити математичну модель об'єкта керування на основі фізичних закономірностей його роботи. У цьому випадку для математичного опису ОУ доводиться вдаватися до методів ідентифікації;

в) електромеханічні перетворювачі ЕМП часто є конструктивною ланкою об'єкта керування;

г) керування потоком енергії від ВДЖ до ЕМП здійснюється силовим напівпровідниковим перетворювачем СНП. Об'єднання ВДЖ, СНП та ЕМП створює мехатронну енергетичну підсистему, в якій виявляються нові властивості (принцип синергії);

д) мехатронна енергетична підсистема, як правило, є нелінійною, імпульсною підсистемою з дискретно змінними параметрами. Тому її аналіз, а також синтез системи керування вимагає застосування методів, що базуються на сучасних комп'ютерних технологіях.

Розрахунки й проєктування МС включають:

- побудову спільної мультидоменної моделі;
- дослідження динамічних характеристик безперервної й імпульсної частини;
- синтез регулятора;
- дослідження динамічних, статичних характеристик системи.

У мехатроніці об'єктами керування доцільно вважати самі електромеханічні системи різного ступеня складності, зокрема нею може бути електричний привод [33].

Головною особливістю сучасного етапу розвитку мехатронних модулів є інтелектуалізація процесів керування їх функціональними рухами. Технічна реалізація інтелектуальних мехатронних модулів руху (ІММР) стала можливою завдяки бурхливому розвитку в останні роки мікропроцесорних систем, орієнтованих на завдання керування руху.

Постійне вдосконалювання виробничих технологій веде до стабільного зниження вартості апаратних засобів, що зробило їх до теперішнього часу рентабельними для практичного впровадження.

3.3 Необхідність моделювання мехатронних систем

Будь-яка ДС (зокрема, її об'єкт керування ОУ), що вимагає керування, повинна бути ідентифікована для побудови її моделі з метою створення необхідного керуючого пристрою для неї. За поведінкою моделі певної ДС можна, у деякому наближенні, судити про поведінку реальної системи, а через складність або неможливість проведення випробувань на реальній системі має сенс моделювати поведінку системи з використанням її моделі. Таким чином, моделювання мехатронних і електромеханічних систем є актуальним завданням.

Аналогічно тому, що МС це синергетичне об'єднання механічної, електричної та комп'ютерної (електронної, цифрової) частин, засоби моделювання повинні допускати спільне моделювання цих час-

тин на єдиній методологічній основі, даючи можливість будувати і досліджувати багатоаспектні моделі.

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, що є загальним недоліком каузального підходу у моделюванні.

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, тобто надавати можливість мультидоменного моделювання. 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 вони зв'язані компонентними рівняннями. Саме цей підхід стає домінуючим останнім часом для дослідження МС. При цьому основу моделювання МС становить моделювання механічних конструкцій (для цього призначені програми класу MCAD). Саме компоненти механічних конструкцій описуються найбільш складними математичними моделями. Вони найбільше багатовимірні й пред'являють найбільш жорсткі вимоги до засобів моделювання [31, 34].

Оскільки кожна мехатронна система має об'єкт керування та пристрій керування, тобто є конкретизованою САК, то система для моделювання повинна володіти широкими можливостями щодо синтезу, аналізу та оптимізації САК. Представниками таких САЕ є *SimApp*, *MATLAB / Simulink*, *VisSim/Altair Embed*, *Dymola*, *20-sim*. Рекомендовано для моделювання мехатронних систем застосовувати програми фізичного мультидоменного моделювання, як найбільш придатних для цих цілей з точки зору представлення моделі (*modeling*) та стійкості й адекватності аналізу поведінки у часі (*simulation*). Найбільш потужним та пристосованим для дослідження САК є *MATLAB / Simulink*, недоліками є неповна підтримка фізичного мультидоменного

моделювання, відсутність пробної версії та необхідний набір додатків, що в сумі з батьківським пакетом коштують більше \$15000.

Контрольні запитання

1. Поняття системи, ознаки ДС, МС. МС як вид ДС.
2. Особливості мехатронних систем.
3. Склад мехатронної системи.
4. Функціональна схема мехатронної системи.
5. Розрахунки й проектування МС.
6. Необхідність моделювання мехатронних систем.
7. Особливості сучасного етапу розвитку МС.
8. Поняття синергії.
9. Програми та підходи моделювання МС.
10. Функціональна схема мехатронної системи.

Завдання для практичного заняття/самостійної роботи

1. Представити задану схемою інформаційно-вимірювальної системи як мехатронну систему, визначити її підсистеми, показати інформаційні зв'язки.
2. Поставити задачу / завдання для моделювання ІВС з урахуванням мультидоменності системи.
3. Обрати і описати ІВС із системою контролю як мультидоменну, мехатронну систему, визначити структурні блоки.

ТЕМА №4

МОДЕЛЮВАННЯ САР ТА САК

Перелік питань:

- Структура систем автоматичного керування (САК).
- Моделі елементів САК.
- Моделювання автоматизованої системи керування.

4.1 Структурні елементи САК

Модель системи керування можна представити рисунком 4.1.

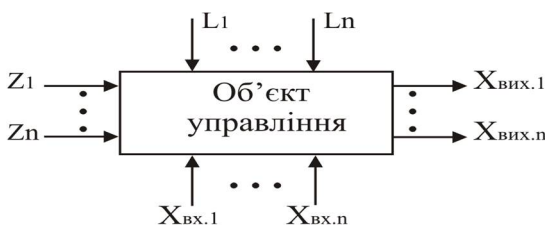


Рисунок 4.1 – Модель системи керування

На кожний об'єкт керування впливають багато зовнішніх факторів, які можна розбити на декілька груп:

- а) $X_{вих}$ – керовані параметри, характеризують стан процесу;
- б) L – випадкові неконтрольовані збурення;
- в) Z – контрольовані збурення;
- г) $X_{вх}$ – керуючі дії, спрямованні на компенсацію дій Z та F .

Метою автоматичного регулювання та керування є або додержання регульованого параметра на заданому рівні ($X_{вих} = \text{const}$), або змінення цього параметра по деякому закону [$X_{вих} = f(t)$]. В першому випадку говорять про систему автоматичного регулювання (САР), а в другому – про систему автоматичного керування (САК). Принцип керування за відхиленням полягає в тому, що вимірюється величина керованого параметра ($X_{вих}$) та порівнюється з заданим значенням ($X_{зад}$), а отримане відхилення перетворюється в керуюче діяння ($X_{вх}$), котре прагне зменшити або усунути це відхилення шляхом відповід-

ного впливу на об'єкт. Структурна схема САК за відхиленням – на рис.4.2.

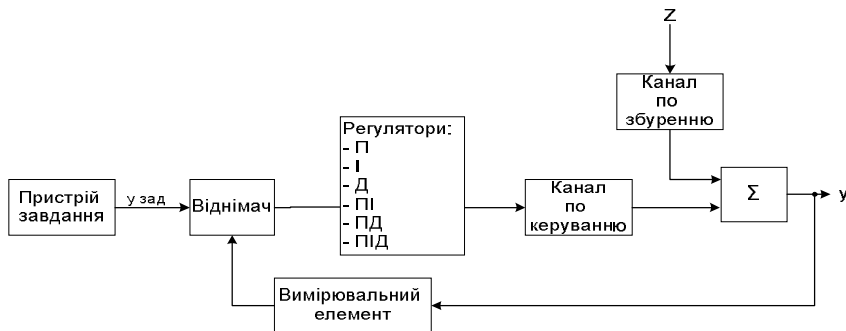


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи керування за відхиленням

САК з таким принципом – це замкнена САК, оскільки сигнал з виходу об'єкта подається (замикається) на його вхід (зворотний зв'язок). Тому такий принцип називають ще принципом зворотного зв'язку (ЗЗ).

Принцип керування за збуренням полягає в тому, що для зменшення або усунення відхилення керованої величини ($X_{\text{вих}}$) від заданого значення ($X_{\text{зад}}$), яке спричиняється збуренням, вимірюється це збурення і перетворюється в керуюче діяння ($X_{\text{вх}}$), яке компенсує це відхилення. Структура такої САК – на рисунку 4.3.

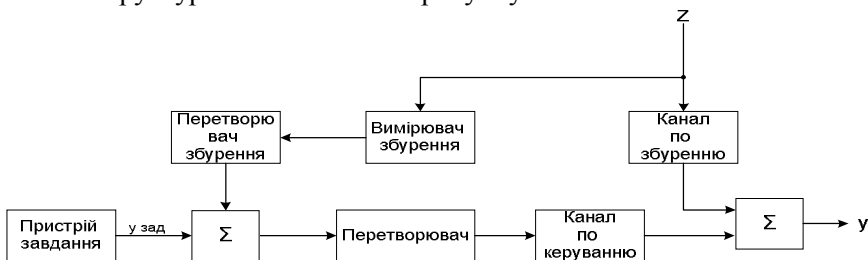


Рисунок 4.3 – Структурна схема САК з принципом керування за збуренням

Вимірювання збурюючого діяння $L(t)$ здійснюється за допомогою вимірювального елемента (BE), а його перетворення – за допомогою перетворювача ($П$). Вимірювальний елемент і перетворювач утворюють зв'язок за збуренням. Вихідна дія зв'язку за збуренням

(XL) в суматорі (Σ) складається із задавальною дією ($X_{зад}$). Далі цей сумарний сигнал підсилюється і перетворюється в ПП та подається на виконуючий пристрій (ВП), який через керуючий орган (КО) компенсує дію збурення. Алгоритм керування тут $X_{ex}(t) = f[L(t)]$. Система з принципом керування за збуренням є розімкненою САК: процес керування не залежить від результату.

Структурна схема системи керування за керуючим впливом наведена на рисунку 4.4.

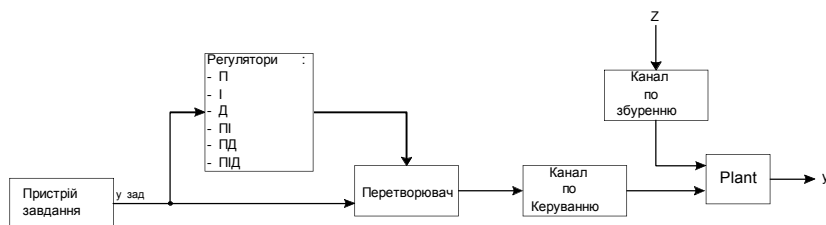


Рисунок 4.4 – Структурна схема системи керування за керуючим впливом

Якщо дії на об'єкт постійні в часі, то процес йде стабільно і без участі людини. Але, як правило, збурення в часі змінні, що призводить до відхилення вихідних параметрів від заданих значень. Тому об'єкт потребує керування, тобто цілеспрямовану зміну параметрів X_{ex} , щоб компенсувати зовнішні збурення L . Щоб вирішити задачу керування, тобто цілеспрямовано змінювати X_{ex} , необхідно знати залежність між окремими параметрами процесу, тобто функціонал $X_{вих} = f(X_{ex}, L, Z)$, що є математичною моделлю та мати моделі підсистем (елементів, блоків) САК/САР.

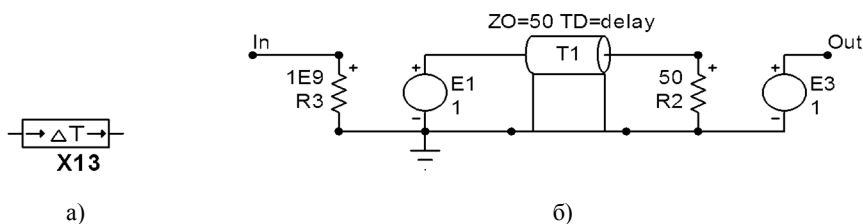
4.2 Моделі для елементів САК в програмі Micro-CAP

В бібліотеці пакету моделювання Micro-CAP наявні макромоделі пристроїв, які необхідні для побудови функціональної моделі САР/САК, зокрема, операційні багатополісники, які можуть виконувати операції інтегрування, диференціювання та всі арифметичні дії та чотирьохполісники із складними передатними функціями (див. додаток Г) [12]. Перелічимо деякі з них:

- ланцюг абсолютного значення - *AbsoluteValueMacro*;
- ланцюг підсилення - *Amplifier Macro*;

- ланцюг затримки - *Analog delay Macro*;
- ланцюги суматорів із різним напрямком та кількістю входів, наприклад, *2-Input Summer Macro*;
- ланцюги для обчислення різниці, результатів множення та ділення сигналів - *Subtraction Macro*, *Multiplier Macro*, *Divider Macro*;
- ланцюги інтегрування та диференціювання *Integrator Macro*, *Differentiator Macro*;
- ланцюг із зоною нечутливості *Slip Macro*;
- тригер Шмітта (ланцюг гістерезису) *Schmitt Macro*.

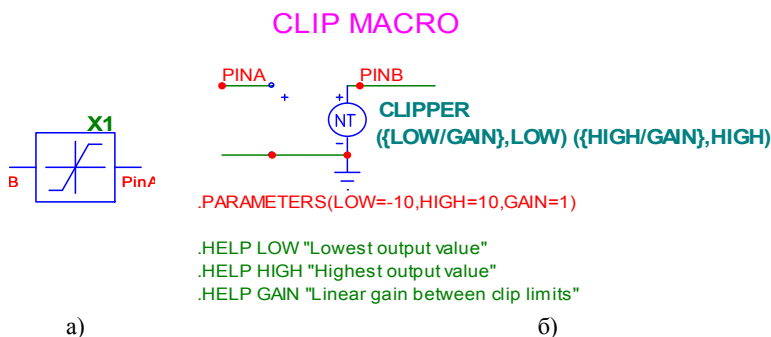
Розглянемо умовні графічні позначки (УГП) та схеми заміщення деяких макромоделей. На рисунку 4.5 наведена макромодель елемента, який реалізує затримку сигналу (параметр – затримка в секундах), на рисунку 4.6 – макромодель елемента із передатною функцією, вид якої зображено на його УГП.



а – УГП;

б – схема заміщення

Рисунок 4.5 – Ланцюг Analog delay Macro



а)

б)

а – УГП; б – схема заміщення

Рисунок 4.6– Ланцюг CLIP Macro

4.3 Приклад побудови САК в програмі Micro-Cap

4.3.1 Теоретичні аспекти моделювання САК

При моделюванні процесів автоматичного керування дотримуються схеми, за якою реальний об'єкт складається з двох підсистем, які взаємодіють: керованої та керуючої.

Класична схема керування з одиничним негативним зворотним зв'язком (одноконтурна САР) показана на рисунку 4.7.



Рисунок 4.7 – Одноконтурна САР

Призначення регулятора системи полягає в корекції динамічних властивостей об'єкта керування за допомогою сигналу $u(t)$, що управляє, так, щоб реальний вихідний сигнал $y(t)$ якомога менше відрізнявся від бажаного вихідного сигналу $g(t)$. Регулятор виробляє такий сигнал керування, використовуючи помилку регулювання $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$, щоб виконувалася наближена рівність $\varepsilon \sim 0$.

При дослідженні систем за їх математичними моделями виникає питання, в якій мірі реальний процес функціонування відповідатиме розрахунковому, оскільки насправді в розрахунках користуються наближеними моделями, коли ряд факторів можуть не враховуватися.

Системи автоматичного керування мають «схильність» до коливання, це викликано тим, що частина енергії з їх виходу може повертатися на вхід, а з появою збурення чи зміни керуючої дії починається перехідний процес.

Стійка система, за умови усталених значень керуючих та збурюючих дій, через певний час, знову повертається до усталеного стану рівноваги, а нестійка система, прийшовши до руху, не повертається до усталеного стану рівноваги, навпаки, її відхилення від стану рівноваги

буде або неперервно змінюватися, або змінюватися в формі постійних незгасаючих коливань. Це питання є предметом теорії стійкості [35].

Для задовільної роботи системи автоматичного керування перш за все необхідно, щоб вона була стійкою, причому вимога стійкості повинна виконуватися з деяким запасом, який передбачає можливі зміни параметрів системи під час її роботи. Якщо система є стійкою, то представляє інтерес її параметри: максимальне відхилення регульованої величини $y(t)$ в перехідному процесі – перерегулювання (відхилення від значення в усталеному режимі у відсотках, час перехідного процесу (час, за який функція змінює своє значення з 10% до 90% від свого значення в усталеному режимі).

Безперервні системи описуються звичайними диференціальними рівняннями та диференціальними рівняннями в частинних похідних, а дискретні системи – диференціально-різницевиими рівняннями. Лінійні та нелінійні неперервні системи автоматичного керування описуються відповідно лінійними та нелінійними диференціальними рівняннями. Лінійні та нелінійні системи (неперервні чи дискретні) можуть бути стаціонарними чи нестаціонарними, із зосередженими чи розподіленими параметрами.

Стаціонарні системи описуються диференціальними рівняннями із сталими коефіцієнтами. Якщо система є нестаціонарною, то коефіцієнти відповідних рівнянь є функціями часу.

Така класифікація систем автоматичного керування за способом їх математичного опису є умовною. На практиці в системах автоматичного керування досить зрідка доводиться мати справу з режимами роботи, які значно відрізняються один від одного, частіше існує якийсь один типовий режим для конкретної системи. Саме ця обставина часто використовується для значного спрощення математичної моделі. Частіше за все використовують локальну лінеаризацію моделі системи, що дозволяє при моделюванні переходити до функцій комплексної частоти (через перетворення Лапласа, Фур'є тощо).

Для оцінки динамічних властивостей системи часто розглядається реакція на одиничну ступінчасту дію. Перехідний процес повинен відповідати заданим показникам якості, до яких відносяться час перехідного процесу, перерегулювання. Можуть бути також використані інтегральні оцінки якості перехідного процесу [35]. Висновки стосовно властивостей систем автоматичного керування можна зробити, виходячи з виду диференціальних рівнянь моделі, які наближено

описують процеси в системах. Порядок диференціального рівняння та значення його коефіцієнтів повністю визначаються статичними та динамічними параметрами системи та її структурою.

4.3.2 Моделювання регулюючих клапанів

Для регулювання швидкості подачі рідин і газів в САР застосовують різні конструкції клапанів, принцип дії яких базується на зміні геометричних розмірів каналу проходження потоку, наприклад електромеханічний моторизований регулятор. Зміна положення штоку такого моторизованого клапана здійснюється системою регулювання, тобто цей пристрій є мехатронною системою.

Синтезуємо структурну схему моделі клапана на базі кінематичної схеми клапана (рисунок 4.8). Спрощено передача механічної енергії по кінематичній схемі регулятора: електропривод – редуктор – обертально-поступальна передача – переміщення затвора клапана.

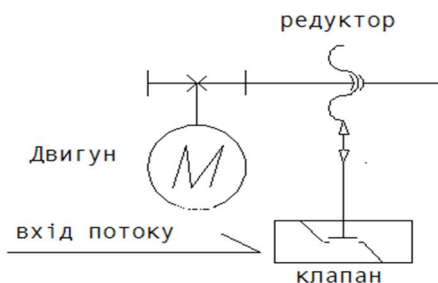


Рисунок 4.8 – Кінематична схема клапана

Контур клапана представлений структурною схемою (рис. 4.9).

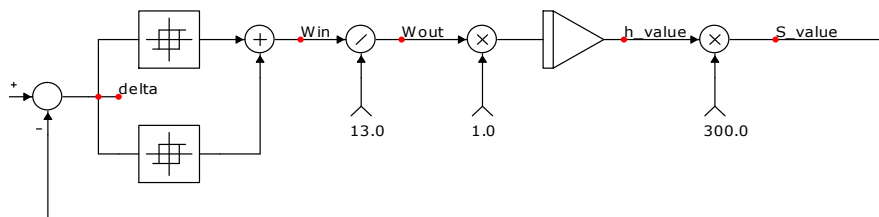


Рисунок 4.9 – Клапан. Структурна схема моделі

Модель клапана описується законами класичної механіки і синтезується виходячи з геометричних розмірів клапана.

Параметризується 3 блоками: редуктор; обертально-поступальна передача; затвор подачі рідини/ пара. Параметри моделі можна отримати з технічної документації, безпосереднім зняттям параметрів з реального устаткування, або їх аналітичним розрахунком. В ході моделінгу можуть бути виявлені нові закономірності, які необхідно врахувати, або такі, впливом яких можна знехтувати. Вхідний сигнал уставки перетину просвіту клапана в мм^2 моделюється програмованим джерелом (напруги).

Контур складається з наступних елементарних ланок:

- ланка визначення величини помилки, реалізована на алгебраїчному суматорі із врахуванням знаку доданків (вихід: *delta* – відхилення поточного положення «вхід -» від уставки «вхід +»);

- ланка зони нечутливості (вихід: *Win* – частота обертання ведучої шестерні редуктора), реалізована на двох тригерах Шмітта (ланки гістерезису) із сполученими межами петель - для збереження ресурсу блоку керування електроприводом від «брязкоту» контактів;

- ланка «Редуктор» (блок ділення на коефіцієнт/передаточне число (вихід – *Wout* – частота обертання веденої шестерні редуктора);

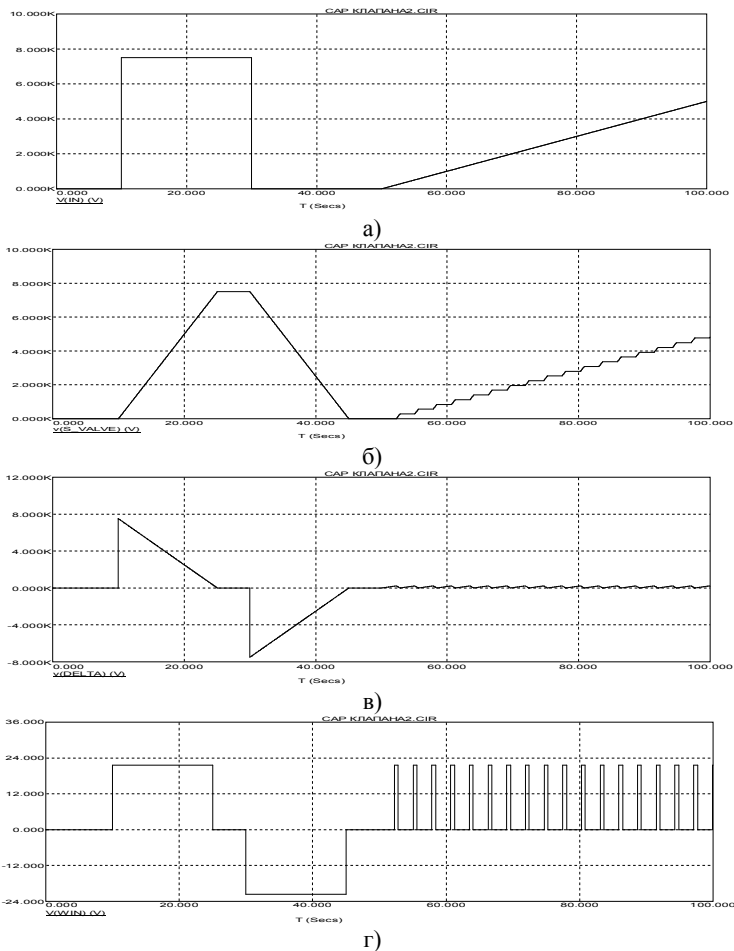
- ланка інтегратора, яка моделює обертально-поступальну передачу із передаточним числом 1 мм/об, вихідна величина – поточне положення штока клапана *h_value* (мм);

- ланка множення для розрахунку поточного вікна просвіту клапана *S_value* (мм^2), відповідно до положення штока *h_value*.

Результати моделювання динаміки САР (перехідні процеси) представлені на рисунку 4.10.

На графіку 4.10, а+ вхідний сигнал уставки перетину просвіту клапана (може мінятися як дискретно, так і безперервно), на рисунку 4.10, б відображена реакція клапана на вхідний вплив (видно роботу ланки зони нечутливості, яка переводить клапан в переривчастий режим роботи при швидкості зміни уставки, меншій за швидкість позиціонування штока клапана- у відсутності цієї ланки на малих швидкостях зміни уставки клапан переходив би у автоколивальний режим).

Рисунок 4.10, в відображає процес визначення помилки між уставкою та поточним значенням просвіту клапана *S_valve* (мм^2), відповідно до положення штока.



а – уставка; б – стан клапана; в – помилка уставка-поточне значення;
г – швидкість обертання двигуна

Рисунок 4.10 – Перехідні характеристики

На рисунку 4.10 наведено: г – частота і напрямок обертання електродвигуна переміщення клапана. Видно режим переривчастої роботи двигуна при повільній зміні уставки.

4.4 Моделі ІППН в Micro-Cap

Імпульсний перетворювач постійної напруги (ІППН) є складовою всіх джерел живлення, він змінює рівень постійної напруги виходу відносно входу. ІППН можна віднести до системи автоматичного регулювання струму, або напруги. В англomовній технічній літературі ці пристрої отримали назву імпульсних регуляторів (ІР), імпульсних стабілізаторів та відносяться до класу *SMPS*, джерел вторинного електроживлення, тобто потужних пристроїв, що працюють в ключовому режимі, саме так і називається підрозділ бібліотеки програми Micro-Cap, де зберігаються макромоделі ІППН. Програми CAD мають в своїх бібліотеках набір макромоделей для ІППН різних типів. Основний розподіл макромоделей – по типу перетворювача, роботу якого вони моделюють.

Існує два способи моделювання ІППН: за допомогою *Switch* (ключових) та *Averaged* (усереднених) макромоделей, на належність до певного типу вказує префікс *A_* або *S_* у назвах файлів перетворювачів. Назви файлів мають інформативний характер та відображають властивості макромоделі згідно наведеної класифікації: наприклад, файл *A_BUCK_VM* в Micro-Cap вміщує усереднену макромодель перетворювача знижувального типу, в режимі контролю вихідної напруги. Крім макромоделей основних ІППН різного роду, наприклад, знижувального та підвищувального типів (Buck, Boost, Buck-Boost), до бібліотеки занесено макромоделі й інших перетворювачів [36, 37].

Switch – макромоделі створені із урахуванням усіх нелінійностей, які властиві транзисторам, вентилям, трансформаторам, дроселям; їхнє використання обмежується режимами розрахунку перехідних характеристик. Однак, при редагуванні бібліотечних моделей та подальшому моделюванні перехідних характеристик за допомогою ключових макромоделей можливі проблеми незбіжності, що є слідством поганой обумовленості/жорсткості моделі.

В *Averaged*–макромоделях немає ключових елементів, функціонування пристрою в режимі малого сигналу описано квазістатичним нелінійним рівнянням із параметричними коефіцієнтами, які залежать від коефіцієнту заповнення. Ці економічні макромоделі набули найбільшого поширення, їх використовують для дослідження в частотному діапазоні. В робочих папках CAD-програм вкладено готові для аналізу схеми: в них є навантаження, джерела живлення, контролер й перет-

ворювач, представлений в *Averaged* моделях «чорним ящиком», схеми яких можна проглянути при переході в інформаційний режим. Існує також поділ за режимом контролю: за струмом (*current mode* – CM), або по напрузі (*voltage mode* – VM).

У моделях перетворювачів центральне місце займає інкапсульована макромодель системи керування – ядро, де керування здійснюється шляхом зміни коефіцієнта заповнення, так звана «широтно-імпульсна» модуляція – PWM. У ключових макромоделях кількість виводів СК дорівнює кількості виводів у реальних мікросхемах, сама модель СК набагато складніша, ніж в усереднених макромоделях. Як правило, при проектуванні ІППН спочатку здійснюється аналіз за допомогою усереднених макромоделей, а потім – за допомогою ключових.

4.4.1 Моделі ШІМ-контролерів для дослідження САК в Spice-сумісних програмах ECAD

Контролер із модуляцією ширини імпульсу (ШІМ) вмикає та вимикає живлення, щоб контролювати рівень напруги або струму в навантаженні. Ця техніка модуляції виробляє серію імпульсів, робочий цикл яких залежить від опорного сигналу. ШІМ є ключовим принципом регулювання в багатьох пристроях: джерелах безперебійного живлення (*UPS*), джерелах живлення змінного струму (*SMPS*), імпульсних перетворювачах постійної напруги (ІППН), регуляторах частоти (перетворювачах змінного струму), автоматизованих системах керування (АСК) напруги /струму або швидкості та інших САР та САК. В якості модулюючого сигналу зазвичай використовується пилкоподібний сигнал.

Для дослідження САК та мехатронних систем на високому рівні абстракції можна використовувати програми ECAD [34]. Як правило, моделі для ШІМ-контролерів представлені в бібліотеках SPICE-сумісних програм призначені для спеціалізованих контролерів, або є невід’ємною частиною моделей імпульсних перетворювачів постійної напруги (ІППН). Наприклад, для мікросхеми 100 В ШІМ-контролеру LM50201 для режиму контролю вихідного струму (*Current Mode PWM Control*), для мікросхеми інтегрованого мережевого інтерфейсу *Ethernet PD* та контролера ШІМ (LM5070), для регулятора поточного режиму вторинних джерел живлення, універсальних бездротових при-

строїв малої потужності (NCP1200 / ON) тощо [31]. Ці моделі отримані як комбінація елементів принципової схеми інтегральної мікросхеми та поведінкових елементів, написані на спеціалізованій мові моделювання (*Spice*).

Моделі ШІМ розвивалися головним чином як компонент перетворювачів постійного струму та вони як правило є адекватними у режимі малого сигналу (*Small Signal Mode*). В Micro-Cap12 [12] є макромодель генератора ШІМ-сигналу, яка є складовою частиною ППІН перетворювача (файл DSP_SAMPLE circuit). Макромодель ШІМ-генератора має шість параметрів: *ModHigh*, *ModLow*, *ModFreq*, *ModType*, *PWMHigh* та *PWMLow*. *ModHigh* і *ModLow* визначають високий та низький рівні напруги модулюючого сигналу. Параметр *ModFreq* задає частоту модулюючого сигналу. *ModType* визначає форму модулюючого сигналу: пилкоподібний із заднім фронтом (*trailing edge sawtooth*), пилкоподібний із переднім фронтом (*leading edge sawtooth*), або трикутний сигнал (*triangle waveform*). Параметри *PWMHigh* та *PWMLow* задають значення високого та низького рівнів вихідного ШІМ-сигналу. Змінна перетворює параметр *ModFreq* в еквівалентний період (вимірюється в секундах). Внутрішній параметр *ModTrans* використовується для задання параметрів динамічного аналізу (*transition time*) для обраного типу модулюючого сигналу. Він задає *transition time* як *ModPeriod* поділений на 10000. Джерело напруги *ModRamp* генерує модулюючий сигнал (*sawtooth signal*).

Поведінковий елемент (*Behavioral element*) – вихідне джерело напруги, генерує вихідний ШІМ сигнал V_{out} . Це функціональне джерело формує сигнал відповідно до рівняння:

$$V_{out} = V_o + V_a \cdot \tanh(1 \cdot 10^5 \cdot V_{IN,Ramp}). \quad (4.1)$$

Гіперболічний тангенс у виразі приймає значення від 1 до -1. Коефіцієнт $1 \cdot 10^5$ забезпечує високий коефіцієнт підсилення, який мінімізує час переходу між двома цими значеннями. Коли диференціальна напруга між вузлами *In* та *Ramp* $V_{IN,Ramp}$ є позитивною, функція *tanh* повертає 1. Коли диференціальна напруга є негативною, функція *tanh* повертає -1. Змінні V_o і V_a встановлюються за двома наступними командними операторами (синтаксис мови *Spice*):

```
.define Va (PWMHigh-PWMLow)/2;
.define Vo (PWMHigh+PWMLow)/2.
```

Ці дві змінні визначають рівні вихідної напруги імпульсного сигналу (високе та низьке значення *PWMHigh* та *PWMLow* відповідно).

Ця модель досить проста, заснована на елементі поведінки, але розрахунок гіперболічного тангенсу може викликати проблеми збіжності обчислювального алгоритму.

Ще одна економічна універсальна модель ШІМ контролера показана на рисунку 4.11 [38, 39]. Ця модель схожа на модель, описану вище, але заснована на більш простому алгоритмі для визначення вихідного сигналу і має втричі менший набір входних параметрів. Назва входного вузла для опорного сигналу – IN. У цій схемі генератор V1 імітує змінний входний / опорний сигнал. OUT – вихідний вузол для сигналу ШІМ. Сигнал модуляції генерується генератором пилоподібного сигналу у межах макросу (передній фронт) багатоцільовим джерелом напруги V2.

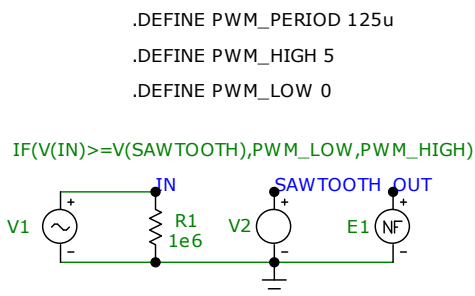


Рисунок 4.11 – Економічна модель ШІМ-контролера

Макрос має три внутрішні (локальні) параметри: *PWM_High* та *PWM_Low*, які визначають значення високої та низької напруги вихідного ШІМ сигналу та *PWM_Period*, що встановлює період Sawtooth сигналу. У цьому прикладі частота модулюючого сигналу становить 8 кГц. Резистор R1 (опір 1 МОм) забезпечує шлях постійного струму до землі від входного вузла.

Поведінка вихідного сигналу запрограмована функціональним джерелом E1. Воно емулює функцію компаратора та генерує вихідний імпульс. Відбувається порівняння входних і модулюючого сигналів:

якщо значення вхідного / опорного сигналу більше за поточне значення пилоподібного сигналу, то значення вихідного напруги приймається низьким; та навпаки, якщо вхідний сигнал менший за пилоподібний сигнал, на виході приймається високе значення напруги.

Цей алгоритм прописаний в умовному операторі:

```
IF V(IN) ≥ V(SAWTOOTH)
THEN PWM_Low
ELSE PWM_High
```

Значення PWM_High та PWM_Low рівнів вихідної напруги наводяться у відповідних операторах «define». Ці командні оператори використовуються для створення та визначення значень символьних змінних. У мові *Spice* умовний оператор має конструкцію IF (b, z1, z2): якщо b є істиною, функція повертає z1, інакше вона повертає z2).

Результат моделювання відповідних сигналів модуляції наведено нижче на рис. 4.12. На верхньому графіку відображається пилоподібний сигнал та змінний вхідний сигнал. Нижній графік показує згенерований ШІМ-сигнал.

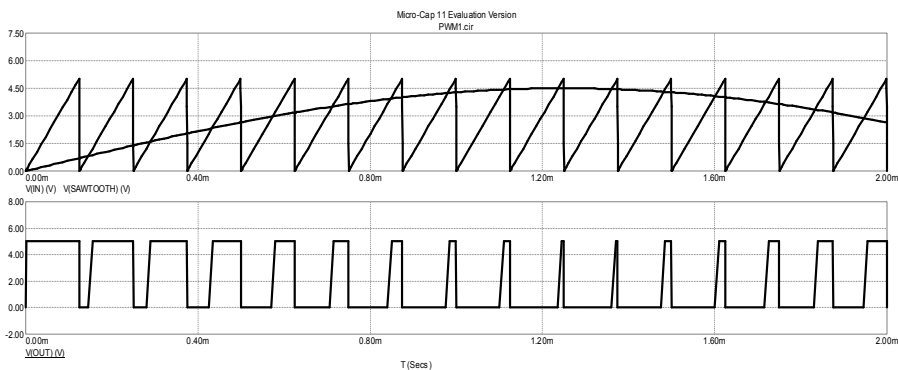


Рисунок 4.12 – Моделювання блока ШІМ в Micro-Cap12

Ще одна модель являє собою спрощену версію, в якій компенсуючий сигнал виробляється як постійний безперервний сигнал з варіацією його амплітуди (сигнал ступінчастої форми). Це припущення прийнятне за умови, якщо вихідний сигнал ефективно згладжує фільтр. Оскільки сигнал ШІМ регулює середнє значення напруги

шляхом зміни коефіцієнта заповнення/шпаруватості (*duty cycle (D.C.)*), можна безпосередньо використовувати варіацію середнього / середнього значення під час симуляції подібних систем із ШІМ-регульованим і згладженим вихідним сигналом.

Якщо *D.C.* змінюється лінійно, ми можемо представити зв'язок параметрів сигналу із усередненим значенням напруги V_{AVG} :

$$V_{AVG} = V_m \cdot D.C. = V_m \cdot \frac{\tau}{T},$$

де V_{AVG} – амплітуда вихідної напруги;

T – період;

τ – тривалість імпульсу.

Ця модель являє собою пропорційний інтеграційний блок [35]. В обох моделях використовується каузальний підхід [40].

4.5 Проєктувальник регуляторів та редактор лінійних систем в 20-sim

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

Фактично, проєктувальник регуляторів (CDE) має інтерфейс і всі можливості LSE, а додатково ще опції «*Sub System*» та «*Additional Ports*» (інтерфейс - на рисунку 4.11). LSE безпосередньо дозволяє аналізувати і досліджувати розроблену САК, використовуючи вбудовану можливість відтворення діаграм Бode, Найквіста, Нікольса та відображення карти нулів-полюсів і *h*-функції (*Step Response*).

Редактор фільтрів дозволяє створювати різні типи фільтрів (Бесселя, 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.

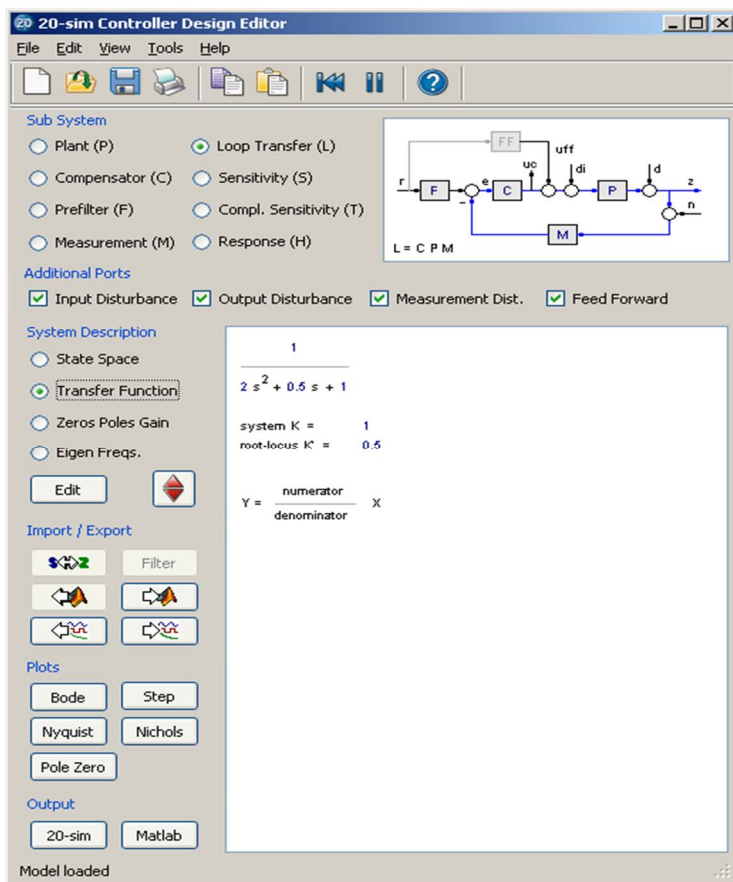


Рисунок 4.11 – Головне вікно CDE

Рисунки 4.12, 4.13, 4.14 показують опції редактора фільтрів для деяких типів регуляторів або фільтрів. Наприклад, для опису універ-

сального 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;
- коефіцієнти демпфування d_z та d_p .

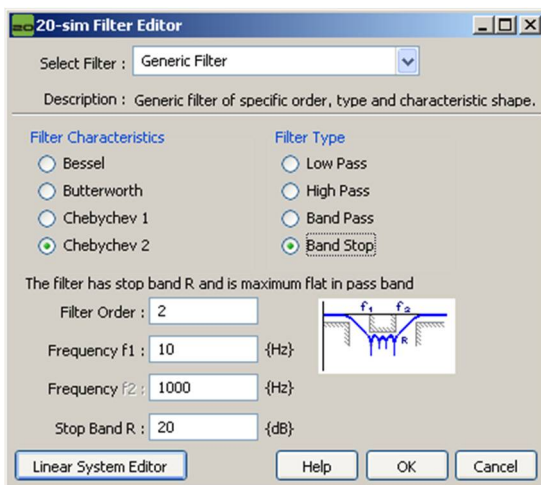


Рисунок 4.12 – Параметри фільтрів загального шаблону

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 вікна можна перейти до редактора лінійних систем LSE, для параметричного синтезу регулятора.

ПД-компенсатор (рис. 4.14) 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. 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» (*tameness*) або крутизни (нахилу) β , що впливає на поведінку диференціювання, тобто на кру-

тизну АЧХ в зоні $1/\tau_d \dots 1/\beta\tau_d$. Виходячи з передавальної функції ПД-компенсатора, знайденої в [4], можна сказати, що використовується послідовне з'єднання внутрішніх елементів (П-, І-, Д- частин та фільтра).

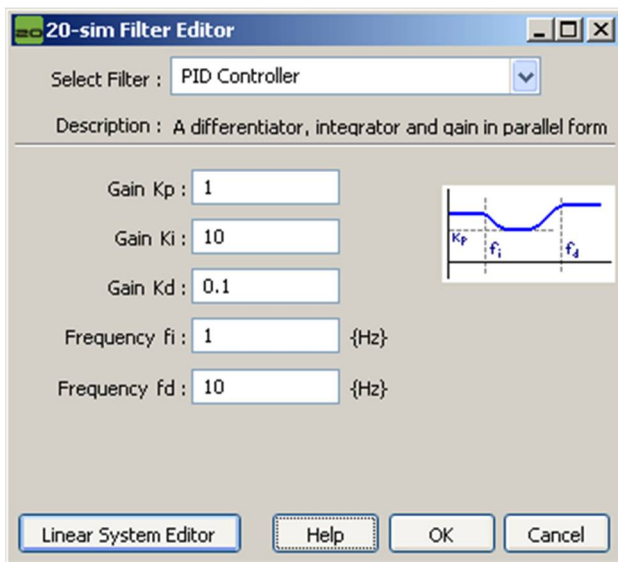


Рисунок 4.13 – Опис паралельного ПД-регулятора

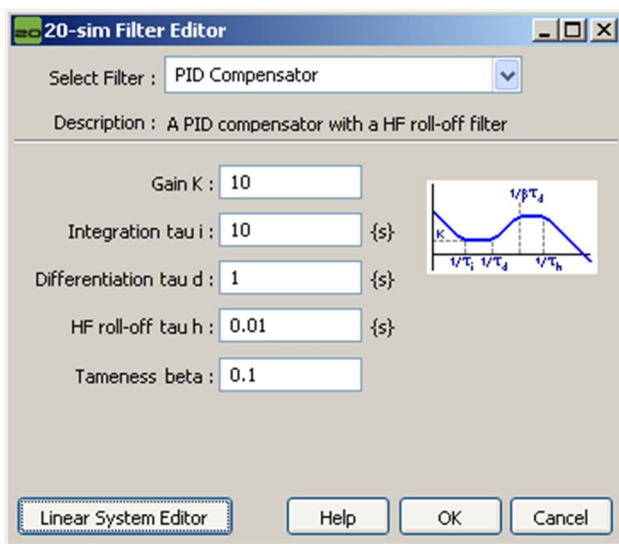


Рисунок 4.14 – Опис ПІД-компенсатора у редакторі фільтрів

Редактор фільтрів пропонує для синтезу декілька типів ПІД-регуляторів з різним набором входних 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* представлена на рисунку 4.15.

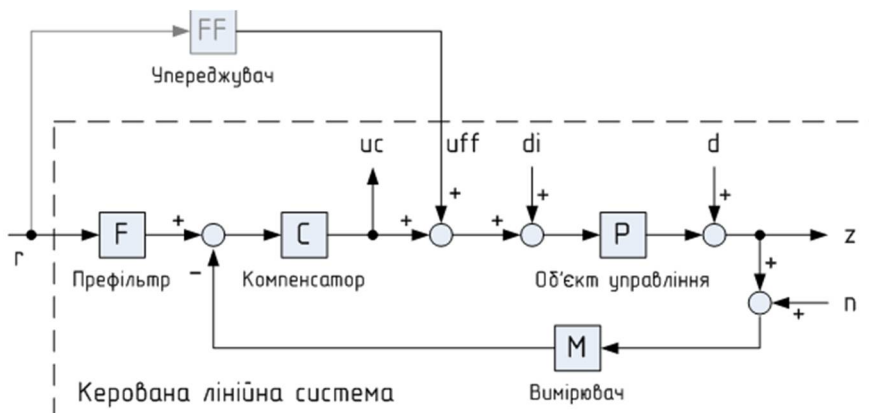


Рисунок 4.15 – Структура САК, що використовується в CDE

Така система складається з об'єкта керування 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 керування (*input disturbance*), d – вихідне збурення об'єкта керування (*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 (*Complex 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 керування корисно було б побачити, як затримки цих контурів неминуче впливають на поведінку моделі. Тому в LSE (та CDE) до моделі можна додати вихідну затримку. Практично всі САЕ, розглянуті вище (окрім, *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 4.16.

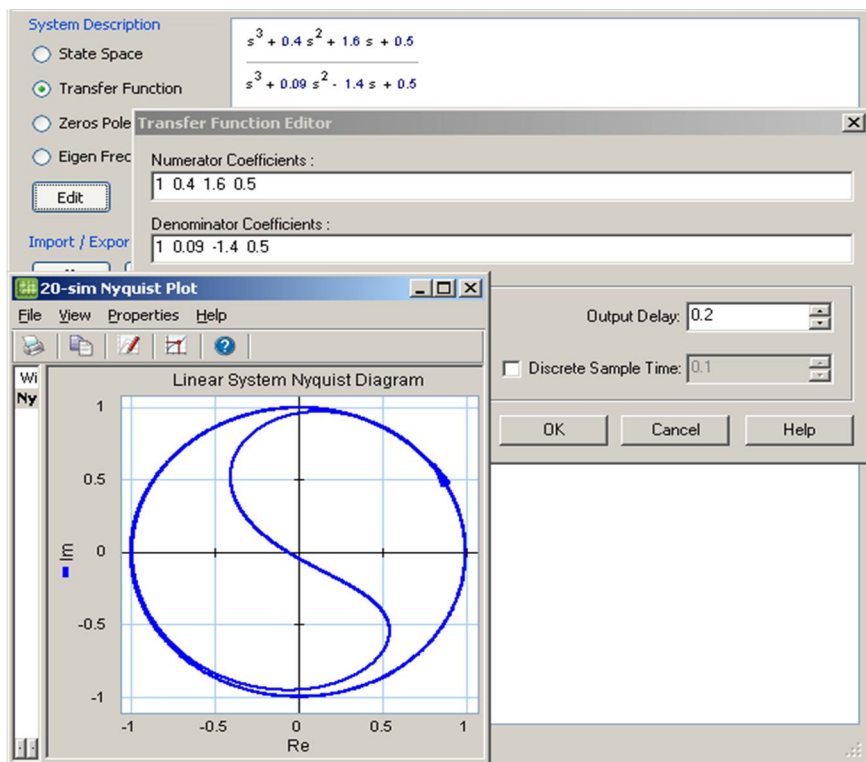


Рисунок 4.16 – ЧХ системи з вихідною затримкою (0,2с), зробленою в LSE

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).

4.6 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. Згорнутий алгоритм моделювання САК наведено в додатку Е. 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) апіорна 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. 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 в [49]).

Методика проведення оптимізації в 20-sim:

- а) вибір алгоритму оптимізації та його налаштування;
- б) вибір параметру моделі, що потребує оптимізації;
- в) встановлення критерію оптимізації;
- г) запуск оптимізації та використання постпроцесора.

Для отримання адекватного результату симуляції вибір методу інтегрування в 20-sim можна проводити згідно розробленої методики [9], яка представлена у вигляді алгоритму в Додатку Ж.

Контрольні запитання

1. Класифікація та принципи дослідження САК.
2. Макроси з бібліотеки програми Micro-Cap, які використовуються для моделінгу САК.
3. Визначити критерії, за якими макроси, які використовуються для моделінгу САК можуть бути класифіковані.
4. Проектування регуляторів.

5. Методика аналізу САК.
6. Проектування фільтрів для САК.
7. Редактор лінійних систем в 20-sim.
8. Структура САК в редакторі CDE 20-sim.
9. Як буде виглядати структура САК замкнутого типу?
10. Методика підвищення адекватності моделювання САК.

Завдання для практичного заняття/самостійної роботи

1. Класифікувати макромоделі блоків САК з бібліотеки Micro-Cap, згідно їхнього функціоналу.
2. Отримати частотні та динамічні характеристики обраного типу ІППН, визначити вихідні (вторинні) параметри.
3. Виписати модель ШІМ-контролера (PWM) на мові Spice, визначити структуру моделі, відновити її схему заміщення.
4. Дослідити моделі ІППН в програмі Micro-Cap (тип ІППН задає викладач).
5. Представити ІППН як САК, визначити його структурні елементи згідно рис.4.15.
6. Представити задану схему ІВС/САК в термінах структури САК (рис.4.15), що використовується в CDE, визначити всі змінні ІВС/САК для CDE.
7. Використовуючи програму 20-sim, синтезувати САК в CDE.
8. Використовуючи програму 20-sim, синтезувати САК в LSE.
9. Порівняти результати, зробити висновки про адекватність, точність.

ТЕМА №5

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

Перелік питань:

- Імітаційне моделювання.
- Моделювання комп'ютерних мереж.
- Основні поняття та моделювання нейронних мереж.

5.1 Критерії оптимальності систем

Моделювання систем повинне відповідати на питання: чи є прийняте рішення стосовно структури та функціонування оптимальним.

Базова задача оптимізації ставиться як завдання математичного програмування [5]:

$$\begin{aligned} & \text{ext} F(X), \\ & X \in D_x \\ & D_x = \{\psi(x), \varphi(x)\} \end{aligned} \tag{5.1}$$

де $F(X)$ – цільова функція;
 X – вектор керованих (проектних) параметрів;
 $\varphi(X)$ і $\psi(X)$ – функції обмеження;
 D_x – допустима область в просторі керованих параметрів.

Складність постановки оптимізаційних проектних завдань обумовлена наявністю у проєктованих об'єктів декількох вихідних параметрів, які можуть бути критеріями оптимальності, але в задачі (6.1) цільова функція повинна бути одна. Іншими словами, проектні завдання є багатокритеріальними, отже, виникає проблема зведення багатокритеріальної задачі до однокритерійної.

Існує кілька способів вибору критерію оптимальності.

У *приватному критерії* серед вихідних параметрів один вибирають в якості цільової функції, а умови працездатності інших вихідних параметрів відносять до обмежень задачі (5.1).

Ця постановка цілком прийнятна, якщо дійсно можна виділити один найбільш критичний вихідний параметр. Але в більшості випадків такий спосіб має серйозні недоліки.

На рисунку 5.1 представлено двовимірний простір вихідних параметрів y_1 і y_2 , для яких задані умови працездатності $y_1 < T_1$ і $y_2 < T_2$.

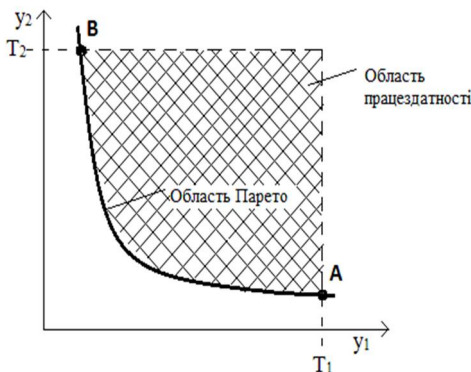


Рисунок 5.1 – Область працездатності

Крива АВ є кордоном досяжних значень вихідних параметрів.

Це обмеження об'єктивне і пов'язано з існуючими фізичними та технологічними умовами виробництва, званими умовами реалізованості. Область, в межах якої виконуються всі умови реалізованості і працездатності, називають *областю працездатності*.

Безліч точок простору вихідних параметрів, з яких неможливо переміщення, що призводить до поліпшення всіх вихідних параметрів, називають областю компромісів (*областю Парето*). Ділянка кривої АВ (рисунок 5.1) відноситься до області Парето.

Якщо в якості цільової функції вибрати параметр y_1 , то результатом оптимізації будуть параметри X , відповідні точці В, яка належить області працездатності, отже, при нестабільності внутрішніх і зовнішніх параметрів велика імовірність виходу за межі області працездатності. Якщо цільовою функцією буде обраний параметр y_2 — оптимізація приведе в точку А.

Адитивний критерій об'єднує (згортає) усі вихідні параметри (приватні критерії) в одну цільову функцію, що представляє собою зважену суму приватних критеріїв:

$$F(X) = \sum_{j=1}^m \omega_j y_j(X), \quad (5.2)$$

де ω_j — ваговий коефіцієнт;

m – число вихідних параметрів.

Функція (5.2) підлягає мінімізації, при цьому якщо умова працездатності має вигляд $y_j > T_j$, то $\omega_j < 0$.

Недоліки адитивного критерію – суб'єктивний підхід до вибору вагових коефіцієнтів і неврахування вимог ТЗ. Дійсно в (6.2) не визначені норми вихідних параметрів.

Аналогічні недоліки властиві й *мультиплікативному критерію*, цільова функція якого має вигляд (її параметри описані вище):

$$F(X) = \prod_{j=1}^m \omega_j y_j Y(X) \quad (5.3)$$

Неважко бачити, що якщо прологарифмувати (6.3), то мультиплікативний критерій перетворюється на адитивний.

Більш кращим є *максимінний критерій*, в якості цільової функції якого беруть вихідний параметр, найбільш неблагополучний з позицій виконання умов працездатності. Для оцінки ступеня виконання умови працездатності j -го вихідного параметра вводять запас працездатності цього параметра S_j і цей запас можна розглядати як нормований j -й вихідний параметр. Наприклад (передбачається, що всі вихідні параметри приведені до вигляду, при якому умови працездатності стають нерівностями у формі $y_j < T_j$):

$$S_j = (T_j - y_j) / T_j,$$

або

$$S_j = (T_j - y_{ном}) / \delta_j,$$

де $y_{ном}$ – номінальне значення;

δ_j – деяка характеристика розсіювання j -го вихідного параметра, наприклад, трьохсігмовий допуск.

Тоді цільова функція в максимінному критерії є:

$$F(X) = \min_{j \in [1:m]} Z_j(X).$$

Параметри цієї функції описані вище.

Тут запис $[1: m]$ означає безліч цілих чисел в діапазоні від 1 до m . Завдання (6.1) при максимінному критерії конкретизується:

$$F(X) = \max \min_j Z_j(X), \quad (5.4)$$

$$X \in D_x, j \in [1, m],$$

де допустима область D_x визначається тільки прямими обмеженнями на керовані параметри x_i : $x_{imin} < x_i < x_{imax}$.

Для оптимізації систем досить істотне значення має повнота і чіткість опису мети функціонування складної системи, переліку вирішуваних нею завдань. Якщо цілі та завдання системи визначені, постає питання про оцінку якості її функціонування. Якість функціонування складної системи оцінюється за допомогою показників ефективності – числових характеристик системи, які оцінюють ступінь пристосованості системи до виконання поставлених перед нею завдань.

Так як значення показника являють собою дійсні числа, тоді можна говорити про відображення безлічі процесів функціонування системи в безліч дійсних чисел, укладених усередині деякого інтервалу (у межах зміни значень показника ефективності). Таким чином, показник ефективності можна вважати функціоналом, що заданий на множині процесів функціонування системи.

У зв'язку з тим, що складні системи працюють в умовах дії випадкових факторів, значення функціоналів є випадковими величинами. Це створює відомі незручності при використанні їх в якості показників ефективності. Тому при виборі показників ефективності зазвичай користуються середніми значеннями відповідних функціоналів.

Можна визначити функціонали, які характеризують процеси роботи складних систем, що використовуються в якості показників їх ефективності. На цьому шляху можуть бути побудовані (причому різними способами) сукупності функціоналів, що характеризують та інші властивості складних систем: їх надійність, перешкодозахищеність, якість керування і т.д. Оцінка надійності проводиться за допомогою спеціально обраних функціоналів – показників надійності системи.

Для багатьох складних систем вихід деяких елементів з робочого стану не тільки не призводить до несподіваної втрати працездатності всієї системи в цілому, але іноді навіть є заздалегідь «плановою»

подією. До таких випадків відносяться поломки автомобілів в міському транспорті, пориви окремих ліній в телефонній мережі, відмови окремих каналів в багатоканальних системах масового обслуговування і т.д. Тут може йти мова не про повну втрату працездатності системи, а лише *про зниження якості її роботи*, тобто *про зміну ефективності системи*. Тоді в якості показника надійності складної системи може бути обрана абсолютна величина різниці: $\Delta\Phi_{\text{надійн}} = |\Phi^0 - \Phi^*_{\text{надійн}}|$, що вказує, наскільки знижується ефективність системи внаслідок можливих відмов її елементів в порівнянні з ефективністю ідеальної системи Φ^0 , елементи якої абсолютно надійні.

Якщо величина $\Delta\Phi_{\text{надійн}}$ мала, то відмови елементів слабо впливають на ефективність системи. У цьому випадку навряд чи доцільні якісь надзвичайні заходи підвищення надійності – отримані результати можуть не виправдати зроблених витрат. В іншому випадку, коли величину $\Delta\Phi_{\text{надійн}}$ не можна вважати малою, потрібно вжити необхідні заходи: підвищити надійність або резервування елементів, відмови яких мають найбільший вплив на ефективність, провести спеціальну профілактику і т.д.

Для розрахунку показників надійності системи, крім характеристик інтенсивності відмов елементів, необхідно також задати характеристики, що описують витрати часу на відновлення їх працездатності – ремонт або заміну. Також існують показники, що характеризують й інші властивості складних систем, наприклад, для оцінки *перешкодо-захищеності системи*.

Нехай як раніше функціонал Φ є показником ефективності складної системи, і нехай його значення $\Phi^*_{\text{перешкод}}$ відповідає функціонуванню системи в умовах дії перешкод із заданими характеристиками, а значення Φ^0 відноситься до так званих нормальних умов, коли перешкоди відсутні. Тоді в якості показника перешкодозахищеності системи можна вибрати абсолютну величину різниці: $\Delta\Phi_{\text{перешкод}} = |\Phi^0 - \Phi^*_{\text{перешкод}}|$, що показує, наскільки змінюється ефективність системи під впливом перешкод із заданими характеристиками.

Деякими особливостями відрізняється оцінка *якості керування* в складній системі. Нехай в даній складній системі керування може бути організовано керування декількома способами (відповідні варіанти позначені буквами $A, B, C, \dots$), а функціонал Φ є показником ефективності системи, а його значення Φ_A, Φ_B, Φ_C відповідають зазначеним

варіантам керування. Тоді абсолютна величина різниці може служити *порівняльною оцінкою* варіантів керування A і B . Для того, щоб виконати *абсолютну оцінку* якості керування (наприклад, для варіанта A), необхідно знати *ідеальний варіант* керування, при якому ефективність системи виявляється найбільшою.

Особливу проблему приділяють показнику стійкості складної системи. Якість функціонування системи доцільно оцінювати за допомогою наборів функціоналів, які є показниками ефективності, надійності, перешкодо-захищеності і т.д., обчислених для заданих умов функціонування. Тільки тоді система володіє необхідними властивостями, коли згадані показники знаходяться в заданих межах. Умови функціонування складної системи не залишаються постійними, вони схильні до збурень різної природи. Важливо знати, чи зберігають при наявності збурень показники якості системи свої значення, а якщо ні, то які є відхилення.

Під *стійкістю* функціонування складної системи розуміють *здатність системи зберігати необхідні властивості в умовах дії збурень*. Для того, щоб надати поняттю стійкості більш точний зміст, необхідно конкретно виділити показники, збереження значень яких необхідно досягти, встановити клас допустимих збурень і способи їх вимірювання, уточнити суть «збереження необхідних властивостей».

Для системи, *стійкої* щодо функціоналу, що характеризує деяку властивість системи, можна вказати такі обмеження, що накладаються на збурення, при яких даний функціонал буде зберігати своє значення в деякому ймовірному сенсі. У разі нестійкої системи цього зробити не можна. Більше того, може виявитися, що для обраної властивості не можна підібрати обмежень на збурення, що забезпечують збереження відповідного функціоналу.

5.2 Імітаційне моделювання систем

При дослідженні багатьох складних систем з'являється необхідність у рішенні задач, які відносяться до масового обслуговування. Вони найбільш поширені у фізиці часток, організації виробництва, плануванні, автоматичному регулюванні складними системами тощо. Особливістю таких задач є наявність обслуговуючої системи, до якої у будь-який момент часу надходять заявки. Ця система має лінії (канали), які виконують сукупність операцій (обслуговування).

Якщо з точки зору обслуговування всі заявки потоку виявляються рівноправними, тоді сенс має лише факт настання у даний момент часу події – поява заявки. Такі потоки мають назву - потоки *однорідних* подій. Іноді для розв'язання практичних задач необхідно враховувати неоднорідність потоку.

Якщо потік однорідних подій є цілком *детермінованим*, то необхідно задати послідовність t_j одним з можливих способів: перерахувати їх, вказати співвідношення, яке описує t_j як функцію індексу j , або привести рекурентні залежності (дозволяють визначити поточні значення t_j за попередніми).

Однак більш суттєве значення мають випадкові потоки однорідних подій – потоки з обмеженою післядією, якщо випадкові величини S_j є незалежними. Також великий інтерес представляють *стаціонарні* потоки, для яких імовірнісний режим не залежить від часу. Потік однорідних подій має назву стаціонарного, якщо імовірність $p_k(t, t_0)$ появи k подій за проміжок часу (t_0, t_0+t) не залежить від t_0 , а залежить тільки від t та k .

Потік однорідних подій називається *ординарним*, якщо імовірність $\psi(t_0, t)$ появи двох та більше подій за проміжок часу (t_0, t_0+1) при будь-якому t_0 є нескінченно малою величиною порівняно з t . Випадковий потік однорідних подій з обмеженою післядією може бути потоком без *післядії*, якщо відсутня імовірнісна залежність подальшого перебігу подій потоку від попереднього. Важливу роль відіграє так званий *найпростіший потік однорідних подій*. Потік називається найпростішим, якщо він є стаціонарним, ординарним і потоком без післядії [44].

Формалізуємо представлення процесів. Нехай система масового обслуговування складається з n ліній, здатних одночасно обслуговувати заявки. Лінія може знаходитися у одному з двох станів – «вільно» або «зайнято». Якщо в момент надходження заявки є вільні лінії, то заявка приймається до обслуговування, якщо всі лінії зайняті – заявка залишається в системі впродовж часу τ_n – час перебування заявки у системі, як претендента на обслуговування. Якщо за час τ_n заявка не буде прийнята на обслуговування, то вона буде втрачена.

У залежності від величини τ_n системи масового обслуговування поділяють на три відмінних класу:

– системи з відмовами. Якщо $\tau_n=0$, то заявка, яка надійшла або негайно обслуговується, або отримує відмову;

– системи з очікуванням. Коли $\tau_n \rightarrow \infty$, заявки, які надійшли до системи не отримують відмову, а очікують на обслуговування;

– системи з обмеженим очікуванням. Якщо $0 < \tau_n < \infty$, заявка застала усі лінії зайнятими, очікує протягом τ_n у черзі, а після закінчення цього часу отримує відмову.

Також для характеристики властивостей обслуговуючої системи необхідно задати τ_s – час обслуговування заявки (час зайнятості лінії).

Реальний процес функціонування системи масового обслуговування слід представляти у вигляді актів (фаз) обслуговування. У приватному випадку обслуговування може бути однофазним. Дуже розповсюдженим є обслуговування з перевагою (з пріоритетом). Для систем з відмовами найбільш часто використовується показник якості – *середня доля відмов* $R(t_0, t)$ за проміжком часу $(t_0, t_0 + I)$. Також величина R має сенс імовірності відмов для заявки.

Сутність методу *імітаційного моделювання* стосовно завдань масового обслуговування (СМО) полягає в наступному. Будуються алгоритми, за допомогою яких можна виробляти випадкові реалізації заданих потоків однорідних подій, а також моделювати процеси функціонування обслуговуючих систем. Ці алгоритми використовуються для багаторазового відтворення реалізації випадкового процесу обслуговування при фіксованих умовах завдання. Отримана при цьому інформація про стан процесу піддається статистичній обробці для оцінки величин, що є показниками якості обслуговування.

Цей метод дозволяє досліджувати залежність якості обслуговування від характеристик потоку заявок і параметрів обслуговуючої системи та вивчати перехідні режими.

5.3 Способи моделінгу систем

Математичні моделі детерміністичних об'єктів (при описанні яких вплив випадкових факторів не враховуються), що функціонують у дискретному часі, відносяться до різних типів кінцевих автоматів. Кінцевий автомат характеризується *кінцевими множинами станів* z , *вхідними сигналами* x і *вихідними сигналами* y . Автомат можна задати *таблицями переходів* та *виходів*, або *графом*.

Стохастичні об'єкти (при описанні яких враховуються випадкові фактори), що функціонують у дискретному часі, можна представля-

ти ймовірнісними автоматами. Функція переходів ймовірнісного автомата визначає *розподіл ймовірностей* на множині станів (автомат з випадковими переходами), а функція виходів – *розподіл ймовірностей* на множині вихідних сигналів (автомат з випадковими виходами). Функціонування ймовірнісних автоматів вивчається за допомогою апарату ланцюгів Маркова. Математичними моделями стохастичних об'єктів з безперервним часом служать *системи масового обслуговування* або предстванники *Марківських випадкових процесів*.

Загальні властивості *динамічних систем*:

- елемент складної системи функціонує в часі (в кожен момент часу t він знаходиться в одному з можливих станів z);
- протягом часу елемент переходить з одного стану в інший під дією внутрішніх і зовнішніх причин;
- у процесі функціонування елемент взаємодіє з іншими елементами складної системи і об'єктами зовнішнього середовища (отримує вхідні сигнали x і вихідні сигнали y).

Вплив, представлений набором своїх характеристик, зазвичай називають *сигналом*. Таким чином, взаємодія елементів складної системи, вивчається в рамках *механізму обміну сигналами*. Сигнали передаються *каналами зв'язку*, прокладеним між елементами складної системи. Канал, що передає сигнали *миттєво і без спотворень*, називається *ідеальним*. Повністю і правильно формалізована складна система має тільки ідеальні канали зв'язку. Фізичні канали зв'язку не є ідеальними. Тому їх необхідно розглядати як *самостійні елементи системи*, функціонування яких зводиться до відповідних затримок і спотворень сигналів.

При побудові математичної моделі складної системи необхідно враховувати її взаємозв'язок із зовнішнім середовищем.

Взаємозв'язок елементів всередині складної системи з об'єктами зовнішнього середовища включає набори наступних складових:

- процес формування вихідного сигналу елементом, який видає сигнал;
- визначення адреси передачі для кожної характеристики вихідного сигналу;
- проходження сигналів каналами зв'язку і компоновка вхідних сигналів для елементів, які приймають сигнали;
- реакція елемента, який приймає сигнал, на вхідний сигнал.

Методика опису зв'язків між елементами складної системи за допомогою операторів сполучення поширюється на ті випадки, коли в процесі функціонування системи змінюється в часі структура зв'язків, або підпорядковується зовнішнім командам керування. Для урахування згаданих факторів треба розглядати оператори сполучення виду

$$Y_i^k = R\left(X_i^j, t, \alpha\right),$$

де t – час;
 α – параметр (сигнал) керування;
 X – вектор вхідних сигналів;
 k – оператор зв'язку.

Складні системи, що складаються із багатьох підсистем різної фізичної природи, кожен з яких можна вважати системою, називають *агрегативні системи* (АС).

З точки зору моделювання агрегат виступає як досить універсальний переробник інформації – він сприймає вхідні та управляючі сигнали та видає вихідні сигнали. (див. рисунок 5.2).

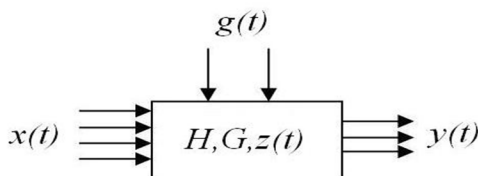


Рисунок 5.2 – Модель агрегативної системи

У кожний момент часу агрегат знаходиться в одному з можливих станів. Стан агрегату є елементом деякої множини Z . Якщо стан $z = (z_1, z_2, z_i)$ виявляється дійсним вектором, Z_i зазвичай називають фазовою координатою. Коли аргумент t проходить свої значення в інтервалі $(0, T)$, стан z змінюється як функція часу $z(t)$. Функції $z(t)$ називають фазовими траєкторіями.

Агрегат має особливі вхідні контакти, до яких надходять в моменти часу τ_i керуючі сигнали. Управляючий сигнал g є елементом множини G . На виході агрегату утворюються вихідні сигнали. Вихідний сигнал y є елементом деякої множини Y і визначається за станом

агрегату $z(t)$ з допомогою оператора G . За кінцевий інтервал часу в агрегат надходить кінцеве число вхідних і управляючих сигналів, а також агрегат видає кінцеве число вихідних сигналів. Оператор H зазвичай називають оператором переходів (до нового стану), а оператор G – оператором виходів.

Ціллю моделювання агрегативних систем є отримання характеристик, які визначаються за допомогою станів системи, яка моделюється. Принцип побудови моделюючого алгоритму, що дозволяє визначати послідовні стани складної системи через деякі інтервали часу, називають «принципом Δt ». Він є універсальним. Мови та програми моделювання є проблемно-орієнтованими, тобто вони відображають деяку сукупність понять, характерних для даного класу задач. В будь-якій мові моделювання існує апарати опису статичної та динамічної структури системи, та відповідний набір для розв'язання рівнянь.

Контрольні запитання

1. Критерії оптимальності систем.
2. Принципи імітаційного моделювання (виділити особливості, порівняно із моделюванням на схемотехнічному рівні).
3. Алгоритми та програми імітаційного моделювання. Метод Монте-Карло в програмі Micro-Cap.
4. Системи масового обслуговування (СМО), приклади.
5. Основні елементи моделей СМО.
6. Закони математичної статистики для моделювання інформаційних систем.

Завдання для практичного заняття/самостійної роботи

1. В заданій схемі інформаційно-вимірювальної системи визначити інформаційну підсистему. Розкласти її на *SoftWare* та *Hardware*. Підібрати типи протоколів, способи зв'язку між підсистемами.
2. Сформувати концептуальну (словесну) модель об'єкта моделювання для системи Net Cracker.
3. Обрати математичний базис для опису моделі на етапі моделінгу Net Cracker (види пакетів, типи розподілів).
4. Провести моделювання в Net Cracker.
5. Отримати модель штучного нейрона в програмі 20-sim.

ПИТАННЯ ДО ЗАЛІКУ

1. Мета та завдання моделювання.
2. Рівні проєктування і моделювання електронних пристроїв.
3. Особливості математичного забезпечення рівнів проєктування і моделювання, програмне забезпечення.
4. Розвиток методів моделювання систем, їх місце у автоматизованому проєктуванні.
5. Математичний базис на різних рівнях проєктування .
6. Критерії якості моделей.
7. Ланка САЕ-CAD-CAM.
8. Програми функціонального та системного проєктування .
9. Каузальне моделювання. Програми, підходи.
10. Акаузальне моделювання. Програми, підходи.
11. Порівняння програм класу САЕ.
12. Поняття динамічної, мехатронної системи.
13. Розвиток методів та алгоритмів моделювання.
14. Класифікація пристроїв автоматики, їхні макромоделі.
15. Принципи моделювання систем на структурному рівні засобами CAD.
16. Види та методика аналізу в програмах CAD.
17. Математичне забезпечення ECAD.
18. Наскрізне проєктування.
19. Алгоритми аналізу.
20. Структура типової програми класу САЕ.
21. Підпрограми синтезу регуляторів засобами САЕ.
22. Роль САЕ програм в системах віртуального виробництва.
23. Інструментальні засоби програм віртуального виробництва.
24. Моделювання систем інформаційної електроніки.
25. Порівняння моделювання аналогових та цифрових систем.
26. Порівняння моделювання: каузального та акаузального.
27. Порівняння підходів моделювання на макрорівні.
28. Моделювання сенсорів.
29. Проблеми моделювання систем керування із мікроконтролерами / мікропроцесорами.
30. Принципи імітаційного моделювання систем масового обслуговування.

ЗМІСТ ТА ОБСЯГ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ

1. У **вступі** актуалізується задача налізу електронної системи, вказуються шляхи та етапи досягнення цілей дослідження.

2. **Теоретична частина** контрольної роботи містить основні відомості та методики моделювання електронних систем, САК та САР на функціональному та системному рівнях, особливості моделей та макромоделей на даних рівнях. В даному розділі роботи необхідно проаналізувати об'єкт, визначити мету дослідження та розробити концептуальну модель, прийняти рішення стосовно способу моделювання (каузальне, або акаузальне) та обрати згідно певних критеріїв програмне забезпечення для віртуального експерименту.

3. В **розрахунковій частині** подаються схеми, рівняння або інші способи представлення моделей, які обираються для моделювання інформаційно-вимірювальних систем. Приймається рішення стосовно інструментального набору для адаптації розробленої моделі до умов обраного програмного середовища. Розділ має містити результати модельного експерименту – характеристики, таблиці, або інші форми представлення інформації, на основі яких приймається рішення про ефективність моделі за обраними критеріями якості (точність, універсальність, економічність, ергономічність) та про необхідність параметричної та структурної оптимізації моделі. Моделлю може бути схема заміщення, система рівнянь, граф, алгоритм, таблиця істинності/переходів, концептуальний опис.

4. **Висновки** складаються за результатами експериментів, причому необхідно проаналізувати кількісно точність, якісно - економічність обраних моделей та їхню універсальність, показати межі адекватності моделі, напрямки її вдосконалення та перспективи використання.

5. **Список посилань** (мінімум 10 джерел) складається в порядку появи посилань за текстом згідно правил.

Всі прийняті рішення в контрольній роботі повинні бути обгрунтованими. Контрольна робота має бути захищена впродовж семестру. Робота повинна бути оформлена згідно норм і правил ДСТУ3008:2015. Обсяг роботи – 20 аркушів А4 (мінімум).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Laboratories, Sandia & James, Dr & Campbell, E & Anderson, Dennis & Lawton, Craig & Shirah, Donald & Dennis, Dr & Longsine, E. (2005). System of systems modeling and simulation. URL: https://www.researchgate.net/publication/228857911_System_of_systems_modeling_and_simulation

2. Обод І. І., Заволодько Г. Е., Свид І. В. Математичне моделювання систем: навчальний посібник. – Харків: Друкарня МАДРИД, 2019. 268 с.

3. Василенко, О.В. Навчальний посібник з дисципліни «Комп'ютерне моделювання» для студентів спеціальності 152. НУ «Запорізька політехніка, 2020. 175 с.

4. 20-sim 4.3 ReferenceManual / Ir.C. Kleijn, Ir.M.A. Groothuis, Ir.H.G. Differ // ControllabProducts B.V.– 1099 p. URL: <https://books.google.al/books?id=zoLnXeaS5iMC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

5. Системи автоматизованого проектування: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерноінтегровані системи та технології в приладобудуванні» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; автори: К.С. Барандич, О.О. Подолян, М.М. Гладський. – Електронні текстові дані (1 файл 3,05 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 97 с.

6. Dynamic System Model. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/dynamic-system-model>

7. What Is the Difference Between CAD, CAE and CAM? URL: <https://online.egr.msu.edu/articles/cad-vs-cae-vs-cam-what-is-the-difference/>

8. What is System Dynamics? URL: https://systemdynamics.org/what-is-system-dynamics/?gad_source=1&gad_campaignid=22532377806&gbraid=0AAA AACVfjiQhzzLvG4SurIOTiXi8l395E&gclid=CjwKCAjwqubPBhBOEiw AzgZX2kZLMxw1JI1UcjLCbr0LCFCAL-z4kjgvXYSgouafuUD2DoQHnK0mLhoCcJ8QAvD_BwE

9. Shmatko, O., Herasymov, S., Milevskyi, S., Balitskyi, N., Pohasii, S., Aleksieiev, M., Vlasov, I., Melenti, Y., Kovalenko, Y., &

- Peleshok, Y. (2025). Development of a method for assessing the efficiency of technical systems' computer dynamic simulators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (134), 50–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.327558> URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/327558>
10. Simulink. URL: <https://uk.mathworks.com/products/simulink.html>
11. Василенко О.В. Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Комп'ютерне моделювання». Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 72 с.
12. Micro-Cap 12, Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual, Spectrum Software URL: <https://gotroot.ca/spectrum/www.spectrum-soft.com/index-2.html>
13. Simulation Tools. URL: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
14. The HDL Handbook. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/edited-volume/9780123821713/the-hdl-handbook>
15. VHDL як алгоритмічна мова для опису паралельних алгоритмів. URL: <https://kanyevsky.kpi.ua>
16. SimApp, Ordering Information. URL: <http://www.simapp.com/order-simapp.php>
17. Differential Algebraic System Solver. URL: <http://acronyms.thefreedictionary.com/DASSL>
18. CVODES. URL: <https://computing.llnl.gov/projects/sundials/cvodes>
19. MapleSim by Maplesoft. Advanced System Level Modeling and Simulation URL: <https://altair.com/maplesim>
20. Simscape. Model and simulate multidomain physical systems. URL: <http://www.mathworks.com/products/simscape/index.html>
21. MathWorksStore. URL: <http://www.mathworks.com/store/product>
22. MathWorks. URL: <https://uk.mathworks.com/>
23. MathWorks Documentation Center, SolverPane. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/gui/solver-pane.html>
24. VisSim/Altair Embed. URL: <https://altair.com/embed/>

25. Floudas, C. A., Pardalos, P. M., (Eds.) Encyclopedia of Optimization, (2nd ed. 2009); Springer-Verlag NewYork, LLC, 2009. 4626p.: 613 illus.

26. VisSim/Altair Embed trial. URL: <https://altairone.com/Marketplace?app=Embed>

27. The Resource Library is your hub for Altair content. URL: <https://altair.com/resourcelibrary/?category=Webinars&product=Altair%20Embed&lang=English>

28. Altair Embed® Applications. URL: <https://altair.com/embed-applications>

29. Dymola Dynamic Modeling Laboratory. User's Manual. URL: <https://people.inf.ethz.ch/cellier/Lect/MMPS/Refs/Dymola5Manual.pdf>

30. Versions of 20-sim. URL: <http://www.20sim.com/home/versions.html>

31. Василенко О.В. Аналіз програм для моделювання мехатронних систем. *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*, 2015. №2. С.16-31.

32. Трет'як А.В. Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А.В. Трет'як, А.М. Кльон. – Полтава, видавництво національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. 135 с.

33. Build a Robot Step by Step. URL: <https://uk.mathworks.com/help/robotics/ug/build-a-robot-step-by-step.html>

34. Василенко О.В. Modeling of multidomain automatic control Systems in ECAD. *Вісник Академії митної служби України. Серія: Технічні науки*, 2015. №1. С.13-19.

35. Приймак, Б. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. Навчальний посібник. К. : КПІ, 2023. – 310 с.

36. PowerEsim Switch Mode Power Supply Design Tool. URL: <https://www.infineon.com/design-resources/simulation-modeling/poweresim-switch-mode-power-supply-simulation-tool>

37. Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник / Співак. В.М., Гуржий А.М., Нельга А.Т., Ітякін О.С.– Київ: КПІ, 2020. 266 с.

38. Vasylenko O.V. PWM controller's models for investigation ACS in SPICE-family ECAD programs [Text] / O.V. Vasylenko, G.V. Snizhnoi // *Електротехніка та електроенергетика*, 2018. № 1. С.64-71.
39. Vasylenko O. Simulation of ACS for Magnetic Susceptibility Measurements in ECAD Based on Time Domain Functions / O. Vasylenko, V. Reva, G. Snizhnoi [Electronic resource] // *Proceeding soft the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, Zaporizhzhia, Ukraine, April 15–19, 2019 (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2353, P. 689–701). URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper55.pdf>
40. Simulink for System Modeling and Simulation. URL: <https://uk.mathworks.com/solutions/system-modeling-simulation.html>
41. Інтервальний аналіз. URL: https://nmetau.edu.ua/file/07_7.6_lbr_gr_rbr_.pdf
42. Переверзєв А.В., Василенко О.В. Моделювання в електроніці. Учбовий посібник для студентів напряму «Електроніка». – Запоріжжя: ЗДІА, 2003. – 160 с.
43. Cellier F.E., Kofman E. Continuous system simulation, Springer Verlag, New York, 2006. 643 p.
44. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування: навч. посібник / А. Л. Литвинов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.
45. Netcracker. URL: www.netcracker.com
46. Гайтан О.М. Порівняльна характеристика програмних середовищ моделювання систем масового обслуговування. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/mist/uk/article/view/483>
47. Штучні нейронні мережі. URL: <https://itmaster.biz.ua/programming/vision/neural-networks.html>
48. І.В.Шелевицький, М.О.Шутко, В.М.Шутко, О.О. Колганова. Сплайни в цифровій обробці даних і сигналів, 2007. 232с., іл. ISBN 078-966-2915-86-0
49. Василенко, О.В. Вибір методу оптимізації систем автоматичного керування в системах автоматизованого інжинірингу / О.В. Василенко, Я.І. Петренко // *Енергетика і автоматика*, 2017. №1. С.75-89.
50. What is PID? Learn how PID controls work in real industrial control systems. URL:

<https://www.valmet.com/automation/services/process-performance/pid-tuning-process-control/pid-tuning-tutorial/>

51. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. URL:

https://skoge.folk.ntnu.no/puublications_others/1942_ziegler-nichols.pdf

52. GLOPT – A Program for Constrained Global Optimization. URL: https://www.mat.univie.ac.at/~herman/papers/glopt_k.pdf

53. Pantelides C. The Consistent Initialization of Differential-Algebraic Systems. SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing. URL: <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/0909014>

54. The Index of General Nonlinear DAEs. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s002110050165> 72:173-196, 1995.

55. Petrenko Y.I. Research of algorithms and development of modeling and simulation technique of automatic control systems in 20-sim/ Матеріали XVII НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА, 2013. С. 48-49.

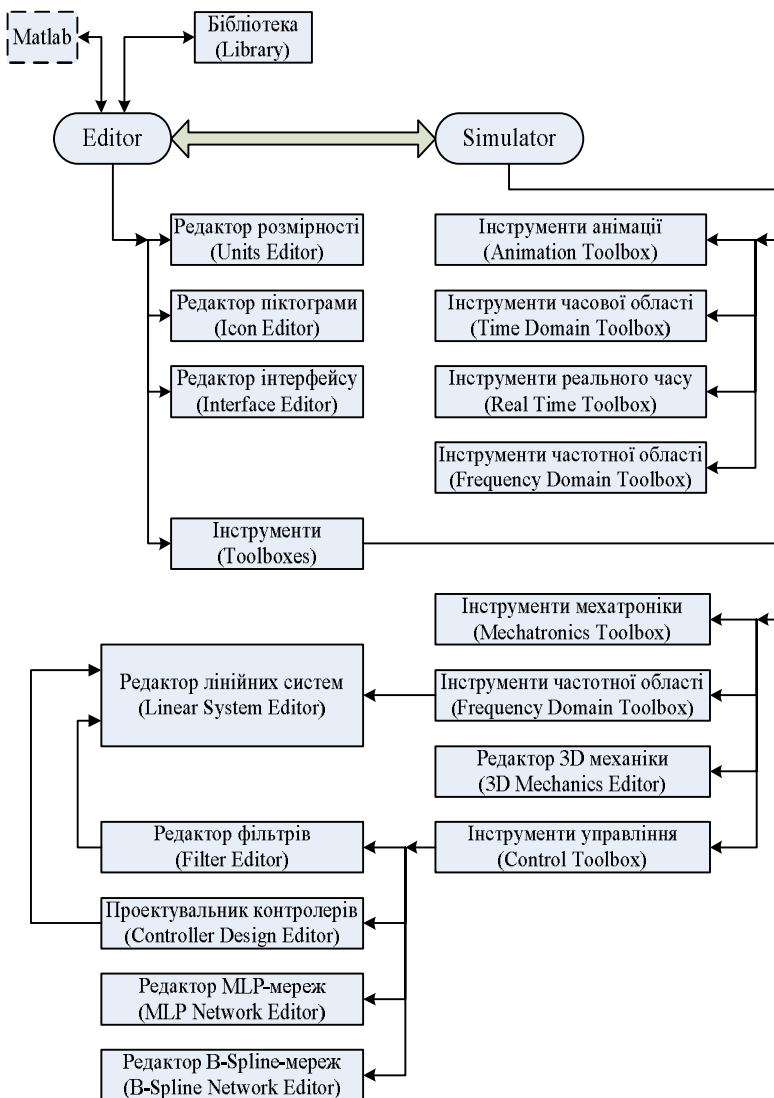
56. Василенко, О.В. Модель крокового двигуна для дослідження систем автоматичного позиціонування в ECAD / О.В. Василенко, Є.Л. Жавжаров // *Електротехніка та електроенергетика*, 2017. №1. С.31-38.

57. Bond Graphs in Dynamic System Modeling. URL: <https://www.scribd.com/document/505453781/Bond-Graph-Modelling-introduction-full-version-2014>

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

ДОДАТОК А

Структура САЕ



ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 - Порівняння можливостей САПР

Особливості	Інструменти										
	ACSLx	O-Matrix	MATLAB	Simscape	20-sim	AMESim	Dymola	MapleSim	SimulationX	EASY5	MathModelica
Моделювання											
процедурне	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
на основі рівнянь	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+
каузальне	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
акаузальне	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Мова програмування											
власна	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-
Modelica	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+
Бібліотеки											
блок-схеми (Control/Signal)	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
електричні	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
термічні	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
гідравлічні	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
механічні (1D)	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+
механічні (3D), Multi-body	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
автомобільних систем	+	-	+	+	-	+	+	+	+	-	+

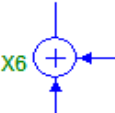
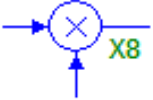
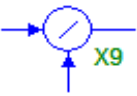
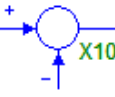
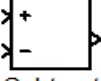
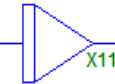
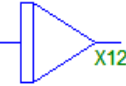
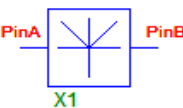
Продовження таблиці Б.1

Особливості	Інструменти										
	ACSLx	O-Matrix	MATLAB	Simscape	20-sim	AMESim	Dymola	MapleSim	SimulationX	EASY5	MathModelica
Взаємодія											
експортування коду	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
імпорт з Simulink	-	-			-	+	-	+	+	+	-
експорт до Simulink	+	-			+	+	+	+	+	+	-
Simulink co-simulation	-	-			+	+	-	-	+	+	-
експорт до ADAMS	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
Microsoft.NET	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Можливості програмування											
обмежені							•				
середні					•	•			•	•	
широкі	•	•	•	•		•		•			•
попередня обробка	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+
підтримка після обробки	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Інтерактивні веб-публікації											
	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-

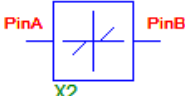
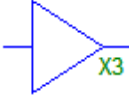
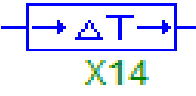
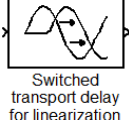
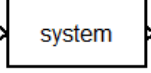
ДОДАТОК В

Умовні зображення блоків для моделювання САК в MICRO-CAP та MatLab

Таблиця В.1 - Умовні зображення блоків для моделювання

N	Назви в програмах	MC12	SIMULINK
1	Суматор <i>Sum-Sum</i>		
2	3-ходовий суматор <i>Sum3-Sumofelement</i>		
3	Мультиплікатор <i>Mul-Product</i>		
4	Дільник <i>Div-Divide</i>		
5	Субтрактор <i>Sub-Subtract</i>		
6	Інтегратор <i>Int-Integrator</i>		
7	Диференціатор <i>Dif-Derivative</i>		
8	Абсолютне значення <i>ABS- ABS</i>		

Продовження таблиці В.1

N	Назви в програмах	MC12	SIMULINK
9	Зона нечутливості <i>Slip-Dead zone</i>		
10	Амплітудний обмежувач <i>Clip-Saturation</i>		
11	Лінійний Підсилювач <i>Amp-Gain</i>		
12	Генератор шуму <i>Noise-UniformRandomNumber</i>		
13	Затримка сигналу <i>Delay-Transportdelay</i>		
14	Передаточна функція <i>F-S Function</i>		

ДОДАТОК Г

Згорнутий алгоритм моделювання САК

