

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних занять з дисципліни
“Системи автоматичного керування”
для студентів спеціальності
152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
денної і заочної форм навчання

2020

Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни “Системи автоматичного керування” для студентів для спеціальності 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» денної і заочної форм навчання / Укл.: О.В. Василенко.– Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 96 с.

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

Рецензент: Г.В. Сніжної, доц., канд. фіз.-мат. наук

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

Затверджено
на засіданні кафедри
“Мікро-та наноелектроніка”
Протокол №8
від “ 26 ” лютого 2020 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол №7
від “ 27 ” лютого 2020 р.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 5 |
| 1 Лабораторна робота № 1. Системи автоматичного керування як динамічні, мехатронні системи..... | 6 |
| 1.1 Системи автоматичного управління..... | 7 |
| 1.1.1 Структура та класифікація САК..... | 8 |
| 1.1.2 Математичний опис САК..... | 10 |
| 1.1.3 Поняття і задачі синтезу та аналізу САК..... | 12 |
| 1.2 Мехатронні системи..... | 16 |
| 1.2.1 Склад мехатронної системи..... | 17 |
| 1.2.2 Приводи мехатронних систем..... | 19 |
| 1.3 Етапи виконання лабораторної роботи..... | 20 |
| 1.4 Контрольні питання..... | 20 |
| 2 Лабораторна робота № 2. Основи моделювання САК..... | 21 |
| 2.1 Математичний базис моделювання САК..... | 23 |
| 2.2 Характеристики математичної моделі..... | 24 |
| 2.3 Вибір класу САПР для проектування САК..... | 25 |
| 2.4 Підходи до моделювання САК..... | 26 |
| 2.5 Макромоделі типових ланок САК..... | 29 |
| 2.6 Приклад побудови САР в ЕСAD..... | 32 |
| 2.7 Етапи виконання лабораторної роботи..... | 35 |
| 2.8 Контрольні питання..... | 35 |
| 3 Лабораторна робота № 3. Сучасні програми математичного моделювання САК..... | 36 |
| 3.1 Критерії вибору та огляд САЕ -систем..... | 36 |
| 3.2 SamSim..... | 38 |
| 3.3 ANSYS Simplorer (VHDL)..... | 40 |
| 3.4 SimApp..... | 41 |
| 3.5 Wolfram SystemModeler (MathModelica)..... | 43 |
| 3.6 MapleSim..... | 45 |
| 3.7 MATLAB / Simulink та Simscape..... | 48 |
| 3.8 VisSim..... | 51 |
| 3.9 Dymola (Modelica)..... | 54 |
| 3.10 20-sim..... | 55 |
| 3.11 Етапи виконання лабораторної роботи..... | 58 |
| 3.12 Контрольні питання..... | 58 |
| 4 Лабораторна робота № 4. Автоматизований синтез САК..... | |

| | |
|--|----|
| Синтез PID-регулятора. Синтез та аналіз лінійної САК..... | 59 |
| 4.1 Проектувальник регуляторів та редактор лінійних систем в 20-sim..... | 59 |
| 4.2 Методика моделювання САК в 20-sim..... | 65 |
| 4.3 Етапи виконання лабораторної роботи..... | 67 |
| 4.4 Контрольні питання..... | 67 |
| 5 Лабораторна робота №5. САК 3D принтера..... | 68 |
| 5.1 Кроковий двигун – поширений актуатор в роботехнічних системах..... | 68 |
| 5.2 Електричний привод..... | 69 |
| 5.3 Конструкція 3D принтеру..... | 72 |
| 5.4 Графічний код та програмне забезпечення..... | 73 |
| 5.5 Етапи виконання лабораторної роботи..... | 76 |
| 5.6 Контрольні питання..... | 80 |
| 6 Лабораторна робота № 6 Проектування САК Smart House | 81 |
| 6.1 Smart House як багатоконтурна САК..... | 81 |
| 6.2 Етапи проектування контуру системи обмеження доступу..... | 82 |
| 6.2.1 Синтез контуру обмеження доступу за технологією RFID..... | 83 |
| 6.2.2 Моделювання в Arduino IDE..... | 85 |
| 6.3 Етапи виконання лабораторної роботи | 86 |
| 6.4 Контрольні питання..... | 86 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 87 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... | 89 |
| ДОДАТОК А. Завдання для самостійної роботи..... | 90 |
| ДОДАТОК Б. Загальна структура 20-SIM | 91 |
| ДОДАТОК В. Форми представлення моделей САК..... | 92 |
| ДОДАТОК Г. Питання до модульного контролю..... | 95 |

ВСТУП

Дані методичні вказівки містять короткі теоретичні відомості, що дозволяють виконати лабораторні роботи, містять питання для самостійної роботи та модульного контролю студентів денного та заочного відділення зі спеціальності для студентів спеціальності 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

Основним завданням дисципліни є освоєння принципів проектування оптимальної системи автоматичного керування, в тому числі для інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен отримати загальні компетентності: здатність спілкуватися державною мовою, здатність до комплексного розв'язання складних задач розробки та використання засобів вимірювальної техніки, використання інформаційних технологій для опрацювання результатів вимірювання та автоматизації метрологічної діяльності при виконанні організаційних та технічних робіт, прикладних досліджень у сфері метрології та метрологічної діяльності.

Спеціальні (фахові, предметні) компетентності: здатність проектувати засоби інформаційно-вимірювальної техніки та описувати принцип їх роботи, використовувати сучасні інженерні та математичні пакети для створення моделей приладів і систем вимірювань, обирати оптимальні методи та засоби для проектування автоматичних систем керування (САК) та регулювання (САР) [1].

Очікувані програмні результати навчання:

знати:

- критерії обирання методів та засобів проектування САК;
- математичні моделі основних ланок САР та САК;
- основи аналізу стійкості САК та САР;
- напрями підвищення якості САК та САР;
- особливості ІВС як частини САК.

вміти:

- вибирати засоби для проектування САК та САР;
- проводити всебічний аналіз із ціллю оптимізації САК;
- розраховувати параметри ПІД-регуляторів;
- застосовувати теорію автоматичного керування для проектування ІВС.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЯК ДИНАМІЧНІ, МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ

Системи автоматичного керування (САК) є прикладом динамічних систем (ДС) [2]. На рис.1.1 наведено ієрархічну вкладеність понять ДС, САК та мехатронних систем (МС) [2-4]. Тут УУ – це устрій (пристрій управління), а ОУ – об'єкт управління.

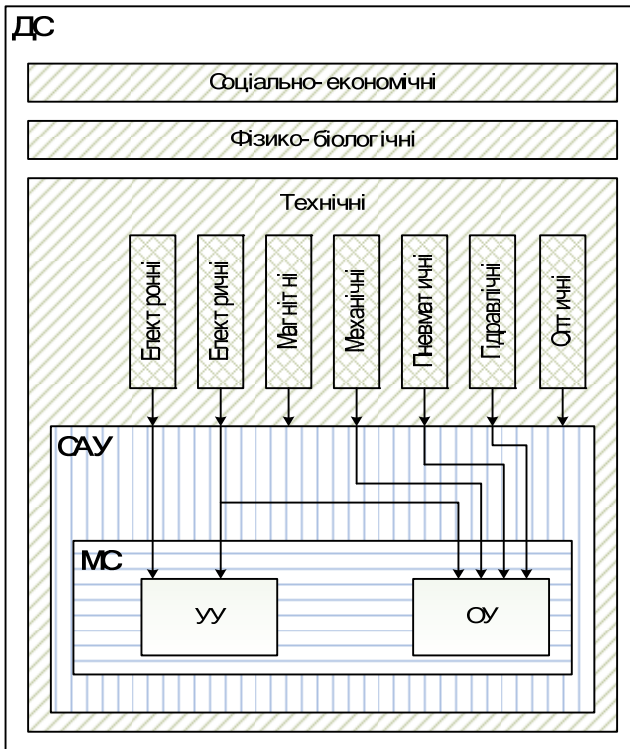


Рисунок 1.1 – Зв'язок ДС, САК та МС

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 управління 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 Землі та інші;

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

Надалі в якості динамічних систем будуть розглядатися тільки технічні системи.

1.1 Системи автоматичного управління

Управління – вплив на об'єкт для досягнення певної мети. Управління без участі людини називається автоматичним, а системи, що здійснюють це управління, – системами автоматичного управління. Під системою автоматичного управління розуміють таку динамічну систему, у якій для досягнення заданої мети управління проводиться збір, передача й переробка різних потоків інформації за заданими алгоритмами. Вивченням САК займається теорія автоматичного управління. При вивченні процесів управління в ТАУ абстрагуються від фізичних і конструктивних особливостей САК й замість реальних САК розглядають їхні адекватні математичні моделі. Тому основним методом дослідження в ТАУ [5] є математичне моделювання.

Автоматизація є одним з головних напрямків науково-технічного прогресу й важливим засобом підвищення ефективності виробництва. Сучасними тенденціями в автоматизації виробництва є:

- широке застосування електронних обчислювальних машин (ЕОМ) для управління;

- створення машин і обладнання із вбудованими мікропроцесорними засобами виміру, контролю й регулювання;

- перехід на децентралізовані (розподілені) структури управління з мікроконтролерним керуванням;

- впровадження людино-машинних систем;

- використання високонадійних технічних засобів;
- автоматизоване проектування систем керування.

1.1.1 Структура та класифікація САК

Систему автоматичного управління можна у загальному випадку умовно розділити на об'єкт управління (ОУ) і пристрій управління (УУ). ОУ – пристрій (система), що здійснює технічний процес і має потребу в спеціально організованих впливах ззовні для здійснення його алгоритму функціонування. Об'єктами управління є, наприклад, як окремі пристрої електричної системи (турбогенератори, силові перетворювачі електричної енергії, навантаження), так і електрична система в цілому. Алгоритм управління – сукупність приписань, що визначають характер впливів ззовні на об'єкт управління та забезпечують його алгоритм функціонування. УУ – пристрій, що здійснює відповідно до алгоритму управління вплив на об'єкт управління. Ціль управління – зміна стану об'єкта відповідно до певної заданої програми (закону). Таким чином, САК – це сукупність взаємодіючих між собою об'єкта управління й пристрою управління. На рисунку 1.2 наведена узагальнена структурна схема САК.

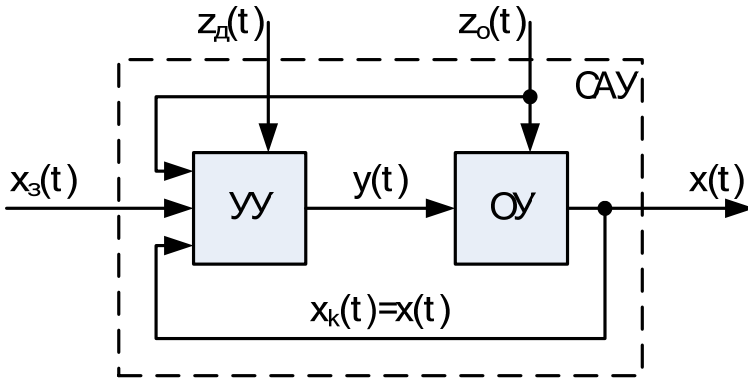


Рисунок 1.2 – Узагальнена структурна схема САК

На рисунку 1.3 наведено структурну схему САК із виділеними підсистемами, інформаційно-вимірювальною в тому числі.

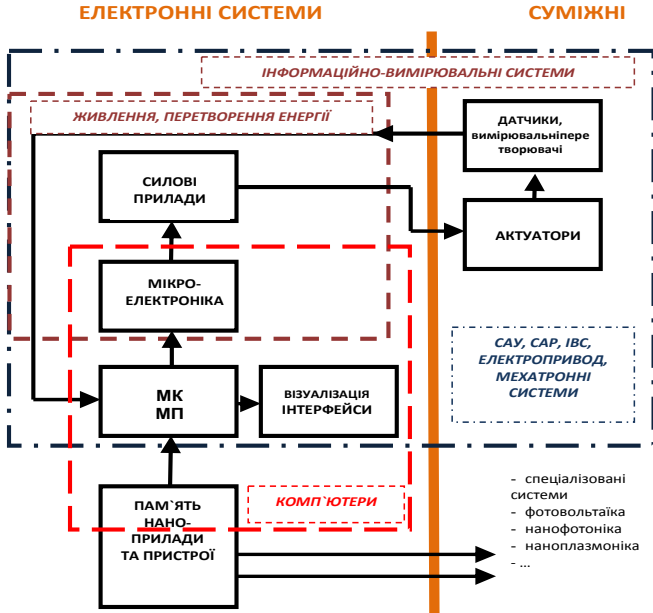


Рисунок 1.3 – Структурна схема САК із підсистемами

Все різноманіття систем управління можна розділити на класи за різними ознаками. За характером математичних співвідношень розрізняють: лінійні системи автоматичного управління, для яких справедливий принцип суперпозиції, і нелінійні системи автоматичного управління, для яких принцип суперпозиції в загальному випадку не справедливий.

За характером зміни величин як лінійні, так і нелінійні САК можуть підрозділятися на: безперервні (аналогові) і дискретні (імпульсні, релейні, цифрові); стаціонарні (параметри елементів якої не залежать від часу роботи системи) і нестаціонарні.

Стаціонарні та нестаціонарні САК можуть бути з зосередженими та розподіленими параметрами.

За характером використовуваної інформації про умови роботи розрізняють:

- САК з жорстким законом управління та структурою – не адаптивні системи;

- САК з змінюваними структурою і \ або законом управління – адаптивні системи, до яких відносяться: системи автоматичної настройки, самонавчальні системи, системи що самоорганізуються, системи зі змінною структурою, системи з самонастроюванням програми, системи з самонастроюванням параметрів, системи з самонастроюванням структури.

За алгоритмами функціонування системи діляться на стабілізуючі, програмні, слідкуючі.

За кількістю вихідних координат об'єкта управління розрізняють одновимірні і багатовимірні САК. Останні діляться на системи пов'язаного і незв'язаного управління. У системах пов'язаного управління окремі керуючі пристрої з'єднані між собою зовнішніми зв'язками. Окрема САК, що входить до складу багатовимірної системи називається автономною, якщо керована нею вихідна змінна не залежить від значення інших керованих величин.

За властивостями в сталому режимі розрізняють статичні і астатичними системи.

За принципом управління розрізняють системи з управлінням по розімкненому циклу (прості і за збуренням) і системи з управлінням по замкнутому циклу з застосуванням зворотного зв'язку. У простих розімкнутих САК програма управління жорстко задана в УУ і вплив збурень на параметри процесів не враховується.

Розімкнене регулювання застосовується за наявності двох умов: достатньої інформації про властивості об'єкта і їх сталості в процесі роботи; незначному рівні перешкод або їх повній відсутності. У той час як замкнуті системи дозволяють вирішувати всі завдання управління: стабілізації, стеження і програмного управління. Нестійкі об'єкти можуть бути керовані тільки системами із замкнутими структурами. Також замкнуті САК можуть бути одноконтурні чи багатоконтурні [1, 5].

1.1.2 Математичний опис САК

Будь-яку САК з кінцевою точністю і певним спрощенням можна описати математично. Таким чином, значно збільшується ефективність і формалізується процедура дослідження САК.

Постановка задачі математичного опису лінійної САК. Типові завдання ТАУ (аналіз і синтез) для свого вирішення вимагають математичного опису САК. Створення такого опису, тобто побудова математичної моделі (ММ) системи, зазвичай проводять за допомогою декомпозиції САК. Систему поділяють на елементи і складають рівняння, що описують їх поведінку (рух) – зміну їх стану в часі. Рівняння складають на основі законів збереження енергії або речовини. При цьому САК ідеалізують (лінеаризація, стаціонаризація). Результуючими рівняннями часто є звичайні диференціальні рівняння (ODE) з постійними коефіцієнтами або диференціальні алгебраїчні рівняння (DAE). Крім диференціальних рівнянь в якості ММ застосовують передавальні функції (ПФ), які дозволяють представляти ММ системи у вигляді алгоритмічних структурних схем. До ММ відносять також часові і частотні характеристики САК, які спільно з ПФ складають класичний математичний апарат ТАУ, що дозволяє аналізувати і синтезувати САК без безпосереднього інтегрування рівнянь.

При взаємодії частин САК між собою, а також і при процесі функціонування самого об'єкта управління здійснюється перетворення енергії одного виду в енергію іншого виду. Це обумовлено різною фізичною природою елементів, що входять до складу САК. Так одна і та ж система може включати в себе, наприклад, механічні, електричні та гідравлічні елементи. Але процеси перетворення та перерозподілу енергії в САК, на відміну від багатьох інших фізичних систем, строго орієнтовані (направлені, каузальні), тобто вплив передається тільки в певному напрямку. Спрямованість передачі впливів в САК забезпечується завдяки наявності у одного або декількох конструктивних елементів системи так званої детектуючої властивості. Ця властивість полягає в тому, що аналізований елемент не робить зворотної дії на попередній елемент, а його вихідна величина не впливає на свою вхідну.

Наприклад, електричний чотириполюсник володіє односпрямованістю передачі впливів, якщо він не навантажує попередній чотириполюсник, тобто якщо вихідний опір попереднього елемента істотно менше вхідного опору розглянутого чотириполюсника. Зазвичай властивістю односпрямованості володіють ті елементи САК, які передають інформаційні впливи. До таких елементів відносяться в першу чергу вимірники і перетворювачі

сигналів. Конструктивні частини системи, через які передаються енергетичні впливи, цією властивістю, як правило, не володіють – це неорієнтовані, а-каузальні елементи. Тільки внаслідок наявності елементів спрямованої дії в САК створюється замкнений контур передачі впливів, за допомогою якого і здійснюється цілеспрямований процес управління. Без таких елементів САК були б непрацездатні або малоефективні.

Передавальні властивості елементів САК в динамічному режимі описують за допомогою динамічних характеристик. Розрізняють такі форми динамічних характеристик: ODE, часові характеристики, передавальна функція, частотні характеристики. ODE в багатьох випадках є найбільш загальною і повною формою опису передавальних властивостей елементів САК, але не дає наочного уявлення про динамічні властивості елемента, що, в свою чергу, дає функція $y(t)$, тобто розв'язання цього рівняння. Однак одне і те ж диференціальне рівняння може мати безліч рішень, що залежать від початкових умов і характеру вхідного впливу $x(t)$, що незручно при зіставленні динамічних властивостей різних елементів. Тому зазвичай характеризують ці властивості елемента тільки одним рішенням диференціального рівняння, отриманим при нульових початкових умовах і одному з типових вхідних впливів.

Найбільш поширеним методом опису і аналізу САК є операційний метод, за допомогою якого визначають передавальну (передатну) функцію (ПФ), яка є самою компактною формою опису динамічних властивостей елементів і систем. Частотні характеристики описують передатні властивості елементів і САК в режимі сталих гармонійних коливань, викликаних зовнішнім гармонійним впливом [9].

1.1.3 Поняття і задачі синтезу та аналізу САК

Всі математичні завдання, які вирішуються в ТАУ, можна об'єднати в два великі класи:

- задачі аналізу;
- задачі синтезу.

Завдання синтезу можна розглядати як зворотні завданням аналізу: в них потрібно визначити структуру й параметри системи за

заданими показниками якості управління. Найпростішими завданнями синтезу є, наприклад, завдання визначення передатного коефіцієнта розімкнутої САК по заданій помилці або умові мінімуму інтегральної оцінки. Синтез САК – процедура визначення структури й параметрів системи за заданими показниками якості управління. У загальному випадку при проектуванні системи необхідно визначити алгоритмічну й функціональну структури системи, тобто вирішити задачу повного синтезу. Визначення алгоритмічної структури (теоретичний синтез) проводиться за допомогою математичних методів і на підставі вимог, записаних у чіткій математичній формі. Визначення функціональної структури (технічний синтез) полягає у виборі конкретних фізичних елементів і узгодження їх між собою по статичних і енергетичних характеристиках. Ця процедура не має поки що строгої математичної основи (тобто не формалізована) і тому відноситься до області інженерної творчості.

З урахуванням того, що не будь-який елемент алгоритмічної структури може мати відображення у вигляді фізичного блоку функціональної структури, тобто просто не може бути реалізований, завдання синтезу в більшості випадків неможливо вирішувати визначаючи спочатку алгоритмічну структуру САК, а потім по ній – функціональну структуру. Тому спочатку, виходячи з визначеності об'єкта управління ОУ, вимог до призначення й умов роботи САК, вибирають функціонально необхідні елементи системи, які утворюють незмінну частину функціональної структури системи. Потім, на підставі вимог до статичних і динамічних властивостей САК визначають змінювану частину функціональної структури системи. Таким чином, процедури визначення алгоритмічної й функціональної структур тісно переплітаються один з одним. Остаточне рішення про структуру САК приймається на основі компромісу між якістю управління, з одного боку, і простотою й надійністю, з іншої.

Заключним етапом проектування САК є параметрична оптимізація – визначення настроюваних параметрів обраного регулятора. Після розв'язку завдання синтезу звичайно виконують аналіз синтезованої системи, тобто перевіряють, чи володіє система необхідними показниками стійкості і якості управління. Застосування ЕОМ на всіх етапах синтезу й аналізу САК дозволяє розглянути велику кількість варіантів структур і параметрів і тим самим суттєво прискорити вирішення задачі синтезу.

У завданнях аналізу повністю відома структура системи, задані всі (як правило) параметри системи, і потрібно оцінити яке-небудь її статичну або динамічну властивість. До завдань аналізу відносяться визначення стійкості й оцінка якості управління системи.

Стійкість САК – властивість системи повертатися в стан рівноваги після припинення зміни впливу, що виводив систему із цього стану. Від стійкості САК залежить її працездатність. Тому проблема стійкості систем є однією із центральних у ТАУ.

Завданнями аналізу стійкості САК звичайно є:

- визначення стійкості або нестійкості системи при заданих параметрах;
- визначення припустимого за умовами стійкості діапазону зміни деяких незаданих параметрів системи;
- з'ясування принципової можливості стійкості системи при заданій її структурі [10].

Якість САК визначають за допомогою критеріїв якості, які розділяють на 4 групи:

- а) критерії точності – використовують величину помилки в різних типових режимах;
- б) критерії величини запасу стійкості – оцінюють віддаленість САК від границі стійкості;
- в) критерії швидкодії – оцінюють швидкість реагування САК на появу задаючого та збурюючого впливів;
- г) інтегральні критерії – оцінюють узагальнені властивості САК: точність, запас стійкості, швидкодія.

Існує два основні підходи до оцінки якості. Перший використовує інформацію про часові параметри системи: перехідна функція й функція ваги; розташування полюсів і нулів ПФ замкненої системи. Другий використовує інформацію про деякі частотні властивості системи: смуга пропускання; відносна висота резонансної вершини і т.д. Частотні критерії якості застосовують, коли відомі або можна визначити експериментально частотні характеристики САК. Вид перехідного процесу при цьому не розглядається. Частотними критеріями можна оцінити запас стійкості й швидкодію САК. Зараз уже існує програмне забезпечення (зокрема, САЕ-програми), яке дозволяє автоматично визначати параметри якості проектованої (модельованої) САК, використовуючи різні її характеристики, і представляти в зручній для користувача формі.

Завдання підвищення точності САК звичайно передбачає суттєвий перегляд її структури, можливі заміни або додавання окремих ланок. Загальними методами підвищення точності САК є:

- збільшення коефіцієнта підсилення розімкненого ланцюга;
- підвищення порядку астатизму;
- застосування регулювання за похідними;
- використання комбінованого управління;
- уведення неединичних зворотних зв'язків;
- включення масштабуючих пристроїв на вході або виході [10].

Отже, проектування систем керування відіграє важливу роль у сучасних технологічних системах. Вигоди від удосконалювання її систем керування в промисловості можуть бути величезні. Вони включають поліпшення якості виробу, зменшення споживання енергії, мінімізацію максимальних витрат, підвищення рівнів безпеки й скорочення забруднення навколишнього середовища. Труднощі тут полягають в тому, що ряд найбільш передових ідей має складний математичний апарат.

Проектування й функціонування автоматичного процесу, призначеного для забезпечення технічних характеристик, таких, наприклад, як прибутковість, якість, безпека й вплив на навколишнє середовище, вимагають тісної взаємодії фахівців різних дисциплін. Інтенсивне ускладнення й збільшення масштабів промислового виробництва, розвиток економіко-математичних методів керування, впровадження ЕОМ в усі сфери виробничої діяльності людини, що володіють більшою швидкістю, гнучкістю логіки, значним обсягом пам'яті, послужили основою для розробки САК, які якісно змінили формулу управління, значно підвищили його ефективність. Достоїнства комп'ютерної техніки проявляються в найбільш яскравій формі при зборі й обробці великої кількості інформації, реалізації складних законів управління.

САК можна віднести до мехатронних систем (МС), до складу яких входить пристрій управління (цифровий) і електромеханічний об'єкт управління.

1.2 Мехатронні системи

Слово «Мехатроніка» складається з двох частин – механіка і електроніка. При своєму народженні це слово означало тільки використання комп'ютера для управління механічною системою [4].

Якщо в якості актуаторів в САК використані електричні двигуни, така система буде мехатронною. МС є динамічною системою, і на першому етапі інтерес буде представляти, зокрема, її об'єкт управління. Крім того МС є специфічною САК (вноситься конкретика до складу пристрою управління й об'єкта управління, тобто на САК накладають обмеження, а значить можна зробити висновок, що МС є, як би, окремим випадком САК), особливості якої будуть розглянуті далі.

Існує велика кількість формальних визначень мехатроніки і МС, що мало відрізняються одне від одного. Ось одне з них: мехатроніка – це нова область науки і техніки, присвячена створенню і експлуатації машин і систем з комп'ютерним управлінням 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, що:

- 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 складних координованих рухів механічної частини.

Це дозволяє визначити особливості ММ мехатронних пристроїв, розуміючи під ними об'єкти, для дослідження та проектування яких використовуються математичні моделі, що відображають взаємний вплив процесів різної фізичної природи в об'єкті – механічних, електричних, інформаційних тощо [4].

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 і інтенсивно розвиваються.

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

Застосування мехатронного підходу при створенні машин з комп'ютерним управлінням 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 управління;
- високу надійність, довговічність і перешкодозахищеність;
- конструктивну компактність модулів (аж до мініатюризації);
- поліпшені масогабаритні й динамічні характеристики машин внаслідок спрощення кінематичних ланцюгів;
- можливість комплексування функціональних модулів у складні МС й комплекси під конкретні завдання замовника.

1.2.1 Склад мехатронної системи

Функціональна схема МС в загальному вигляді наведена на рисунку 1.4.

Вона включає три підсистеми: інформаційну, енергоелектронну і електромеханічну [4]. Електромеханічна підсистема містить об'єкт управління (ОУ) і електромеханічний перетворювач (ЕМП). Енергоелектронна підсистема включає силовий напівпровідниковий перетворювач (СНП) та вторинне джерело живлення (ВДЖ). Інформаційна підсистема містить систему управління і діагностики (СУД) і блок сенсорних пристроїв (СП). При дослідженні МС необхідно розглядати динамічні, статичні, енергетичні, спектральні і ряд інших характеристик.

Слід підкреслити основні особливості МС:

- а) об'єкти управління 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 управління ОУ мехатронних систем, як правило, мають змінні параметри. Часто не вдається створити математичну модель об'єкта управління 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 управління. У цьому випадку конструкція ЕМП є нетрадиційною;

г) управління 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, відсутні в окремо взятих блоках;

д) мехатронна енергетична підсистема, як правило, є нелінійною, імпульсною підсистемою з дискретно змінними параметрами. Тому її аналіз, а також синтез системи управління вимагає застосування методів, що базуються на сучасних комп'ютерних технологіях [4].

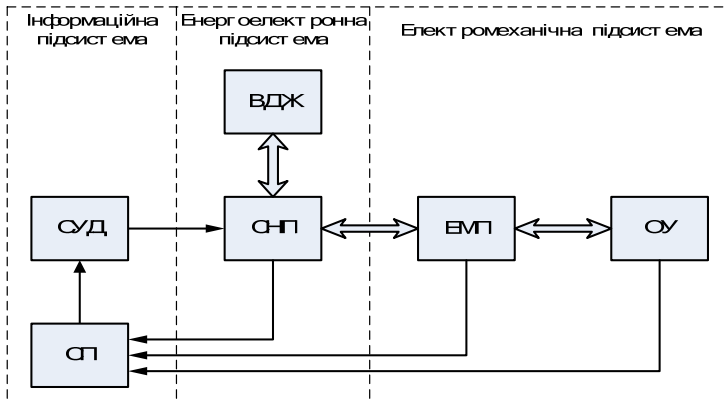


Рисунок 1.4 – Функціональна схема мехатронної системи

Розрахунки й проектування МС включають:

- побудову спільної моделі цифрової, імпульсної й безперервної частини;

- дослідження динамічних характеристик безперервної й імпульсної частини;
- синтез регулятора;
- дослідження динамічних характеристик усієї системи;
- дослідження статичних характеристик усієї системи.

У мехатроніці об'єктами управління доцільно вважати самі електромеханічні системи різного ступеня складності, зокрема нею може бути електричний привод [6].

1.2.2 Приводи мехатронних систем

Привод, як відомо, включає, перш за все, двигун і пристрій управління ним. Крім того, до складу приводу можуть входити різні механізми для передачі і перетворення руху (редуктори, перетворювачі обертального руху в поступальний і навпаки), гальмо і муфта.

До приводів, що застосовуються в МС, пред'являють досить жорсткі специфічні вимоги. У зв'язку з необхідністю вбудовування приводів до робочих органів МС – в маніпулятори та системи пересування – габарити і маса приводів повинні бути мінімальними. Приводи в МС працюють в основному в несталих режимах і зі змінним навантаженням. При цьому перехідні процеси в них повинні бути практично неколивальними. Важливими параметрами приводів МС є також надійність, вартість, зручність експлуатації. Вимоги, що пред'являються до їх способу управління, швидкодії і точності, безпосередньо визначаються відповідними вимогами до МС в цілому. Зокрема, зазвичай потрібно, щоб швидкість поступального руху на виході приводів МС в середньому становила від часток до декількох м/с при погрішності відпрацювання переміщення, рівної долям міліметра.

У МС знайшли застосування практично всі відомі типи приводів: електричні, гідравлічні та пневматичні; із поступальним і обертальним рухом; регульовані (по положенню і швидкості) і нерегульовані; замкнуті (зі зворотним зв'язком) і розімкнені; безперервної і дискретної дії (в тому числі крокові).

Застосування пневматичних приводів в МС пояснюється їх дешевизною, простотою і відповідно надійністю. Але ці приводи

погано керовані і тому використовуються в основному як нерегульовані з цикловим управлінням. Пневматичні приводи застосовують тільки в роботах невеликої вантажопідйомності – до 10 кг, рідше 20 кг.

Гідравлічні приводи найбільш складні і дорогі в порівнянні з пневматичними і електричними. Однак при потужності 500-1000 Вт і вище вони володіють найкращими масогабаритними характеристиками, добре керовуються і тому є основним типом приводу для важких і надважких МС.

Електричний привод, незважаючи на його добру керованість, простоту підведення енергії, більший коефіцієнт корисної дії (ККД) і зручність експлуатації має гірші масогабаритні характеристики, ніж пневматичний і гідравлічний приводи. Прогресивне збільшення в останні роки частки електромеханічних МС в загальному парку мехатронних пристроїв у світі викликано швидким прогресом у створенні нових типів електричних двигунів, спочатку призначених для роботів, що дозволяють створювати більш компактні комплекти приводи всіх необхідних типів. На сьогодні основна область застосування електричних приводів в мехатроніці – це пристрої середньої вантажопідйомності (десятки кілограм), легкі МС з високоякісним управлінням і мобільні роботи.

1.3 Етапи виконання лабораторної роботи

1. Отримайте структурну схему заданої САК (див. Додаток А), визначте її ланки згідно рис.1.2 та 1.3.

2. Класифікуйте задану САК за різними ознаками.

3. Отримайте структурну схему заданої САК як МС.

1.4 Контрольні питання

1.САК як динамічні, мехатронні системи.

2.Класифікація САК та САК.

3.Структурні схеми САК.

4.Задачі синтезу та аналізу САК.

5.Математичний опис САК.

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ САК

Будь-яка САК (зокрема, її об'єкт управління ОУ), що вимагає управління, 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 [3].

Аналогічно тому, що МС та САК це синергетичне об'єднання механічної, електричної та комп'ютерної (електронної, цифрової) частин, засоби моделювання таких мультидоменних систем повинні допускати спільне моделювання цих частин на єдиній методологічній основі, даючи можливість будувати і досліджувати багатоаспектні моделі [7].

Реалізувати це можливо двома способами. По-перше, можна перейти до єдиної системи диференціальних рівнянь. У цьому випадку всі фізичні особливості окремих частин системи будуть загублені. Варіантом такого підходу є структурне моделювання, де всі змінні є скалярними сигналами і їх можна з'єднувати (як у структурній схемі). Недолік підходу – великий обсяг попередніх перетворень (у випадку системи рівнянь), або одержання схеми, що мало нагадує реальну систему. Інший варіант – використання систем моделювання, які здатні на єдиній методологічній основі моделювати механічні, електричні й інформаційні компоненти, тобто поєднувати їх у єдину схему, зберігаючи при цьому звичні для фахівців у предметних областях способи завдання вихідної інформації [8].

Цей підхід відрізняється від прийнятого в ТАУ тим, що в ММ використовуються не абстрактні сигнали, а величини, що безпосередньо характеризують фізичний стан об'єкта (струми, потенціали, тиски, сили й т.п.) і зв'язані компонентними рівняннями. Саме цей підхід стає домінуючим останнім часом для дослідження МС. При цьому основу моделювання МС становить моделювання механічних конструкцій – найбільш складна й трудомістка справа. Саме компоненти механічних конструкцій описуються найбільш складними математичними моделями. Вони зазвичай багатовимірні й

пред'являють найбільш жорсткі вимоги до інструментальних засобів моделювання [8].

У процесі проектування й експлуатації сучасних технічних об'єктів і систем дослідник постійно змушений мати справу з побудовою та дослідженням моделей цих об'єктів. Зараз моделювання являє собою основний науковий інструмент, застосовуваний як для чисто теоретичних, так і для практичних цілей. Моделювання є важливою стадією проектування технічної системи і дозволяє скоротити час та матеріальні засоби при наладці та випробуваннях. А коли натурні випробування неможливі за якихось причин, то моделювання стає єдиним засобом для відпрацювання поведінки системи. Термін «моделювання» достатньо багатогранний. Стосовно технічних систем, в тому числі мехатронних систем (МС), під моделюванням буде розумітися процес, що складається у виявленні основних властивостей досліджуваного об'єкта, побудові моделей та їх застосуванні для прогнозування поведінки об'єкта.

Моделювання складних динамічних систем (ДС), наприклад, мехатронних, було і є одним з найбільш потужних інструментів системних досліджень. Моделюванням слід користуватися з достатньою мірою обережності та уважності: необхідно не просто отримати результати досліджень, проведених за допомогою тих чи інших моделей, важливо ретельно вивчити досліджувану систему, скласти її опис, підібрати методи відтворення вхідних впливів, побудувати адекватну модель, спланувати і провести експерименти, обробити і вірно інтерпретувати результати [8].

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

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

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

- «simulation» – означає проведення комп'ютерного експерименту з моделлю (зазвичай чисельного), 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. Такі системи виникають тоді, коли протікання процесу визначається не тільки станом системи в даний момент, але також і передісторією процесу;
- стохастичні системи, описувані ймовірнісними поняттями і методами.

2.1 Математичний базис моделювання САК

Будь-яку динамічну систему, САК в тому числі, можна описати однією з форм (або їх комбінацією) представлених на рисунку 2.1.

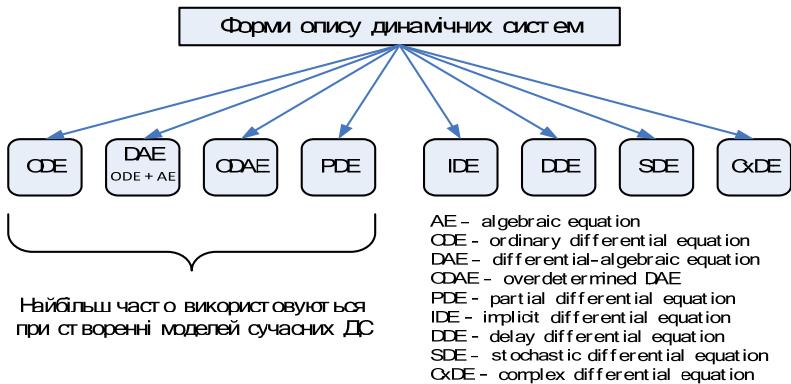


Рисунок 2.1 – Форми опису ДС

Якщо поведінку безперервної системи можна описати відразу лише алгебраїчними рівняннями (AE) без попередніх спрощень, то вона не є динамічною (не відображає динаміку). Це властиво лише деяким абстрактним системам.

Отже, саме математичний опис буде визначати вибір інструментальних засобів і технологій проектування систем. При

цьому на сучасному етапі особлива увага приділяється проектуванню технічних систем, характерною особливістю яких є різке підвищення їх логічної складності, жорсткості вимог якості проектування і зниження часу і вартості розробки. Вирішити зазначені протиріччя, що виникають при проектуванні технічних систем, особливо засобів і систем управління (ЗСУ), на сучасному етапі можливо тільки через розробку і впровадження систем автоматизованого проектування (САПР). Вміння застосовувати такий інструментальний засіб проектування ЗСУ, як САПР, ґрунтується на розумінні того, яким чином будується САПР, її структура та окремі підсистеми, на знанні ММ, методів їх формування, методів і алгоритмів аналізу та синтезу, які покладені в основу цих підсистем [7, 9].

2.2 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;
 - та, що допускає зміни (в процесі експлуатації вона може ускладнюватися).

Формою графічного представлення інформації про модельовану систему можуть бути [10]:

- 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) [11];
- 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) [7], 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. Перехід до зображення структури системи на екрані монітора дозволив виключити етап ручного кодування схеми, однак вимагав розробки нового принципу організації самого процесу чисельних розрахунків.

2.3 Вибір класу САПР для проектування САК

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

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

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

- в області архітектури і будівництва.

За цільовим призначенням розрізняють САПР для різних аспектів проектування:

- САПР функціонального проектування, інакше CAE-системи (Computer Aided Engineering);

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

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

CAE системи дозволяють досліджувати системи на макрорівні, тобто аналізувати та оптимізувати систему із ціллю прийняття рішення щодо топології (структурний підхід) та функціональних можливостей в цілому (системний підхід). В CAD проектується підсистеми різної фізичної природи як на макрорівні (функціональний рівень для змішаних систем), так і на мікрорівні (схемотехнічний рівень). В САМ від ECAD можуть бути передані програми для станків із ЧПУ, роботів та синтезовані технологічні карти.

В системах віртуального виробництва ланка CAE → CAD → CAM утворює наскрізний цикл під керуванням програми – менеджера даними про виріб (PDM- Product Data Manager) [7,9].

2.4 Підходи до моделювання САК

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 2.2), VisSim, SimApp, SamSim [12].

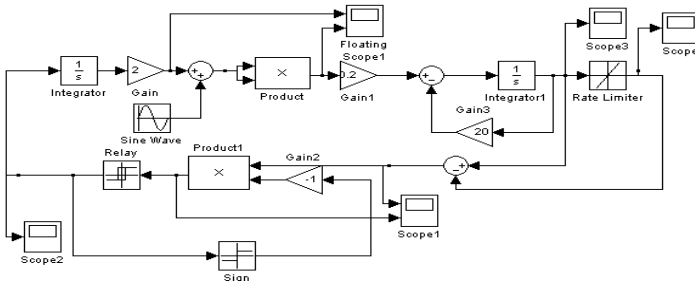


Рисунок 2.2 – Схема для дослідження екстремальної системи в пакеті Simulink

Фізичним мультидоменним (акаузальним) моделюванням називається техніка моделювання, заснована на використанні бібліотеки моделей елементів фізичних пристроїв, з яких можна скласти схеми фізичні принципи [24]. Оскільки в енергетичних ланцюгах потік енергії може змінювати напрямок, то для елементів фізичних схем входи і виходи не визначені. Окремим випадком даної техніки моделювання є використання графів зв'язків (bond graph, BG). Ідеологія фізичного мультидоменного моделювання полягає в тому, що модель будь-якого технічного пристрою будується як перетворюючий енергію ланцюг (рис. 2.3).

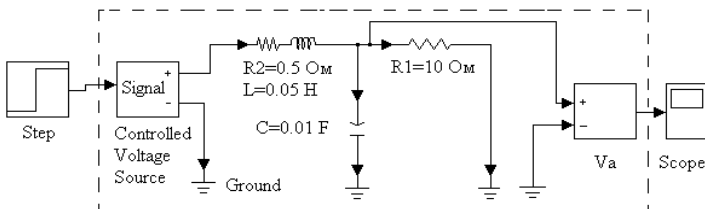


Рисунок 2.3 – Схема для моделювання електричного кола в пакеті SimPowerSystems

У розпорядження користувача надається бібліотека елементів фізичних пристроїв. В залежності від рівня ієрархії це можуть бути

бібліотеки різних енергетичних доменів (електричних, механічних, гідравлічних і т.д.) або більш складних функціональних вузлів, наприклад, механічних ланок і кінематичних пар в механічних моделях, підсилювачів, трансформаторів, перетворювачів, двигунів – у електричних і електромеханічних моделях.

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

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

Але явні і неявні методи інтегрування не прив'язані жорстко до структурного та фізичного мультидоменного моделювання. Деякі сучасні САЕ-системи, незалежно від підходу до моделювання, використовують неявні та явні методи інтегрування [13-15], а також дозволяють моделювати в часовій області як об'єкти, задані структурними схемами, тобто з використанням спрямованих ланок, так і об'єкти представлені у вигляді фізичних принципових схем (наприклад, 20-sim, Maplesim, SystemModeler, Simplorer, Simscape, Amesim).

При завданні вихідної інформації у вигляді принципової схеми в математичне ядро може бути включена процедура перетворення мультидоменної інформації до форми спрямованої структури, а потім можуть бути використані ті ж самі методи явного чисельного інтегрування, що й у звичайному структурному моделюванні. Саме так зроблено в пакетах Simmechanics і Simpowersystems, які є підсистемами Simulink [16,17].

У результаті, отриманий деякий проміжний варіант, основним достоїнством якого є форма завдання вихідної інформації. При цьому сам перехід до структури в загальному випадку неоднозначний. У простих випадках машина може виконувати його самостійно, без

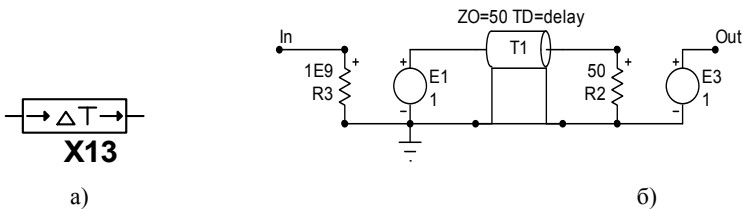
звертання до користувача. У більш складних, користувач повинен допомогти програмі сформуванню найбільш раціональну, з погляду витрат на інтегрування, структуру.

2.5 Макромоделі типових ланок САК

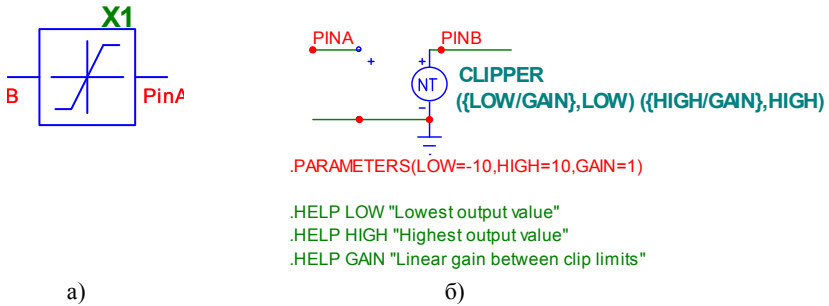
В бібліотеках CAD та САЕ макромоделі ланок, які необхідні для побудови функціональної моделі САР та САК, зокрема, операційні багатополіусники, які можуть виконувати операції інтегрування, диференціювання та всі арифметичні дії та чотирьохполіусники із складними передатними функціями. Перелічимо деякі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

- ланцюг абсолютного значення - Absolute Value Macro;
- ланцюг підсилення - Amplifier Macro;
- ланцюг затримки - Analog delay Macro;
- ланцюги суматорів із різним напрямком та кількістю входів для сумування, наприклад, 2-Input Summer Macro;
- ланцюги для обчислення різності, результатів множення та ділення сигналів - Subtraction Macro, Multiplier Macro, Divider Macro;
- ланцюги інтегрування та диференціювання Integrator Macro, Differentiator Macro;
- ланцюг із зоною нечутливості Slip Macro;
- тригер Шмидта (ланцюг гістерезису) Schmitt Macro.

Розглянемо умовну графічну позначку (УГП) та схеми заміщення деяких макромоделей. На рисунку 2.4 наведена маромодель елемента з бібліотеки ЕСAD програми МС12 [18], який реалізує затримку сигналу (в секундах), на рисунку 2.5 – макромодель елемента із передаточною функцією (обмеження, насичення сигналу), вид якої зображено на УГП цього двополіусника.



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



а – УТП; б – схема заміщення із керованим джерелом, в якому передаточна функція задана таблично (NT)

Рисунок 2.5 – Ланцюг CLIP Macro

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

Таблиця 2.1 – Класифікація ланок та блоків в програмі MC 12.

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

У бібліотеці блок-схем САЕ програми 20-sim [19] передбачили кілька реалізацій диференціюючого елемента (диференціатора), що дозволяє будувати обчислювально економічні моделі. На рисунку 2.6 приведені реалізації диференціатора в програмі 20-sim.

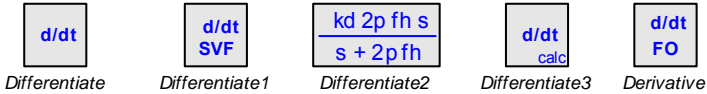


Рисунок 2.6 – Диференціатори з бібліотеки Signal

Один з них реалізований за схемою, представленою на рисунку 2.7.

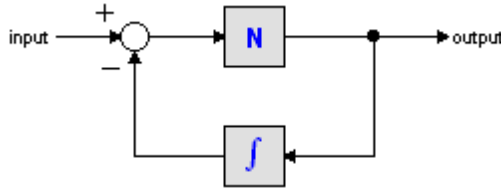


Рисунок 2.7 – Реалізація диференціатора (Differentiate-SVF)

Така схема відповідає рівнянню

$$output = \frac{s}{\frac{s}{N} + 1} \cdot input,$$

де s – оператор Лапласа;

N – коефіцієнт підсилення (дорівнює 10 за замовчуванням).

У цій схемі (рис. 2.7) не використовується диференціювання, отже всі алгоритми симуляції можуть бути використані при моделюванні. При збільшенні коефіцієнта підсилення апроксимація диференціатора стає більш точною, але збільшується кількість ітерацій при симуляції.

Також є диференціатор (Differentiate-FO) першого порядку апроксимації у частотній області, ПФ (TF) якого

$$W(s) = kd \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot fh \cdot s}{s + 2 \cdot \pi \cdot fh},$$

де kd – коефіцієнт підсилення диференціатора;

fh – частота, до якої елемент веде себе як диференціатор, Гц.

Інша альтернативна реалізація диференціатора (з захистом ділення на нуль) апроксимується формулою чисельного диференціювання

$$y = \frac{2}{3} \cdot \frac{u(t) - u(t-h)}{h} + \frac{1}{3} \cdot y(t-h),$$

де y – вихідний сигнал;

u – вхідний сигнал;

t – час;

h – крок симуляції.

2.6 Приклад побудови САР в ЕСAD

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 2.8) в програмі Micro Cap 12 [18] (МС 12). Спрощено путь передачі механічної енергії по кінематичній схемі регулятора такий: електропривод – редуктор – обертально-поступальна передача – переміщення затвора клапана. Модель клапана описується законами класичної механіки і синтезується виходячи з геометричних розмірів клапана. Параметрується 3 блока: 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.

Контур клапана представлений схемою (рисунок 2.9). Вхідний сигнал уставки перетину просвіту клапана в мм² моделюється програмованим джерелом (напруги).

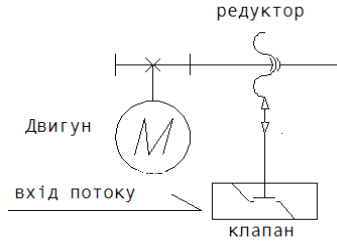


Рисунок 2.8 – Кінематична схема клапана

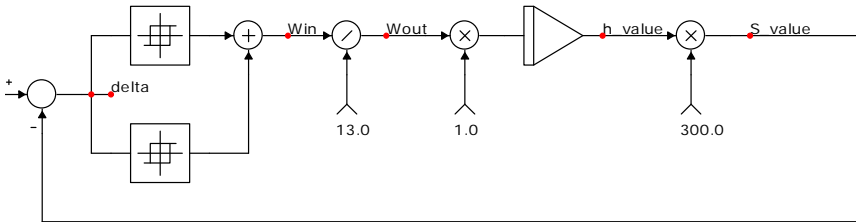


Рисунок 2.9 – Клапан. Структурна схема моделі

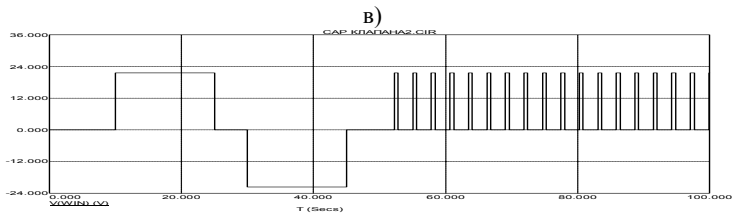
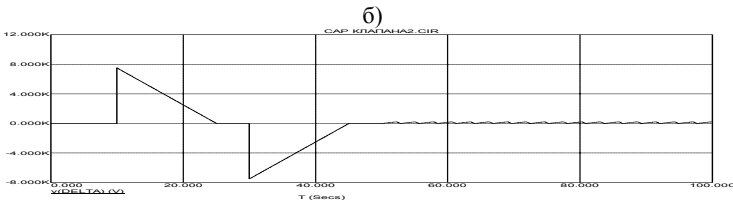
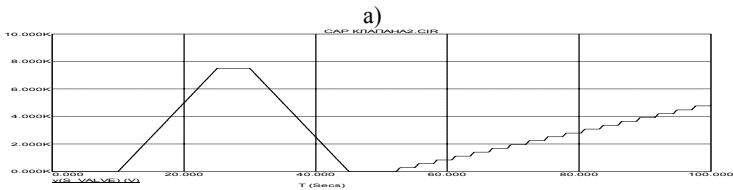
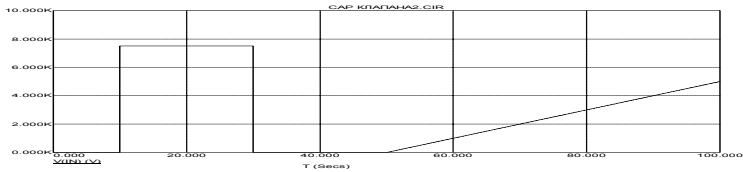
Контур складається з наступних елементарних ланок:

- 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 управління електроприводом від “брязкоту” контактів;
- ланка «Редуктор» (блок ділення на коефіцієнт/передаточне число (вихід - *Wout* – частота обертання веденої шестерні редуктора);
- ланка інтегратора, яка моделює оберально-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* (мм²), відповідно до положення штока *h_value*.

Результати моделювання динаміки САР (перехідні процеси) представлені на рисунку 2.10. На графіку 2.10, а – вхідний сигнал уставки перетину просвіту клапана (може мінятися як дискретно, так и безперервно), на рисунку 2.10, 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 позиціювання штока клапана). У відсутності цієї ланки на малих швидкостях зміни уставки клапан переходив би у автоколивальний режим).

Рисунок 2.10, в відображає процес визначення помилки між уставкою та поточним значенням просвіту клапана S_{valve} (мм²), відповідно до положення штока. На рисунку 2.10, γ – частота і напрямок обертання електродвигуна переміщення клапана. Видно режим переривчастої роботи двигуна при повільній зміні уставки.



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

Рисунок 2.10 – Перехідні характеристики САК режимом автоклава

2.7 Етапи виконання лабораторної роботи

1. Виписати з бібліотеки програми МС12 макроси, які використовуються для моделінгу САК, визначити критерії, за якими вони можуть бути класифіковані.
2. Отримайте передаточну функції заданої ланки.
3. Розробіть класифікацію типових ланок САК в заданому програмному середовищі.
4. Сформууйте в заданому програмному середовищі модель ПІД-регулятора. Задайте можливість зміни його параметрів.
5. Дослідите на системному та структурному рівнях моделі систем (файли system1.cir та system2.cir в програмі Micro Cap 12).

2.8 Контрольні питання

1. Поняття та приклади динамічних систем.
2. Форми представлення моделей (прикладі).
3. Принципи вибору програми для дослідження САК.
4. Способи моделінгу САК.
5. Рівняння, якими описуються динамічні системи (САК в тому числі).
6. Характеристики моделі.
7. Поняття САПР. Критерії вибору програми моделювання.
8. Показники якості САЕ.
9. Мультидоменне моделювання.
10. Каузальне та акаузальне моделювання.

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 СУЧАСНІ ПРОГРАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ САК.

Для моделювання на макрорівні використовують математичні процесори та системи автоматизованого інжинірингу (CAS та CAE відповідно).

3.1 Критерії вибору та огляд CAE -систем

Сучасні професійні CAE мають наступні відмітні риси:

- 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, які може зробити сам користувач;
- графічний інтерфейс, що поєднує графічні засоби формування візуального образу досліджуваного технічного пристрою з автоматичною генерацією моделі 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 CAE постпроцесорів моделювання, що дозволяє не тільки переглядати результати моделювання, але й обробляти ці результати;
- наявність вбудованих засобів чисельного 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.

На даний момент існує багато програм рівня САЕ (або таких, що його охоплюють, наприклад, Micro-Cap [18]), 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 MATRIXX, 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, SamSim, SimApp, SimulationX, Simplorer, VisSim, SystemModeler, 20-sim та інші, які можуть бути знайдені у [12, 16-].

Оскільки ДС 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. У цій роботі розглядатися будуть технічні динамічні системи, отже увага буде зосереджена саме на САЕ-системах для моделювання технічних об'єктів та систем, що володіють засобами графічного описання та представлення моделей. Далі будуть 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, інформація про які важкодоступна, але була отримана тим чи іншим чином. Більшість з перелічених програм моделювання технічних динамічних систем розвиваються та підтримуються виробниками. 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;
- доступність програми, види ліцензій та редакцій, вартість та наявність безкоштовних версій.

3.2 SamSim

Програма SamSim [20] призначена для моделювання лінійних і нелінійних САК. Працює з моделями, які можна представити у формі блок-схем (в програмі 48 типових блоків). За допомогою цієї програми можливо:

- побудова будь-яких схем моделей з елементів, пропонованих бібліотеками;
- завдання параметрів інтегрування і параметрів елементів схеми;
- збереження в файлі і зчитування з файлу моделі (схеми і її параметрів);
- побудова залежностей від часу у будь-яких точках схеми;
- побудова фазових портретів для будь-яких схем;
- побудова частотних характеристик і годографів для будь-яких лінійних схем;
- представлення результатів розрахунку в графічній і табличній формі;
- збереження результатів розрахунку в текстовому файлі, графіків в bmp і jpg;
- експорт результатів розрахунку в MS Excel;
- вивід на друк схеми моделі і її параметрів, результатів розрахунку.

Програма має всього одну редакцію, можна скачати з сайтів автора: samsim.fromru.com, samsim2002.chat.ru, samsim2002.narod.ru. Не потребує встановлення, працює з поточного каталогу. Є файл

допомоги і приклади схем. Розроблена в 2002 році, поширюється вільно. Приклад роботи програми можна побачити на рисунку 3.1.

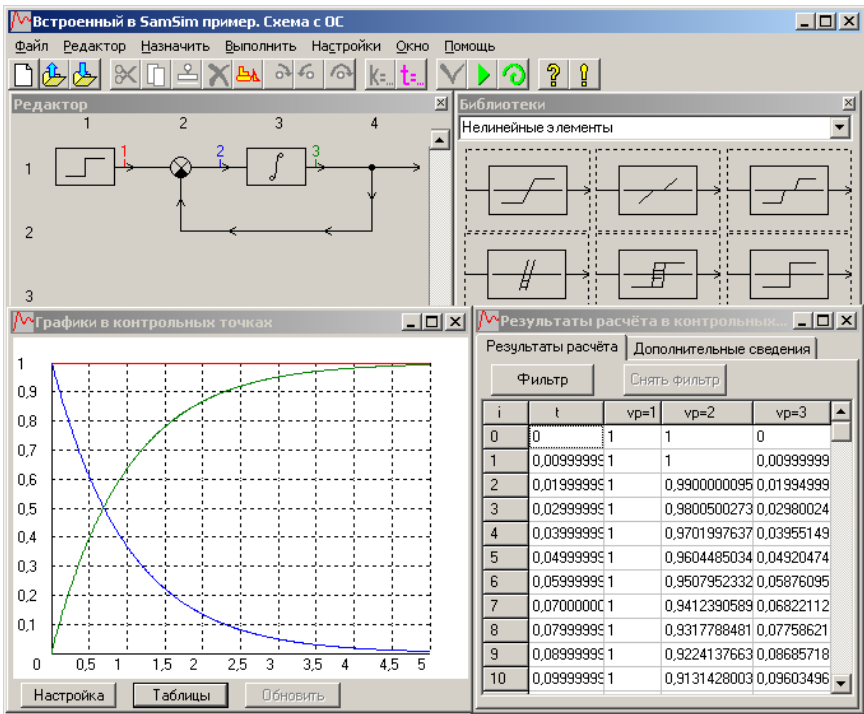


Рисунок 3.1 – Дослідження моделі в програмі SamSim

Програма має три алгоритми інтегрування (солверу/розв'язувача). SamSim не має засобів автоматичної структурної або параметричної оптимізації моделі.

Програма проста, наочна, може бути використана для попереднього моделювання САК, відпрацювання та дослідження чисельних методів розрахунку. Дозволяє представляти модель системи тільки як блок-схему, типові ланки САК (лінійні) задаються через ПФ, в якій можна редагувати коефіцієнти чисельника і знаменника. SamSim може будувати АЧХ, ФЧХ, АФЧХ і ЧХ в логарифмічному масштабі, також може моделювати у часовій області. Не має можливостей розрахунку нулів і полюсів ПФ моделі. Моделювання (simulation) у часовій і частотній областях не можливо

без зміни моделі: для отримання частотних характеристик необхідно в якості джерела сигналу ставити генератор качаючої частоти ГКЧ. Не має автоматичних засобів визначення показників стійкості та якості САК.

3.3 ANSYS Simplorer (VHDL)

Прикладом мови моделювання дискретних електронних пристроїв на логічному рівні може бути мова VHDL (Very high-speed integrated circuits Hardware Design Language) [21,22], затверджена у якості міжнародного стандарту IEEE 1076; успішно використовується також при синтезі пристроїв. Мова VHDL була модифікована і тепер містить засоби опису аналогових і змішаних моделей. Ці описи разом з базовим варіантом мови VHDL утворюють мову VHDL-AMS (AMS – Analog and Mixed Signal). VHDL – не єдина мова проектування дискретних пристроїв САК. Так, для проектування інтегральних схем широко застосовується Verilog, близька до C++ мова SystemC, мова опису ланцюгів EDIF, мови проектування пристроїв на ПЛИС і ін., але для функціонального проектування (вище схемотехнічного) найбільше поширення одержали VHDL і Verilog. В VHDL також є засоби для поведінкових і структурних описів.

ANSYS Simplorer – це програмне забезпечення для моделювання електромеханічних систем, у яких потрібне проведення міждисциплінарних розрахунків, що й створює повноцінну електромеханічну лабораторію на робочому столі комп'ютера. Розробка мультидоменної системи є складним завданням, що вимагає великих зусиль. У таку систему входить безліч нелінійних компонентів з різних областей фізики: електричної, механічної, термічної і з області управління. Взаємодія між областями робить однодоменні системи неефективними. ANSYS Simplorer – системний інструмент, що дозволяє паралельно використовувати кілька стандартних технік моделювання (включає принципи схеми, блок-схеми, кінцеві автомати, рівняння) і мов моделювання (VHDL-AMS, SML – Simplorer Modeling Language, C/C++). Програма дозволяє моделювати взаємодію компонентів у різних інженерних областях.

У загальному випадку в Simplorer 8 можливі два методи інтегрування (simulation) та їх варіації (в залежності від технології

побудови моделі). Після побудови моделі у вигляді принципової схеми (електричної) програма, використовуючи модифікований вузловий підхід (modified nodal approach), будує систему нелінійних диференціальних алгебраїчних рівнянь (у загальному випадку) та використовує методи Ейлера або трапецій для чисельного інтегрування. При цьому нелінійні рівняння лінеаризуються за допомогою ітераційного методу Ньютона-Рафсона (метод дотичних), а потім вже лінеаризована система рівнянь вирішується за допомогою LU-факторизації (варіація метода Гауса). Також можлива параметрична оптимізація.

Програма дозволяє робити три види аналізу (перехідних процесів, на змінному струмі та на постійному струмі), включаючи побудову діаграм Бode та годографа Найквіста (вже маються відповідні передумовки). Це спрощує процедуру дослідження САК. Але програма «перевантажена» з точки зору інтерфейсу (для цілей даної роботи), має «зайві» модулі, які перешкоджають візуальному сприйняттю та уповільнюють інтуїтивне використання і знайомство з програмою. Маючи ефективний та гнучкий VHDL-AMS язык описання моделей, ця програма більше пристосована (підходить) для моделювання на схемотехнічному рівні, що підтверджує наявність великої кількості моделей у бібліотеці напівпровідникових приладів та інструмента створення характеристик компонента (component characterization tool). Усі перелічені вище «недоліки» вказують на ненайкраще використання цієї програми для досягнення цілей даної роботи. Потрібна більш простіша, більш направлена на дослідження САК програма, що спеціалізується не на схемотехнічному (наприклад, Micro-Cap) рівні моделювання, а на функціональному або структурному. Simplorer дозволяє автоматично вирішувати алгебраїчні петлі (або жорсткі зворотні зв'язки), але алгоритму симуляції потрібно більше ітерацій, а іноді навіть можуть виникати чисельні проблеми з вирішувачем (solver).

3.4 SimApp

SimApp це програма моделювання поведінки ДС в часовій та частотній областях [23]. Можливе моделювання (modeling & simulation) безперервних і дискретних систем. Найкраще підходить

для дослідження систем автоматичного управління. Графічний, блочно-орієнтований інтерфейс з більш ніж 80 основних блоків, розділених на різні категорії. Можливе створення нових блоків в спеціальному вікні дизайну. Збереження часто використовуваних підсистем в бібліотеки для подальшого використання. Результати моделювання представлені у вигляді набору даних в табличній формі, а також у вигляді діаграм: часової, Боде, Нікольса-Блека та Найквіста, які можна експортувати в інші додатки для подальшої обробки. Можливо обчислити власні значення частот (eigenvalues, eigenfrequencies) лінійних систем. Програма підтримує дослідження систем з різними значеннями параметрів і різними зовнішніми збуреннями. SimApp відрізняється від інших подібних продуктів завдяки інтуїтивному управлінню і простотою у використанні, що дозволяє отримати результати протягом декількох хвилин.

Крім того, програма має докладну довідку з функцій та стандартних блоків. SimApp версії 2.6 існує в чотирьох різних редакціях, які відрізняються з точки зору максимального розміру системи (кількість блоків у проекті), функцій і вартості покупки: Workstation (UAH 3,072.84 / EUR 290.00), Light (UAH 1,271.52 / EUR 120.00), Student (UAH 529.80 / EUR 50.00) та Server Edition. Остання має чотири типи ліцензій, їх ціни відрізняються. Розглядалася пробна версія SimApp 2.6 (Workstation edition 30-day Free Trial), яка дозволяє розташовувати у проекті всього лише 10 блоків [29].

SimApp не має структурної чи програмної оптимізації. Хоча у довідкових додатках до програми і викладається дві методики Зіглера-Нікольса (Ziegler-Nichols) для автоматизованого (табличний розрахунок у Microsoft Excel) тюнінгу ПД регуляторів, але відсутня параметрична оптимізація робить її неконкурентоспроможною у випадку, якщо потрібен буде автоматичний пошук коефіцієнтів для створення оптимального регулятора.

Також SimApp не може моделювати (simulate) у часовій області алгебраїчні петлі (algebraic loops) без встановлення у коло зворотного зв'язку ланки затримки чи аперіодичної ланки (бо вихідна величина безпосередньо залежить від вхідної та вихідної величини), тобто процес подолання проблеми алгебраїчних петель у кращому випадку автоматизований, але не автоматичний у цій програмі. Зараз вже існують програми, що можуть самостійно (тобто автоматично)

вирішувати проблему алгебраїчних петель за рахунок символічних перетворень на етапі створення рівнянь ДС перед процесом симуляції.

3.5 Wolfram SystemModeler (MathModelica)

Раніше цей проект мав назву MathModelica [24], потім його викупила компанія Wolfram. Wolfram SystemModeler, зі слів виробника, є найбільш повним інструментальним засобом для фізичного і чисельного моделювання. На відміну від інших систем, SystemModeler не вимагає придбання додаткових компонентів (як у MapleSim та Simulink) і в повній мірі підтримує стандартну мову фізичного моделювання Modelica. Також SystemModeler передбачає повне з'єднання з системою Mathematica для отримання найбільш інтегрованого робочого процесу фізичного, чисельного моделювання і аналізу. SystemModeler реалізує мову Modelica, яка користується перевагами компонентно-орієнтованого моделювання, де моделюються потоки в компонентах. Це дає суттєві переваги порівняно з блочно-орієнтованим моделюванням. Архітектура програми представлена на рисунку 3.2.

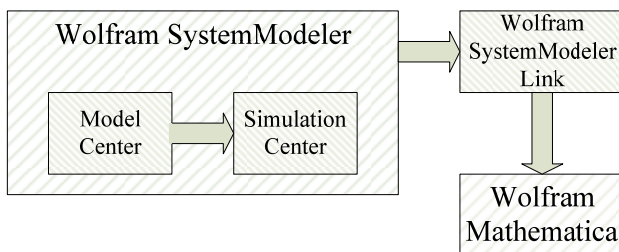


Рисунок 3.2 – Структура програми SystemModeler та зв'язок з Wolfram Mathematica

Серед функціональних можливостей Wolfram SystemModeler можна відзначити:

- використання за основу непатентованої, об'єктно-орієнтованої мови Modelica, що спирається на рівняння;
- графічний інтерфейс для drag-and-drop моделювання;
- текстовий інтерфейс для моделювання на мові Modelica за допомогою рівнянь;

- некаузальне (компонентно-орієнтоване) і каузальне (блочно-орієнтоване) моделювання;
- ієрархічне моделювання (modeling);
- велика кількість вбудованих бібліотек моделей;
- моделювання гібридних систем;
- багатодоменне моделювання, що включає: механіку (в одному і в трьох вимірах), електроніку, гідравліку, термодинаміку, елементи керування, системну біологію;
- створення автономного *.exe файлу для подальшого відтворення результатів моделювання (simulation) без виклику SystemModeler;
- інтеграція з системою Mathematica для аналізу та документування моделей і результатів комп'ютерного симулювання.

Є кілька редакцій цієї програми. Спеціальна редакція для студентів (Annual and Semester Editions – річна та семестрова редакції) коштує \$75 та \$35, академічна редакція – \$350, державна редакція – \$1838 та комерційна редакція – \$2450. Також є безкоштовна пробна версія, що може працювати протягом 30 днів з моменту інсталяції. Саме пробна версія SystemModeler 3.0.0 була розглянута.

Інтерфейс модуля Model Center має, зображений на рисунку 3.3.

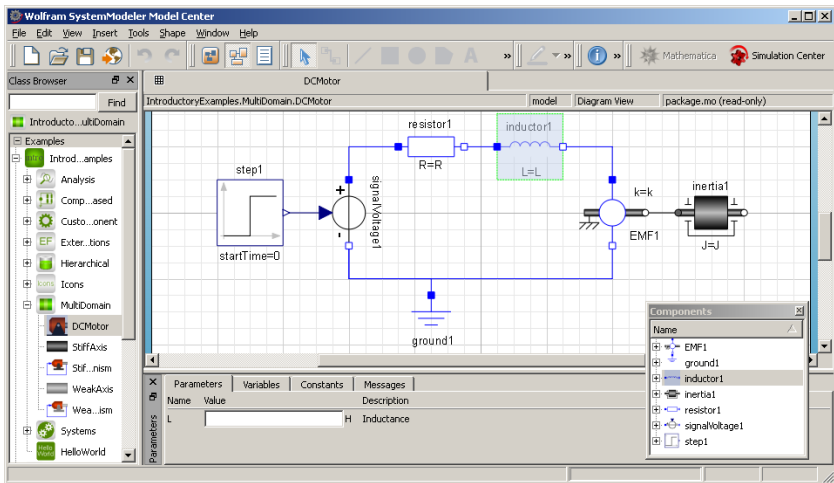


Рисунок 3.3 – Головне вікно Model Center з відкритим прикладом (DCMotor)

SystemModeler не має модулів оптимізації, оскільки є у деякому сенсі дочірньою програмою, тому для виконання параметричної оптимізації треба мати батьківську програму Wolfram Mathematica, яка купується за окремі кошти. Відсутність такої функції є суттєвим недоліком, отже ця програма, незважаючи на наявність потужних вирішувачів, не може бути використана як основна у даній роботі; крім того має не дуже вдалу архітектуру (Model Center та Simulation Center рознесені як окремі програми та мають різні виконавчі файли .exe, що збільшує час переходу від однієї до іншої) та незручні інструменти і підхід (спосіб) до моделювання (modeling), тобто створення моделі. Також програма не має передумов можливостей для відображення та аналізу частотних характеристик (АЧХ, ФЧХ, різні годографи), що є важливим аспектом при дослідженні САК; не має інтерактивної довідкової системи, яка могла би пояснювати незрозумілі елементи інтерфейсу чи опції.

3.6 MapleSim

Пакет MapleSim [25] являє собою потужний інструмент імітаційного моделювання для самих різних областей застосування. Реалізовані в ньому технології фізичного моделювання деталей і систем допоможуть конструкторам швидше готувати свої творіння до виробництва. Пакет дозволяє просто намалювати блок-схему роботи потрібної системи, і MapleSim автоматично згенерує всі рівняння, що описують роботу моделі. На думку авторів, MapleSim відкриває нову еру в конструюванні інженерних систем, скорочуючи тривалість циклу розробки з декількох місяців до декількох тижнів. У моделях пакета MapleSim можна комбінувати фізичні компоненти з традиційними логічними блоками ланцюгів управління. Блок-схема моделі може виглядати точно так само, як описувана нею реальна система. З готових компонентів конструктор може зібрати найскладнішу і багатофакторну модель. Чіткий контроль використовуваних одиниць виміру допомагає уникнути помилок при переході від однієї системи одиниць до іншої.

Також в ході конструювання моделі можна одночасно готувати всю супровідну документацію до проектних робіт. Розвинуті алгоритми символічних обчислень дозволяють автоматично

спрощувати складні моделі. Крім того, відмова від традиційного чисельного моделювання на користь символічних можливостей платформи Maple допомагає пакету MapleSim домогтися небувало високої точності моделювання і уникнути помилок, пов'язаних з ручним перерахунком формул.

Пакет MapleSim містить більше 500 готових модельних компонентів для 10 прикладних областей, таких, як електричні мережі та пристрої, механіка, системи управління та теплові мережі. Всі ці компоненти систематизовані і розбиті на зручні набори. На даний момент безкоштовна версія пакету MapleSim поширюється у вигляді пілотної демо-версії. Щоб випробувати можливості MapleSim на практиці, потрібно зареєструватися для участі в пілотній програмі на сайті розробника та дочекатися поки з вами зв'яжуться представники компанії для огляду програми у Live-режимі. Вигляд головного вікна програми відповідає рисунку 3.4.

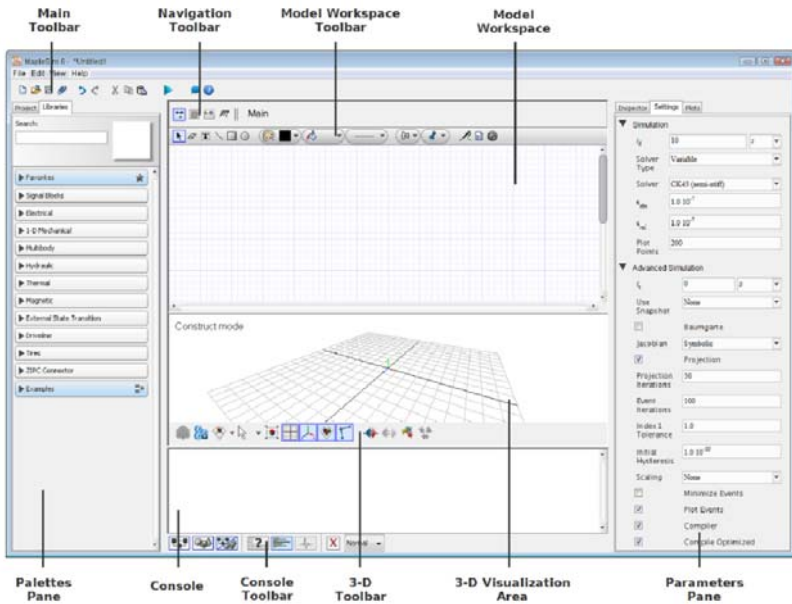


Рисунок 3.4 – Головне вікно програми MapleSim 6

MapleSim 6 володіє наступними ключовими особливостями [32]:

- потужне символічне та числове математичне ядро (Math Engine);
- потужна платформа Modelica (для некаузального моделювання зокрема);
- мультидоменне моделювання із вбудованими компонентами;
- середовище фізичного моделювання з технікою Drag-and-Drop;
- компоненти, основані на рівняннях;
- підтримка технології багатьох тіл (Multibody Technology);
- генерація оптимізованого коду;
- широкі опції солверів/вирішувачів при симуляції;
- доступність рівнянь структурного (системного) рівня;
- керування одиницями вимірювання для кожного об'єкту;
- широкий спектр можливих видів та способів інтерактивного аналізу;
- функції візуалізації у 2D та 3D;
- інтеграція усієї інформації стосовно проекту та зручне її представлення і зберігання у єдиному файлі.

Є кілька редакцій програми MapleSim 6, що різняться функціональністю та ціною: Student Edition (\$124), Commercial (\$6895), Academic (\$1555), Government (\$6550). При чому батьківська програма Maple продається окремо (\$2,845.00 – комерційна версія, \$124 – студентська версія). Єдиною безплатною редакцією програми є редакція Live Demo, але вона є важкодоступною та незручною на етапі отримання її від компанії-виробника та надто обмеженою для використання з боку компанії. Документації до неї доступна з сайту компанії MapleSoft [25].

З одного боку MapleSim має і багато вбудованих бібліотек, і язык Modelica для описання моделей, а з іншого – повна неможливість роботи програми без батьківського пакету Maple (який купується за окремі кошти). Виходячи з довідкових матеріалів до програми, вона не має вбудованих модулів оптимізації (як і SystemModeler) і дозволяє робити оптимізацію лише у Maple; для досягнення кращих результатів (стосовно оптимізації) пропонується використовувати як доповнення Global Optimization Toolbox, який має додаткові методи оптимізації та спеціалізується на цьому, але його вартість не врахована ні в MapleSim, ні в сам Maple, отже потрібно докуповувати це доповнення окремо.

3.7 MATLAB / Simulink та Simscape

Система математичного моделювання MATLAB / Simulink (компанії MathWorks) [16] 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 управління 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 Сі, 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 (наприклад, Power System Blockset – моделювання електротехнічних пристроїв, Digital Signal Processing Blockset – набір блоків для розробки цифрових пристроїв, Control System Toolbox – пакет для розробки систем управління 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. Окремий напрямок досліджень пов'язаний з можливим переходом в область лінеаризованих систем, де реалізовано весь арсенал методів лінійного аналізу. Засоби візуалізації дають можливість стежити 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 приходиться 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 механічних та електричних систем відповідно. А також тим, що розробники більшості сучасних пакетів фізичного мультидоменного моделювання передбачають можливість підключення бібліотек Simulink до інших програм.

Програма Simscape [26] буде розглянута у тому ж самому підпункті, що і MATLAB \ Simulink, бо ці програми пов'язує одна компанія-виробник – MathWorks. 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 управління 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 параметризування моделі з використанням змінних та виразів MATLAB, а також проектування моделі об'єкту управління фізичної системи, система управління якої може бути побудована в Simulink. Для розгортання моделі в інших середовищах моделювання Simscape підтримує генерацію Сі-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. Проте, ціни ліцензій для індивідуального (Individual License) використання (програма повнофункціональна) були знайдені. Також виявилось, що 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), Simulink Design 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.

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.

В програмі MATLAB широкі можливості щодо рішення ODE, солвери поділяються на методи зі змінним кроком та постійним кроком. Параметрична оптимізація у MATLAB можлива за допомогою додаткового інструментарію Optimization Toolbox – прикладний пакет для розв'язання оптимізаційних задач і систем нелінійних рівнянь.

3.8 VisSim

VisSim – пакет компонентного візуального моделювання фірми Visual Solutions, призначений для розробки і моделювання динаміки безперервних, дискретних та гібридних систем [27]. За своїми функціональними можливостями і способом завдання початкової інформації VisSim близький до пакету MATLAB / Simulink. Simulink більш поширений, тим не менш, VisSim має чимало шанувальників і займає помітну частку ринку інженерних пакетів. VisSim – один з найбільш яскравих представників систем, що реалізують концепцію структурного (каузального) моделювання. Основним інструментом створення моделей є типові блоки «вхід-стан-вихід». Подібно MATLAB / Simulink кожен типовий блок VisSim реалізує математичну модель або забезпечує візуалізацію того чи іншого явища, процесу або пристрою. Базова бібліотека VisSim 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, VisSim має широкий набір інструментів оцінки якості, стійкості, синтезу, корекції, оптимізації, лінеаризації, налагодження об'єктів в контурі моделі та програмування цифрових сигнальних процесорів. Вирішувач VisSim інтерпретуючого типу, функціонує в динамічному режимі з можливістю online-взаємодії з

обладнанням реального часу. У складі пакету вирішувача VisSim реалізовані як явні, так і неявні методи. Можливості моделювання гібридних систем у пакеті VisSim приблизно аналогічні Simulink. VisSim призначений насамперед для моделювання безперервних систем. Загальним принципом гібридного моделювання в VisSim є використання готових гібридних блоків або перемикання заздалегідь заготовлених альтернативних ділянок блок-схем. Подібно Simulink, пакет VisSim включає в себе ряд додаткових модулів, що розширюють його можливості у конкретних предметних областях, а так само інструменти інтеграції з пакетами MATLAB, Mathcad і транслятор проектів програми Simulink. В якості обмежень пакету VisSim можна відзначити відсутність альтернатив мові блок-схем. Крім того, VisSim 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. Але для восьмої версії VisSim існує додатковий модуль State Charts, який дозволяє оперувати UML-сумісними (Unified Modeling Language) графічними діаграмами станів і редагувати та генерувати Сі-код для кінцевих автоматів, створених у цьому середовищі. Більшість додаткових модулів VisSim представлені на рисунку 3.5.

VisSim, окрім інших редакцій, випускається у вигляді академічної (приблизна ціна – 5000грн.) та професійної (28000грн.) редакцій, версія VisSim 3.0 русифікована та є безкоштовною (вільно розповсюджується) для персонального (академічного) використання з деякими обмеженнями. З сайту розробника ціни на нові версії програми отримати не можливо, поки не зробити відповідне замовлення або запит. Останніх свіжих версій VisSim у вільному доступі немає, але автори програми пропонують зареєструватися на їхньому сайті, щоб мати можливість зробити запит на безкоштовну пробну версію VisSim 8.0.

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 російськомовної літератури через розповсюдженість та широку вживаність програми, взаємодія з розповсюдженими відомими програмними пакетами (MATLAB, Simulink, Mathcad, Maple, Excel).

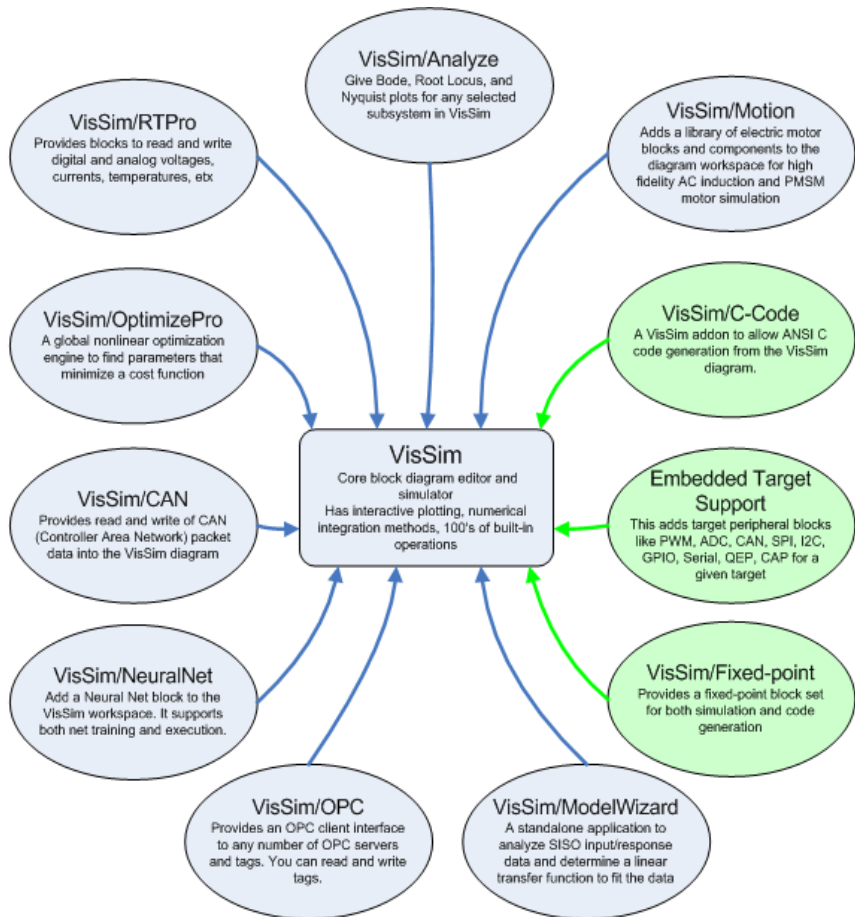


Рисунок 3.5 – VisSim та додаткові модулі

Недоліки VisSim: 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 3.6. 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.

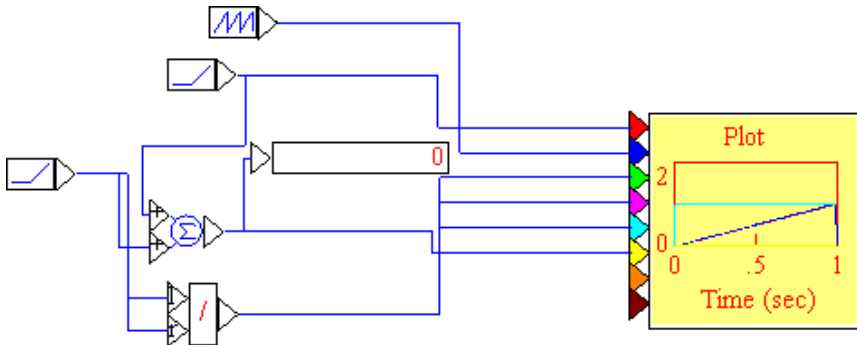


Рисунок 3.6 – Ілюстрація відсутності вузлів з'єднання в VisSim

3.9 Dymola (Modelica)

Dymola [28] 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. 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.

Гнучкість і відкритість пакета Dymola дозволяє користувачам створювати свої власні бібліотеки моделей, описуючи їх на внутрішній мові опису блоків, або модифікувати вже існуючі моделі

під свої конкретні 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. Архітектура програми представлена на рисунку 3.7 [46].

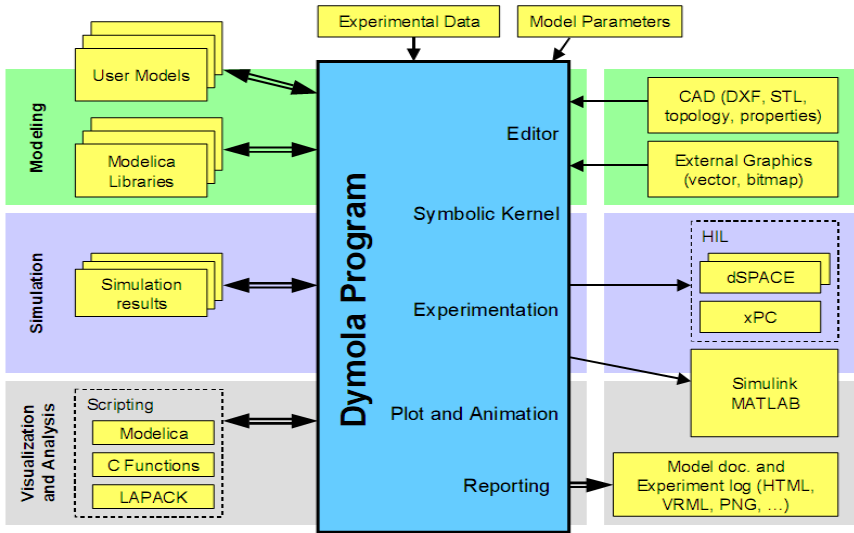


Рисунок 3.7 – Архітектура Dymola

Коштує Dymola приблизно \$3800.

3.10 20-sim

Пакет моделювання 20-sim [29] призначений для моделювання динаміки технічних систем – механічних, електричних, гідравлічних, а також складних систем, що містять елементи всіх перелічених. Пакет підтримує візуальне компонентне моделювання – модель вводиться звичайним для пакетів такого типу методом – компоненти вибираються з бібліотеки, переносяться на робочий стіл і з'єднуються зв'язками. 20-sim дозволяє працювати як з орієнтованими блоками, так і з не орієнтованими, що дуже зручно при моделюванні систем

управління фізичними об'єктами і установками. Бібліотеки базових компонентів включають: бібліотеку типових одновимірних направлених ланок (Signal) – джерел, вимірників, перетворювачів, блоків математичних операцій і т.д.; бібліотеку елементів графів зв'язків (Bond Graph), як найпростіших універсальних енергетичних компонентів; бібліотеки механічних, електричних, гідравлічних, теплових елементів (Iconic Diagram). В якості прикладу на рисунку 3.8 представлена модель системи, де енергетична частина представлена графом зв'язків, а керуюча – блок-схемою, що включає спрямовані ланки.

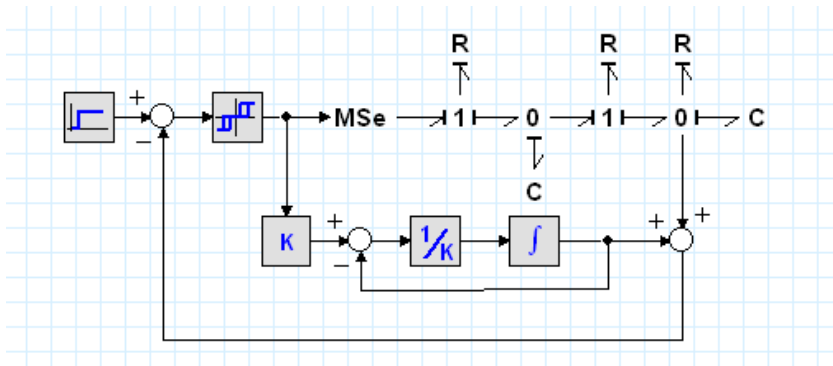


Рисунок 3.8 – Приклад моделі системи в 20-sim

Пакет 20-sim має ряд розширень, одним з яких є Mechatronics Toolbox, що включає в основному моделі різних електромеханічних пристроїв. Важливо відзначити, що більшість моделей, представлених в даному розширенні, відносяться до конкретних мехатронних пристроїв, що підтримуються і супроводжуються виробниками технічних засобів. Вони точні, докладні, закривають всі аспекти функціонування пристроїв і з цієї точки зору дуже корисні проектувальникам, що займаються розробкою МС. Пакет допускає створення користувачем власних бібліотек. В якості внутрішньої мови опису моделей використовується мова, подібна мові Modelica або мові середовища Maple, але є більш зрозумілою і простою у вивченні. Також 20-sim має розвинуті засоби анімації, в тому числі 3D анімацію. 20-sim має потужний вирішувач, що дозволяє отримувати чисельне рішення як ODE (ODE), так і диференціально-алгебраїчних рівнянь

(DAE), використовуючи однокрокові і багатокрокові методи різних порядків. Також програма має 8 алгоритмів оптимізації (2 прямих, 6 градієнтних).

20-sim має широкі можливості щодо моделювання (modeling) та дослідження САК, також має інтуїтивно зрозумілий і не перевантажений інтерфейс. Привабливою програму також роблять можливість фізичного мультидоменного моделювання та різноманітність форм представлення моделей систем: рівняння у рядковій математичній нотації, орієнтовані блок-схеми, акаузальні традиційні (Iconic) схеми (принципові) та ненаправлені зв'язані графи (графи зв'язків). Програма має три види версій або редакцій (з ліцензіями Academic та Corporate): Viewer, Standard, Professional. Причому версія Viewer безкоштовна, завантажується з сайту виробника без авторизації (легкодоступна) та не має обмежень (на відміну від Standard), тобто володіє повною функціональністю (як Professional). Мінімальні ціни 20-sim Standard та 20-sim Professional – \$700 та \$1400 відповідно (для академічної ліцензії), в той час як для корпоративної ліцензії вартість цих редакцій збільшена в 6 разів (\$4200 та \$8400 відповідно). Програма має деякі переваги та особливості:

- 32-бітний розрахунковий машинний код, що дозволяє в кілька раз підвищити швидкість розрахунків при симуляції;
- принцип відкритості, забезпечуваний механізмами підключення зовнішніх програм (Matlab/Simulink) і можливістю вільно переглядати, редагувати існуючі й створювати нові бібліотеки моделей;
- принцип вкладеності або ієрархічності структур (глибина вкладеності не обмежена), що особливо актуально при моделюванні складних ДС;
- значний обсяг бібліотеки моделей, що в багатьох випадках дозволяє сформувати математичну модель динаміки складної технічної системи без необхідності створення нових спеціалізованих ММ;
- дуже проста в освоєнні Modelica-подібна мова опису моделей SIDOPS+, яка використовує математичну нотацію для запису рівнянь;
- присутній потужний інструментарій частотної області, що включає FFT-аналізатор, лінеаризатор моделей і редактор лінійних систем;

- мається універсальний редактор лінійних систем, який дозволяє редагувати систему (модель) як простір станів, передатну функцію, нулі-полюса й перетворювати їх між собою, а також містить опції показу діаграм Бode, годографа Найквіста, графіка Нікольса, діаграм нулів-полюсів, реакції системи на функцію Хевісайда;

- можливість транслювати будь-яку модель у Сі-код для використання в Matlab/Simulink або автономний Сі-код для використання в С и С++ програмах;

- наявність вичерпної контекстної довідкової системи у формі типової довідки WINDOWS для кожної моделі стандартної бібліотеки й елемента інтерфейсу.

3.11 Етапи виконання лабораторної роботи

1. Аргументуйте вибір САЕ для дослідження САК.
2. Ознайомтеся із інтерфейсом обраної програми для дослідження (VisSim, 20 sim, Simulink).
3. Складіть модель системи, заданих в л.р.1 та 2 в обраній програмі, підключить приклади для візуалізації.
4. Отримайте основні характеристики системи.

3.12 Контрольні питання.

1. Огляд САЕ систем.
2. Огляд CAS систем.
3. Структура САЕ системи (приклад).
4. Критерії порівняння САЕ систем.
5. Критерії для вибору програми для проектування САК.

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ САК. СИНТЕЗ ПІД-РЕГУЛЯТОРА. СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ ЛІНІЙНОЇ САК

4.1 Проектувальник регуляторів та редактор лінійних систем в 20-sim

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

Фактично, проектувальник регуляторів в програмі 20-sim [19] (CDE) має інтерфейс і всі можливості LSE, а додатково ще опції «Sub System» та «Additional Ports» (інтерфейс – на рисунку 4.1).

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

Рисунки 4.2, 4.3, 4.4 показують опції редактора фільтрів для деяких типів регуляторів або фільтрів.

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

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

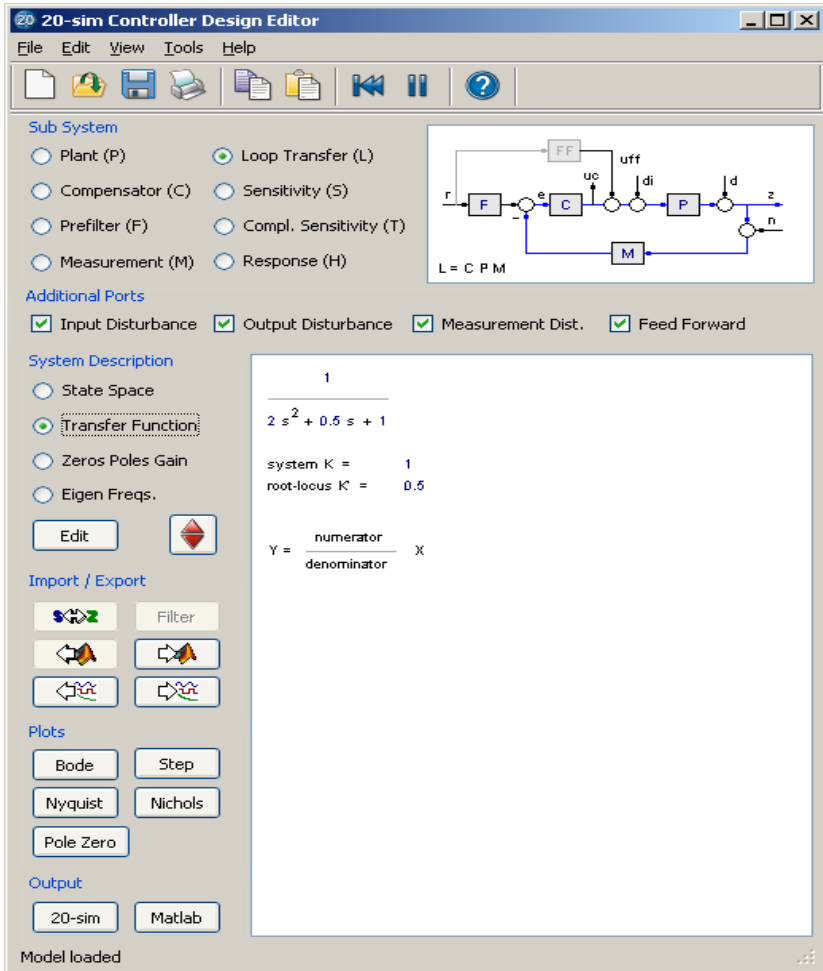


Рисунок 4.1 – Головне вікно CDE

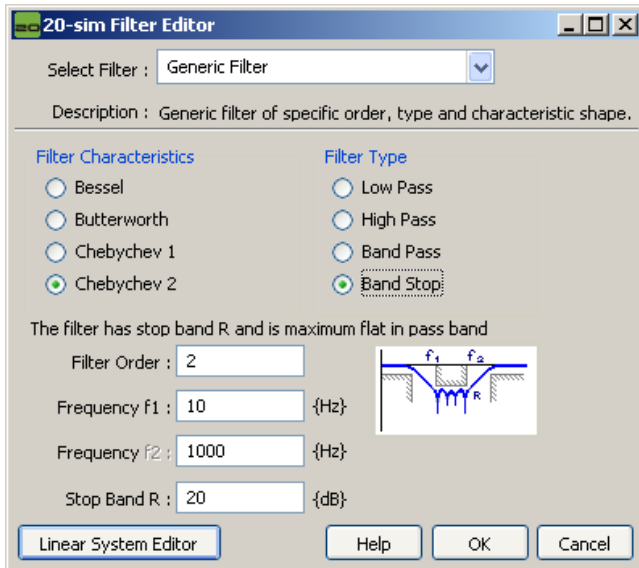


Рисунок 4.2 – Параметри фільтрів загального шаблону

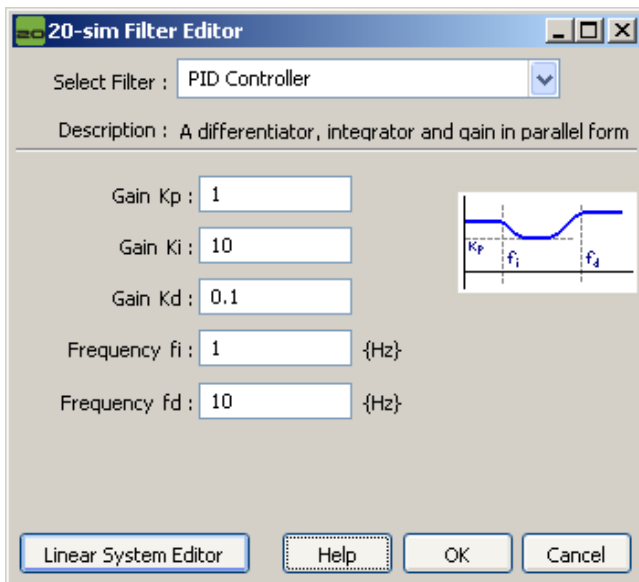


Рисунок 4.3 – Опис паралельного ПІД-регулятора

Вікно для параметризації ПІД наведено на рисунку 4.3; регулятор описується трьома коефіцієнтами підсилення (для зони НЧ – K_i , ВЧ – K_d та у смузі пропускання K_p) та двома частотами спряження (інтегруючої частини f_i та диференціюючої – f_d). Ілюстрація сенсу коефіцієнтів – на рисунку у правому куті вікна.

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

ПІД-компенсатор (рис. 4.4) має у своїй структурі (окрім самого регулятора) фільтр із спадаючою АЧХ в області ВЧ після значення $1/\tau_h$ (параметр «HF roll-off tau h»), всі частоти з більшим значенням відфільтровуються.

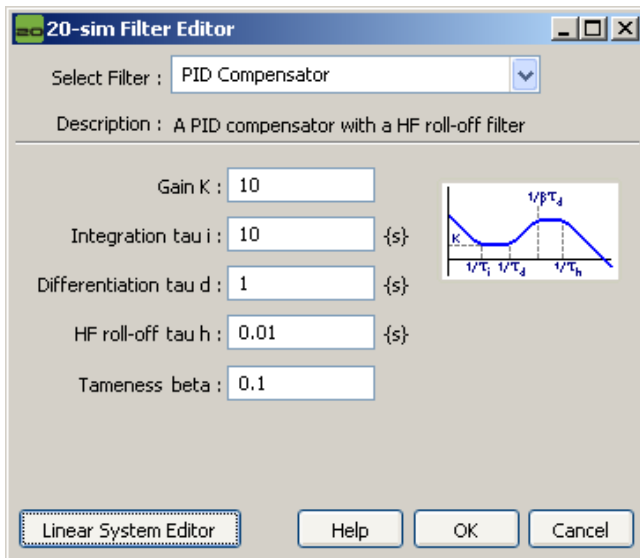


Рисунок 4.4 – Опис ПІД-компенсатора у редакторі фільтрів

Такий компенсатор описується постійними часу інтегруючої (*Integration tau i*) τ_i та диференціюючої частини (*Differentiation tau d*) τ_d ; коефіцієнтом підсилення K на інтервалі частот від $1/\tau_i$ до $1/\tau_d$; коефіцієнтом «слухняності» (*tameness*) або крутизни (нахилу) β , що впливає на поведінку диференціювання, тобто на крутизну АЧХ в зоні $1/\tau_d \dots 1/\beta\tau_d$. Виходячи з передавальної функції ПІД-компенсатора,

можна сказати, що використовується послідовне з'єднання внутрішніх елементів (П-, І-, Д-частин та фільтра).

Редактор фільтрів пропонує для синтезу декілька типів ПІД-регуляторів з різним набором вхідних параметрів. Проектувальник регуляторів (CDE) дозволяє синтезувати повну структурно завершену САК з контролем проміжних сигналів, використовуючи будь-яку форму опису, представлену в LSE.

Структурно повна система в CDE може бути представлена рисунком 4.5.

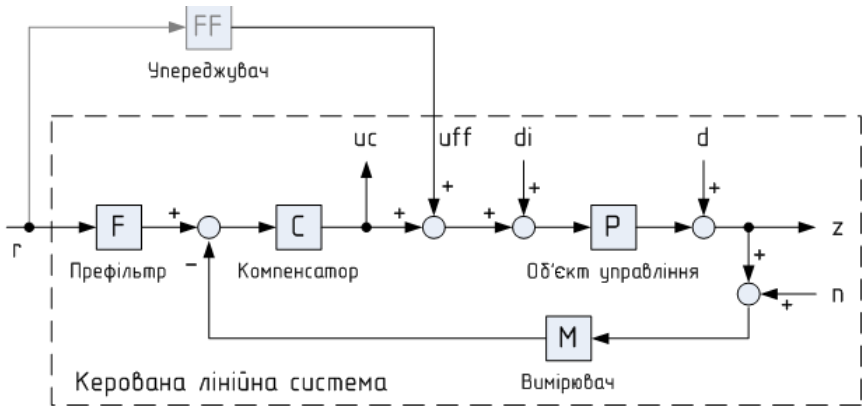


Рисунок 4.5 – Структура САК, що використовується в CDE

Така система складається з об'єкта управління P (Plant), регулятора або компенсатора C (Compensator), префільтра F (Prefilter), вимірювача M (Measurement), упереджувача FF (Feed Forward), та ряду вхідних/вихідних сигналів: r – вхідний вплив на систему або завдання, u_c – чистий вихідний сигнал компенсатора, u_{ff} – вхідний сигнал від упереджувача, d_i – вхідне збурення об'єкта управління (input disturbance), d – вихідне збурення об'єкта управління (output disturbance), z – контрольований результуючий вихідний сигнал системи, n – збурюючий вплив з боку вимірювача.

CDE також дозволяє оцінити чутливість системи S (Sensitivity), передавальну функцію замкнутого контуру L (Loop Transfer), комплексну чутливість T (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: $W(p)=e^{-T \cdot p}$). Взагалі, моделі з часовими затримками не можуть бути лінеаризовані, тому що немає прямого відношення (зв'язку) між входами і виходами моделі. Однак, для систем з контурами управління корисно було б побачити, як затримки цих контурів неминуче впливають на поведінку моделі. Тому в LSE (та CDE) до моделі можна додати вихідну затримку. Практично всі САЕ, розглянуті вище (окрім, наприклад, SamSim), дозволяють працювати з ланкою чистого запізнення тільки в часовій області, але не можуть відпрацьовувати її у частотному домені.

Приклад частотних характеристик моделі з вихідною затримкою, розробленою в редакторі лінійних систем 20-sim, приведено на рисунку 4.6.

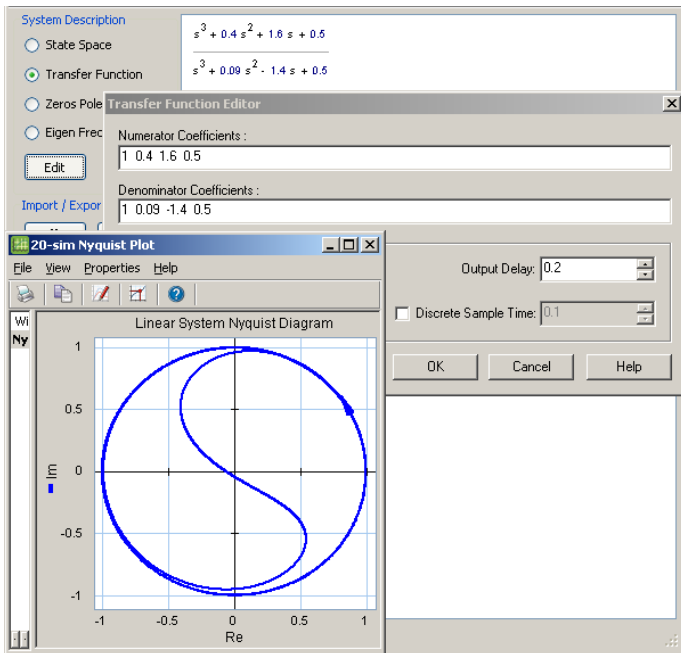


Рисунок 4.6 – ЧХ системи з вихідною затримкою (0,2с), зробленою в LSE

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).

4.2 Методика моделювання САК в 20-sim

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) апріорна корекція моделі;
- д) компонентно-топологічна (апостеріорна) корекція моделі.

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

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

Треба відмітити, що задача вибору методу симуляції (алгоритму моделювання) дуже комплексна, багатокритеріальна, залежить від багатьох факторів.

Етап параметричної оптимізації, не відноситься до етапу симуляції, але залежить від нього: якщо симуляція призводить до неадекватних результатів, то проводити оптимізацію, у загальному випадку, не має сенсу (окрім випадків, коли варіюється параметр моделі, що відповідає за її жорсткість). Оптимізація є невід'ємною складовою сучасних САЕ для моделювання САК (є необхідність у знаходженні оптимальних коефіцієнтів регуляторів при налагодженні САК; дослідження алгоритмів оптимізації розглядається на наступних заняттях).

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

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

Для нескладних САК рекомендується будувати модель у формі BD. Для комплексних САК рекомендується користуватися інкапсуляцією і будувати модель у змішаній формі представлення з використанням BG або ID для силових (енергетичних) частин САК та BD – для управляючих (сигнальних). Якщо треба побудувати модель, що швидко «читається» та більш зрозуміла, тоді варто використовувати форму ID замість BG (бо графи зв'язків специфічні та маловідомі). Також треба враховувати наявність бібліотек для певної форми представлення, особливо для BD та ID (форма BG позбавлена цього недоліку, бо має визначений уніфікований набір елементів). Якщо модель нелінійна, то рекомендується застосовувати BD. Якщо модель мультидоменна і немає можливості використовувати форму ID, то краще застосовувати BG для її побудови.

Для дослідження моделі у частотній області рекомендується використовувати форму TF (або BD з попередньою лінеаризацією для нелінійних моделей) і застосовувати CDE, як універсальний і багатофункціональний проектувальник САК. Також зручно використовувати форму BD з інкапсульованими підсистемами у формі TF. Форма SM не має власної бібліотеки елементів; її треба застосовувати, якщо дослідник на потрібному рівні володіє мовою SIDOPS+, щоб запрограмувати автомат станів. Якщо при побудові моделі виявилось, що немає потрібного елемента у жодній бібліотеці (математичної моделі або графічної піктограми), то можна використати представлення на основі рівнянь, і написати потрібну частину моделі «вручну». Практично кожен елемент будь-якої бібліотеки 20-sim на нижньому рівні описується рівняннями у

математичній нотації та кодом SIDOPS+, таким чином, можна легко редагувати модель у будь-якій формі представлення.

В 20-sim дозволяється вводити диференціюючі елементи у модель, але це не рекомендується робити, бо вони ускладнюють роботу компілятора. На етапі компіляції, якщо це можливо, 20-sim виконує символічні перетворення ММ до інтегральної форми (див. підрозділ 3.3), бо вона більш бажана для алгоритмів симуляції та підвищує їх ефективність. Але іноді (коли функція дуже складна) навіть безпосереднє диференціювання не може бути застосоване. На цей випадок в симуляторі існують методи диференціювання назад, які можуть вирішити цю проблему.

Також для зменшення навантаження на компілятор та збільшення ефективності методів симуляції рекомендується уникати алгебраїчних петель при створенні моделі та унеможливити появу високорангових структурних сингулярностей.

4.3 Етапи виконання лабораторної роботи

1. Виконайте автоматизований синтез САК із використанням різних інструментів програми 20 sim.
2. Порівняйте результати, зробіть висновки про область придатності використаних інструментів автоматизованого синтезу.
3. Використовуючи наведену в п.4.6 методику, промодельуйте задану САК.
4. Зробіть висновки про показники якості синтезованої САК.

4.4 Контрольні питання

1. Проектувальник регуляторів в 20-sim.
2. Редактор лінійних систем в 20-sim.
3. Структура САК, що використовується в CDE.
4. Параметри ПІД регулятора, його призначення та характеристики [30].
5. ПІД-регулятор як фільтруючий пристрій.

5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 САК 3D ПРИНТЕРА

5.1 Кроковий двигун – поширений актуатор в роботехнічних системах

Мехатронна система 3D принтеру є системою автоматичного керування та складається з інформаційної підсистеми, підсистеми силової електроніки та механічної підсистеми. Останні дві можна назвати системою електроприводу. Механічне переміщення робочої зони здійснюється за допомогою крокових двигунів (КД, Stepper Motor).

КД це електричний двигун, в якому імпульсне живлення електричним струмом призводить до того, що його ротор не обертається неперервно, а виконує щоразу обертальний рух на заданий кут. Завдяки цьому, кут повороту ротора залежить від числа поданих імпульсів струму, а кутова швидкість ротора точно рівна частоті імпульсів помноженій на кут повороту ротора за один цикл роботи двигуна. Основною відмінністю крокових моторів від інших електричних двигунів є дискретне обертання ротора (вала) на певний кут при подачі імпульсу в обмотку статора. Це переміщення називається кроком, звідки і пішла назва самого мотора. В основу роботи крокового двигуна покладено принцип взаємодії магнітних полів, що передбачає взаємне притягання різноименних полюсів.

КД є трьох видів, за способом реалізації:

- мотор зі змінним магнітним опором: конструкція ротора не передбачає розміщення в ньому постійних магнітів;
- двигун з постійними магнітами, що входять в конструкцію ротора, з числом кроків на оберт до 48 (відповідає куту повороту 7,5о за один крок);
- гібридний двигун, що забезпечує найбільшу точність позиціонування, момент обертання і швидкість з кроком до 0,9о (400 кроків за один оберт ротора).

Крім того, за особливостями конструкції і наявності додаткових пристроїв, можна розділити крокові двигуни на наступні види:

- біполярні, що мають для кожної фази тільки по одній обмотці, і уніполярні мотори, в яких передбачено відведення від середини кожної обмотки, що дозволяє змінювати полярність;

- магнітного поля без застосування складних драйверів;
- двигуни з енкодером, що дозволяють контролювати точність обертання.

5.2 Електричний привод

Електричний привод – керована електромеханічна система, призначена для перетворення електричної енергії в механічну і управління цим процесом.

В якості органів перетворення руху можуть бути використані крокові двигуни або серводвигуни, але зазвичай використовують крокові двигуни. Для управління процесом переміщення та зворотного зв'язку використовується драйвер. Структурну схему електричного приводу наведено нарис.5.1, тут КД1, КД2 – крокові двигуни.



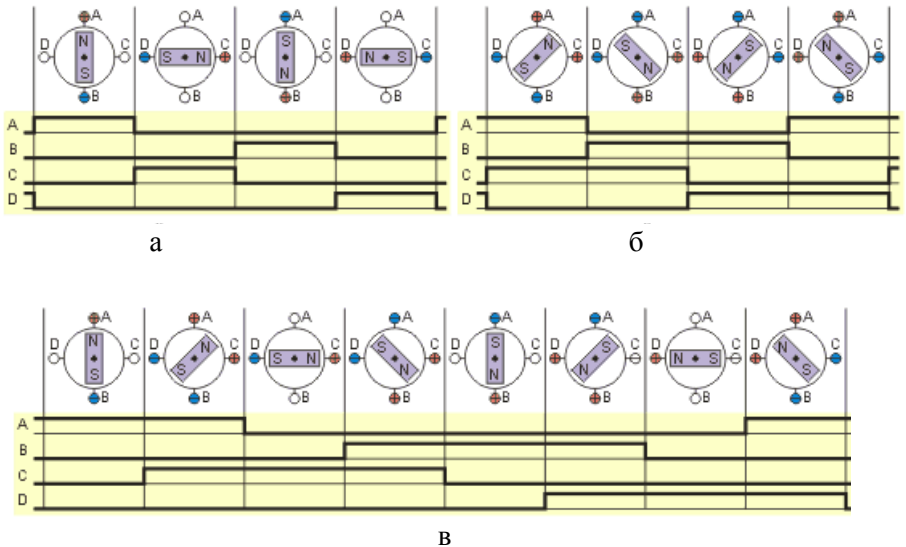
Рисунок 5.1 – Структурна схема електричного приводу, КД1, КД2 – крокові двигуни

Драйвер крокової двигуна – електронний пристрій, який змушує кроковий двигун "крокувати" за сигналами управління. Існують спеціалізовані мікросхеми драйверів для біполярних двигунів, з використанням яких драйвер виходить не складніше, ніж для уніполярного двигуна. Наприклад, це мікросхеми L293E, L298N або L6202 фірми SGS-Thomson, PBL3770, PBL3774 фірми Ericsson, NJM3717, NJM3770, NJM3774 фірми JRC, A3957 фірми Allegro, LMD18T245 фірми National Semiconductor.

Існує кілька способів управління фазами крокової двигуна.

Перший спосіб забезпечується почерговою комутацією фаз, при цьому вони не перекриваються, в один момент часу включена тільки одна фаза (рис.5.2, а). Цей спосіб називають "one phase on" full step або wave drive mode. Точки рівноваги ротора для кожного кроку збігаються з «природними» точками рівноваги ротора. Недоліком цього способу управління є те, що для біполярного двигуна в один і той же момент часу використовується 50% обмоток, а для уніполярного тільки 25%. Це означає, що в такому режимі не може бути отриманий повний момент.

Другий спосіб – управління фазами з перекриттям: дві фази включені в один і той же час. Його називають "two-phase-on" full step або просто full step mode. При цьому способі управління ротор фіксується в проміжних позиціях між полюсами статора (рис. 5.2, б) і забезпечується приблизно на 40% більший момент, ніж в разі однієї включеної фази. Цей спосіб управління забезпечує такий же кут кроку, як і перший спосіб, але становище точок рівноваги ротора зміщена на півкроку.



а) повнокроковий режим з однією фазою; б) повнокроковий режим з двома фазами
в) напівкроковий режим

Рисунок 5.2 – Режимы работы привода 3D принтера

Третій спосіб є комбінацією перших двох і називається напів-кроковим режимом, "one and two-phase-on" half step або просто half step mode, коли двигун робить крок в половину основного. Цей метод управління досить поширений, таяк к двигун з меншим кроком коштує дорожче і дуже заманливо отримати від 100-крокового двигуна 200 кроків на оборот. На кожному другому кроці заживлена лише одна фаза, а в решті випадків – дві (рис. 5.2, в). В результаті кутове переміщення ротора становить половину кута кроку для перших двох способів управління. Крім зменшення розміру кроку цей спосіб управління дозволяє частково позбутися явища резонансу. Напів-кроковий режим зазвичай не дозволяє отримати повний момент, хоча найбільш досконалі драйвери реалізують модифікований підлозі кроковий режим, в якому двигун забезпечує практично повний момент, при цьому розсіює потужність не перевищує номінальної.

Ще один спосіб управління називається мікро-кроковим режимом або micro stepping mode. При цьому способі управління ток в фазах потрібно міняти невеликими кроками, забезпечуючи, таким чином, дроблення половинного кроку на ще менші мікро кроки. Коли одночасно включені дві фази, але їх струми не рівні, то становище рівноваги ротора буде лежати не в середині кроку, а в іншому місці, визначеному співвідношенням струмів фаз. Змінюючи це співвідношення, можна забезпечити деяку кількість мікро кроків всередині одного кроку. Крім збільшення роздільної здатності, мікро-кроковий режим має Напівкроковий режим є окремим випадком мікро-крокового режиму.

В повнокроковому режимі з двома включеними фазами положення точок рівноваги ротора зміщені на півкроку. Потрібно відзначити, що ці положення ротор приймає при роботі двигуна, але станон ротора не може зберігатися незмінним після виключення струму обмоток. Тому при включенні та виключенні живлення двигуна ротор буде зміщуватися на півкроку. Для того, щоб він не зміщувався при зупинці, необхідно подавати в обмотки струм утримання. Те ж справедливо і для крокового й мікрокрокового режимів.

Для найбільш плавного обертання ротора на низьких частотах, в системі управління 3D-прінтера використовують драйвери, що підтримують мікро-кроковий режим роботи. Це підвищує точність позиціонування й роздільну здатність.

5.3 Конструкція 3D принтеру

3D-принтери – це мехатронні системи, які мають електроприводи для механічних переміщень. Дані системи також обладнані пристроями, що відстежують переміщення, вимірювальними пристроями і є САК.

Привод (електричний привод) – керована електромеханічна система, призначена для перетворення електричної енергії в механічну і назад та управління цим процесом, отже, це сукупність електромашин, апаратів та систем управління ними. В сучасних 3D принтерах в якості органів перетворення руху зазвичай використовуються крокові двигуни у парі з драйвером.

Конструкція 3D принтеру в більшості випадків містить 3 приводи для переміщення виконавчого органу (печатного механізму) по вісях X, Y та Z. Сьогодні в приводах подач сучасних принтерів адитивних технологій і верстатів з ЧПУ застосовуються два типи приводів: крокові двигуни і сервоприводи, і хоча принцип їх дії схожий — в багатьох рішеннях використовуються саме пара кроковий двигун та драйвер для побудови приводу.

У якості системи автоматичного керування (САК) в 3d принтерах зазвичай виступає мікроконтролер, який узгоджує роботу приводів і проводить позиціонування робочого органу приладу згідно з заданою користувачем програмою. Знаючи це, стає можливим побудувати умовну схему роботи 3D принтеру, яку наведено на рисунку 5.3.

Креслення деталі, що підлягає обробці на 3D принтері формується за допомогою спеціалізованих прикладних програм для 3D моделювання (графічних CAD) та обробки його в спеціалізованих програмах – слайсерах, які умовно ділять модель на шари для друку та де відбувається створення файлу G-коду (розширення файлу: *.gcode), виходячи з математичної моделі (геометрії), масштабування отриманих координат, переміщення або повертання деталі в одну сторону щодо системи координат.

Потужності керуючих сигналів, які надходять від мікроконтролера недостатньо для безпосереднього керування двигунами приводу, тому необхідно використовувати драйвер. Безпосереднє електромеханічне перетворення відбувається в цільовому (виконавчому) механізмі.

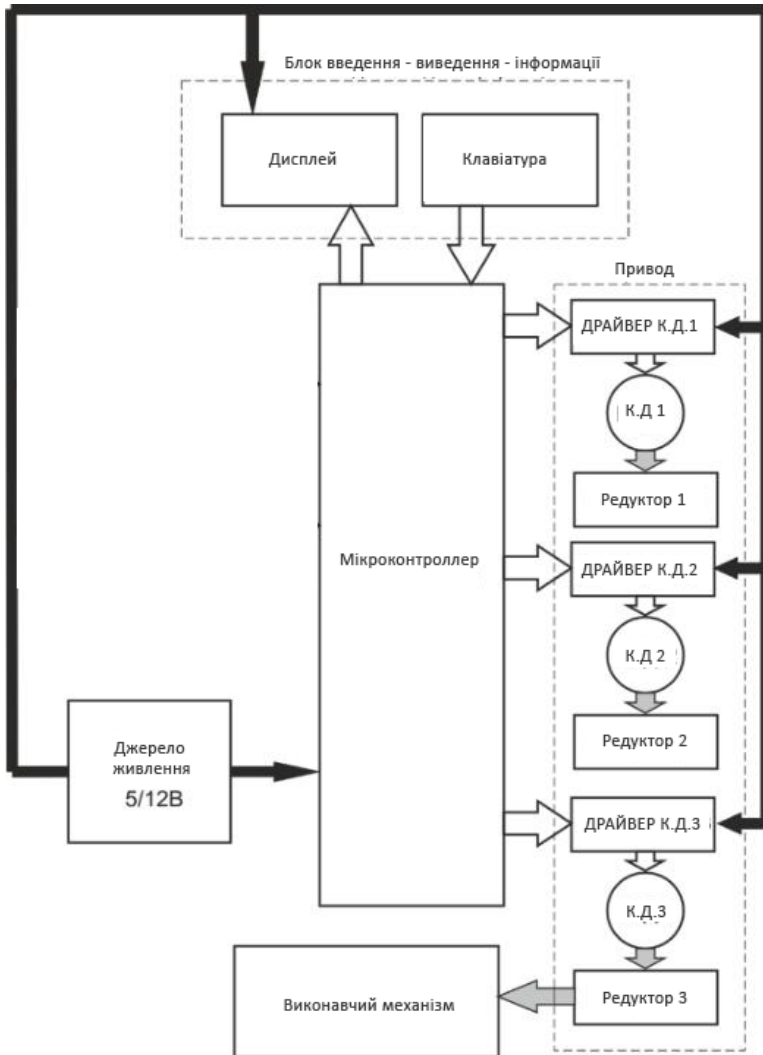


Рисунок 5.3 – Структурна схема 3D принтеру

5.4 Графічний код та програмне забезпечення

В якості набору мікрокоманд для драйверів приводів 3D принтеру використовується програма, написана за допомогою G-Code.

G-Code – це стандартизована мова друку, який використовується багатьма 3D-принтерами для управління процесом друку. Програма описує переміщення, яке необхідно зробити кожному приводу для виконання цілої деталі, шляхом інтерпретації представлених команд в керуючі імпульси, які надходять на двигуни і викликають переміщення. Всі команди управління об'єднуються в кадри – групи, що складаються з однієї або більше команд.

Така програма складається з:

- сервісної інформації – інформації про програму – середу утворення, інформацію про автора, використовуємий матеріал та інш.
- координати переміщення – координати, які необхідно зайняти робочому органу шляхом руху того чи іншого приводу 3D принтера.

Сервісні команди – команди на зупинення руху, зміну активного приладу, активації робочого органу та інш.

Фрагмент програми:

G00 X57 Y62 (позиціонування по X, Y)

M98 P112 (вирізання 1-го отвору)

G00 X104 Y76 (позиціонування по X, Y)

M98 P112 (вирізання 2-го отвору)

...

M30 – команда, яка викликає кінець інтерпретування коду програми. Після виконання цієї команди покажчик номера кадру встановлюється на 1-й рядок програми і виконання програми зупиняється.

Основні (так звані в стандарті підготовчими) команди мови починаються з літери G і наведені в таблиці 5.1:

Таблиця 5.1 – Підготовчі (основні) команди графічного коду

| Коди | Опис дії |
|---------|--|
| G00-G03 | Позиціонування інструменту, наприклад G0 X0 Y0 Z100. |
| G17-G19 | Перемикання робочих площин (XY, ZX, YZ) |
| G40-G44 | Компенсація розміру інструмента (длина, дсаметр) |
| G53-G59 | Перемикання системи координат |
| G80-G85 | Цикли свердління, розточування, нарізування різьблення |
| G90-G91 | Перемикання систем координат (абсолютна, відносна) |

Типи команд:

Переміщення робочих органів обладнання із заданою швидкістю (лінійне і кругове);

Виконання типових послідовностей (таких, як обробка отворів і різьблення);

Управління параметрами інструменту, системами координат, і робочих площин.

Також в специфікації G-коду є технічні команди, які починаються з літери M (наприклад M30 – зупинка роботи та повернення в початок програми).

Зазвичай програми для 3D печаті не пишуться в ручну а інтерпретуються (перетворюються) з графічної 3D моделі у “математичне” представлення за допомогою спеціалізованих програм – слайсерів (див. рис.5.4).

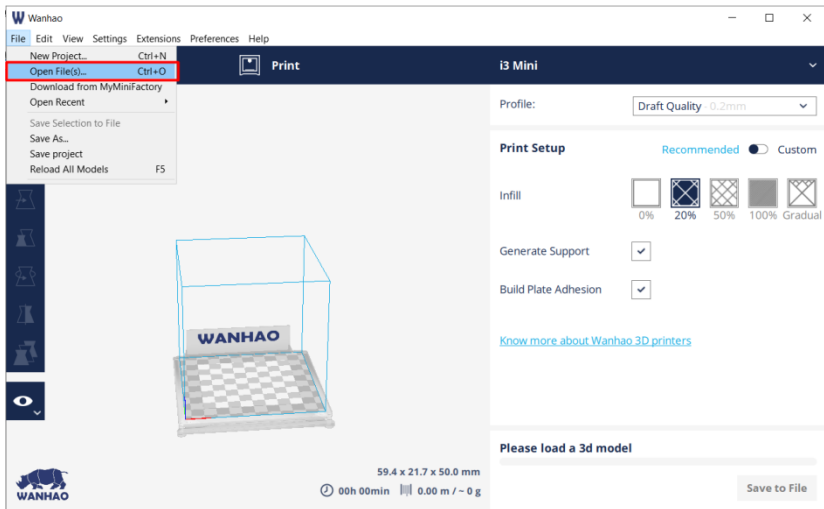


Рисунок 5.4 – Програма – слайсер CURA для 3D принтерів WANHAO

Програма слайсер умовно розбиває усю модель на шари і перетворює графічне зображення (шар) на графічний код та шарову модифікацію – змінення масштабу моделі, ущільнення або зменшення товщини стінок, підтримуючі шари. В ній також можливо задати сервісну інформацію, необхідну для 3D друку – тип матеріалу, точність та якість печаті та інш. Ці програмні засоби можуть здійснювати як підготовку так і печать 3D моделі.

5.5 Етапи виконання лабораторної роботи

Дослідження роботи приводу 3D принтеру та його САК буде проводитись на прикладі 3D принтеру WANHAO I3 mini (див. його вікно налаштувань на рис.5.5) та програми – слайсера CURA для 3D принтерів WANHAO.

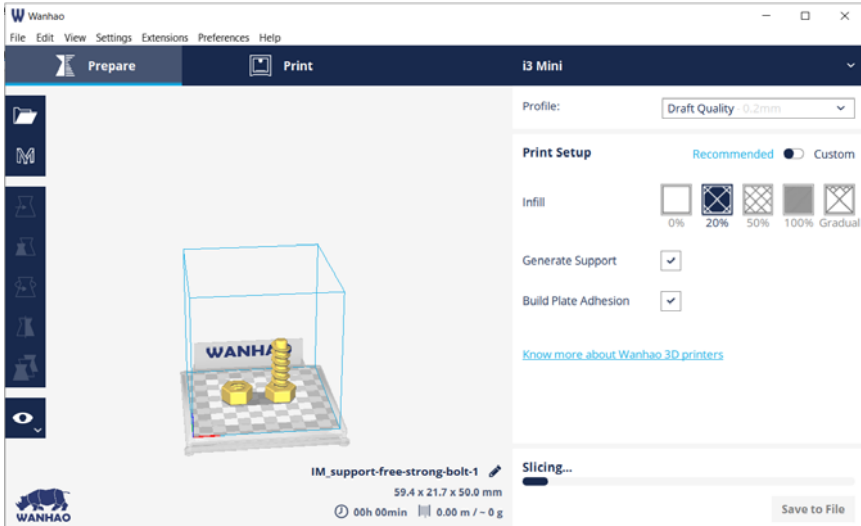


Рисунок 5.5 – Інтерфейс 3D принтеру WANHAO I3 mini

Для початку роботи з принтером необхідно підготувати модель, перетворивши її в графічний код.

1. Відкрийте слайсер CURA для WANHAO.
2. Виберіть контекстне меню File (Файл) та виберіть Open File (Відкрити файл).
3. Виберіть файл 3D моделі для її подальшого опрацювання у слайсері.
4. Після завантаження моделі необхідно обрати профіль печаті для встановлення якості та точності друку.

Для дослідницьких цілей обираємо Draft Quality (Прикладна якість) та встановлюємо 20% заповнення матеріалом (нещільне) (див.рис.5.6).

Якщо деталь є складною, з порожнинами та навесними деталями необхідно встановити друк підтримуючих шарів та адгезивної

підкладки. Оскільки матеріал для печаті пластик, то одразу після друку він має досить нестабільну структуру, тому деталь може зламатись під власною вагою. Якщо необхідне масштабування, натиснемо лівою клавішею миші на деталь і в лівому меню коло графічного зображення моделі обираємо пункт меню «Масштабування» та встановлюємо необхідні параметри масштабування.

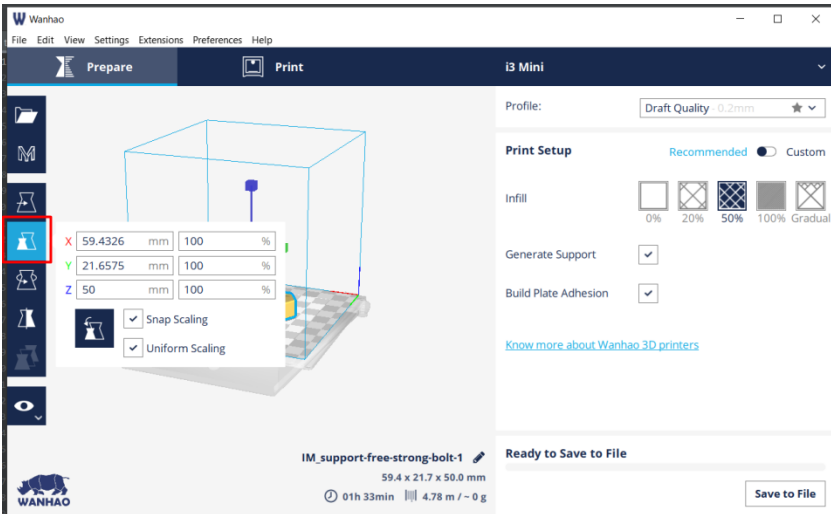


Рисунок 5.6 – Налаштування друку для 3D принтеру

5. По завершенню роботи натисніть Зберегти (Save File) для слайсингу та перетворення моделі в графічний код.

Після виконання усіх перерахованих вище дій на виході буде отриманий файл з розширенням .gcode, який записується на носій типу micro SD та вставляється у відповідний отвір/роз`єм принтеру.

Приклад отриманого G-коду після слайсингу наведено на рис.5.7.

```

G0 F4500 X42.331 Y39.511 Z0.179
G1 F900 X43.083 Y38.75 E0.0637
G1 X43.875 Y38.056 E0.12639
G1 X44.727 Y37.414 E0.1899
G1 X45.713 Y36.782 E0.25963
G1 X45.805 Y36.728 E0.26598
G1 X46.719 Y36.235 E0.32781
G1 X47.709 Y35.792 E0.39238
G1 X48.696 Y35.435 E0.45487
G1 X49.72 Y35.145 E0.51823
G1 X50.771 Y34.929 E0.58211
G1 X51.828 Y34.792 E0.64556

```

Рисунок 5.7 – Приклад отриманого G-коду після слайсингу

Підготовка принтера до друку.

Включити кнопку живлення на задній панелі Duplicator i3. При включенні Duplicator i3 ви повинні побачити логотип Wanhao на ЖК-екрані і початкові налаштування температури. Як правило, при першому запуску на екрані відображається температура навколишнього середовища (рис.5.8).



Рисунок 5.8 – Меню 3D принтера WANHAO I3 mini

Для початку роботи з приладом потрібно увійти в головне меню. Біля ЖК-екрану є джойстик керування. Поверніть і натисніть його для навігації та вибору (рис.5.9).



Рисунок 5.9 – Джойстик 3D принтеру WANHAO I3 mini

Першим кроком при друку є обрізка кінця нитки таким чином, щоб він був максимально гострим. Потім перейдіть до функції «Швидка настройка» – «Розігрів нитки» в залежності від типу матеріалу PLA, або ABS. Принтер почне нагрів екструдера до заданої температури (рис.5.10).



Рисунок 5.10 – Вибір режиму нагрівання

Натисніть пружинний важіль екструдера вниз, щоб відкрити шлях нитки в нагрівальну камеру. У цей час вставте нитку в отвір до самого кінця екструдера. Потім відпустіть важіль, і ви зможете відчути, як нитка щільно захоплюється екструдером (рис.5.11).

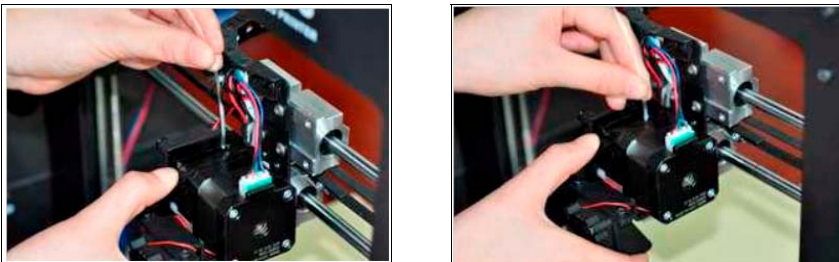


Рисунок 5.11 – Заправлення нитки в екструдер

Перейдіть до функції «Екструдер-Положення екструдера» (рис.5.12). Поверніть джойстик керування за годинниковою стрілкою, щоб завантажити нитку.

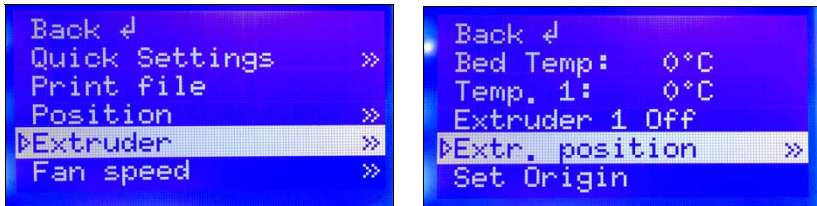


Рисунок 5.12 – Вибір положення екструдера

Переконайтеся, що Мікро SD з файлом завдання знаходиться у відповідному слоті блоку управління Duplicator іЗ (рис.5.13). Перейдіть в меню «Друк з SD». Виберіть один із файлів друку.



Рисунок 5.13 – Розміщення Мікро SD-карти

Після того, як Duplicator іЗ завершив екструзію, зачекайте кілька секунд поки екструдований пластик охолоне, перш ніж витягнути його. Ви можете утилізувати його разом зі звичайним сміттям, або переробити. Не залишайте пластик на соплі екструдера.

5.6 Контрольні питання

1. Склад мехатронної системи.
2. САК 3D принтеру. Структура 3D принтера.
3. Що таке електричний привод.
4. Основні режими роботи електричного двигуна.
5. Що таке графічний код? Що таке слайсер?
6. Чим кроковий двигун відрізняється від серводвигуна.
7. Заходи з безпеки при роботі 3D принтеру.

6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 ПРОЕКТУВАННЯ КОНТУРУ САК SMART HOUSE

6.1 Smart House як багатоконтурна САК

«Розумний будинок – Smart House» – це високотехнологічна система, яка може об'єднати всі комунікації дому і керувати ними одним натисканням кнопки. Освітлення, опалення, сигналізація, відеонагляд – це далеко не всі системи, якими можна керувати з допомогою «розумного будинку».

Наприклад, система керування світлом дає змогу запрограмувати світлові сцени у вашому будинку, чи створити видимість присутності господаря вдома під час його відпочинку в іншій країні. Система керування опаленням легко підтримуватиме задану температуру в цілому приміщенні або в окремих кімнатах, понижуючи її чи піднімаючи у відповідності до заданих параметрів.

Ще одна важлива опція системи «розумний будинок» – це можливість забезпечення перебування дітей у будинку. Якщо дитина залишається одна вдома, батьки можуть заблокувати вхідні двері, відімкнути групи розеток, електроприладів, і цим самим забезпечити життя малюка. Знову ж таки – це легке, але дуже ефективне рішення.

Smart House фактично є багатоконтурною САК різними процесами в різних системах: освітлення, охорони (захисту від несанкціонованого доступу), пожежної безпеки тощо. На рис. 6.1 наведений один з варіантів композиції САК Smart House.

Центральний контролер отримує інформацію про роботу всіх приладів і систем в будинку за допомогою спеціальних датчиків. Наприклад, датчики системи освітлення передають інформацію про рівень природного освітлення в конкретний момент часу. Контролер визначає, чи є цей рівень достатнім. Якщо немає, то автоматично включається певну кількість освітлювальних приладів. При цьому, система визначає, чи є люди в конкретних приміщеннях. І включає додаткове освітлення тільки в разі їх присутності.

Приблизно таким же чином працює і система опалення та вентиляції. Варто зауважити, що будь-який параметр будь-який з систем завжди можна змінити в ручному режимі. При цьому, часто це можливо навіть у віддаленому режимі, за допомогою SMS або інших інструментів віддаленої передачі інформації.

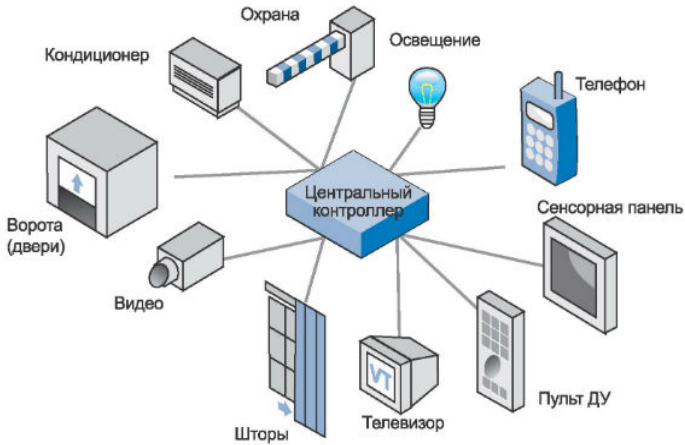


Рисунок 6.1 – Схема возможных контурів керування системи Smart House

Зрозуміло, що найбільш оптимальним способом установки такого устаткування в будинок, є планування його ще на етапі проектування конкретного будинку. В цьому випадку, можна найбільш раціонально використовувати всі конструктивні особливості будови і забезпечити максимально прийнятну вартість системи.

Таким чином, система розумний будинок є рішенням, що здатне забезпечити максимальний рівень комфорту і безпеки для людей, які проживають в будинку. Крім того, завдяки високому ступеню автоматизації, система здатна оптимізувати витрати ресурсів і забезпечити економію коштів, при оплаті електроенергії, газу, води і так далі. Крім того, ця система може перебрати на себе функції системи охорони (обмеження доступу) та захисту від небезпечних явищ (пожежі, затоплення тощо).

6.2 Етапи проектування контуру системи обмеження доступу

До контуру системи безпеки входять такі системи, як система обмеження доступу в будинок небажаних осіб, контроль витoku газу, сигналізація, відеоспостереження та інші системи, що дозволяють контролювати рівень безпеки в будинку.

Крім того, розумний будинок може забезпечити віддалене інформування про будь-якому інциденті в приміщенні, під час відсутності людей і навіть зімітувати їх присутність.

Розроблювана система включає в себе 2 типи обладнання: різноманітні датчики проникнення та елементи, які на це реагують. Завдання датчиків – повідомити про недозволене проникнення в будинок. Автоматика розумного будинку відреагує на це, в залежності від встановленого обладнання та запрограмованих функцій.

Основні датчики, які застосовують для системи охорони в розумному будинку:

- **Система контролю доступу до будинку** за технологією RFID.
- **Датчики руху** активуються під час постановки будинку на сигналізацію. В інший час можуть бути задіяні для керування освітленням, або інших функцій. Монтуються у всіх приміщеннях, де є двері та вікна.
- **Датчики розбиття скла** активуються на звук розбитого скла. Встановлюються у всіх приміщеннях, де є вікна, або засклені двері.
- **Геркони** (магнітні контакти) монтуються на вікна та двері. Якщо будинок на сигналізації, то при відкритті дверей, чи вікон геркон повідомить про це розумний дім.

6.2.1 Синтез контуру обмеження доступу за технологією RFID

RFID – *Radio Frequency IDentification* або радіочастотна ідентифікація. Це спосіб автоматичної ідентифікації об'єктів, в якому за допомогою радіосигналів зчитуються або записуються дані, що зберігаються в так званих транспондерах, або RFID-мітках.

Будь-яка RFID-система складається з пристрою, що зчитує (рідера) і RFID-мітки. Більшість RFID-міток складається з двох частин. Перша – інтегральна схема (IC) для зберігання і обробки інформації, модулювання і демодулювання радіочастотного (RF) сигналу і деяких інших функцій. Друга – антена для прийому і передачі сигналу. Ідентифікація об'єктів проводиться за унікальним

цифровому коду, який зчитується з пам'яті RFID-мітки.

За дальності зчитування RFID-системи можна поділити на системи:

- ближньої ідентифікації (зчитування проводиться на відстані до 20 см);
- ідентифікації середньої дальності (від 20 см до 5 м);
- дальньої ідентифікації (від 5 м до 300 м).

RFID мітки поділяються на три типи залежно від частотного діапазону:

- мітки діапазону LF (125-134 кГц);
- мітки діапазону HF (13,56 МГц);
- мітки діапазону UHF (860-960 МГц).

У повсякденному житті ми постійно використовуємо RFID-системи – домофони, допуск на територію, що охороняється, контроль за відвідуваністю робочих місць, управління пристроями. Розібравшись, як влаштовані RFID-системи, ви зможете зробити власний проект, наприклад, систему контролю доступу в школі.

В даній лабораторній роботі ми навчимося підключати RFID-рідер RC522 до Arduino Uno і зчитувати дані з RFID-міток. Модуль RC522 має дальність виявлення до 6 см і призначений для читання і запису RFID міток з частотою 13.56 МГц. Схема підключення RFID наведена на рисунку 6.2.

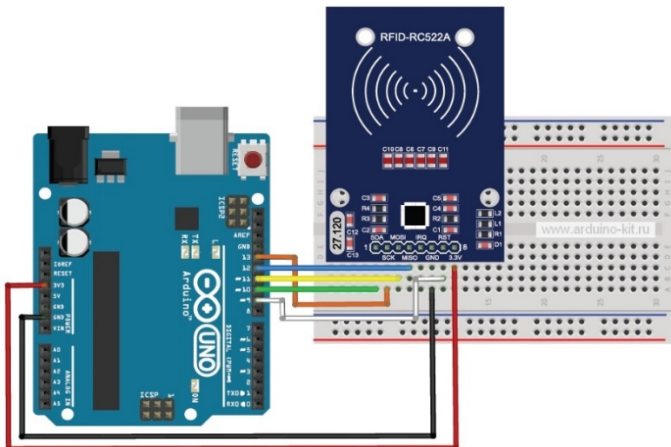


Рисунок 6.2 – Схема підключення RFID

6.2.2 Моделювання в Arduino IDE

```
// Для Arduino IDE 1.0.1
#include <SPI.h>
#include <RFID.h>
#define SS_PIN 10
#define RST_PIN 9

RFID rfid(SS_PIN, RST_PIN);

int serNum0;
int serNum1;
int serNum2;
int serNum3;
int serNum4;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  SPI.begin();
  rfid.init();
}

void loop()
{
  // Якщо знайдено карту
  if (rfid.isCard()) {
    // Считываем адрес
    if (rfid.readCardSerial()) {
      // Виводимо його в порт в десятичному представленні
      Serial.println("Card number:");
      Serial.print(rfid.serNum[0],DEC);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(rfid.serNum[1],DEC);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(rfid.serNum[2],DEC);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(rfid.serNum[3],DEC);
      Serial.print(" ");
      Serial.print(rfid.serNum[4],DEC);
    }
  }
}
```

```
        Serial.println(" ");  
    }  
}  
rfid.halt();  
}
```

6.3 Етапи виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з поняттям «Розумний будинок – Smart House»
2. Ознайомитися з будовою модуля RFID.
3. Послідовно з'єднати RFID модуль з Arduino згідно рис. 6.2.
4. Під'єднати платформу Arduino до комп'ютеру.
5. Розмістити скетч програму з методичних вказівок до середовища розробки Arduino IDE.
6. Скопіювати скетч.
7. Відкрити монітор порту.
8. Піднести RFID мітку до модуля та з монітору порту записати унікальний ID.

6.4 Контрольні питання

1. Дати визначення «Розумний будинок».
2. З яких підсистем складається «Розумний будинок», загальні принципи їхньої побудови та функціонування.
3. Які датчики можуть використовуватися у САК «Розумний будинок»?
4. Функції системи безпеки/охорони, підсистеми обмеження доступу.
5. Принцип побудови та функціонування системи охорони.
6. Що таке RFID-модуль?
7. Яке функцію RFID-модуль виконує в системі «Розумний будинок»?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герасимьяк, Р. П. Теория автоматического управления [Текст]: сборник задач : навч. посібник / Р. П. Герасимьяк. – Одеса: Наука і техніка, 2003. – 108 с. – ISBN 966-8335-01-5
2. Клиначев Н.В. Обзор архитектурного построения программ математического моделирования динамических систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/educat/news/klinachev>
3. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.: ДизайнПРО, 1997. – 640с.
4. Borutzky W. Bond Graph Methodology. Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models. Springer-Verlag London Limited, 2010, –262p.
5. Попович, М. Г. Теория автоматического управления [Текст]: підручник для студентів вищ. навч. закладів / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
6. Попович, М. Г. Электромеханические системы автоматического управления та электроприводы [Текст]: навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів / , О. Ю. Лозинський, Б. М. Мацко [та ін.] ; за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
7. Кунву Ли, Основы САПР (CAD/CAM/CAE), – СПб.: Питер, 2004. – 560с.
8. Василенко, О.В. Аналіз програм для моделювання мехатронних систем [Текст] / О.В. Василенко // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2015. – №2. – С.16-31.
9. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 430 с.
10. System Modeling and Simulation. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.hs-owl.de/fb5/labor/es/en/sym/>
11. Bond graph. Art of Creating Models [Electronic resource]. – Access mode: <http://bondgraph.org/about1.html#art>
12. Simulation Tools [Electronic resource]. – Access mode: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
13. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing (3rd ed.) / Cambridge University Press, 2007, –1235p.

14. Hairer E., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems (2nd rev.ed.), Springer. 2010, –630p.
15. Cash J. Efficient numerical methods for the solution of stiff initial-value problems and differential algebraic equations./ Proc. Roy. Soc. London, A, 459:797-815, 2003.
16. MathWorks Documentation Center [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.mathworks.com/help/simulink/gui/solver-pane.html>
17. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + SIMULINK 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. М.: СОЛОН-Пресс. – 2003. – 576с.
18. Micro-Cap 12, Analog and Digital Behavioral Modeling [[Electronic resource]. – Access mode: <http://www.spectrum-soft.com/demo/abm.shtm>
19. 20-sim 4.3 Reference Manual / Ir.C. Kleijn, Ir.M.A. Groothuis, Ir.H.G. Differ // Controllab Products B.V., 2012.– 1099 с.
20. О программе для моделирования систем автоматического управления SamSim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://samsim2002.chat.ru>
21. Differential Algebraic System Solver [Electronic resource]. – Access mode: <http://acronyms.thefreedictionary.com/DASSL>
22. VHDL Tutorial: Learn by Example by Weijun Zhang, July 2001 [Electronic resource]. – Access mode: <http://esd.cs.ucr.edu/labs/tutorial/>
23. SimApp, Ordering Information [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.simapp.com/order-simapp.php>
24. Fritzson P. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1.-Wiley-IEEE Press, 2006.– 939 с.
25. MapleSim – Key Features [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.adeptscience.co.uk/products/mathsim/maplesim/features.html>
26. Simscape Overview [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.mathworks.com/products/simscape/index.html>
27. VisSim Product Overview [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.vissim.com/products/vissim.html>
28. Dymola Dynamic Modeling Laboratory User's Manual [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/Lect/MMPS/Refs/Dymola5Manual.pdf>
29. Versions of 20-sim [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.20sim.com/home/versions.html>
30. Astrom K.J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K.J. Astrom, T. Hagglund. – NC: ISA, 1995. – 408 p.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни "Теорія автоматичного керування" для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка" денної та заочної форм навчання [Текст] / Запорізьк. нац. техн. ун-т. Каф. електроприводу та автомат. пром. установок; уклад.: А. Є. Казурова, С. Г. Деєв, І. А. Андріяс. – Електронні дані. – Запоріжжя: НУЗІП, 2019. – 34 с.
2. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Теорія автоматичного керування" для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка" денної та заочної форм навчання [Текст] / Запорізьк. нац. техн. ун-т. Каф. електроприводу та автомат. пром. установок; уклад.: А. Є. Казурова, С. Г. Деєв. – Електронні дані. – Запоріжжя: НУЗІП, 2019. – 54 с.
3. **Герасим'як Р. П.** Теорія автоматичного керування [Текст]: збірник задач: навч. посібник / Р. П. Герасим'як. – Одеса: Наука і техніка, 2003. – 108 с. – ISBN 966-8335-01-5
4. **Попович М. Г.** Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи [Текст]: навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів / О. Ю. Лозинський, Б. М. Мацко [та ін.]; за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
5. **Попович, М. Г.** Теорія автоматичного керування [Текст]: підручник для студентів вищ. навч. закладів / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – 2-ге вид., перероб. і доп.– К.: Либідь, 2007. – 656 с.
6. Astrom K.J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K. J. Astrom, T. Hagglund. — NC: ISA, 1995. – 408 p.
7. Simulation Tools [Electronic resource]. – Access mode: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
8. VisSim/State Charts [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.vissim.com/products/vissim/state_charts.html
9. Versions of 20-sim [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.20sim.com/home/versions.html>

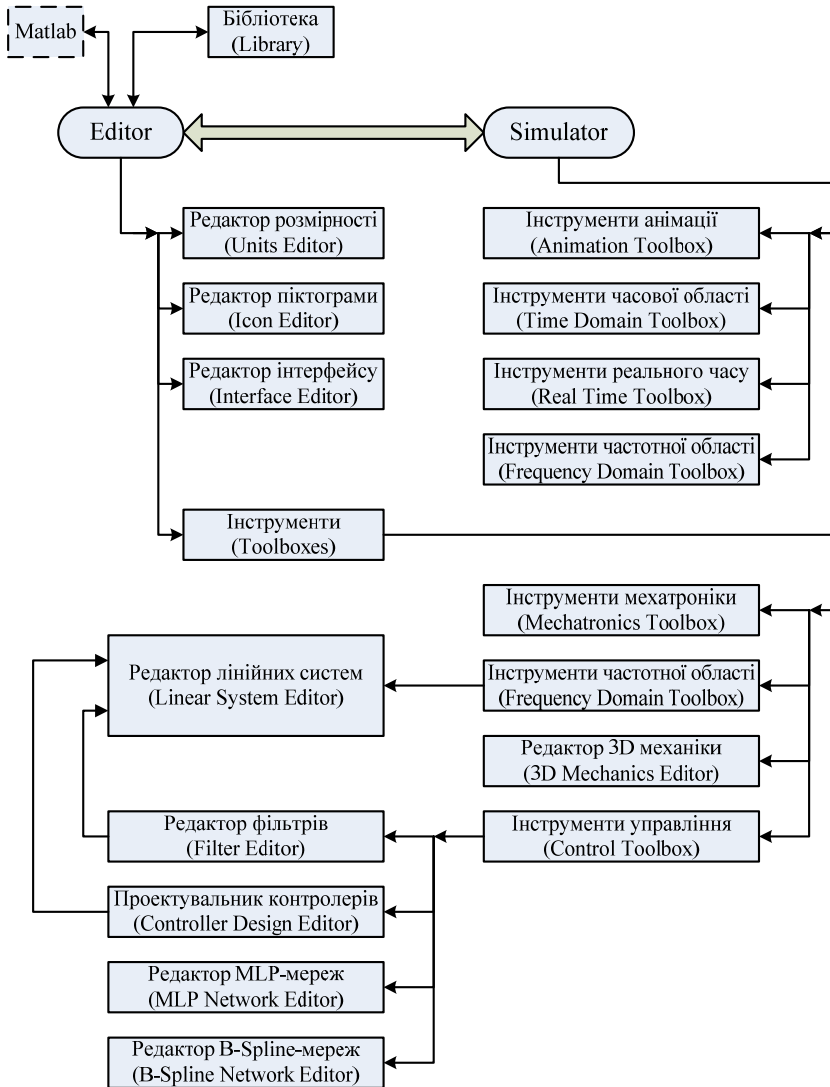
Додаток А

Завдання для самостійної роботи

1. Автоматизоване проектування та дослідження САК.
2. Оптимальні значення параметрів автоматичних регуляторів.
3. Наближені та аналітичні методи розрахунку параметрів настроювання регуляторів.
4. Складання рівнянь для математичних моделей елементів САР та САК.
5. Функції передачі елементів систем автоматичного керування.
6. Методи дослідження нелінійних систем автоматичного регулювання.
7. Формування законів регулювання регуляторів за допомогою нелінійних елементів з метою підвищення якості регулювання.
8. САР зі змінною структурою.
9. Амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики елементів систем автоматичного керування. Годографи.
10. Зв'язок перехідних функції системи з її функцією передачі та з імпульсними функціями.
11. Визначення стійкості динамічних систем. Алгебраїчні та частотні критерії стійкості. Критерій Рауса. Критерій Гурвіца.
12. Аналіз стійкості динамічних систем за критерієм Найквіста.
13. Частотні критерії стійкості для систем із запізненням. Запас стійкості. Критерій Михайлова.
14. Структура, основні елементи та принципи функціонування інформаційно-вимірювальних систем (ІВС).
15. Вимірювальні перетворювачі.
16. Побудова систем автоматичного вимірювання із різними законами регулювання.
17. Побудова ПІД регуляторів на базі мікропроцесорних систем.
18. Оцінка якості процесів регулювання.
19. Оптимальний синтез САР та САК в програмах автоматизованого інжинірингу (САЕ).
20. Вплив властивостей об'єкта регулювання і автоматичного регулятора на характер процесу регулювання.

Додаток Б

Загальна структура 20-SIM



Додаток В

Форми представлення моделей САК

Існує багато форм представлення (переважно графічних) моделей САК:

- диференціальні рівняння (ODE);
- сигнальні графи (signal flow graph, SFG);
- блок-схеми (BD);
- традиційні діаграми (ID), або функціональні/принципові схеми;
- графи зв'язків (BG);
- автомати станів (SM);
- передавальні функції (TF);
- орієнтовані графи тощо.

Після ідентифікації об'єкта постає задача вибору однієї (або кількох, якщо є потреба у змішаній формі) з форм представлення. Якщо дослідник володіє поняттями лише про одну з форм (і немає можливості розібратися в інших), то вибір очевидний. Взагалі, алгоритм вибору форми представлення моделі погано формалізується і, в багатьох випадках, в межах даного програмного середовища визначається уподобаннями дослідника.

Після вибору форми представлення моделі елементи з потрібних бібліотек виносяться на робоче поле у головний редактор та з'єднуються згідно топологічних рівнянь ММ.

На стадії апріорної корекції моделі можна робити математично еквівалентні заміни компонентів, проводити інкапсуляцію (створення підсистем), візуально оформлювати модель у головному редакторі.

Одна з найбільш важливих стадій етапу побудови моделі – апостеріорна (або компонентно-топологічна) корекція моделі. Саме вона, значною мірою, буде визначати адекватність моделі (не враховуючи можливої складності ММ, що отримана при ідентифікації реального об'єкта) та ефективність застосування алгоритмів симуляції.

Вибір форми представлення може залежати від кількох факторів:

- від запиту споживача (якщо запросили модель у вигляді автомату станів, то вона така і має бути);

- від знань та вмінь дослідника (краще робити те, у чому більше розумієшся);
- від можливостей програмного забезпечення, що є у розпорядженні (неможливо розробити модель у формі, яка не підтримується даною САЕ).

Особливості деяких форм представлення:

1. особливості представлення у вигляді передавальних функцій (TF):
 - a. являють собою вхідні-вихідні відношення компонентів (або систем);
 - b. легше оперувати алгебраїчними рівняння з оператором Лапласа (замість диференціальних рівнянь);
 - c. застосовуються тільки до ДС, що можуть бути описані тільки лінійними, стаціонарними ODE;
 - d. допустимі лише коли всі початкові умови дорівнюють нулю;
 - e. порядок системи визначається найвищим ступенем, до якого піднесений оператор Лапласа у знаменнику передавальної функції;
 - f. для реальних систем порядок чисельника не може бути вище порядку знаменника, інакше це суперечить фізичності об'єкта;
 - g. незалежність від величини та природи вхідного, керуючого сигналів;
 - h. можуть бути представлені у вигляді блок-схеми.
2. особливості блок-схем (BD):
 - a. візуалізують відношення між входами та виходами;
 - b. корисні при проектуванні і реалізації компонентів (переважно лінійних);
 - c. допомагають зрозуміти взаємодію потоків інформації між внутрішніми змінними;
 - d. еквівалентні системі лінійних алгебраїчних рівнянь (для лінійних систем);
 - e. в першу чергу доречні, коли в системі існують каскадні потоки інформації (наприклад, зворотні зв'язки).
3. особливості сигнальних графів (SFG):
 - a. є альтернативою до блок-схем;

- b. не потребують ітеративного редукування для знаходження передавальної функції (застосовується правило Мейсона (Mason's gain rule));
- c. можуть використовуватися для знаходження ПФ будь-яких двох змінних (не тільки вхідних і вихідних).

Особливості та переваги BG (в порівнянні з BD та ID):

а) акаузальність:

1) засновані на рівняннях;

2) каузальність визначається після етапу побудови моделі (modeling), а не до (як це треба робити при створенні моделі у вигляді BD);

3) причинний зв'язок стає ясным (на відміну від ID);

б) енергетичне представлення:

1) зв'язки передають потужність (на відміну від BD);

2) автоматично підкоряються законам фізики;

в) компактність:

1) кожен зв'язок передає два пов'язаних сигнали (на відміну від BD, де кожен зв'язок передає лише один сигнал);

2) з'єднання локалізовані (на відміну від BD та ID);

3) компоненти локалізовані (на відміну від BD та ID);

4) топологія ближче до фізичної системи (на відміну від BD);

г) багаторазове використання підсистем (існуюча підсистема каузально пристосовується у відповідь на підсистеми, що вводяться (на відміну від BD)).

Для електричних та гідравлічних схем широке розповсюдження мають 3 методи перетворення моделі з форми ID до форми BG:

- метод поступового розкриття (Method of Gradual Uncover);
- метод точкових потенціалів (Point Potential Method);
- метод змішаних кіл (Mixed Network Method).

Методи перетворення моделі з форми ID до форми BG для механічних систем наступні:

- метод карти потоків (Method of Flow Map);
- метод карти зусиль (Method of Effort Map);
- метод змішаних карт (Method of Mixed Map).

Додаток Г

Питання до модульного контролю

1. Класифікація об'єктів регулювання.
2. Об'єкти з зосередженими і розподіленими параметрами.
3. Поняття регулювання, керування, об'єкта регулювання, збурення, впливи, відхилення, уставки тощо.
4. Ступені автоматизації: часткова, комплексна і повна. Ручне регулювання. Автоматичне регулювання.
5. Принципи регулювання.
6. Системи автоматичного регулювання (САР) та керування (САК).
7. Класифікація систем автоматизації за функціональними ознаками.
8. Основні принципи побудови систем автоматичного регулювання (САР): принцип за відхиленням, принцип за збуренням. САР: стабілізуючі (САР-С); програмні (САР-П); слідкуючі САР-S); екстремальні (САР-Е); оптимальні (САР-О), адаптивні та інші.
9. Основні принципи побудови САР ТА САК: принцип за відхиленням, принцип за збуренням.
10. Розімкнуті, замкнуті та комбіновані системи автоматичного регулювання. Циркуляція інформації в САР.
11. Багатоконтурні, каскадні та комбіновані системи регулювання.
12. Структурні схеми САР та САК.
13. Вхідні та вихідні величини елементів систем регулювання.
14. Елементи та сигнали в САР та САК.
15. Вхідні та вихідні величини елементів автоматики.
16. Коефіцієнт перетворення. Коефіцієнт підсилення. Коефіцієнт стабілізації.
17. Похибка (абсолютна, відносна, зведена).
18. Поріг чутливості та причини, що його викликають. Зона нечутливості.
19. Динамічні характеристики елементів автоматики.
20. Характеристики точності приладів і засобів автоматизації. Номінальна статична характеристика перетворення.

21. Поняття зворотного зв'язку як одного з основних понять автоматики. Коефіцієнт зворотного зв'язку. Позитивний і негативний зворотний зв'язок.
22. Лінійні та нелінійні елементи. Статичні характеристики елементів.
23. Коефіцієнти передачі елементів.
24. Статичні характеристики послідовно та паралельно з'єднаних елементів.
25. Динамічні характеристики елементів.
26. Визначення нелінійних систем. Особливості нелінійних систем.
27. Типові суттєво нелінійні елементи, їх характеристики.
28. Типові входні сигнали та реакція на них елементів.
29. Перехідна функція, імпульсна перехідна функція, реакція елемента на гармонічні збурення. Математичний опис сигналів.
30. Пропорційна ланка. Аперіодична ланка першого порядку, її часові функції та частотні характеристики. Знаходження параметрів аперіодичної ланки першого порядку.
31. Класифікація регуляторів.
32. Регулятори прямої дії. Будова та принцип дії регуляторів прямої дії, способи встановлення завдання регуляторам.
33. Статична характеристика системи регулювання.
34. Лінійні та нелінійні закони регулювання. Регулятори дискретної дії: релейні та імпульсні.
35. Інтегрувальна, пропорційна та диференціальна ланки (ідеальна та реальна) ланка, їх часові та частотні характеристики. Функція передачі, статична і динамічна характеристики.
36. Пропорційно-інтегральні регулятори.
37. Пропорційно-диференціальні регулятори.
38. Пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори (ПІД – регулятори).
39. Аперіодична та коливна ланки другого порядку.
40. Ланка запізнення та її характеристики.