

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
здобувачами всіх форм навчання другого (магістерського)
рівня вищої освіти навчання за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» (освітня програма
«Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв»)
при вивченні дисципліни
«Електромеханічні та електронні системи енергоємних
виробництв»

2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт здобувачами всіх форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв») при вивченні дисципліни «Електромеханічні та електронні системи енергоємних виробництв» / Укл.: Л. Б. Жорняк, В. В. Василевський, О. О. Каплієнко, С. І. Шило. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 80 с.

Укладачі: Л. Б. Жорняк, доцент, к. т. н.
В. В. Василевський, доцент, к. т. н.
О. О. Каплієнко, ст. викладач
С. І. Шило, ст. викладач

Рецензент: О. І. Афанасьєв, доцент, к.т.н.

Відповідальний
за випуск: Р. Е. Мохнач, завідувач
лабораторією кафедри ЕЕА

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні та
електронні апарати»
Протокол № 8
від «31» січня 2024р.

Затверджено НМК ЕТФ
Протокол № 6
від «22» лютого 2024 р.

ЗМІСТ

ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ ЗВІТІВ ПРО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	6
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. РОБОТА КОРИСТУВАЧА В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK ПАКЕТУ MATLAB ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОСТОЇ МОДЕЛІ.....	11
1.1 Мета роботи.....	11
1.2 Загальні відомості.....	11
1.3 Запуск демонстраційної моделі	12
1.4 Опис демонстраційного прикладу	14
1.5 Деякі експерименти	15
1.6 Створення простої моделі.....	17
1.7 Установка Simulink Preferences.....	26
1.8 Зміст звіту по лабораторній роботі.....	29
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ЗМІСТУ БІБЛІОТЕКИ ЯДРА SIMULINK. СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ НА ЇХ ОСНОВІ.....	29
2.1 Мета роботи.....	29
2.2 Основні властивості підсистеми Simulink	29
2.3 Бібліотеки блоків Simulink.....	30
2.3.1 Джерела (Sources).....	32
2.3.2 Кінцеві блоки (Sinks).....	34
2.3.3 Дискретні блоки (Discrete).....	35
2.3.4 Безперервні блоки (Continuous).....	37
2.3.5 Нелінійні блоки (Nonlinear).....	37
2.3.6 Математичні функції (Math).....	39
2.3.7 Безперервні та табличні функції (Functions & Tables).....	40
2.3.8 Сигнали та системи (Signals & Systems).....	41
2.4 Об'єднання блок-діаграм у складені блоки.....	43
2.5 Безперервний і дискретний час.....	44
2.6 Сигнали.....	46
2.7 Зміст звіту по лабораторній роботі.....	47
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОДНОФАЗНИХ ТА	

ТРИФАЗНИХ ПРИСТРОЯХ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ. БІБЛІОТЕКА POWER SYSTEM BLOCKSET. ІНСТРУМЕНТАРІЙ POWER ELECTRONICS.....	48
3.1 Мета роботи.....	48
3.2 Загальна інформація.....	48
3.3 Система одиниць бібліотеки Power System Blockset.....	49
3.4 Моделювання некерованого однофазного однонапівпе- риодного випрямляча з активно-індуктивним наванта- женням.....	50
3.5 Моделювання некерованого однофазного двонапівпере- одного нульового випрямляча з активно-індуктивним навантаженням.....	53
3.6 Моделювання керованого однофазного однонапівпереі- одного випрямляча.....	55
3.7 Моделювання некерованого трифазного мостового ви- прямляча.....	58
3.8 Моделювання некерованого трифазного нульового ви- прямляча із трансформаторним входом.....	59
3.9 Зміст звіту по лабораторній роботі.....	61
4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ОДНОКАНАЛЬНА ТА ДВОКАНАЛЬНА СИСТЕМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЇВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ.....	62
4.1 Мета роботи.....	62
4.2 Принцип вертикального керування	62
4.3 Моделювання двоканальної системи керування однофа- зним мостовим випрямлячем.....	64
4.4 Моделювання одноканальної системи керування однофазним мостовим випрямлячем.....	66
4.5 Зміст звіту по лабораторній роботі.....	67
5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНИХ НЕКЕРОВАНИХ ПРИСТРОЯХ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ.....	67
5.1 Мета роботи.....	67
5.2 Моделювання зовнішнього короткого замикання трифазного мостового некерованого випрямляча.....	67
5.3 Моделювання внутрішнього короткого замикання	68

трифазного мостового некерованого випрямляча.....	
5.4 Зміст звіту по лабораторній роботі.....	71
6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНИХ КЕРОВАНИХ ПРИСТРОЯХ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ.....	71
6.1 Мета роботи.....	71
6.2 Моделювання зовнішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча без блокування керування.....	71
6.3 Моделювання зовнішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча із блокуванням керування	73
6.4 Моделювання внутрішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча без блокування керування	74
6.5 Моделювання внутрішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча із блокуванням імпульсів керування	76
6.6 Зміст звіту по лабораторній роботі.....	77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	78

ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ ЗВІТІВ ПРО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Електромеханічні пристрої та електронні системи енергоємних виробництв (ЕМ та ЕлС ЕСВ) – це електромеханічні комплекси для систем генерування електроенергії (АЕС, ТЕС, автономних систем), а також для систем передавання та споживання електроенергії на промислових підприємствах, із застосуванням сучасних ресурсо- та енергозберігаючих технологій та використанням новітніх діагностичних засобів щодо електромеханічних перетворювачів енергії – електричних генераторів та двигунів, а також сучасні електромеханічні та електромеханотронні системи (мікромашини, електромеханічні засоби автоматики, електромеханічні системи спеціального та технологічного призначення тощо). Крім того це є електротехнічні пристрої для керування потоками енергії та інформації. При цьому мова може йти про потоки енергії різного виду: електричної, механічної, теплової тощо. Наприклад, потоком механічної енергії від двигуна до технологічної машини може керувати електромагнітна муфта. Потоками теплової енергії можна керувати за допомогою електромагнітних клапанів та заслінок.

ЕМ та ЕлС ЕСВ як низької, так і середньої напруги, зазвичай, є конструктивно закінченими технічними пристроями та системами, що реалізують певні функції та розраховані на різні умови експлуатації.

В основі конструкції більшості ЕМ та ЕлС ЕСВ є контактна система (виконавчий орган) з різноманітними типами приводів – ручним, електромагнітним, механічним тощо. Процеси, що протікають в електромеханічних та електронних апаратах системи енергоємних виробництв, визначаються різноманітними фізичними явищами, які вивчаються в електродинаміці, механіці, термодинаміці та інших фундаментальних наукових дисциплінах.

У сучасних умовах, коли швидко зростає складність конструкцій електротехнічних пристроїв та систем, час їх створення невблаганно знижується, а термін служби має збільшуватися, коли треба забезпечити їх конкурентоспроможність на світовому ринку, вимоги до інженерної продукції та процесу її створення невпинно зростають, забезпечити отримання ефективного результату можливо тільки за умови ретельної підготовки до професійної діяльності,

тобто розробки плану дій (з одного боку) та чіткого виконання його у процесі діяльності (з іншого).

Опанування матеріалів з проєктування ЕМ та Ел С ЕСВ як базової дисципліни з фаху має два напрями:

- студент засвоює фундаментальні теоретичні основи різноманітних фізичних явищ, що відбуваються в електромеханічних та електронних системах і на яких базується їх функціонування;

- студент навчається використовувати знання у практичній діяльності, зокрема при проєктуванні, моделюванні та їх експлуатації тощо.

Найкращим чином поєднати та вирішити ці проблеми можна в тому числі завдяки виконанню лабораторних робіт із зазначеного курсу, а також через мотивовану самостійну діяльність студента, а саме – через виконання завдань для самостійної роботи, тобто навчання в процесі його проєктування.

З метою розвитку здатності виконувати розрахунок магнітних кіл постійного та змінного струму при дослідженні параметрів різноманітних електротехнічних пристроїв та систем, а також використовувати стандартні програмні засоби комп'ютерного моделювання типових електромеханічних пристроїв з метою дослідження їх характеристик передбачено виконання студентами лабораторних робіт і завдань на практичних заняттях. Тематику виконуваних лабораторних робіт та практичних занять наведено у робочій програмі дисципліни. Лабораторні роботи та завдання на практичних заняттях студенти виконують під керівництвом викладача з використанням методичних рекомендацій, наведених нижче.

Метою лабораторного практикуму є

- набуття практичних навичок з вибору найбільш раціональних методів математичного моделювання електромеханічних перетворювачів, виходячи з умов розв'язуваної задачі;

- визначення необхідного рівня математичного моделювання та способів рішення рівнянь моделі,

- складання алгоритмів та програм розрахунку,

- дослідження на математичних моделях перехідних і усталених режимів електричних машин різних типів,

- аналіз результатів моделювання та розрахунку із застосуванням його для оптимального проєктування пристроїв

електромеханіки.

У результаті виконання лабораторних і самостійних робіт, студент повинен знати, а також вміти захистити таке:

- фізичні процеси, що відбуваються в досліджуваному електричному апараті або ЕМ та Ел С ЕСВ, їх вибір і обґрунтування, методи їх аналізу;

- вибір конструктивних рішень, принципів роботи, матеріалів основних елементів електричних апаратів;

- аналітичне обґрунтування параметрів об'єкту проєктування, розробку алгоритму розрахунків, зміст розрахунків та отримані результати.

За результатами теоретичного та практичного опанування дисциплін кафедри ЕЕА студент повинен:

знати:

- основні методи аналізу і розрахунку основних елементів електромеханічного обладнання енергоємних виробництв, а також принципи та особливості побудови сучасних систем їх автоматизованого проєктування;

- сучасні організаційні основи, основні задачі та зміст моделювання та досліджень електромеханічного обладнання енергоємних виробництв;

- принципи моделювання роботи основних груп електричних апаратів та систем, які використовуються в побуті, електротехнічній галузі, а також в системах електромеханічного обладнання енергоємних виробництв, електропостачання промислових підприємств при автоматизації виробничих процесів та електропривода;

- структуру та основні схемні та технічні рішення, а також основні методи та технічні засоби проведення комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень електромеханічного обладнання енергоємних виробництв;

вміти:

- володіти методами системного аналізу, а також математичного та фізичного моделювання об'єктів та процесів в електричних та електронних апаратах з використанням сучасного технічного та програмного забезпечення;

- знаходити варіанти підвищення енергоефективності та надійності електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного обладнання енергоємних виробництв;

- класифікувати інформаційні джерела наукових досліджень; працювати з сучасними бібліографічними і реферативними базами даних, а також наукометричними платформами з метою пошуку та аналізу базової інформації і її використання у науково-дослідній роботі;

- впроваджувати автоматизацію та інформатизацію наукових досліджень у галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки з метою підвищення ефективності та якості їх результатів;

набути навички діяльності науковця-дослідника, а саме:

- ставити і вирішувати інноваційні наукові та інженерно-технічні завдання з використанням методів системного аналізу і моделювання об'єктів електроенергетики, електротехніки та електромеханіки та відповідних процесів;

- аналізувати структуру технологічних процесів енергоємних виробництв, а також застосовувати відповідні моделі раціонального вибору обладнання та визначення оптимальних параметрів технологічного процесу;

- складати моделі об'єкту дослідження (фізичні, аналітичні, графічні тощо) і працювати з ними;

- формулювати, оцінювати та захищати отримані результати, тобто мати впевненість та особисту точку зору;

- складати звіти за результатами роботи;

- вміти ефективно працювати з людьми, задавати питання та спілкуватися;

- бути об'єктивним, мати почуття відповідальності, творчого незадоволення та відсутності обмеженості поглядів.

Виконання лабораторної роботи складається з роботи студента у лабораторії або дистанційно, а також із самостійної роботи. Активна самостійна робота є визначальним чинником ефективного сприйняття змісту лабораторних занять.

Звіти про виконання лабораторних робіт складаються окремо кожним студентом в одному зошиті, або в друкованому вигляді.

Зміст кожного звіту включає:

- мета роботи, предмет дослідження;

- завдання щодо виконання лабораторної роботи;

- електрична схема проведення дослідів;

- таблиці дослідних даних;

- графіки залежностей, побудованих за дослідними даними;

- висновки по роботі.

Захист звітів про виконання лабораторних робіт здійснюється студентами або одночасно бригадою (за умови очної форми навчання) або дистанційно кожним студентом особисто, попередньо завантаживши звіт у Систему дистанційного навчання за посиланням <https://moodle.zp.edu.ua/course/view.php?id=5023> у відповідну до номеру лабораторної або самостійної роботи секції, але контрольні запитання та оцінку якості виконання кожним студентом отримується окремо.

Під час захисту студент повинен бути готовим пояснити методику проведення досліджень, показати вміння аналізувати результати, отримані в ході проведення досліджень, бути готовим відповісти на питання викладача на тему проведених досліджень.

Студенти, які не виконали всі лабораторні роботи або не захистили всі звіти про виконання лабораторних робіт, передбачених навчальним планом та навчальною програмою, не допускаються до екзамену.

Всі необхідні матеріали для виконання лабораторних робіт та самостійної роботи студентами при вивченні даної навчальної дисципліни знаходяться у репозитарію НУ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА» за посиланням <http://eir.zp.edu.ua/handle/123456789/488> та в Системі дистанційного навчання за посиланням <https://moodle.zp.edu.ua/course/view.php?id=5023>, <https://moodle.zp.edu.ua/mod/url/view.php?id=140285>, <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/3473> <https://moodle.zp.edu.ua/mod/assign/view.php?id=109211> а також в наведеному переліку джерел посилання.

Пакет MATLAB online можна завантажити на Ваш комп'ютер за посиланням <https://www.mathworks.com/products/matlab-online.html>.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

РОБОТА КОРИСТУВАЧА В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK ПАКЕТУ MATLAB ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОСТОЇ МОДЕЛІ

Тривалість лабораторного заняття – 2 години

1.1 Мета роботи

Основною метою лабораторної роботи, що виконується, є вивчення принципу програмування в середовищі **Simulink** і отримання навичок швидкого старту запуску моделі.

1.2 Загальні відомості

MATLAB (скорочення від англ. "Matrix Laboratory") – це термін, що відноситься до пакета прикладних програм для вирішення завдань технічних обчислень, а також до мови програмування, що використовується в цьому пакеті. MATLAB використовують понад 1 000 000 інженерних робітників та науковців, він працює у більшості сучасних операційних систем, включаючи Linux, Mac OS, Solaris та Microsoft Windows.

Мова MATLAB є високорівневою мовою програмування, що інтерпретується, включає засновані на матрицях структури даних, широкий спектр функцій, інтегроване середовище розробки, об'єктно-орієнтовані можливості та інтерфейси до програм, написаних іншими мовами програмування.

Програми, написані на MATLAB, бувають двох типів – функції та скрипти:

- функції мають вхідні та вихідні аргументи, а також власний робочий простір для зберігання проміжних результатів обчислень та змінних;

- скрипти використовують загальний робочий простір.

Як скрипти, так і функції не компілюються в машинний код і зберігаються як текстові файли. Існує також можливість зберігати так звані pre-parsed програми, тобто функції та скрипти, оброблені у вигляді, зручному для машинного виконання. Загалом такі програми виконуються швидше за звичайні, особливо якщо функція містить команди побудови графіків.

Основною особливістю мови MATLAB є її широкі можливості для роботи з матрицями, які розробники мови висловили у гаслі «думай векторно» (англ. Think vectorized).

MATLAB надає користувачеві велику кількість (кілька сотень) функцій для аналізу даних, що покривають практично всі галузі математики, зокрема:

- матриці та лінійна алгебра – алгебра матриць, лінійні рівняння, власні значення та вектори, сингулярності, факторизація матриць та інші;

- багаточлени та інтерполяція – коріння багаточленів, операції над багаточленами та їх диференціювання, інтерполяція та екстраполяція кривих та інші;

- математична статистика та аналіз даних – статистичні функції, статистична регресія, цифрова фільтрація, швидке перетворення Фур'є та інші;

- обробка даних – набір спеціальних функцій, включаючи побудову графіків, оптимізацію, пошук нулів, чисельне інтегрування (у квадратурах) та інші;

- диференціальні рівняння – розв'язання диференціальних та диференціально-алгебраїчних рівнянь, диференціальних рівнянь із запізненням, рівнянь з обмеженнями, рівнянь у приватних похідних та інші;

- розріджені матриці – спеціальний клас даних пакету MATLAB, що використовується у спеціалізованих додатках;

- цілочисельна арифметика – виконання операцій цілочисельної арифметики серед MATLAB.

MATLAB надає зручні засоби розробки алгоритмів, включаючи високорівневі з використанням концепцій об'єктно орієнтованого програмування. У ньому є всі необхідні засоби інтегрованого середовища розробки, включаючи налагоджувач та профайлер. Функції для роботи з цілими типами даних полегшують створення алгоритмів для мікроконтролерів та інших додатків, де це необхідно.

1.3 Запуск демонстраційної моделі

Ця демонстраційна програма в середовищі **Simulink** моделює термодинаміку будинку. Щоб запустити цей демонстраційний приклад, виконаєте наступні кроки.

1) Запустіть **MATLAB**.

2) Викличте демонстраційну модель, друкуючи **thermo** в командному вікні **MATLAB**. Ця команда запускає **Simulink** і створює вікно, що містить цю модель.

3) Клацніть два рази по блоці осцилографа (**Scope**), позначеному **Thermo plots**.

4) Блок **Scope** показує криві, позначені **Indoor vs** та **Outdoor Temp** (верхнє вікно) і **Heat Cost (\$)** (нижнє вікно), відповідно.

5) Щоб розпочати процес моделювання, клацніть у головному меню **Simulation** \Rightarrow **Start** (або клацніть значок **Start** на панелі інструментів. Після запуску процесу моделювання на екрані осцилографа з'являється внутрішня й зовнішня температура (вектор **Indoor vs** та **Outdoor Temp**) і вартість опалення (\$).

6) Щоб зупинити процес моделювання, виберіть у головному меню команду **Simulation** \Rightarrow **Stop** або натисніть кнопку **Pause** на панелі інструментів. Якщо Ви бажаєте шукати інші частини моделі, перегляньте розділ «Деякі експерименти».

7) Коли ви хочете закінчити сеанс роботи з даною моделлю, відкрийте її, вибравши в головному меню **File** \Rightarrow **Close**.

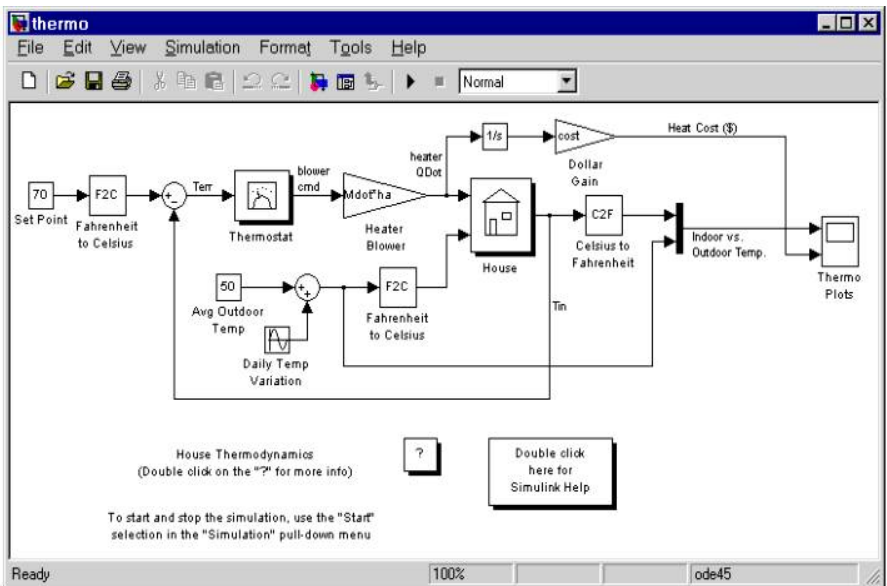


Рисунок 1.1 – Теплова модель будинку (Thermal Model of a House)

1.4 Опис демонстраційного прикладу

Демонстраційний приклад моделює термодинаміку будинку, використовуючи просту модель. **Thermostat** з установкою 70 градусів по Фаренгейту, на який подається сигнал зовнішньої температури, що змінюється по синусоїді з амплітудою 15 градусів щодо базової температури 50 градусів. Цей процес моделює щоденні температурні коливання.

У даній моделі використані підсистеми (**subsystems**), задля того, щоб спростити структуру та створити переналаджувану систему. Підсистема (**Subsystem**) – це група блоків, що представлена блоком **Subsystem**. Надана модель містить п'ять підсистем, а саме: одну **Thermostat**, одну **House**, і три **Temp Convert** підсистеми (дві з яких перетворюють градуси по Фаренгейту в градуси по Цельсию (**Fahrenheit to Celsius**), третя перетворює градуси по Цельсию в градуси по Фаренгейту (**Celsius to Fahrenheit**)).

Сигнали внутрішньої та зовнішньої температур подаються в підсистему **House**, що встановлює внутрішню температуру. Клацніть два рази на блоці **House**, щоб побачити основні блоки в цій підсистемі (рисунок 1.2...1.4).

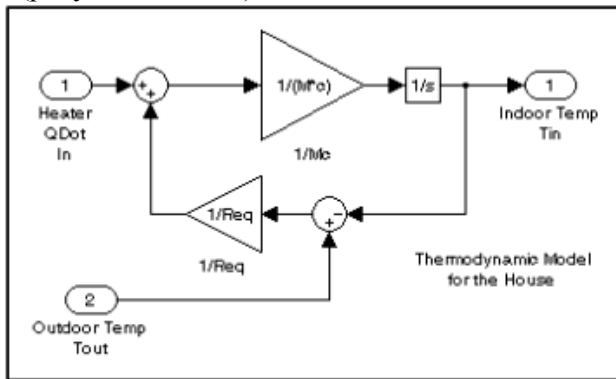


Рисунок 1.2 – Модель **House Subsystem**

Підсистема **Thermostat** моделює дію термостата, визначаючи, коли система нагрівання повинна бути включена або відключена. Клацніть два рази по блоку, щоб побачити основні блоки в цій підсистемі.

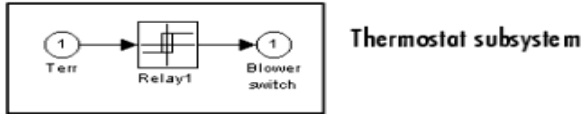


Рисунок 1.3

І зовнішня, і внутрішня температури перетворені із градусів по Фаренгейту в градуси по Цельсию ідентичними підсистемами.



Рисунок 1.4

1.5 Деякі експерименти

Спробуємо подивитися, як запропонована модель відповідає на зміну різних параметрів.

1) Кожен **Scope** блок містить одну або більше областей відображення й контролю сигналу, що дає Вам можливість вибрати діапазон зображення сигналу, змінювати масштаб зображення заданої ділянки сигналу й виконувати інші корисні процедури. Горизонтальна вісь представляє час, а вертикальна вісь представляє значення сигналу.

2) Блок **Constant**, позначений як **Set Point** (див. у лівому верхньому куті моделі) установлює бажану внутрішню температуру. Відкрийте цей блок і переустановите значення константи на 80 градусів. Подивитися, як змінюються внутрішня температура й витрати на опалення на (рисунок 1.2). Також відрегулюйте зовнішню температуру (**Avg Outdoor Temp** блок у центрі діаграми моделі) і подивитися, як це впливає на симуляцію (рисунок 1.3).

3) Регулюйте зміну щоденної температури, відкривши **Sine Wave** блок, позначений як **Daily Temp Variation**, і змінюючи параметр **Amplitude** (рисунок 1.5...1.7).

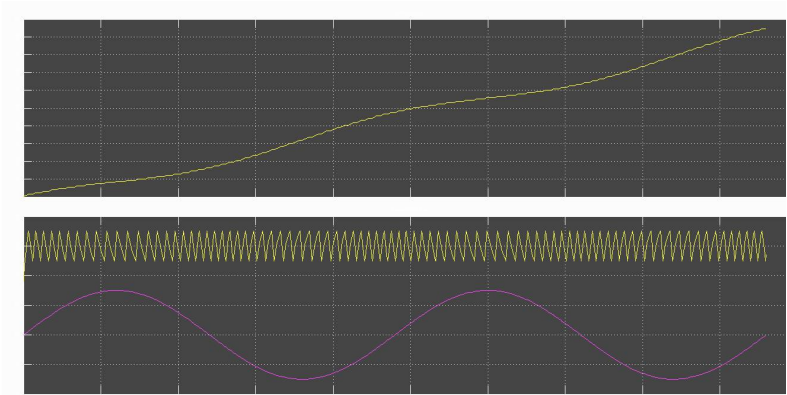


Рисунок 1.5 – Модель при зміні внутрішньої температури 80 градусів

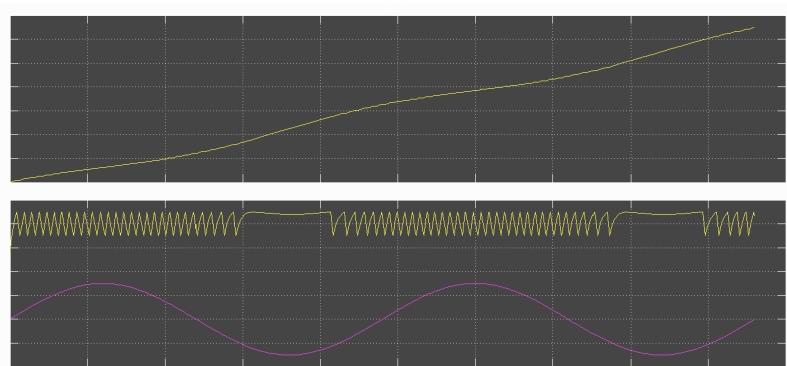


Рисунок 1.6 – Модель при зміні параметр Amplitude

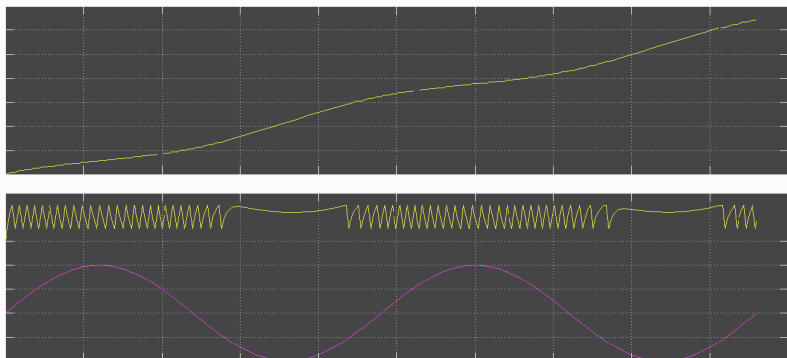


Рисунок 1.7 – Модель при зміні зовнішньої температури 40 градусів

Цей демонстраційний приклад ілюструє кілька завдань, що зазвичай використовуються при створенні моделей, тобто:

1) хід процесу симуляції визначається його заданими параметрами, а його початок – командою **Start**.

2) Ви можете компанувати складні групи зв'язаних блоків в один окремий блок, називаний підсистемою (Subsystem).

3) Ви можете створювати іконки користувача й розробляти діалогові вікна, використовуючи можливості маски, щоб настроїти блоки. У моделі thermo всі блоки підсистем мають користувацькі іконки, створені за допомогою маскування.

4) блоки Scope відображають вихідну графічну інформацію моделі в тім обсязі, у якому її робить фактичний осцилограф.

1.6 Створення простої моделі

Цей приклад показує Вам, як побудувати модель, використовуючи багато команд і дій для створення моделі, які Ви використовуватиме, щоб побудувати свої власні моделі. У даній лабораторній роботі надані короткі інструкції зі створення моделі. Більш докладніше ознайомимося із цим завданням у наступних лабораторних роботах. Ця модель інтегрує синусоїду й показує результат інтегрування разом із синусоїдою. Діаграма блоку моделі показує, як це робиться на (рисунку 1.8).

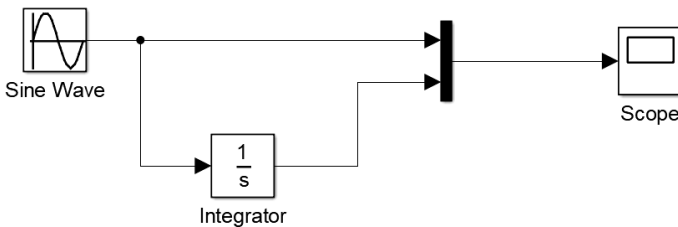


Рисунок 1.8 – Модель інтегрування синусоїди

Щоб створити модель, спочатку надрукуйте **simulink** у командному вікні **MATLAB** або натиснув відповідну іконку на панелі інструментів, що викликав появу браузера бібліотеки **Simulink** на (рисунках 1.9 та 1.10):

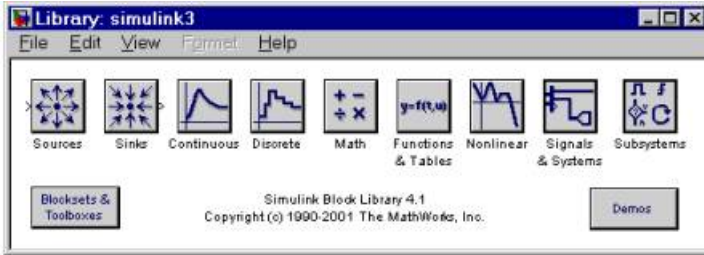


Рисунок 1.9 – Бібліотека Simulink

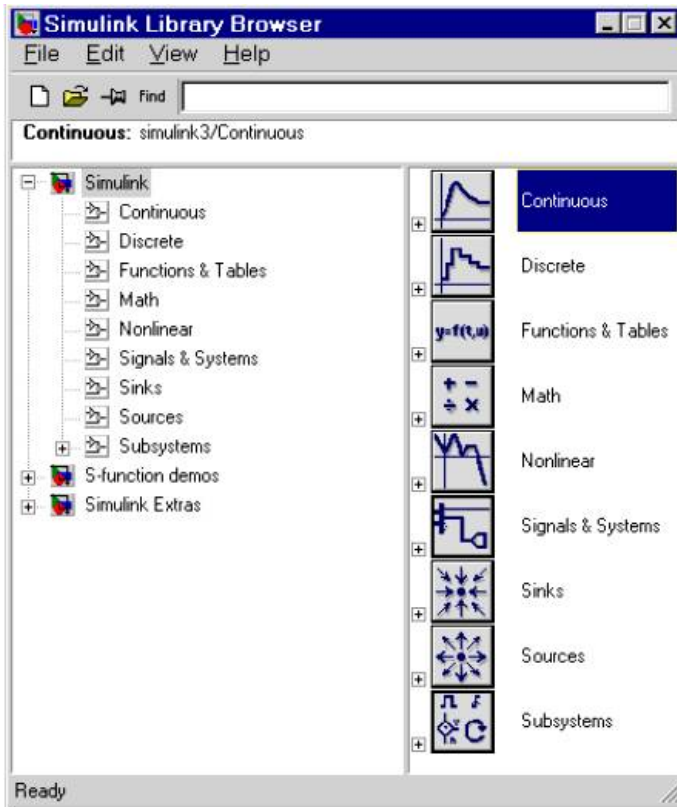


Рисунок 1.10 – Бібліотека Simulink

Щоб створювати нову модель, виберіть кнопку **New Model** на панелі інструментів браузеру бібліотеки.

Далі **Simulink** відкриває нове вікно для створення моделі (рисунок 1.12).

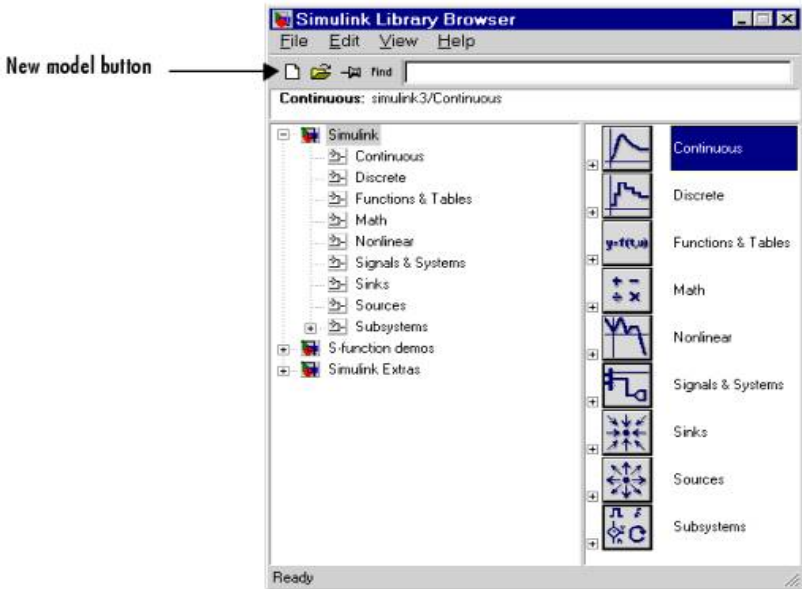


Рисунок 1.11 – Кнопка **New Model** на панелі інструментів браузера бібліотеки Simulink

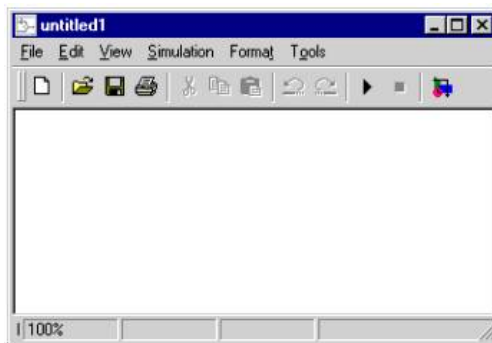


Рисунок 1.12 – Simulink відкриває нове вікно для створення моделі в бібліотеці Simulink

Щоб створити цю модель, необхідно скопіювати в модель блоки з наступних **Simulink** - бібліотек блоків (рисунок 1.13).

Simulink - бібліотека блоків є наступною:

- 1) **Sources library (Sine Wave block)** – бібліотека джерел;
- 2) **Sinks library (Scope block)** – бібліотека приймачів;

3) **Continuous library (Integrator block)** – бібліотека безперервних блоків;

4) **Signals & Systems library (Mux block)** –бібліотека сигналів і систем.

Ви можете скопіювати блок **Sine Wave** з бібліотеки Джерел, використовуючи браузер бібліотеки або вікно бібліотеки джерел.

Щоб скопіювати блок **Sine Wave** із браузера бібліотеки, спочатку розкривають дерево браузера бібліотеки, щоб побачити блоки в бібліотеці джерел. Зробіть це, клацнувши на вузол **Sources**. Нарешті, клацніть на значку **Sine Wave**, щоб вибрати цей блок.

Браузер бібліотеки виглядає так, як показано на рисунку 1.13, після того, як ви зробили це.

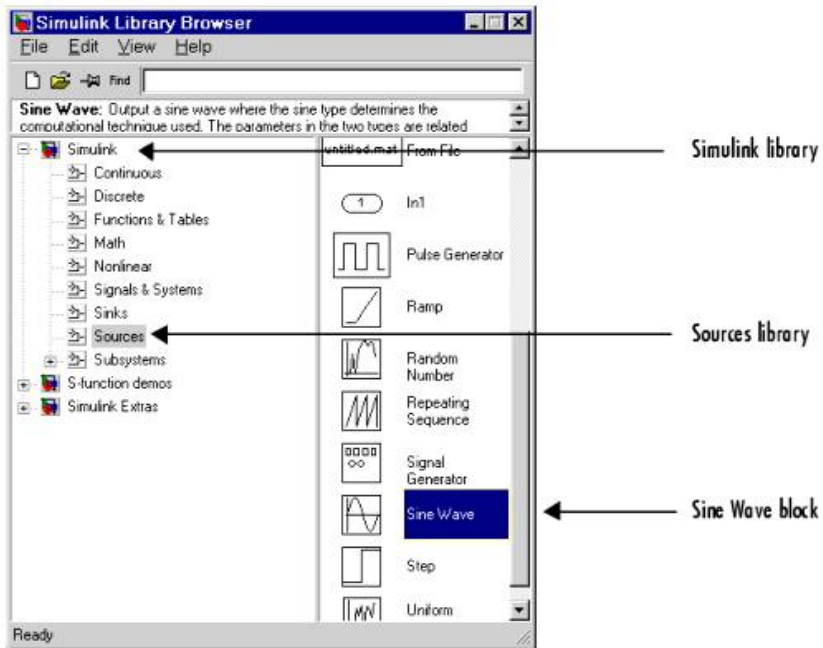


Рисунок 1.13 – Браузер бібліотеки **Simulink**

Тепер потягніть блок **Sine Wave** із браузера, і помістите його у вікні моделі. **Simulink** створює копію блоку **Sine Wave** у тій місці, де Ви залишили зображення блоку.

Можна зробити те ж саме в такий спосіб: клацніть правою кнопкою миші на вузлі **Sources**, потім на повідомленні «**open the**

‘Sources’ Library».

Потім тягніть блок у вікно моделі, як у попередньому випадку (дивись рисунок 1.14). Скопіюйте інші блоки аналогічно з їхніх відповідних бібліотек у вікно моделі.

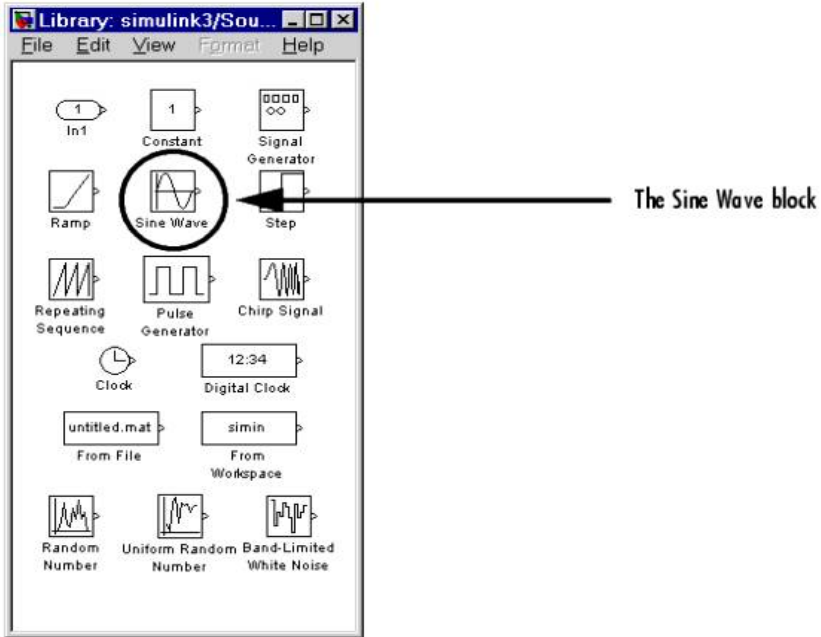


Рисунок 1.14

Ви можете переміщати блок з одного місця у вікні моделі в інше, перетаскуючи блок. Ви можете переміщати блок на невелику відстань, виділивши блок, а потім натискаючи кругові ключі. З усіма скопійованими блоками вікно моделі повинне виглядати в такий спосіб, як наведено на рисунку 1.15.

Якщо Ви досліджуєте зображення блоку, Ви бачите кутову дужку праворуч від блоку **Sine Wave** і дві ліворуч від блоку **Mux**. Символ $>$, спрямований із блоку – *вихідний порт (output port)*; якщо символ указує на блок, це *вхідний порт (input port)*.

Сигнал передається з вихідного порту в порт входу іншого блоку через лінію з'єднання. Коли блоки з'єднані, символи порту зникають.

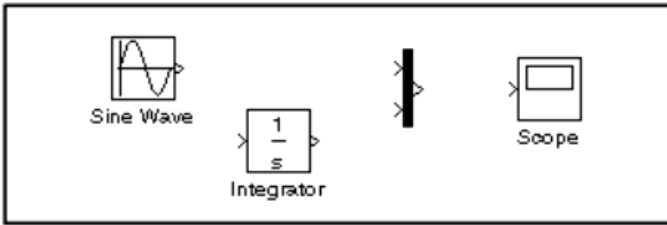


Рисунок 1.15

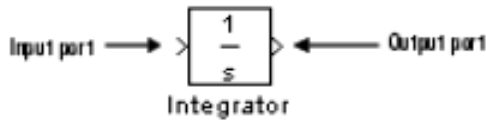


Рисунок 1.16

Тепер прийшов час з'єднувати блоки. З'єднаєте блок **Sine Wave** з верхнім портом входу блоку **Mux**. Помістіть покажчик на вихідний порт на правій стороні блоку **Sine Wave**. Зауважте, що форма курсору змінюється на тонкий хрест.

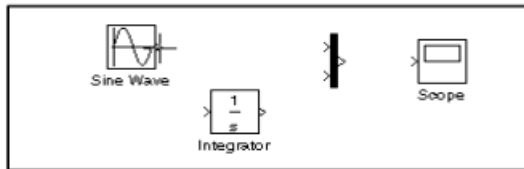


Рисунок 1.17

Утримуйте кнопку миші та перемістіть курсор у верхній порт входу блоку **Mux**. Зверніть увагу на те, що лінія буде переривчастою, поки натискаєте кнопку миші, і що форма курсору змінюється на подвійний хрест при наближенні до блоку **Mux**.

Тепер відпустіть кнопку миші. Тепер блоки з'єднані. Ви можете також з'єднувати лінію із блоком, відпустивши кнопку миші, коли покажчик буде усередині зображення блоку. Якщо Ви зробите це, лінія буде з'єднана з портом входу, найближчим до позиції курсору.

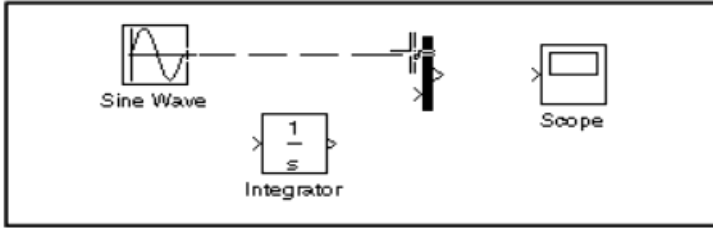


Рисунок 1.18

Якщо Ви знову поглянете на модель на початку цього опису («Створення простої моделі»), Ви помітите, що більшість ліній з'єднує вихідні порти блоків із входними портами інших блоків. Однак, одна лінія приєднує лінію до входного порту іншого блоку. Ця лінія, названа лінією-галузою, з'єднує вихід блоку «**Sine Wave**» із блоком інтегратора («**Integrator block**»), і несе такий самий сигнал, що приходиться від «**Sine Wave**» блоку до блоку «**Mux**».

Зображення лінії-гілки дещо відрізняється від зображення лінії, що Ви щойно тягли. Щоб виконати приєднання до існуючої лінії, зробіть наступне:

1) Спочатку розмістити покажчик на лінії між «**Sine Wave**» блоком і блоком «**Mux**».

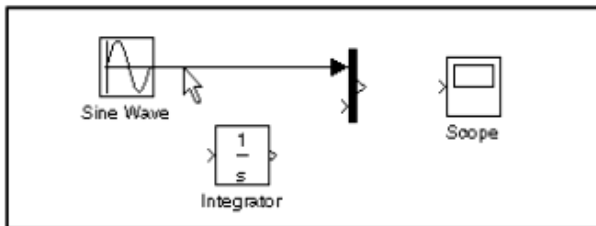


Рисунок 1.19

2) Натисніть і утримуйте ключ **Ctrl** (або клацніть правою кнопкою миші). Натисніть кнопку миші, потім тягніть покажчик на порт входу блоку «**Integrator**» або в блок «**Integrator**» безпосередньо.

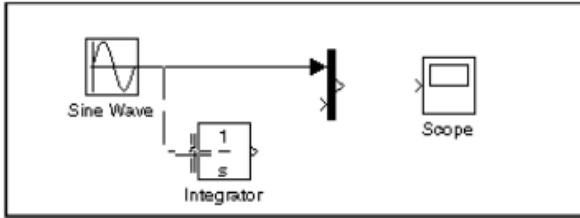


Рисунок 1.20

3) Відпустіть кнопку миші. **Simulink** зобразить лінію між відправною крапкою і портом входу блоку «**Integrator**».

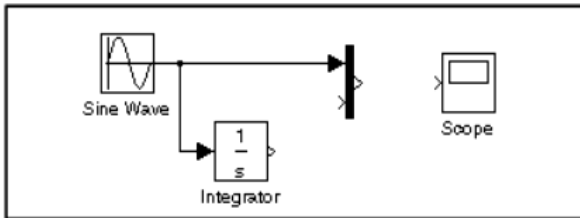


Рисунок 1.21

4) Отже, зв'язку між блоками встановлені. Коли Ви це зробили, ваша модель повинна вигляд на (рисунку 1.22).

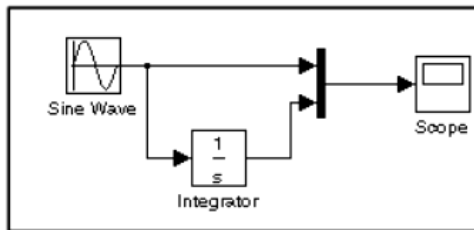


Рисунок 1.22

Тепер, відкрийте блок «**Scope**», щоб подивитися результати моделювання. Зберігаючи відкритим вікно **Scope**, встановіть **Simulink** на тривалість симуляції 10 секунд. Для цього встановіть параметри моделювання, вибираючи з головного меню **Simulation** ⇒ **Simulation parameters** ⇒ **Stop time** =10. Зверніть увагу, що за замовчуванням тривалість симуляції **Stop time**=10 (рисунку 1.23 або такий, як наведено на рисунку 1.24).

Закрийте вікно діалогу **Simulation parameters**, кладнувши на кнопку **OK**. **Simulink** застосує параметри й закриє вікно діалогу.

Виберіть **Start** з меню **Simulation** (або натисніть кнопку **Start simulation** на панелі інструментів) і подивитися криві на вході блоку **Scope**.

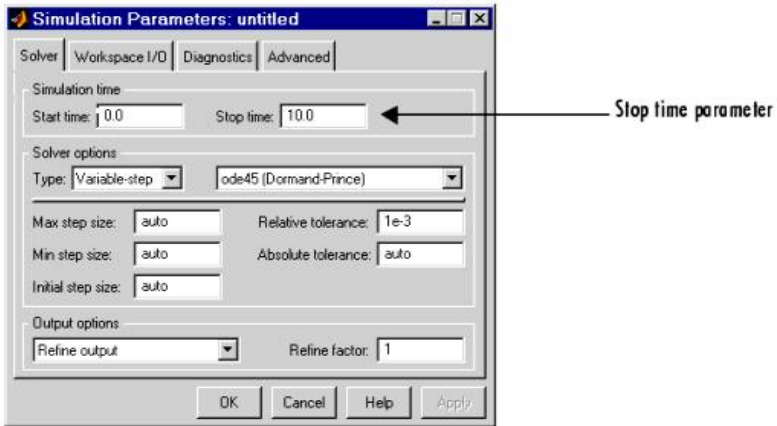


Рисунок 1.23 – Вікно діалогу **Simulation parameters**

Симуляція зупиняється, коли поточний час досягає часу **Stop time**, зазначеного в діалоговому вікні **Simulation parameters** або коли Ви виберете **Головне меню** ⇒ **Simulation** ⇒ **Stop** (або натисніть кнопку **Stop** на панелі інструментів вікна моделі).

Щоб зберегти цю модель, помістіть її у свою особисту папку на студентському диску. Виберіть **Головне меню** ⇒ **File** ⇒ **Save as** і уведіть ім'я файлу та його місце розташування. Цей файл містить опис моделі.

Щоб закінчити сеанс роботи з **Simulink** і **MATLAB**, виберіть **Головне меню** ⇒ **Exit MATLAB**. Ви можете також надрукувати **quit** після знаку запрошення» у командному вікні **MATLAB**. Якщо Ви хочете вийти з **Simulink**, але не з **MATLAB**, тільки закрийте всі вікна **Simulink**.

Цей приклад показує Вам, як виконувати деякі типові завдання побудови та симулювання моделей. Ці та інші завдання будуть описані пізніше більш докладно.

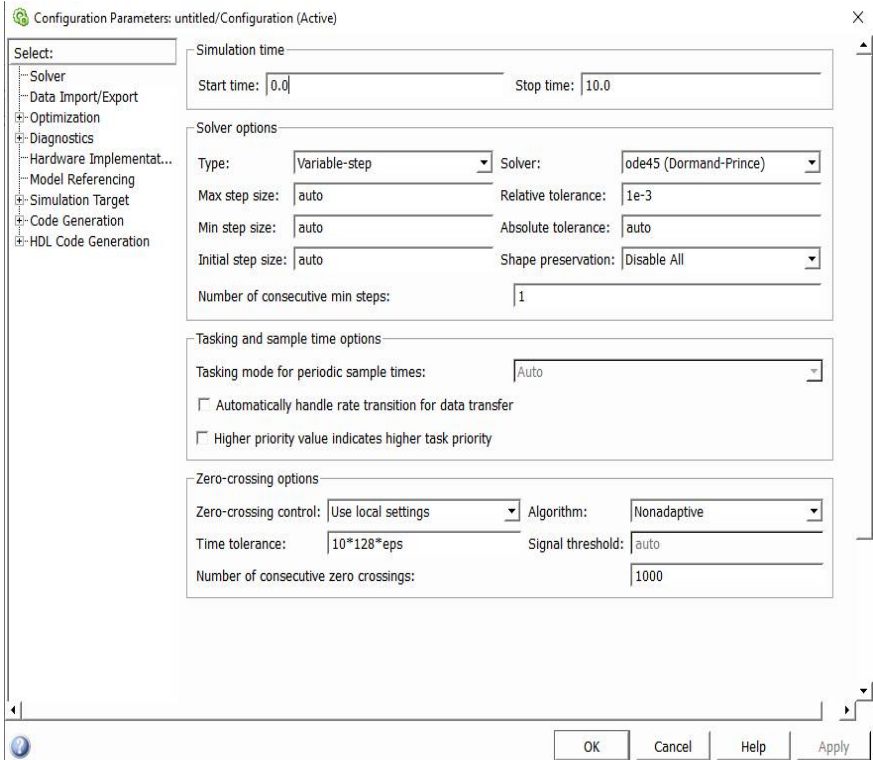


Рисунок 1.24 – Зображення на екрані

1.7 Установка Simulink Preferences

Діалогове вікно **MATLAB Simulink Preferences** дозволяє Вам установити багато опцій **Simulink**. Щоб побачити вікно діалогу **Preferences**, виберіть **Головне меню**⇒**File**⇒**Preferences. Simulink Preferences**.

Вікно діалогу **Preferences** дозволяє Вам установити наступні опції **Simulink**:

- **Window reuse** – визначає, чи використає **Simulink** існуючі вікна або відкриває нові, щоб показати підсистеми моделі;

- **Model Browser** – визначає, чи показує **Simulink** дерево, коли Ви відкриваєте модель і чи показує дерево блоки, імпортовані з підсистем і зміст замаскованих підсистем;



Рисунок 1.25 – Графік інтегрування синусоїди

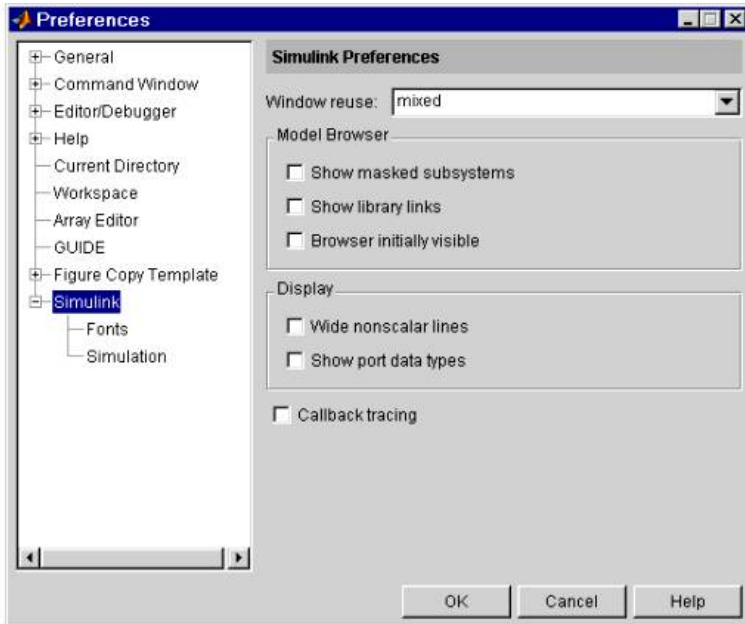


Рисунок 1.26 – Вікно Simulink Preferences

– **Display** – визначає, чи використати товсті лінії, щоб показати нескалярні зв'язки між блоками й чи показувати типи даних порту на

діаграмі блоку;

- **Callback tracing** – визначає, чи показувати повернення моделей, які **Simulink** викликає при симуляції;
- **Simulink Fonts** - визначає шрифти, які потрібно використати для блоку і ярликів лінії й анотацій діаграм блоків;
- **Solver** – визначає опції симуляції для вирішувача;
- **Workspace** – визначає опції робочого простору для симуляції моделі;
- **Diagnostics** – визначає опції діагностики для симуляції моделі;
- **Advanced** – визначає підвищені вимоги при симуляції моделі.

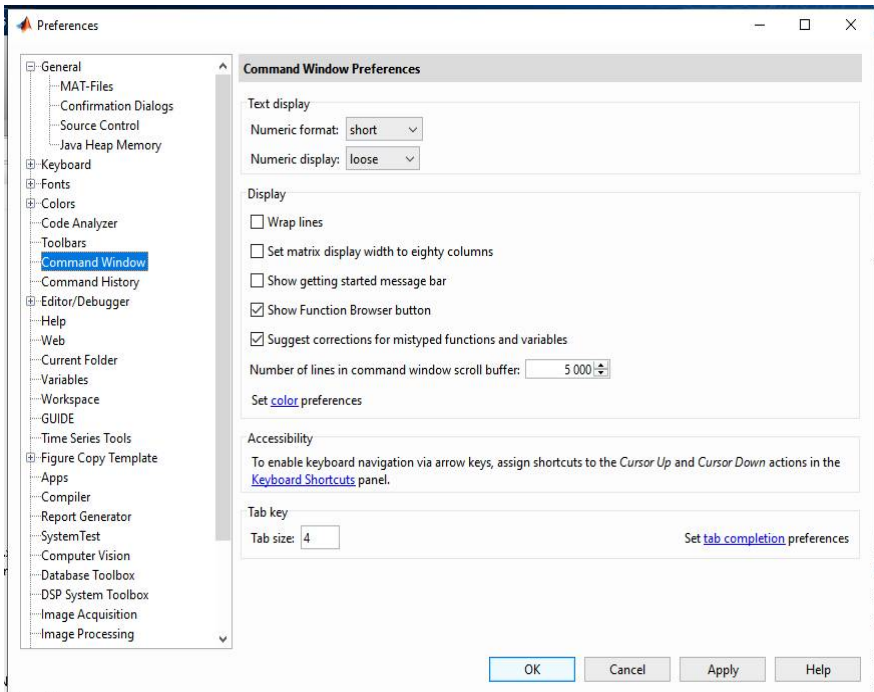


Рисунок 1.27 – Зображення на екрані Simulink Preferences

1.8 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері і повинен мати:

- 1.8.1 Назву, тему та мету роботи.
- 1.8.2 Скріншоти виконання запуску програми **MATLAB Simulink** відповідно до пп.1.5...1.7.
- 1.8.3 Висновки, які пояснюють призначення та основні етапи при роботі з програмою **MATLAB Simulink**.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ЗМІСТУ БІБЛІОТЕКИ ЯДРА SIMULINK. СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ НА ЇХ ОСНОВІ

Тривалість лабораторного заняття – 2 години.

2.1 Мета роботи

Ознайомитися з принципами організації та змістом бібліотек ядра Simulink, а також зі створенням моделей на їх основі.

2.2 Основні властивості підсистеми Simulink

Серед великої кількості пакетів візуального моделювання пакет **Matlab** займає особливе місце. Спочатку орієнтований на дослідницькі проекти, пакет в останні роки став робочим інструментом інженерів-проектувальників, викладачів і студентів. Однієї з основних причин широкого використання пакета **Matlab** є широкий спектр засобів, надаваних користувачеві для рішення різноманітних інженерних і наукових завдань. Серед цих засобів особливе місце займає підсистема **Simulink**. Підсистема **Simulink** – це інтерактивне середовище для моделювання та аналізу широкого класу динамічних систем, що використовує графічну мову блок-діаграм.

Підсистема **Simulink**:

- надає можливість моделювання безперервних, дискретних і гібридних як лінійних, так і нелінійних систем;
- містить у собі велику бібліотеку блоків (безперервні елементи, дискретні елементи, математичні функції, нелінійні елементи,

джерела сигналів, засобу відображення, додаткові блоки), які можна використати для створення нових систем;

- дозволяє поєднувати блок-діаграми в складені блоки, забезпечуючи ієрархічне подання структури моделі;

- містить засобу для створення блоків і бібліотек, обумовлених користувачем;

- дає можливість проектувати підсистеми, що мають змінювану в часі структуру, але ці можливості досить обмежені.

Процес побудови моделі **Simulink** містить у собі компонування моделі та завдання необхідних параметрів. Компонування полягає у виборі з бібліотек **Simulink** необхідних блоків, їх розміщення у вікні, що відкрилося, та з'єднання між собою. Далі для кожного блоку встановлюються відповідні параметри, що відповідають вимогам моделюємої системи. Для того, щоб побудувати модель **Simulink**, необхідно знати, які типи блоків надаються користувачеві.

2.3 Бібліотеки блоків **Simulink**

Основним «будівельним» елементом у процесі побудови моделі в пакеті **Simulink** є блок. Блок являє собою систему типу «вхід - вихід – стан» (або просто «вхід – вихід») і може бути як простим, так і складовим.

За аналогією із класами, що використовуються в об'єктно-орієнтованих мовах, можна зазначити, що кожен блок з будь-якої бібліотеки блоків пакета **Simulink** є класом. Щойно користувач переносить блок з бібліотеки у вікно побудови моделі, він тим самим створює екземпляр даного «класу». У цьому екземплярі він може змінювати значення параметрів блоку залежно від вимог, пропонуєваних до системи, що моделюється.

За допомогою зв'язків екземпляри блоків поєднуються в єдину схему, що створюється у вікні побудови моделі, або може бути зібрана відразу в складеному пристрої – контейнері, екземпляр якого попередньо міститься у вікно.

Процедура пошуку та переміщення блоків з бібліотек **Simulink** у вікно моделі багато в чому нагадує операції копіювання і переміщення файлів у середовищі **Windows**. Зокрема, технологія роботи в **Simulink Library Browser** (рисунок 2.1) аналогічна роботі з **Windows Explorer**. Для того щоб перемістити необхідний блок з бібліотеки у вікно будови моделі, необхідно знайти цей блок серед

списку стандартних блоків **Simulink**. Для цього у вікні **Simulink Library Browser** необхідно вибрати пункт **Simulink**, потім вибрати відповідний пункт у списку, що відкрився, бібліотеки і розкрити його (аналогічно тому, як розкривається каталог в **Windows Explorer**). У результаті, вікно **Simulink Library Browser** приймає вид, аналогічний показаному на рисунку 2.1. Для переміщення курсор мишки встановлюється на потрібний блок. Потім, натиснувши ліву клавішу мишки, блок переміщується у вікно моделі. Також, крім безпосереднього перегляду вмісту бібліотек, будь-який блок може бути знайдений по імені, уведеному в текстове поле, розташоване в правій верхній частині **Simulink Library Browser**. Після того, як блок з'явився у вікні побудови моделі, можна встановити для нього відповідні параметри. Для цього досить зробити подвійний клік лівої кнопки мишки по піктограмі блоку та установити необхідні для даного блоку параметри.

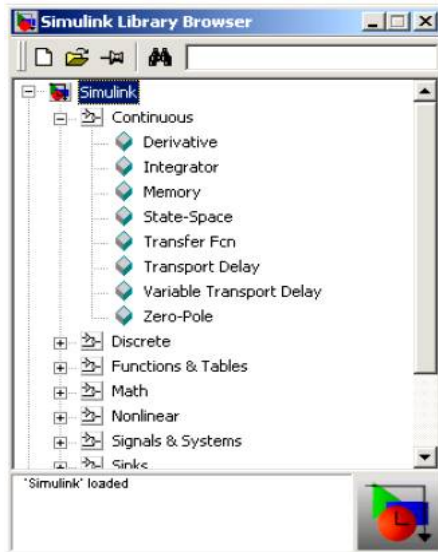


Рисунок 2.1 – «Дерево» **Simulink**

В процесі створення моделі є можливість редагування параметрів у блоці **Constant**. На рисунках 2.3 та 2.4 наведені можливі вікна для редагування параметрів блоку «Стала» (**Constant**). Simulink містить у собі наступні бібліотеки блоків.

2.3.1 Джерела (Sources)

Дана бібліотека містить у собі джерела сигналів, такі як «генератор імпульсних/синусоїдальних сигналів», «генератор випадкових чисел», «генератор пилкоподібних сигналів»; «годинники» тощо (рисунк 2.2).

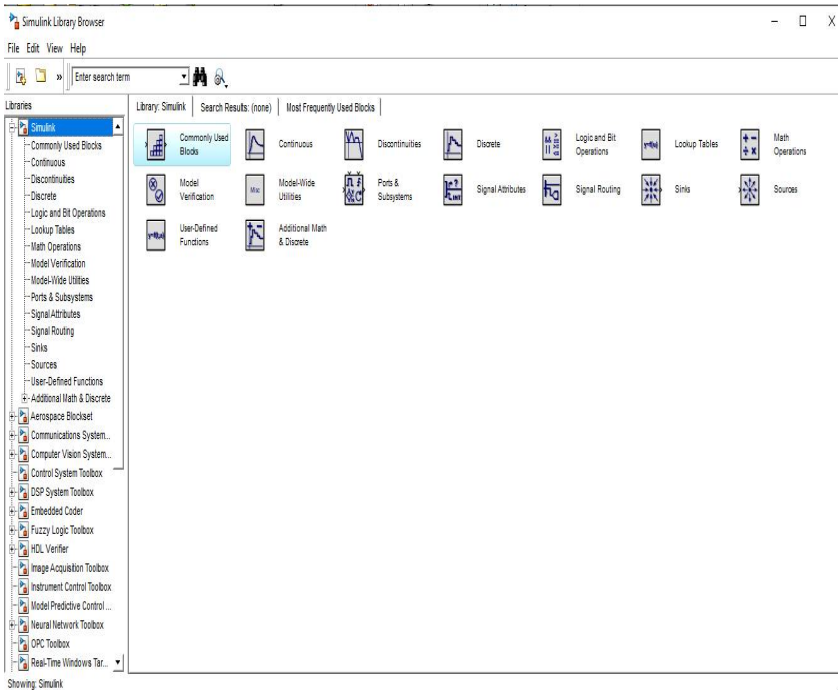


Рисунок 2.2 – Зображення на екрані «Дерево» Simulink

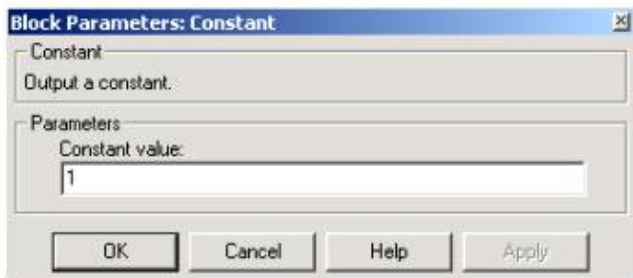


Рисунок 2.3 – Вікно завдання параметрів блоку Constant

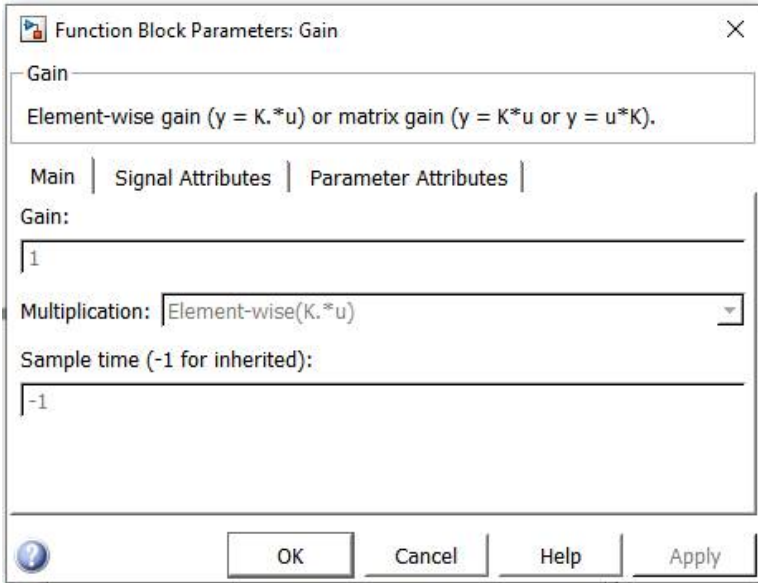
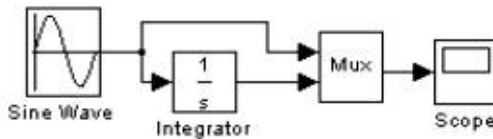


Рисунок 2.4 – Вікно завдання параметрів блоку Constant

Прикладом 1 (example1) може бути наведений спосіб одержання косинусоїдального сигналу $\cos t$, яке може слугувати для взяття інтеграла від синусоїди. Для цього досить подати на вхід інтегратора сигнал з виходу блоку «Генератор синусоїди» (**Sine Wave**) (зробивши в ньому попередні установки відповідних параметрів). На виході інтегратора буде необхідна косинусоїда, яку можна спостерігати, підключивши до виходу інтегратора блок «Осцилограф» (**Scope**) (рисунки 2.5 та 2.6).

Рисунок 2.5 – Одержання косинусоїдального сигналу $\cos t$

2.3.2 Кінцеві блоки (Sinks)

Дана бібліотека містить у собі засобу відображення сигналів, що виникають на виході блоків. Сюди входять блоки «**осцилограф**», «**вивід результатів у файл**», а також блок «**зупинка виконання**».

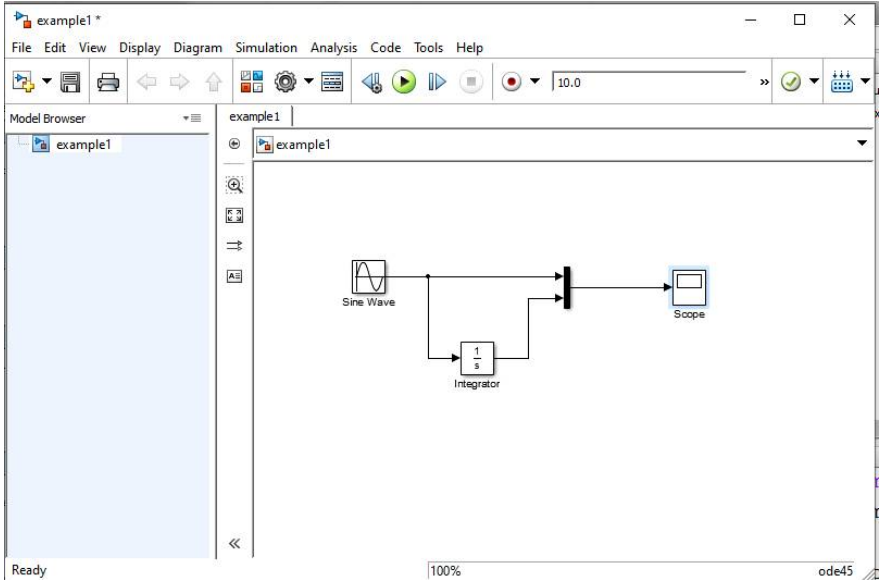


Рисунок 2.6 – Вікно для одержання косинусоїдального сигналу $\cos t$

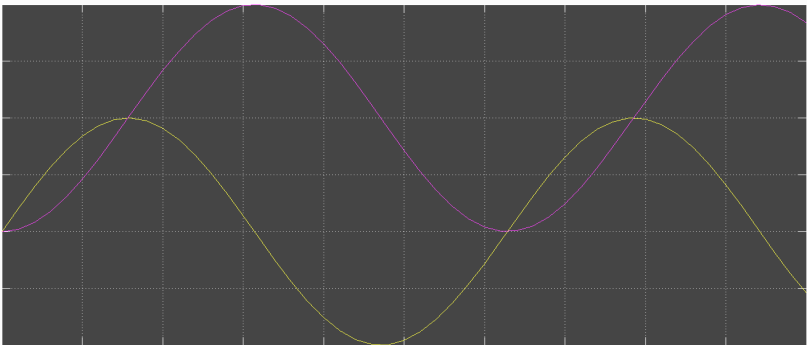


Рисунок 2.7 – Зображення на екрані одержання косинусоїдального сигналу $\cos t$

Ілюстрацією щодо застосування блоку «**осцилограф (Scope)**» може послужити попередній приклад.

Наступний приклад 2 (example2) ілюструє застосування блоку «**зупинка виконання**» (**Stop**). Щойно значення часу у моделі стане більше або дорівнює 15 секундам, модель припиняє виконуватися:

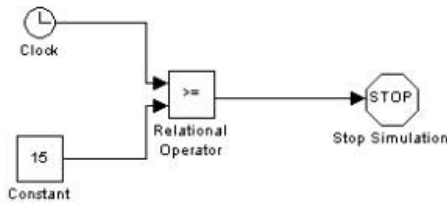


Рисунок 2.8 – Приклад реалізації блоку «зупинка виконання» (**Stop**)

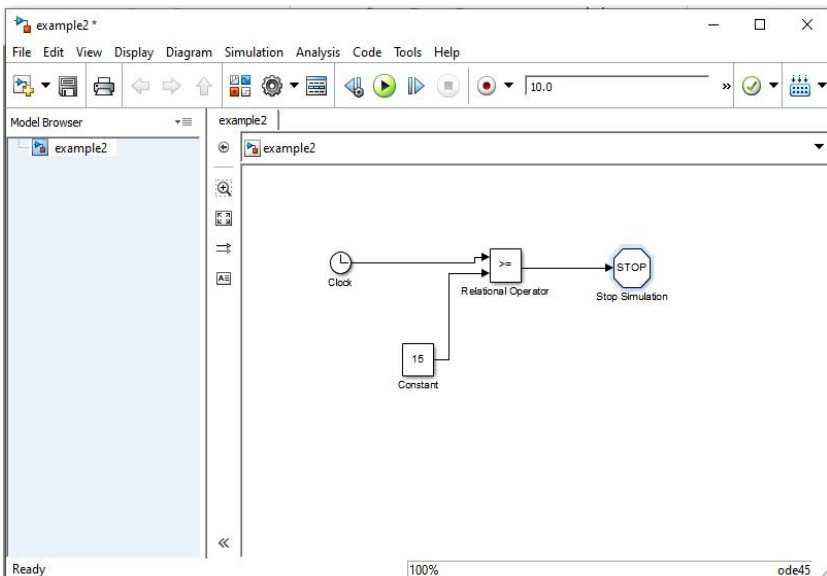


Рисунок 2.9 – Зображення на екрані реалізації блоку «зупинка виконання» (**Stop**)

2.3.3 Дискретні блоки (Discrete)

Дана бібліотека містить у собі блоки, що функціонують у дискретному часі, такі як «**інтегратор з дискретним часом**», «**дискретний фільтр**» тощо. У бібліотеці є в наявності блоки, які

дозволяють розв'язувати системи, що описуються різницевиими рівняннями за допомогою дискретного перетворення Лапласа або так названого z - перетворення. У цьому випадку, рішення рівняння перебуває за допомогою передатної функції, що має наступний вид

$$H(z) = \frac{num(z)}{den(z)} = \frac{num_0 z^n + num_1 z^{n-1} + \dots + num_m z^{n-m}}{den_0 z^n + den_1 z^{n-1} + \dots + den_n},$$

де $m+1$ та $n-1$ – це коефіцієнти відповідно в чисельнику і знаменнику, що містять відповідно статичні функції від z ;

num та den – це вектори коефіцієнтів чисельника і знаменника відповідно, при чому їх значення встановлюються користувачем у діалоговому вікні блоку.

Довжина вектора den повинна бути більше або дорівнювати довжині вектору num .

Наступний приклад 3, аналогічно прикладу1, ілюструє процес інтегрування синусоїди, але вже з використанням інтегратора з дискретним часом:

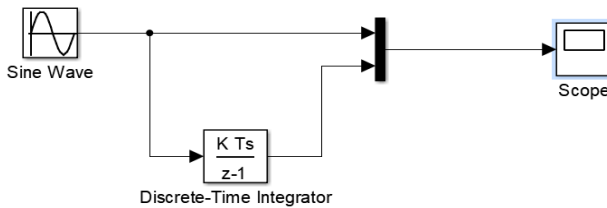


Рисунок 2.10 – Приклад реалізації блоку «Дискретні блоки (Discrete)»

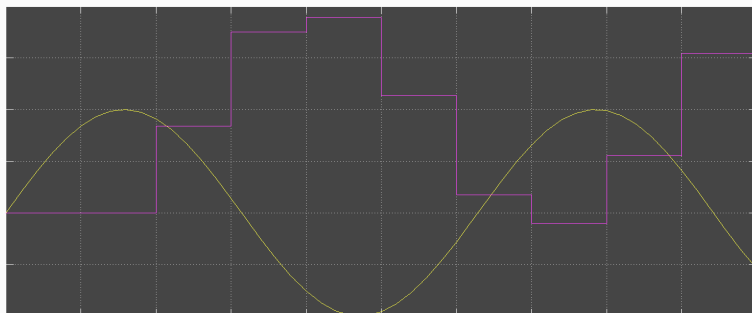


Рисунок 2.11 – Зображення на екрані реалізації блоку «Дискретні блоки (Discrete)» в прикладі 3

2.3.4 Безперервні блоки (Continuous)

Дана бібліотека містить у собі безперервні елементи, такі як «інтегратор», «диференціатор», «лінійна система вхід-вихід-стан», та інші, що задаються за допомогою передатних функцій.

Приклад 4 ілюструє реалізацію безперервних блоків, а саме «інтегратор». Отже: дано диференціальне рівняння:

$$X'(t) = -2x(t) + u(t),$$

де $u(t)$ – прямокутна хвиля з амплітудою 1 і частотою 1 рад / сек.

Для розв'язання цього завдання необхідно використати «інтегратор», на вхід якого подається похідна x' , а на виході одержується значення змінної x .

Два інших блоки – «Суматор» (Summator) і «Підсилювач» (Gain) – необхідні для формування значення x' відповідно до вищепри описаного рівняння. Для одержання сигналу $u(t)$ використовується блок «Генератор сигналів» (Signal Generator), у якому необхідно задати відповідним умовам установки. Отримане в результаті значення $x(t)$ подається на вхід блоку «осцилограф»:

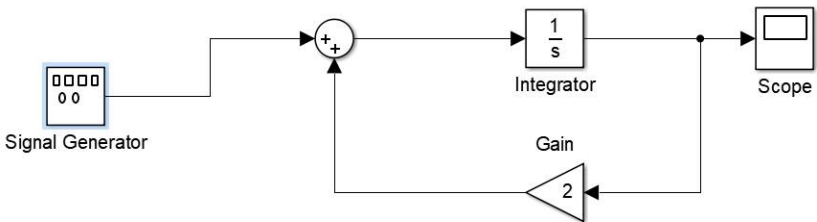


Рисунок 2.12 – Приклад реалізації блоку «Безперервні блоки (Continuous)»

2.3.5 Нелінійні блоки (Nonlinear)

Дана бібліотека містить у собі блоки, що реалізують нелінійні функції, такі як «релейна ланка», «перемикачі» тощо.

Приклад 5 ілюструє реалізацію функції «Нелінійні блоки (Nonlinear)», а саме припустимо, що необхідно одержати сигнал, що перші 20 секунд буде прямокутною хвилею, а у наступний час –

пилкоподібним.

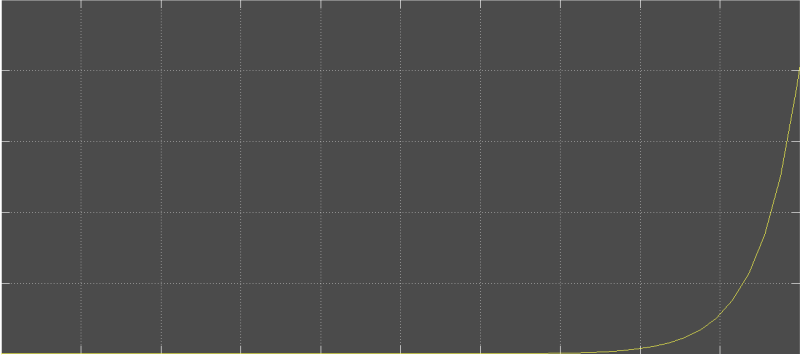


Рисунок 2.13 – Зображення на екрані реалізації блоку «**Безперервні блоки (Continuous)**» в прикладі 4

Для цього необхідно використати «**Перемикач (Switch)**». У блоці «**перемикач**» встановлюється граничне значення часу 20, на перший вхід подається пилкоподібний сигнал, на другий – годинники, на третій – прямокутна хвиля. Перші 20 секунд значення часу буде менше граничного, тому буде активним третій вхід. Щойно час перевищить граничне значення, активним стає перший вхід і на виході з'являється пилкоподібний сигнал:

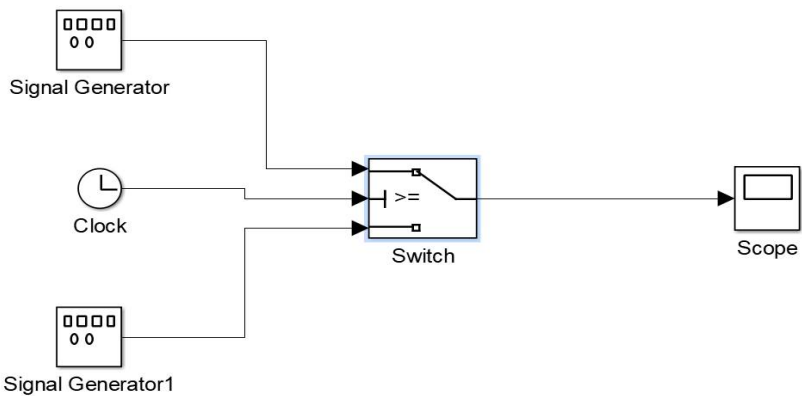


Рисунок 2.14 – Приклад реалізації блоку «**Нелінійні блоки (Nonlinear)**»

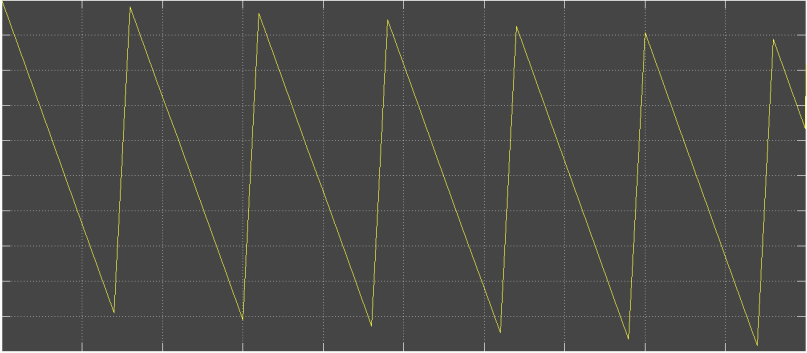


Рисунок 2.15 – Зображення на екрані реалізації блоку «**Нелінійні блоки (Nonlinear)**» в прикладі 5

2.3.6 Математичні функції (Math)

Дана бібліотека містить у собі блоки, що реалізують математичні функції, такі як «**абсолютне значення**», «**комбінаторна логіка**», «**виділення речовинний і мнимий складовій комплексного числа**» тощо.

Приклад 6 ілюструє реалізацію функції «**Математичні функції (Math)**». Як вже зазначалось, деякі блоки цієї бібліотеки використовувалися в раніше описаних прикладах (блок «**Оператор відношення**» (**Relational Operator**) використався в прикладі 2, а блок «**Підсилювач**» (**Gain**) – у прикладі 4).

Ще одним прикладом використання блоку бібліотеки «**Математичні блоки**» може слугувати раніше описаний приклад одержання косинусоїдального сигналу $Cos(t)$. Для цього необхідно подати на вхід блоку «**Тригонометричні функції**» (**Trigonometric Function**) вихідний сигнал часу «**годинники**» (**Clock**) (попередньо в установках блоку «**Тригонометричні функції**» вибравши пункт «**cos**»). У результаті, на виході блоку «**Тригонометричні функції**» буде необхідна косинусоїда, що можна спостерігати, підключивши до виходу блок «**Осцилограф**» (**Scope**):

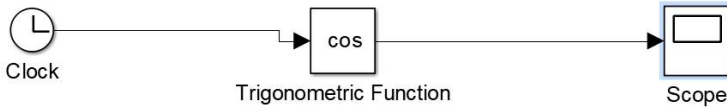


Рисунок 2.16 – Приклад реалізації блоку «Математичні функції (Math)»

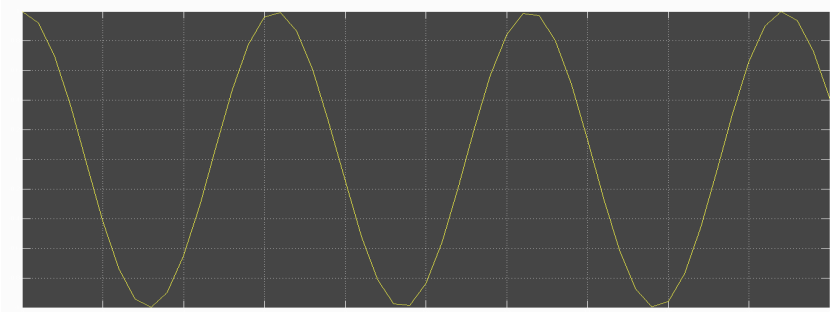


Рисунок 2.17 – Зображення на екрані реалізації блоку «Математичні функції (Math)» в прикладі 6

2.3.7 Безперервні та табличні функції (Functions & Tables)

Дана бібліотека містить у собі блоки, що дозволяють реалізовувати функції й працювати з таблицями. Сюди входять такі блоки, як виклик «функцій пакета Matlab», «S-функції», блок «Інтерполяція», що відображає вхідний вектор у вихідний (з використанням лінійної інтерполяції значень, певних у параметрах блоку) і т.д.

Приклад 7 ілюструє реалізацію функції «Безперервні й табличні функції (Functions & Tables)», а саме наступне завдання: необхідно одержати рішення функції

$$\sin(\cos(t)) \cdot \exp[2.1 \cdot (-\sin(t))].$$

Це можна зробити, використовуючи блок «Функції» (Fcn). Для цього досить подати на вхід блоку «Функції» (Fcn) вектор, першим елементом якого є значення **Cos (t)**, а другим – **Sin (t)**.

В установках блоку необхідно описати функцію, значення якої треба одержати. У результаті, на виході блоку буде отримане шукане значення функції, що можна спостерігати, підключивши до виходу

блок «Осцилограф» (Scope):

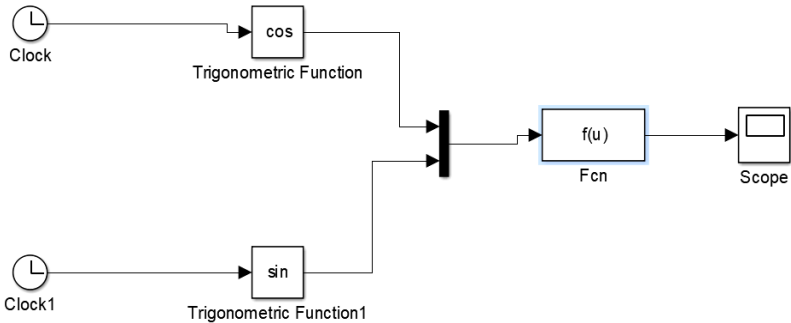


Рисунок 2.18 – Приклад реалізації блоку **Безперервні та табличні функції (Functions & Tables)**

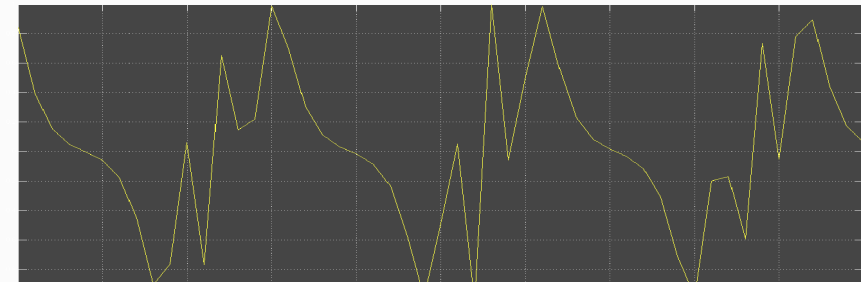


Рисунок 2.19 – Зображення на екрані реалізації блоку **«Безперервні та табличні функції (Functions & Tables)»** в прикладі 7

2.3.8 Сигнали та системи (Signals & Systems)

Дана бібліотека містить у собі блоки, такі як «мультиплексор» (Mux) і «демультиплексор» (DeMux), «вхідний сигнал» та «вихідний сигнал», «підсистема» (Subsystem), «пошук крапки перемикання» (Hit Crossing) тощо.

Приклад 8 ілюструє реалізацію функції «Сигнали та системи (Signals & Systems)». У попередньому прикладі 7 представлений один із способів використання блоку «мультиплексор» (Mux) цієї бібліотеки. Також найчастіше використовуваним блоком є блок «підсистема» (Subsystem). Його зручно використовувати для

побудови ієрархічної блок-діаграми. Виділяючи необхідні частини системи в підсистеми та розташовуючи їх у блоках-контейнерах **Subsystem**, можна уникнути захаращення діаграми заплутаними схемами.

Так, наприклад, нехай необхідно одержати рішення описаної в попередньому прикладі функції

$$\sin(\cos(t) \cdot \exp[2.1 \cdot (-\sin(t))]),$$

а також двох функцій, що відрізняються від зазначеної тільки значенням коефіцієнта в показнику експоненти, тобто:

$$\begin{aligned} &\sin(\cos(t) \cdot \exp[1.1 \cdot (-\sin(t))]), \\ &\sin(\cos(t) \cdot \exp[3.1 \cdot (-\sin(t))]). \end{aligned}$$

Навіть у цьому простому прикладі зручно схему, що описує першу функцію, помістити в окремий блок «підсистема» (**Subsystem**), а потім, скопіювавши цей блок, зробити в схемі мінімальні зміни (змінити значення відповідного коефіцієнта в описах блоку «Функції» (**Fcn**)). Для зручності можна переглянути отримані рішення на одному осцилографі, використовуючи при цьому блок «мультиплексор» (**Mux**). Вид основного вікна при цьому буде наступним (рисунок 2.20):

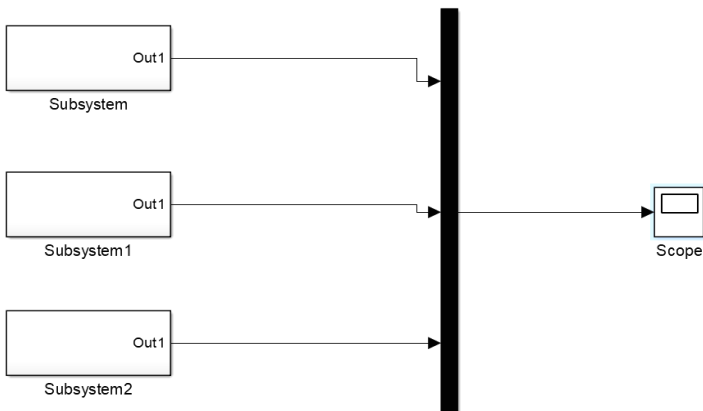


Рисунок 2.20 – Приклад реалізації блоку «Сигнали та системи (Signals & Systems)»

Вид кожного з підокон, що містить у собі підсистему, буде однаковим:

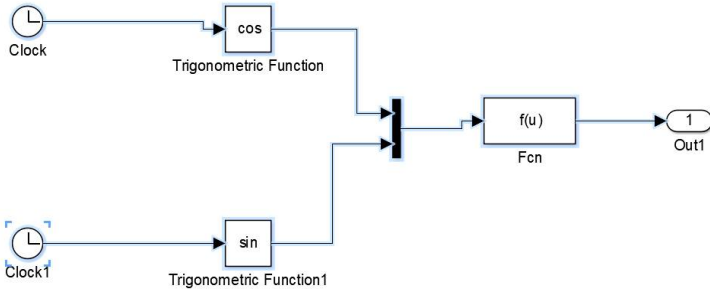


Рисунок 2.21 – Зображення на екрані реалізації блоку **Сигнали та системи (Signals & Systems)**» в прикладі 8



Рисунок 2.22 – Зображення на екрані реалізації блоку **«Сигнали та системи (Signals & Systems)»** в прикладі 8

2.4 Об'єднання блок-діаграм у складені блоки

Як уже було зазначено раніше, блок-діаграми **Simulink** можуть бути об'єднані в складені блоки, що дозволяє використовувати ієрархічне подання структури моделі.

Для того, щоб виділити частину системи в складений блок, можна це реалізувати за стандартною процедурою: перенести з бібліотеки блоків **«Підсистема» Subsystem** блок (а саме складений блок) і, відкривши його вікно, сформувати його структуру саме в

цьому окремому вікні. Але в пакеті **Simulink** передбачений інший спосіб: вибудувавши блок-діаграму в основному вікні розробляємої моделі, можна виділити її частину (ту, що необхідно об'єднати в складений блок) і, перейшовши в меню, вибрати пункт «**Edit/Create Subsystem**». У результаті в основному вікні автоматично утворюється складений блок, в якому буде укладена та частина блок-діаграми, що була виділена. Виділення необхідної частини блок-діаграми можна зробити, натиснувши ліву кнопку миші в од прикладі 8ному з кутів передбачуваної рамки (якої необхідно обвести виділювану частину діаграми) і, утримуючи ліву кнопку мишки, розтягнути рамку, що з'явилася, до необхідних розмірів. Після цього кнопку необхідно відпустити.

2.5 Безперервний і дискретний час

У пакеті **Simulink** розрізняють два «часи»: безперервний та дискретний. Побачити розходження між цими двома способами завдання часу можна на найпростішому прикладі: взявши блок «Годинники» (**Clock**) і блок «Дискретні годинники» (**Digital Clock**), під'єднаймо їх виходи на входи мультиплектора, а вихід мультиплектора з'єднаємо із входом «осцилографа» (**Scope**).

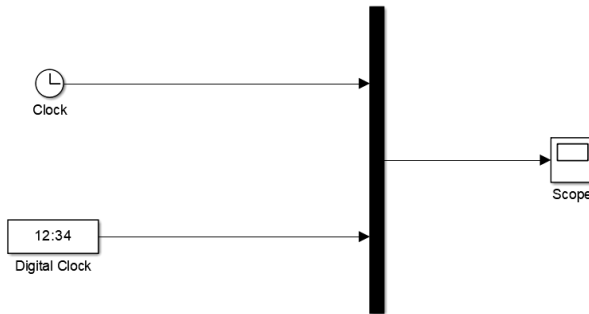


Рисунок 2.23 – Модель для порівняння «безперервного» і «дискретного» часів

Як видно з рисунку 2.24, безперервний час задається лінійною функцією $y = f(t)$, а дискретний час являє собою ступінчасту зростаючу функцію.

У пакеті **Simulink** дискретний час задається скалярною величиною, що визначає величину «сходи». Через те, що в даній

роботі основним предметом розгляду є гібридна система, то повстає питання про те, яким чином відбувається сполучення роботи безперервних та дискретних блоків у рамках однієї моделі?

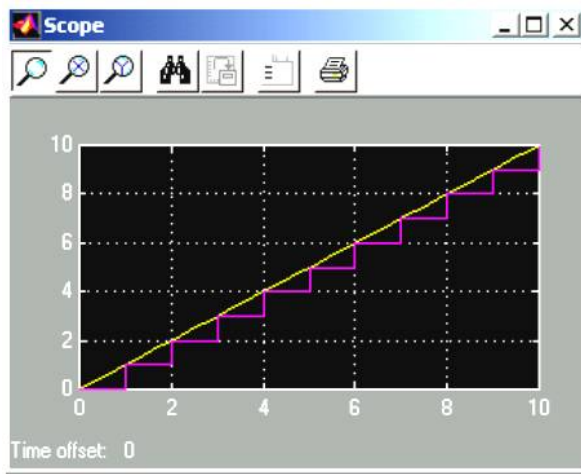


Рисунок 2.24 – Порівняння сигналів «безперервного» й «дискретного» часу на екрані блоку **Scope**

У пакеті **Simulink** з погляду завдання часу існує кілька типів блоків:

- безперервні блоки (такі як «**Integrator**», «**Derivative**», «**Transfer Fcn**» і т.д.) працюють у безперервному часі;

- блок «**Константа**» (**Const**) підтримує на виході задане постійне значення і є нейтральним;

- дискретні блоки (такі як «**Zero-order Hold**», «**Unit Delay**», «**Discrete Transfer Fcn**» і т.д.) працюють у дискретному часі, параметри якого задаються в діалоговому вікні блоків;

- інші блоки (такі як «**Gain**») мають неявну установку на роботу в дискретному часі. Але якщо блок «**Gain**» треба розмістити за інтегратором, то він працює в безперервному часі (тому що інтегратор є блоком з безперервним часом), хоча якщо цей же самий блок «**Gain**» треба за блоком «**Zero-Order Hold**», він працює як дискретний блок, причому в тому ж самому дискретному часі, що і блок «**Zero-Order Hold**».

Якщо на входи блоку подаються сигнали з різними

установками дискретного часу, то блок автоматично вибирає з них дискретний час із мінімальним кроком і працює саме в його режимі. Важливо зазначити, що блоки «**Mux**» і «**Demux**» просто групують оператори – сигнали, що проходять через них зберігають свою інформацію про синхронізацію дискретного часу.

2.6 Сигнали

Для реалізації гібридного поведіння в пакеті **Simulink** передбачені спеціальні пристрої, що реагують на певні події й спеціальні сигнали, що виробляють. До них ставляться блоки «**Enable**» («Недоступний»), «**Trigger**» («Тригер») і «**Hit Cross**» («Пошук кореня»).

Перший, «Недоступний», реагує на появу в змінній негативних значень, і відключає блок, в середині якого він розташований до тих пір, поки значення змінної знову не стане позитивним. Прикладом його використання та роботи є блоки, наведені на рисунку 2.25.

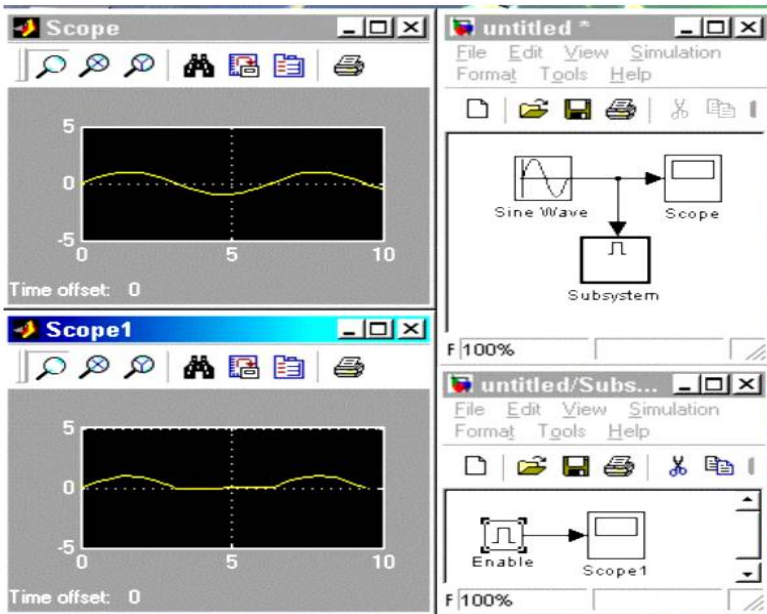


Рисунок 2.25 – Приклад використання блоку **Enable**

Другий, «Тригер», має два входи, і реагує на «стрибок», що подається на спеціальний вхід, запам'ятовуючи при цьому значення змінної, подаваної по другому входу. Приклад роботи наведений на рисунку 2.26.

Третій, здатний знайти значення часу, при якому вхідний сигнал приймає нульове значення, і видати відповідний сигнал.

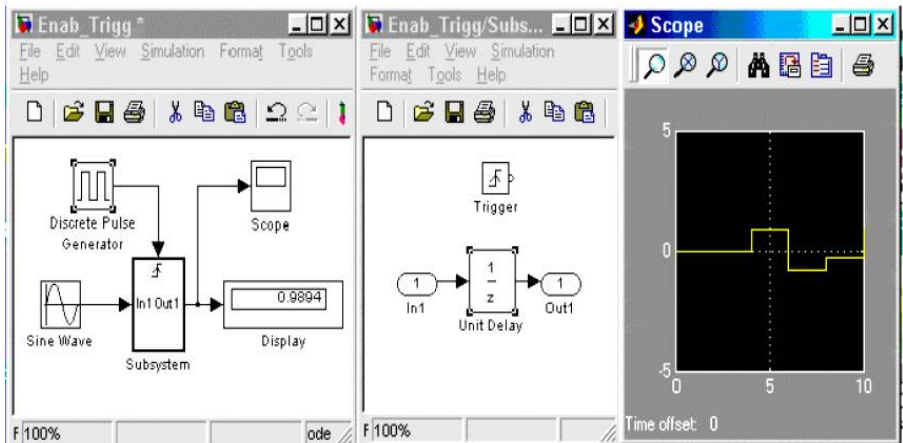


Рисунок 2.26 – Приклад використання блоку **Trigger**

2.7 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері і повинен мати:

2.7.1 Назву, тему та мету роботи.

2.7.2 Скріншоти виконання і реалізації блоків **Simulink** відповідно до пп. 2.3.1...2.3.8.

2.8.3 Висновки, які пояснюють призначення блоків **Simulink** при роботі з програмою **MATLAB Simulink**.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОДНОФАЗНИХ ТА ТРИФАЗНИХ ПРИСТРОЯХ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ. БІБЛІОТЕКА POWER SYSTEM BLOCKSET. ІНСТРУМЕНТАРІЙ POWER ELECTRONICS

Тривалість лабораторного заняття – 6 годин.

3.1 Мета роботи

Моделювання електромагнітних процесів в однофазних та трифазних пристроях силової електроніки

3.2 Загальна інформація

Енергетичні системи – це комбінація електричних кіл та електромеханічних пристроїв, таких як двигуни, генератори, комутаційні апарати тощо. Інженерні розробки в цій області постійно вимагають поліпшення рівня проектування даних систем. Вимоги кардинального поліпшення ефективності систем енергетики призводить до необхідності використання потужних електронних пристроїв та складних концепцій систем керування, які, в свою чергу, висувають підвищені вимоги до традиційних інструментів аналізу електродинаміки потужних електроенергетичних та електромеханічних систем. Подальше підвищення рівня кваліфікації фахівців у цій області викликано тим фактом, що система є зазвичай настільки нелінійною, що єдиним способом з'ясувати всі її режими в динаміці є моделювання.

Бібліотека **Power System Blockset** призначена для забезпечення вчених та інженерів-проектувальників сучасним інструментарієм проектування, що дозволяє швидко і легко будувати моделі систем енергетики, електроніки, електромеханіки тощо. Ця бібліотека працює під керуванням **Simulink**, використовуючи бібліотеки блоків ядра **Simulink** та інших додатків, а також і власні бібліотеки користувача.

Power System Blockset містить моделі типового електроенергетичного устаткування, а саме: трансформатори, лінії електропередавання, електродвигуни, прилади силової електроніки, різні види навантажень, що перемикають пристрої тощо.

3.3 Система одиниць бібліотеки Power System Blockset

В бібліотеці **Power System Blockset** використовується Міжнародна Система Одиниць (SI), а також відносні одиниці (р.у.) для визначення модельних параметрів.

Важливою особливістю **Power System Blockset** є її здатність симулювати процеси або за допомогою алгоритмів інтегрування з безперервною зміною кроку в часі, або з дискретним решателем (**solver**). Для невеликих систем алгоритми зі змінним кроком звичайно швидше, ніж методи з фіксованим кроком, тому що число кроків чисельного інтегрування менше. Однак, для більш складних систем, у яких багато станів або багато нелінійних блоків, таких як потужні електронні перемикачі, вигідно дискретизувати електричну систему.

Таблиця 3.1

Позначення	Одиниці виміру	Позначення одиниці виміру
Час	секунда	s
Довжина	метр	m
Маса	кілограм	kg
Енергія	Джоуль	J
Струм	Ампер	A
Напруга	Вольт	V
Активна потужність	ватт	W
Передбачувана потужність	Вольт-ампер	VA
Реактивна потужність	ВАр	VA _r
Повний опір	Ом	Ohm
Активний опір	Ом	Ohm
Індуктивність	Генрі	H
Ємність	Фарад	F
Потокозчеплення	Вольт-секунда	V.s
Швидкість обертання	радіани в секунду	rad/s
	оберти у хвилину	rpm
Момент сили	Ньютон-метр	N.m
Момент інерції	кілограм-метр у квадраті	kg□m ²
Коефіцієнт тертя	Ньютон-метр-секунда	N□m□s

Коли Ви дискретизуєте Вашу систему, точність моделювання буде керуватися лише кроком часу. Якщо Ви використаєте занадто великий крок часу, точність може бути недостатньою. Єдиний спосіб довідатися, чи прийнятне це рішення, полягає в тому, щоб повторити симулювання з різними кроками часу і знайти компромісне значення кроку часу. Звісно часові кроки довжиною від 20 мс до 50 мс дають кращі результати при моделюванні перехідних процесів в енергосистемах із частотою 60 Гц або 50 Гц, або в системах, у яких встановлені лінійні комутаційні електронні прилади типу діодів чи тиристорів.

Вам необхідно буде зменшити крок часу для систем, що використовують примусову комутацію потужних електронних перемикачів. Такі прилади, як біполярний транзистор з ізольованим затвором (**IGBT**), польовий транзистор з ізольованим затвором (**MOSFET**), чи двоопераційний тиристор (**GTO**) працюють на високих частотах перемикання.

Наприклад, симулюючи інвертор із широтно-імпульсною модуляцією (**PWM**), що працює на частоті 8 кГц, потрібно встановити часовий крок мінімум 1 мс.

Протягом цієї лабораторної роботи Ви будете будувати, аналізувати і моделювати нелінійні вентиляльні електричні кола. У процесі роботи Ви зможете ознайомитися із принципом функціонування блоків бібліотеки **Power System Blockset** і **Power Electronics Toolbox**, створювати моделі перетворювальних пристроїв на їх основі, будувати параметри симуляції створеної моделі, інтерпретувати результати моделювання.

3.4 Моделювання некерованого однофазного однонапівперіодного випрямляча з активно-індуктивним навантаженням

Зберіть модель відповідно до рисунку 3.1.

Блоки **Voltage Measurement (E2, V load)** і **Current Measurement (I load)** призначені для виміру напруги та струму, а також для узгодження вимірювальних блоків ядра **SimulinkLib** із блоками бібліотеки **Power System Blockset**. Дані блоки перебувають у розділі **Measurement**.

Блоки **Fourier (Fourier V load, Fourier I load)** встановлені з метою виміру постійних складових напруги та струму навантаження.

Їх можна знайти за адресою: **powerlib_extras/Measurement**. Дані блоки призначені для розкладання в ряд Фур'є періодично, що змінюються сигналів. Для одержання постійної складової необхідно встановити параметр цього блоку **Harmonic n=0**.

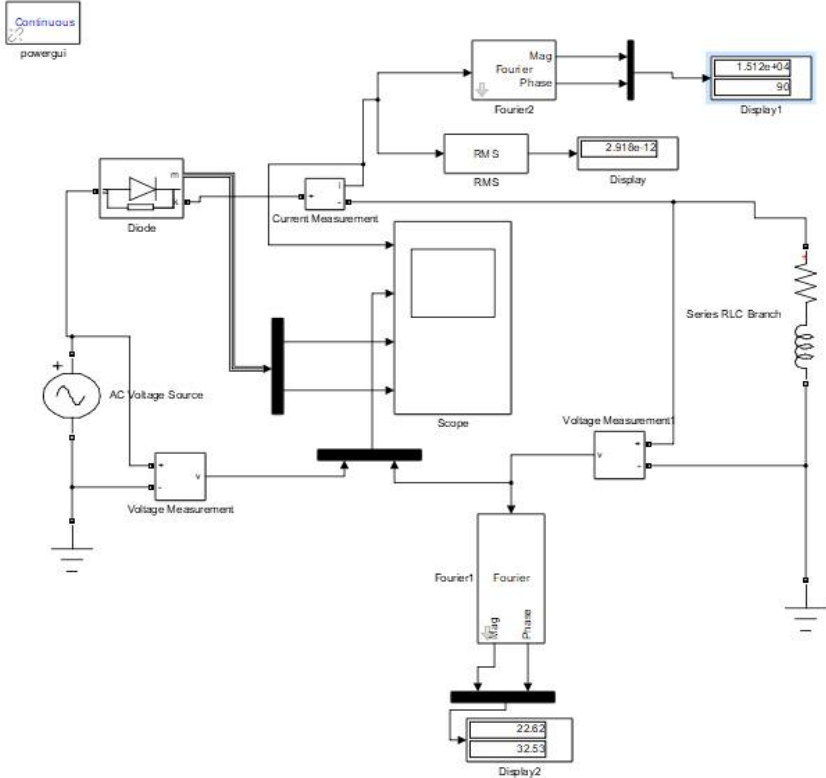


Рисунок 3.1 – Модель некерваного однофазного однонапівперіодного випрямляча з активно-індуктивним навантаженням

Для вимірювання діючого значення струму вентиля (навантаження) установлений блок **RMS (Powerlib_extras/Measurement)**.

Вихідні дані вищезгаданих вимірювань у цифровому вигляді відображають блоки **Display (Display Ud, Display Id, Display I FRMS)**. Параметри блоку **Diode** є наступними:

$R_{on}=0.001$ Ohms; $L_{on}=0$ H; $V_f=0.1$ V; $I_c=0$ A; $R_s=10000$ Ohms; $C_s=inf$. Параметри блоків **E2** та **Series RLC Branch**, зазначені на

рисунку 3.1.

Параметри симуляції:

Start time = 0.0; Stop time = 0.04; **Type - variable-step;**
ode 23t (**mod.stiff/Trapezoidal**); **Max step size = 0.00001.**

Інші параметри – за замовчуванням.

Тепер запустіть модель на симуляцію. Спостерігайте криві струмів і напруги у схемі на екрані віртуального осцилографа, а середні й діючі значення зазначених струмів і напруги на екранах блоків відображення.

Змініте параметри навантаження й простежте, як це вплине на характер процесів у досліджуваній схемі перетворення.

Досліджуйте вплив параметрів діода на струми та напругу у випрямлячі на (рисунку 3.2).

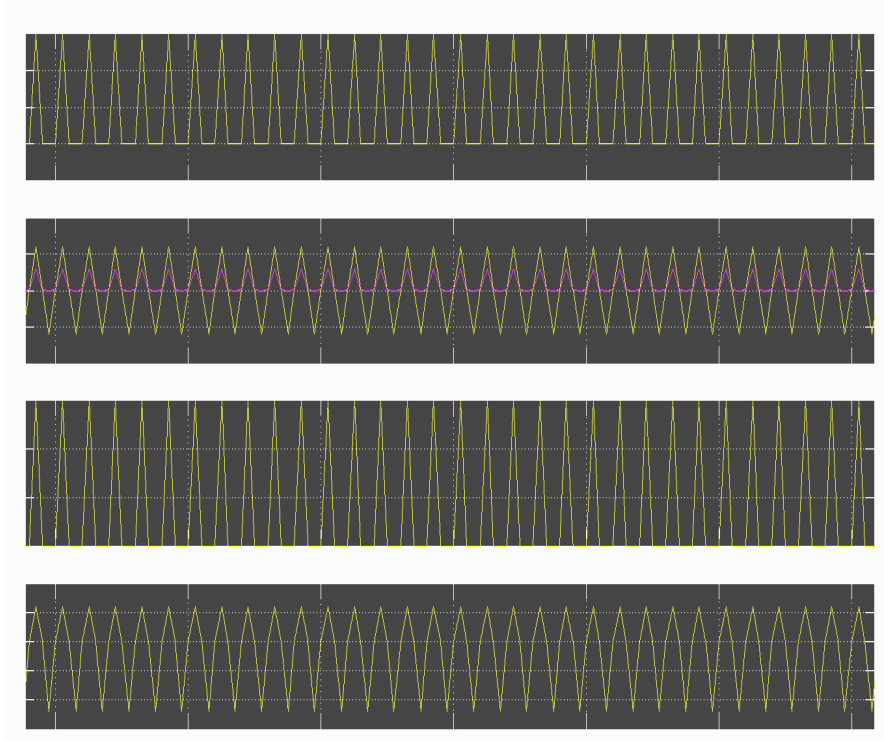


Рисунок 3.2 – Приклад графіків однофазного однонапівперіодного випрямляча з активно-індуктивним навантаженням

3.5 Моделювання некерowanego однофазного двонапівперіодного нульового випрямляча з активно-індуктивним навантаженням

Зберіть модель відповідно до рисунку 3.3.

Параметри блоку **Diode** є наступними:

$R_{on}=1e-2$ Ohms; $L_{on}=0$ H; $V_f=0.8$ V; $I_c=0$ A; $R_s=10000$ Ohms; $C_s=inf$. Параметри блоків **E2a**, **E2b**, **Ld** та **Rd** зазначені на рисунку 3.3.

Параметри симуляції:

Start time = 0.0; Stop time = 0.08;

Type - variable-step; ode 23t(mod.stiff/Trapezoidal);

Max step size = 0.00001.

Інші параметри – за замовчуванням.

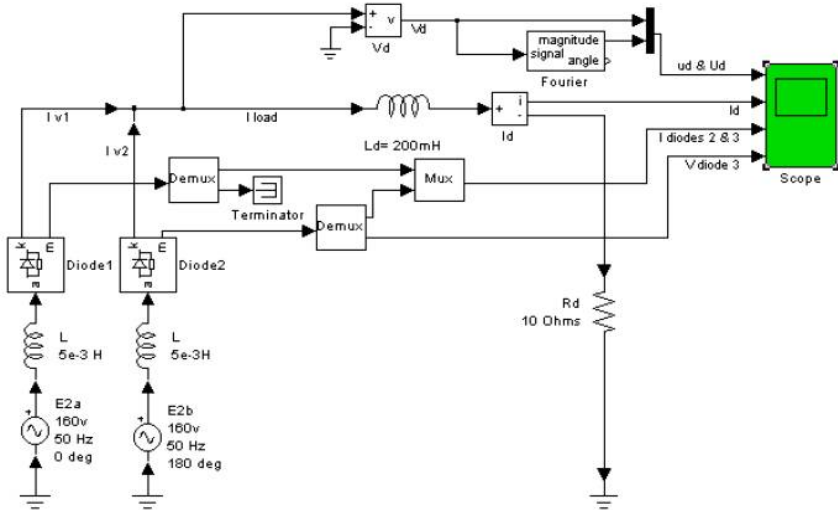
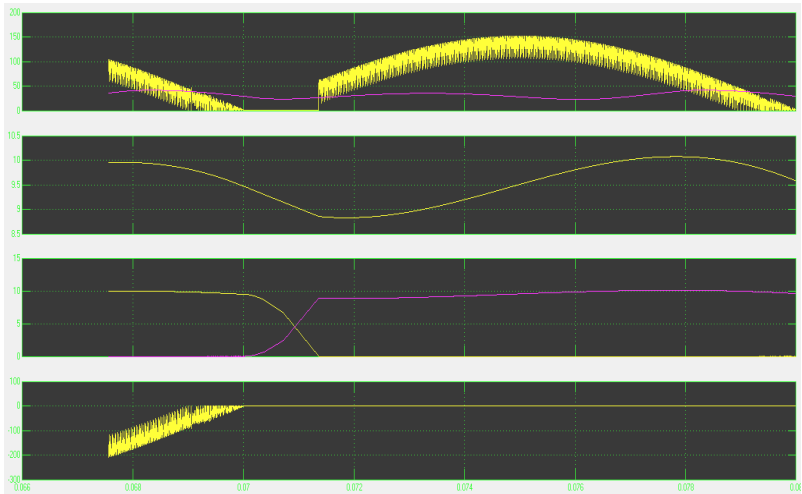


Рисунок 3.3 – Модель некерowanego однофазного двонапівперіодного нульового випрямляча з активно-індуктивним навантаженням

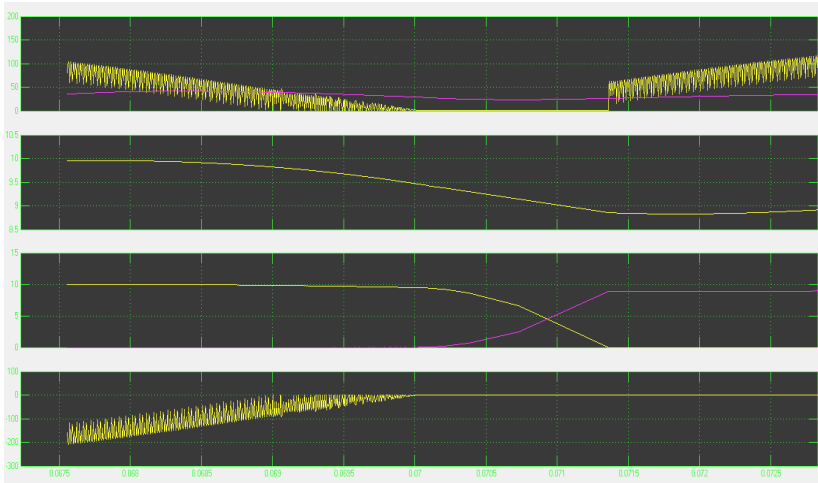
Тепер запустіть модель на симуляцію. Спостерігайте криві струмів і напруги у схемі на екрані віртуального осцилографа.

Змініть параметри навантаження і простежте, як це вплине на характер процесів у досліджуваній схемі перетворення. Досліджуйте вплив параметрів діодів на струми і напруги у випрямлячі (рисунки

3.4, *a* та 3.4, *б*).



a



б

Рисунок 3.4 – Графіки некерованого однофазного двохпівперіодного нульового випрямляча з активно-індуктивним навантаженням

3.6 Моделювання керованого однофазного однонапівперіодного випрямляча

Зберіть модель відповідно до рисунку 3.5.

Параметри навантаження й джерела живлення показані на рисунку 3.5.

Параметри тиристора (**Thyristor**) для моделі:

$R_{on}=1e^{-3}$ Ohms; $L_{on}=0$; $V_f=0.8$ V; $R_s=10000$ Ohms; $C_s=inf$.

Параметри генератора керуючих імпульсів (**Pulse Generator**):

Pulse type – **Time based**; Amplitude – 1; Period – 1/50 secs; Pulse width – 50%; Phase delay – 1/400 secs; **Interpret vector parameters** is 1 - D.

Параметри симуляції: Start time = 0.0; Stop time = 0.06; **Type - variable-step**; ode 23t (**mod.stiff/Trapezoidal**); Max step size – 0.00001;

Інші параметри за замовчуванням.

Тепер запустіть модель на симуляцію. Спостерігайте криві струмів і напруг у схемі на екрані віртуального осцилографу (рисунок 3.6).

Досліджуйте вплив значення кута керування на струми і напруги у випрямлячі.

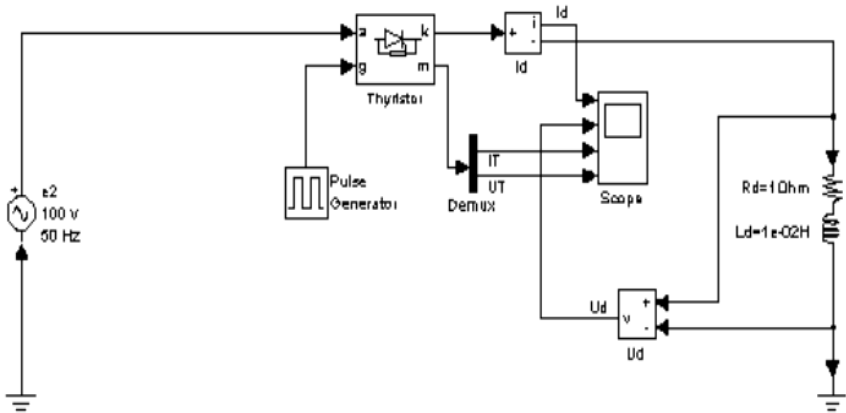


Рисунок 3.5 – Модель керованого однофазного однонапівперіодного випрямляча з активно-смісним навантаженням

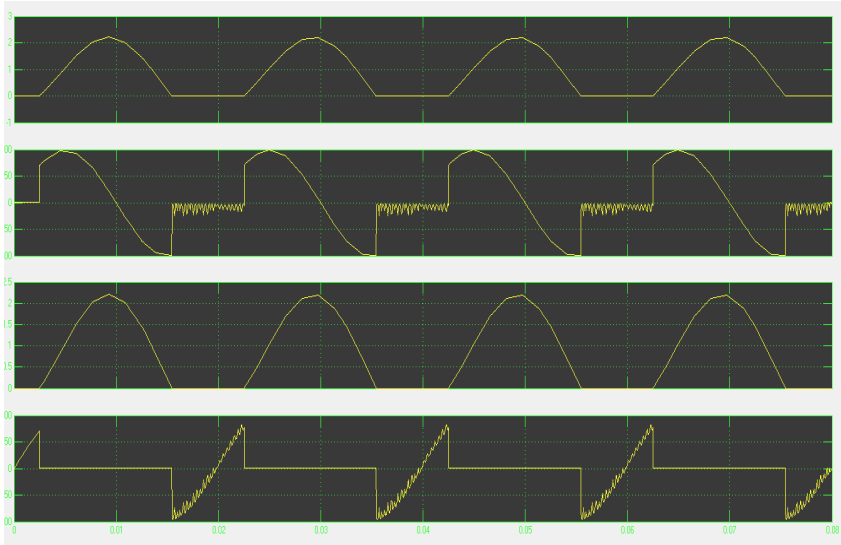


Рисунок 3.6 – Графік керованого однофазного однопівперіодного випрямляча з активно-ємнісним навантаженням

Зберіть модель відповідно до рисунку 3.7.

Параметри **E2**, **Rd**, **Cd** зазначені на рисунку 3.7. Параметри блоків **Thyristor** і **Pulse Generator** установити як для моделі на рисунку 3.5, окрім параметра **Phase delay** = 0 secs.

Запустіть модель на симуляцію. Спостерігайте криві струмів **IT**, електрорушійної сили (ЕРС) **E2**, напруги **Ud**, струми активного та ємнісного навантажень (**IR**, **IC**) на екрані віртуального осцилографа.

Досліджуйте вплив значення кута керування на струми та напруги у випрямлячі.

Досліджуйте вплив параметрів навантаження на струми та напруги у випрямлячі.

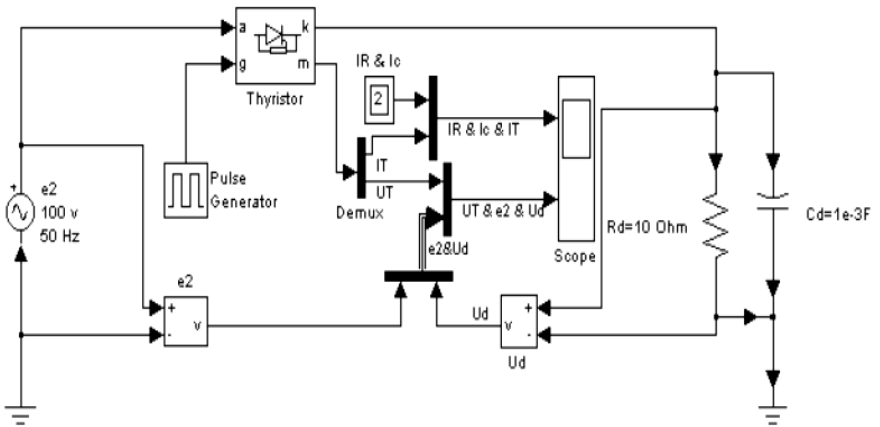


Рисунок 3.7 – Модель керуваного однофазного однонапівперіодного випрямляча з активно-ємнісним навантаженням

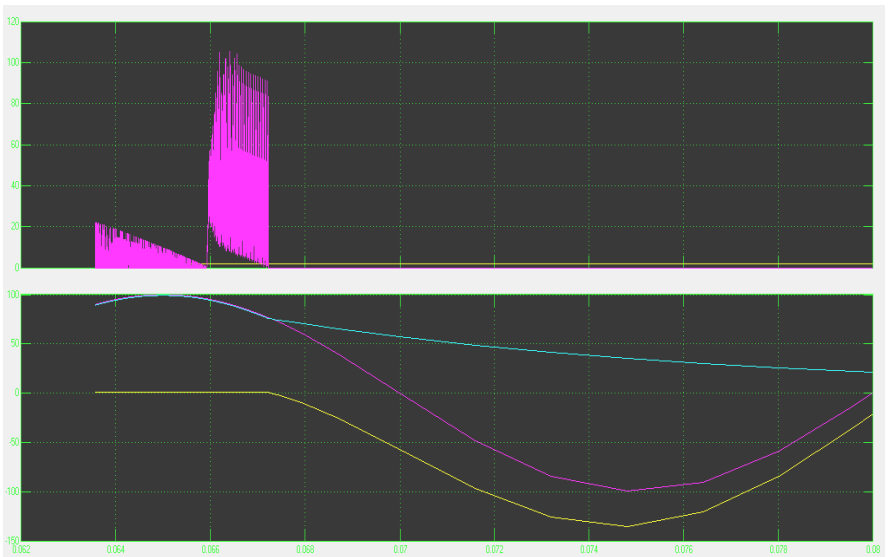


Рисунок 3.8 – Графік керуваного однофазного однонапівперіодного випрямляча з активно-ємнісним навантаженням

3.7 Моделювання некерованого трифазного мостового випрямляча

Зберіть модель відповідно до рисунку 3.9.

Встановіть параметри блоків відповідно до рисунку 3.9. Параметри блоку **Universal Bridge** є наступними:

Number of bridge arms – 3; **Port configuration** – ABC as input terminals; $R_s=2000\ \text{Ohms}$; $C_s=\text{inf}$;

Power electronic device – diodes; $R_{\text{on}}=5\text{e-}4\ \text{Ohms}$; $L_{\text{on}}=0\ \text{H}$; $V_f=0.8\ \text{V}$; **Measurements** – all voltages and currents.

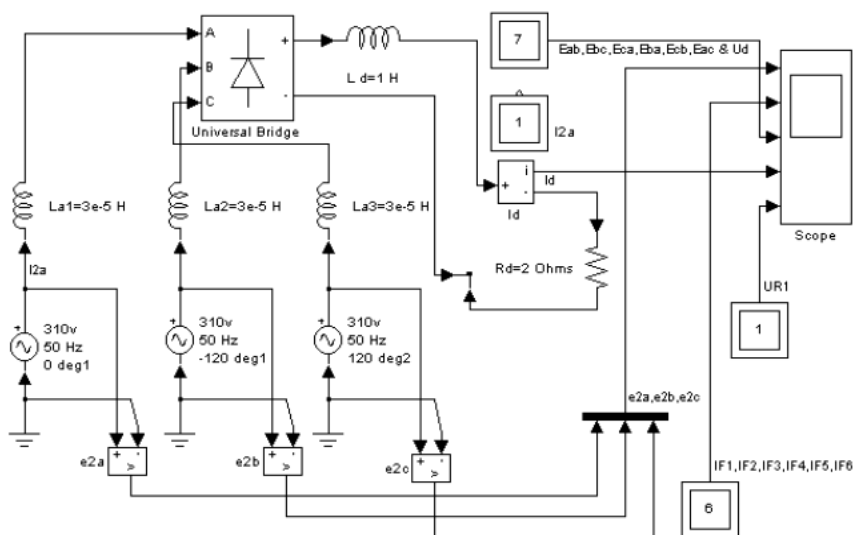


Рисунок 3.9 – Модель некерованого трифазного мостового випрямляча

Налаштуйте параметри блоків **Multimeter** відповідно до їх вихідних сигналів, показаними на рисунку 3.9. Для одержання шестифазної системи лінійних ЕРС на виході блоку **Multimeter2** перенесіть лінійні ЕРС у праве вікно (вікно відображуваних сигналів) два рази: зі знаком «+» та зі знаком «-».

Параметри симуляції: Start time = 0.0; Stop time = 0.6; **Type - variable-step**; ode 23t (**mod.stiff/Trapezoidal**); **Max step size**=0.00001.

Інші параметри – за замовчуванням.

Запустіть процес симуляції та проаналізуйте її результати.

Одержіть осцилограми струмів і напруг на останньому періоді напруги мережі. Розрахуйте час, за яке процес досягне квазісталого стану. Розрахуйте та установіть параметри навантаження таким чином, щоб процес установився за заданий час симуляції 0.06 с, і струм навантаження залишався ідеально згладженим (рисунок 3.10).

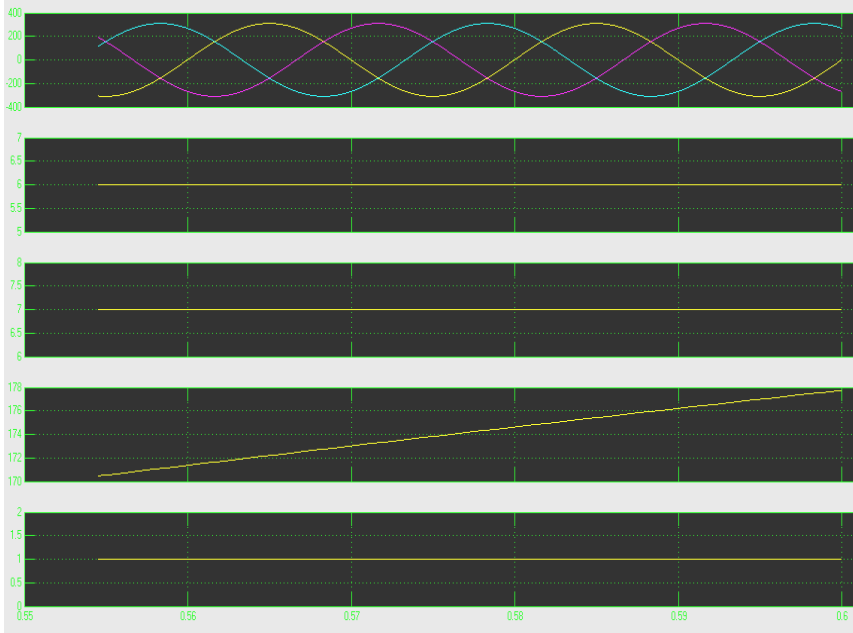


Рисунок 3.10 – Графік некерованого трифазного мостового випрямляча

3.8 Моделювання некерованого трифазного нульового випрямляча із трансформаторним входом

Зберіть модель відповідно до рисунку 3.11.

Параметри навантаження зазначені на рисунку 3.11.

Параметри блоків **Diode (VD1, VD2, VD3)**:

$R_{on}=1e-2$ Ohms; $L_{on}=0$; $V_f=0.8$ V; $I_c=0$; $R_s=10000$ Ohms; $C_s=inf$.

Параметри блоку трифазного джерела живлення:

Phase-to-phase rms voltage = 380 V; **Phase angle of phase A** = 0 deg; **Frequency** = 50 Hz; **Internal connection** – Y; **Source resistance** = 0.1 Ohms; **Source inductance** = 0.

Параметри блоку **Tree-phase Transformer (two windings)** (на

рисунку 380/140 V 10 kVA) наведені у відносних одиницях. Моделюєма схема заміщення представлена ідеальним трансформатором з винесеними елементами, що характеризують втрати в обмотках (R_1, R_2), потоки розсіювання обмоток (L_1, L_2) і коло намагнічування трансформатора (L_m, R_m).

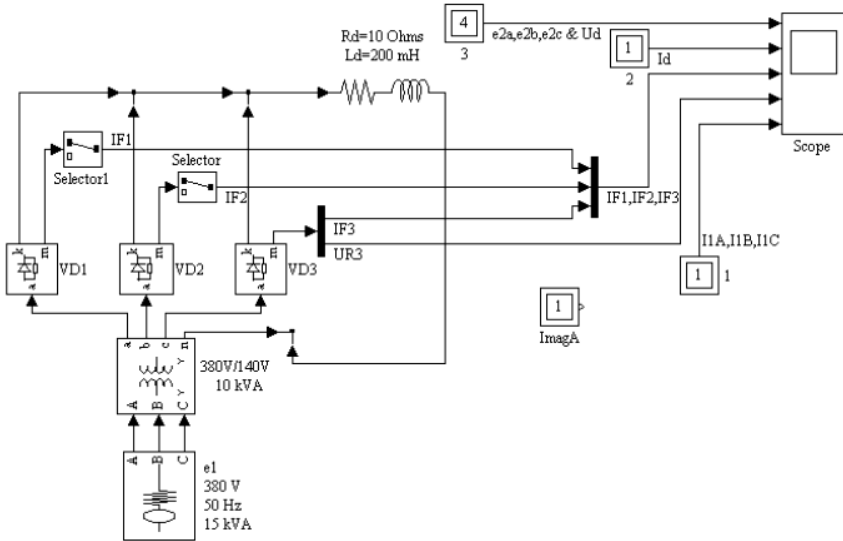


Рисунок 3.11 – Модель некерованого трифазного нульового випрямляча

Відносні параметри можна розрахувати за паспортним даними трансформатора $S_H, U_{K3}\%, P_{K3}, P_o, I_o\%$ у такий спосіб:

- базовий опір $R_6 = U_{1H} / I_{1H}$;
- номінальний струм первинної обмотки $I_{1H} = S_H / U_{1H}$;
- коефіцієнт потужності при короткому замиканні $\cos \varphi_k = P_{K3} / (U_{K3}\% \cdot S_H)$;
- повний опір короткого замикання $Z_{K3} = U_{K3}\% \cdot R_6$;
- активний опір короткого замикання $r_{K3} = Z_{K3} \cdot \cos \varphi_k$;
- реактивний опір короткого замикання $x_{K3} = Z_{K3} \cdot \sin \varphi_k$;
- відносні опори первинної та вторинної обмоток $R_1 = R_2 = r_{K3} / (2 \cdot R_6)$;
- відносні індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток $L_1 = L_2 = x_{K3} / (2 \cdot R_6)$;
- відносні опір та індуктивність кола намагнічування

$$R_m = L_m \approx S_H/P_0.$$

У моделюємій схемі рекомендується встановити наступні значення параметрів трансформатора:

$P_n(\text{VA})$, $f_n(\text{Hz})$ – [50e3, 50];

Winding 1 (ABC) connection – Y;

V1 Ph-Ph (V_{rms}), $R1(\text{pu})$, $L1(\text{pu})$ – [380, 0.004, 0.02];

Winding 2 (abc) connection – Y_n ;

V2 Ph-Ph (V_{rms}), $R2(\text{pu})$, $L2(\text{pu})$ – [140, 0.004, 0.02];

$R_m=100(\text{pu})$;

$L_m=100(\text{pu})$;

All measurements.

Струми та напруги, вимірювані блоками **Multimeter**, зазначені на рисунку 3.11.

Параметри симуляції:

Start time = 0.0; Stop time = 0.12;

Type - variable-step; ode 23t(mod.stiff/Trapezoidal);

Max step size = 0.00001.

Інші параметри – за замовчуванням.

Симулюйте електромагнітні процеси в схемі. Досліджуйте вплив параметрів намагнічування на характер струмів і напруг у перетворювачі.

3.9 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері і повинен мати:

3.9.1 Назву, тему та мету роботи.

3.9.2 Досліджувані моделі відповідно до пп. 3.4...3.7.

3.9.3 Діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемах і дані цифрових вимірювальних приладів.

3.9.4 Результати розрахунків.

3.9.5 Висновки, які пояснюють результати експериментів.

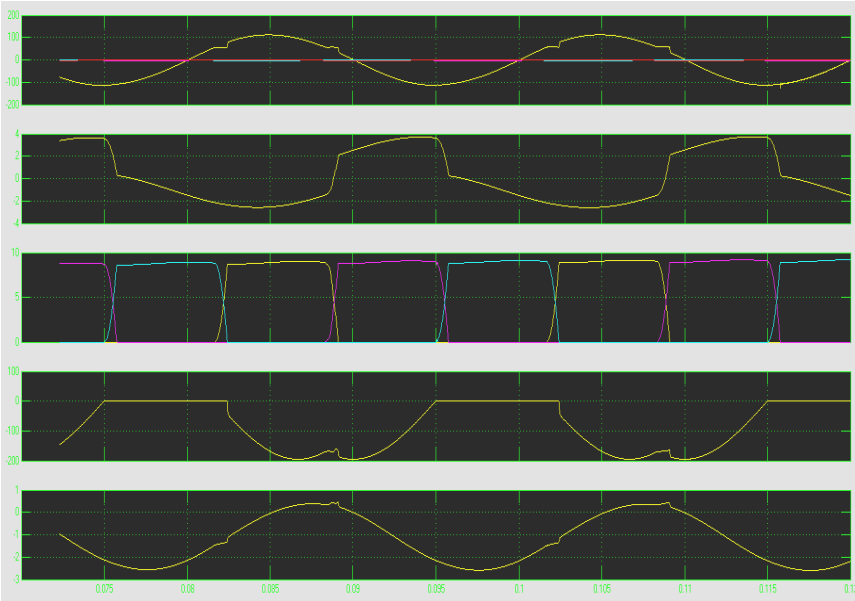


Рисунок 3.12 – Осцилограми некерованого трифазного нульового випрямляча

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ОДНОКАНАЛЬНА ТА ДВОКАНАЛЬНА СИСТЕМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЇВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години.

4.1 Мета роботи

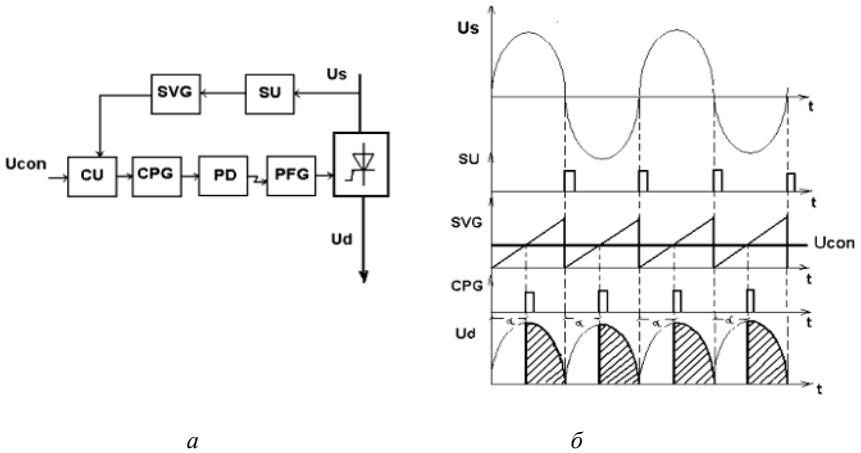
Моделювання систем керування за допомогою пакету **Simulink**.

4.2 Принцип вертикального керування

Однією з найважливіших особливостей керованого випрямляча є його здатність регулювати середнє значення випрямленої напруги при зміні кута керування α . При зміні кута α від 0° до 180° вихідна напруга U_d перетворювача регулюється від

максимального значення U_{dm} до 0.

Для реалізації фазового керування служить система керування перетворювачем. Розглянемо вертикальний спосіб керування, заснований на порівнянні опорної напруги пилкоподібної форми та постійної напруги сигналу керування. Рівність миттєвих значень цих напруг визначає фазу α , при якій схема виробляє імпульс, яким запускається генератор-формував імпульсів, що включають тиристор. Зміна фази α керуючого імпульсу досягається зміною рівня опорної напруги. Функціональна схема такого керування наведена на рисунку 4.1, *а*, а діаграми – на рисунку 4.1, *б*.



а

б

а – функціональна схема; *б* – діаграми роботи

Рисунок 4.1 – Принцип роботи системи вертикального керування

Опорна напруга, що виробляє генератор пилкоподібної напруги **SVG (Sawtooth Voltage Generator)** і синхронізоване з напругою мережі U_s за допомогою пристрою синхронізації **SU (Synchronization Unit)**, подається на схему порівняння **CU (Comparison Unit)**, на яку одночасно надходить сигнал керування **Ucon (Control Voltage)**. Сигнал з виходу **CU** надходить на генератор імпульсів керування **CPG (Control Pulse Generator)**, потім – на розподільник імпульсів **PD (Pulse Distributor)**, на формував імпульсів керування **GPF (Gate Pulse Former)**, звідки у вигляді потужного імпульсу з крутим фронтом і регулюемого по фазі подається на керуючий електрод. Ламана стрілка між блоками **PD** і

GPF позначає гальванічну розв'язку між системою керування тасиловою схемою. Системи керування можуть бути одноканальними і багатоканальними.

Багатоканальна система вертикального керування будується таким чином, що кожен керований силовий прилад (або група приладів) має незалежну від інших приладів (або групи приладів) апаратну систему формування імпульсів керування, тобто кількість каналів керування дорівнює числу керованих силових приладів.

На виході одноканальної системи вертикального керування, що має одну апаратну систему формування імпульсів (один канал керування), виробляється послідовність імпульсів керування всіма тиристорами силової схеми. Потім ці імпульси розподіляються за допомогою спеціальних пристроїв (розподільників імпульсів) на генератори-формувачі керуючих імпульсів для кожного тиристора.

4.3 Моделювання двоканальної системи керування однофазним мостовим випрямлячем

Зберіть модель відповідно до рисунків 4.2 та 4.3.

Параметри блоку **Universal Bridge** є наступними.

Number of bridge arms – 2.

Port configuration – ABC as input terminals.

$R_s=1e5$ Ohms.

$C_s=1e-6$ F.

Power electronic device – thyristors.

$R_{on}=0.001$ Ohms.

$L_{on}=0$ H.

$V_f=0.8$ V.

Measurements – all voltages and currents.

Для силової схеми (див. рисунок 4.2) вихідні дані є наступними.

Параметри блоків **e2(t)**, **Ld** та **Rd** зазначені на рисунку 4.2.

Параметри симуляції:

Start time = 0.0;

Stop time = 0.04;

Type - variable-step;

ode 23t(**mod.stiff/Trapezoidal**) Max step size = 0.00001.

Інші параметри – за замовчуванням.

Для системи керування (див. рисунок 4.3):

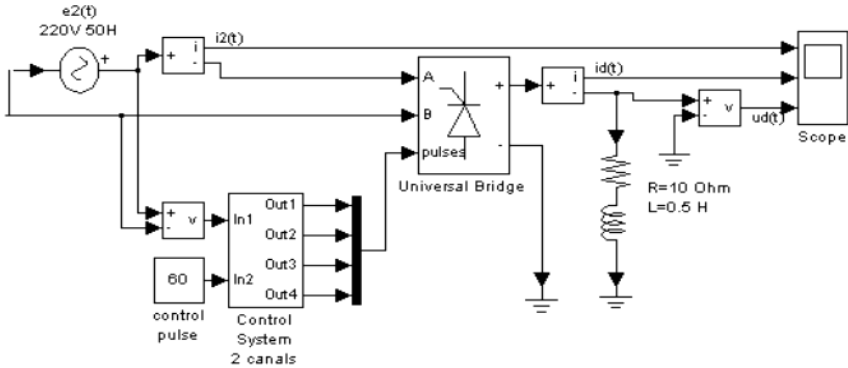


Рисунок 4.2 – Модель керуваного однофазного мостового випрямляча з активно-індуктивним навантаженням

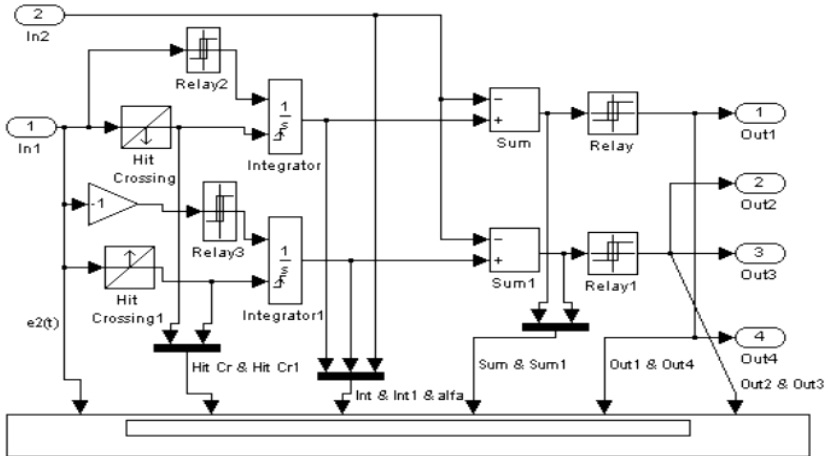


Рисунок 4.3 – Модель підсистеми двоканального керування Control System 2 canals

Блоки **Hit Crossing (HC)** є такими.

Hit crossing offset – 0.

Show output port.

Enable zero crossing detection.

Hit crossing direction: for **HC** – falling; for **HC1** – rising.

Блоки **Relay** наступні:

Switch on point – 0;

Switch off point – -0.01;

Output when on: for **Relay2, Relay3** – 18000; **Relay, Relay1** – 1;

Output when off – 0.

Блоки **Integrator** у моделі мають бути такими:

External reset – rising;

Initial condition source – internal;

Initial condition – 0;

Absolute tolerance – $2e-4$;

Enable – zero crossing detection. Запустіть процес симуляції.

Поясніть принцип роботи системи керування відповідно до діаграм блоку **Scope** підсистеми.

Змініть підсистему таким чином, щоб одержати на виході вузькі імпульси керування.

4.4 Моделювання одноканальної системи керування однофазним мостовим випрямлячем

Зберіть підсистему керування відповідно до рисунку 4.4. Настроювання блоків провести відповідно до рисунку 4.4 і вказівок, що надані в п. 4.2.

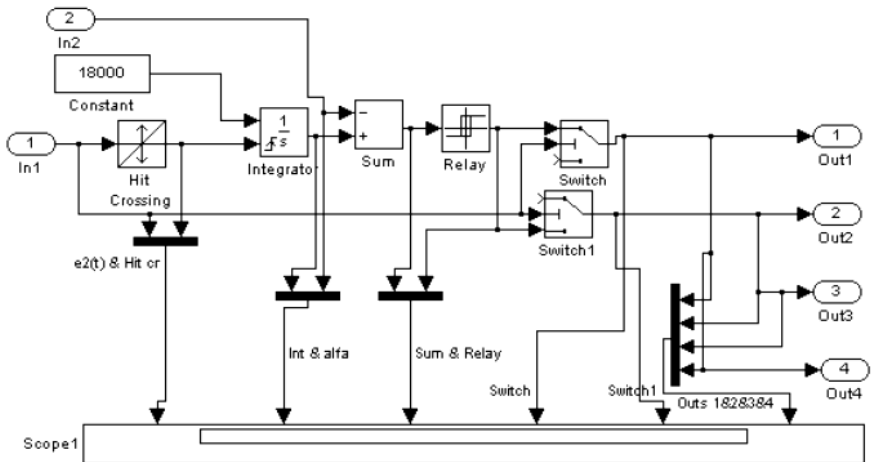


Рисунок 4.4 – Модель підсистеми одноканального керування Control System 1 chanal

Запустіть процес симуляції. Поясніть принцип роботи системи керування відповідно до діаграм блоку **Scope** підсистеми. Запропонуйте свій варіант моделі підсистеми керування.

4.5 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері і повинен мати наступну інформацію.

4.5.1 Назву, тему й ціль роботи.

4.5.2 Досліджувані моделі відповідно до пп.4.2...4.3.

4.5.3 Діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й алгоритму роботи систем керування.

4.5.4 Індивідуально розроблені моделі підсистем керування з діаграмами результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі та алгоритмами роботи систем керування.

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНИХ НЕКЕРОВАНИХ ПРИСТРОЯХ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години.

5.1 Мета роботи

Дослідження режимів зовнішнього та внутрішнього короткого замикання некерованого випрямляча

5.2 Моделювання зовнішнього короткого замикання трифазного мостового некерованого випрямляча

Зберіть модель відповідно до рисунку 5.1.

Параметри навантаження, джерела живлення та приведених фазних опорів показані на рисунку 5.1.

Параметри блоку **Universal Bridge**:

$R_{on}=5e-4$ Ohms;

$L_{on}=0$;

$V_f=0.8$ V;

$R_s=20$ Ohms;

$C_s=inf$.

Параметри блоку **Breaker**:

$R_{on}=0.001$ Ohms;

Initial state – 0; $R_s=1e6$ Ohms;

$C_s=inf$;

Switching times – [1.02] s.

Параметри симуляції:

Start time = 1.0; Stop time = 1.08;

Type - variable-step;

ode 23t(mod.stiff/TR-BDF2);

Max step size – 0.00001.

Інші параметри за замовчуванням.

Тепер запустіть модель на симуляцію.

Спостерігайте криві струмів і напруг у схемі на екрані віртуального осцилографа. Досліджуйте вплив R_a та L_a на характер аварійних струмів у випрямлячі. Досліджуйте вплив початку аварії на ударні аварійні струми вентилів.

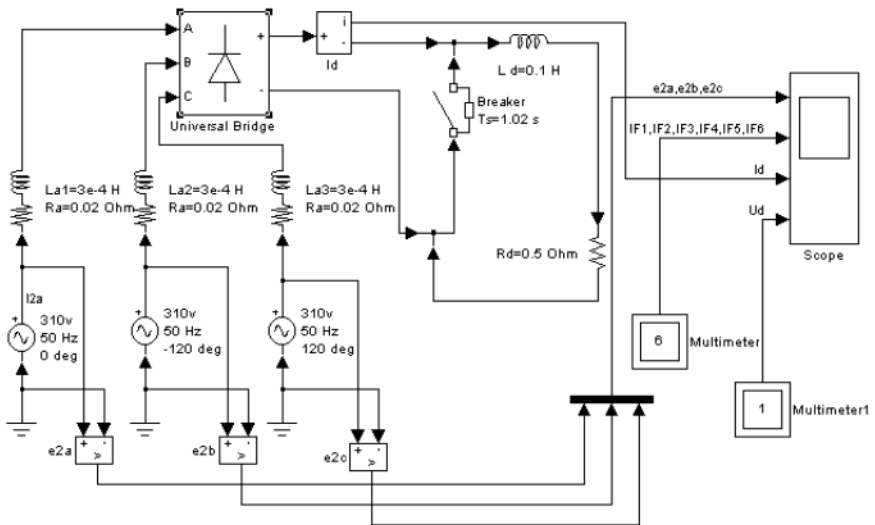


Рисунок 5.1 – Модель для дослідження зовнішнього короткого замикання трифазного мостового некерованого випрямляча

5.3 Моделювання внутрішнього короткого замикання трифазного мостового некерованого випрямляча

Зберіть модель відповідно до рисунків 5.2, 5.3, 5.4.

Параметри навантаження, джерела живлення і наведених фазних опорів показані на рисунку 5.2.

Параметри блоку **Diode** наступні:

$R_{on} = 0.001 \text{ Ohms};$
 $L_{on} = 0;$
 $V_f = 0 \text{ V};$
 $R_s = 1e5 \text{ Ohms};$
 $C_s = \text{inf}.$
 Параметри блоку **Breaker**:
 $R_{on} = 0.001 \text{ Ohms};$
 Initial state - 0;
 $R_s = 1e6 \text{ Ohms};$
 $C_s = \text{inf};$ Switching times – $[1.02 + 0.01/6] \text{ s}.$
 Параметри симуляції:
 Start time = 1.0;
 Stop time = 1.06;
 Type - variable-step;
 ode 23t(mod.stiff/TR-BDF2);
 Max step size – 0.00001.
 Інші параметри – за замовчуванням.

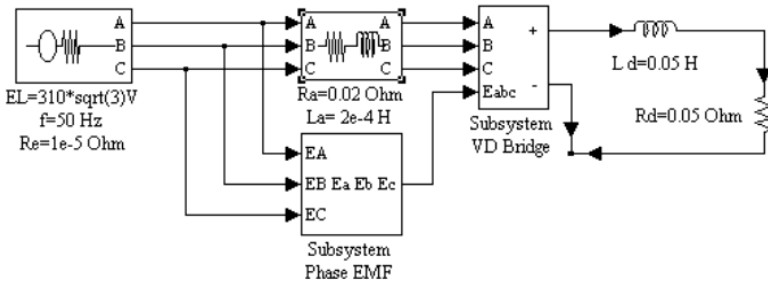


Рисунок 5.2 – Модель внутрішнього короткого замикання трифазного мостового некерованого випрямляча

Запустіть модель на симуляцію, щоб одержати криві струмів і напруг у схемі на екрані віртуального осцилографа.

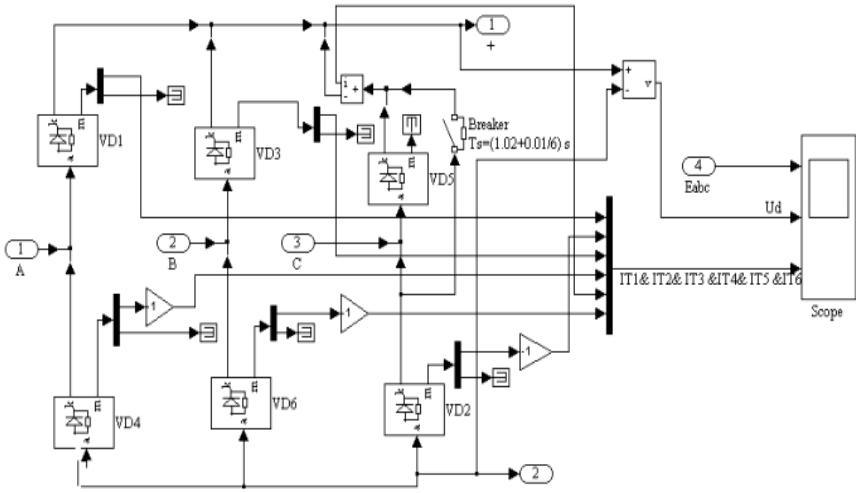


Рисунок 5.3 – Модель підсистеми діодного мосту **SubSystem VD Bridge**

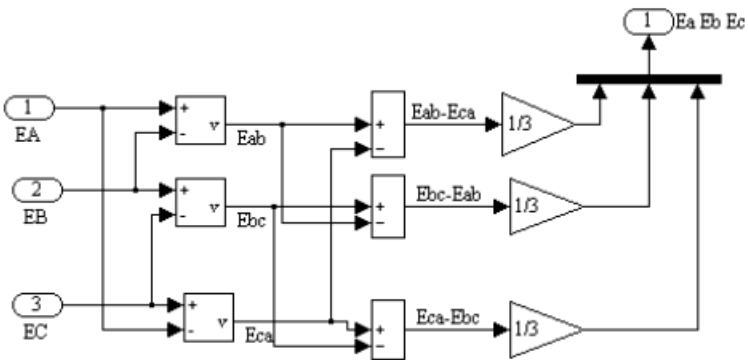


Рисунок 5.4 – Модель підсистеми для відображення фазних ЕДС **SubSystem Phase EMF**

Досліджуйте вплив R_a та L_a на характер аварійних струмів у випрямлячі.

Досліджуйте вплив початку аварії на ударні аварійні струми вентилів. Знайдіть такі параметри елементів схеми, при яких аварійний струм не переривається. Поясніть, як та які параметри силової схеми впливають на даний фактор.

5.4 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері та повинен містити наступні пункти.

5.4.1 Назву, тему та мету роботи.

5.4.2 Досліджувані моделі відповідно до пп.5.1...5.3.

5.4.3 Діаграми результатів проведених досліджень.

5.4.4 Виводи повинні пояснювати результати експериментів.

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНИХ КЕРОВАНИХ ПРИСТРОЯХ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години.

6.1 Мета роботи

Дослідження режимів зовнішнього та внутрішнього короткого замикання керованого випрямляча.

6.2 Моделювання зовнішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча без блокування керування

Зберіть модель відповідно до рисунку 6.1.

Параметри навантаження, джерела живлення і приведених фазних опорів показані на рисунку 6.1.

Параметри блоків **VS1 – VS6** наступні:

$R_{on}=1e-3$ Ohms; $L_{on}=0$; $V_f=0$ V; $R_s=20000$ Ohms; $C_s=inf$.

Параметри блоку **Breaker** є наступними:

$R_{on}=0.001$ Ohms;

Initial state – 0;

$R_s=1e6$ Ohms;

$C_s=inf$;

Switching times – $[0.02+0.01/6]$ s.

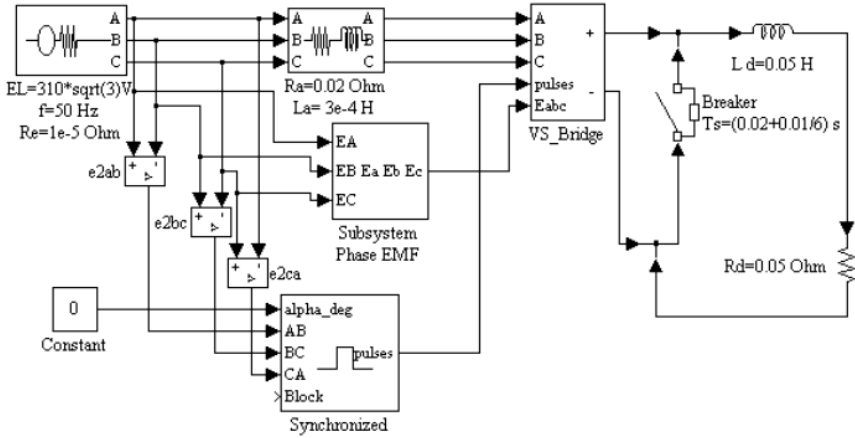
Параметри симуляції: Start time = 0.015; Stop time = 0.045;

Type - variable-step; ode 23t(mod.stiff/Trapezoidal);

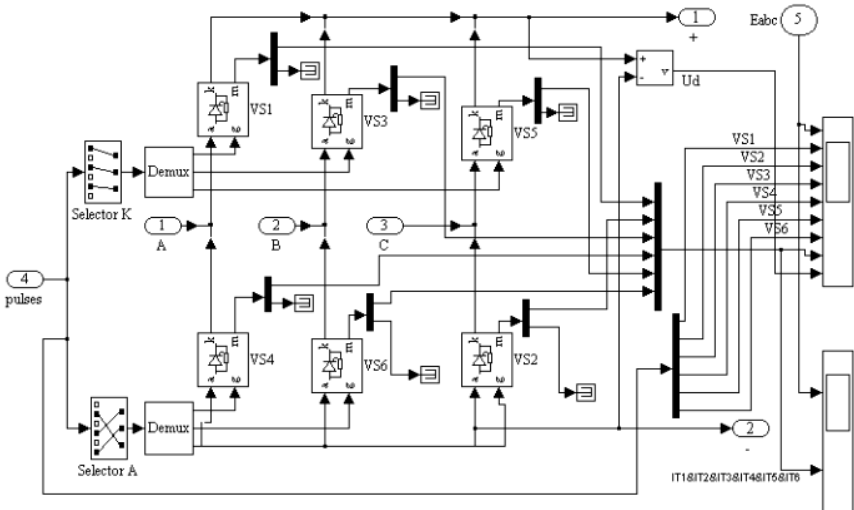
Max step size – 0.00001.

Інші параметри за замовчуванням.

Запустіть модель на симуляцію.



a



б

a – силова схема; *б* – тиристорний блок VS Bridge.

Рисунок 6.1 – Модель для дослідження зовнішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча

Спостерігайте криві фазних напруг **Ea, Eb, Ec**, імпульсів керування, що подаються на тиристори **VS1 – VS2**, також струмів вентилів **I_{T1} – I_{T6}** і напруги навантаження **Ud** на екрані віртуального осцилографа **Scope**. Деталізовані осцилограми **Ea, Eb, Ec** і **I_{T1} – I_{T6}** відображає **Scope1**.

Задайте струми уставки системи захисту для блокування імпульсів керування до 1-й комутації (**I_{ycr1}**) і між 1-й та 2-й комутаціями (**I_{ycr2}**).

Досліджуйте вплив кута керування α на ударні струми вентилів.

Отримайте криві аварійних струмів при керуванні широкими імпульсами. Для цього встановіть параметр блоку **Synchronized 6-Pulse Generator**

Pulse width – 100 deg.

Порівняйте сценарії розвитку аварії при керуванні вузькими або широкими імпульсами.

6.3 Моделювання зовнішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча із блокуванням керування

Зберіть модель силової схеми згідно з рисунком 6.2.

Параметри блоків силової схеми відповідають рисунку 6.1.

Параметри тиристорів (блоки **VS1 – VS6**) зазначені в п. 6.2.

Параметри блоку **Relay**:

Switch on point – 0.01; Switch off point – -0.01;

Output when off – 0; Output when on – 1.

Встановіть параметр блоку **Hit Crossing**:

Hit Crossing offset – **I_{ycr1}**.

Запустіть модель на симуляцію.

Спостерігайте криві фазних напруг **Ea, Eb, Ec**, імпульсів керування, що подаються на тиристори **VS1 – VS2**, також струмів вентилів **I_{T1} – I_{T6}** і напруги навантаження **Ud** на екрані віртуального осцилографа **Scope**. Деталізовані осцилограми **Ea, Eb, Ec** та **I_{T1} – I_{T6}** відображає **Scope1**.

Встановіть параметр блоку **Hit Crossing**:

Hit Crossing offset – **I_{ycr2}**.

Повторіть симуляцію. Порівняйте сценарії розвитку аварії та ударних струмів тиристорів без блокування подачі імпульсів керу-

вання та результати віртуальних експериментів із двома способами блокування.

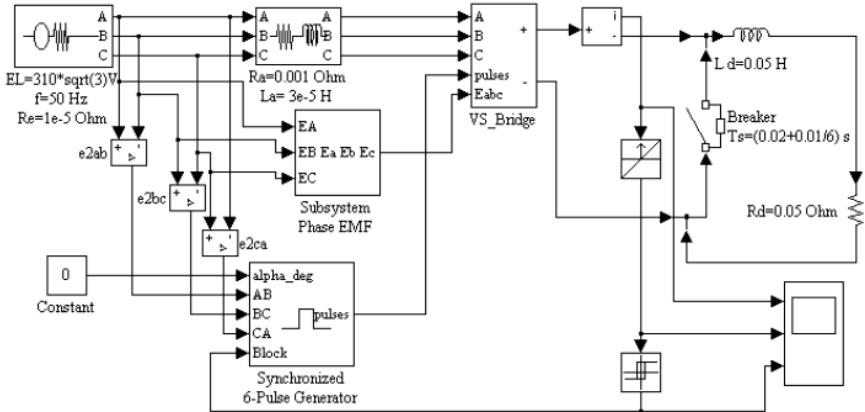


Рисунок 6.2 – Модель зовнішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча із блокуванням керування

6.4 Моделювання внутрішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча без блокування керування

Зберіть модель згідно з рисунком 6.3.

Параметри навантаження, джерела живлення та приведених фазних опорів показані на рисунку 6.3.

Параметри блоків **VS1 – VS6**:

$$R_{on} = 1e-3 \text{ Ohms};$$

$$L_{on} = 0;$$

$$V_f = 0 \text{ V};$$

$$R_s = 20000 \text{ Ohms};$$

$$C_s = \text{inf}.$$

Параметри блоку **Breaker**:

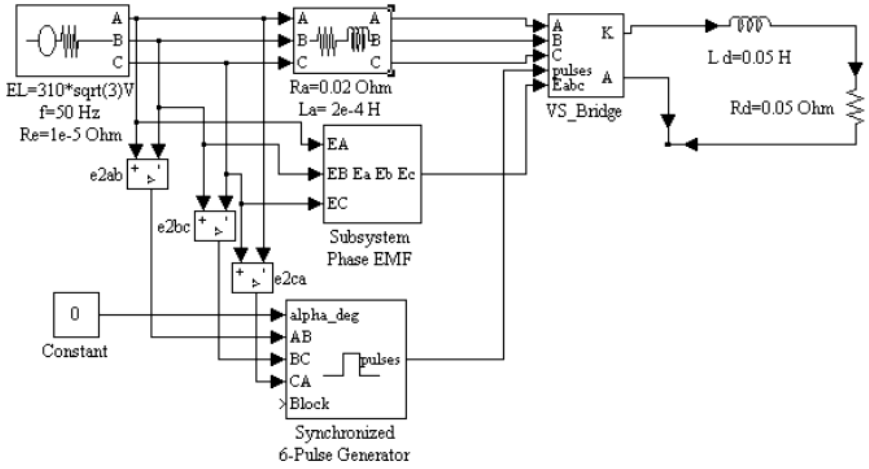
$$R_{on} = 0.001 \text{ Ohms};$$

$$\text{Initial state} = 0;$$

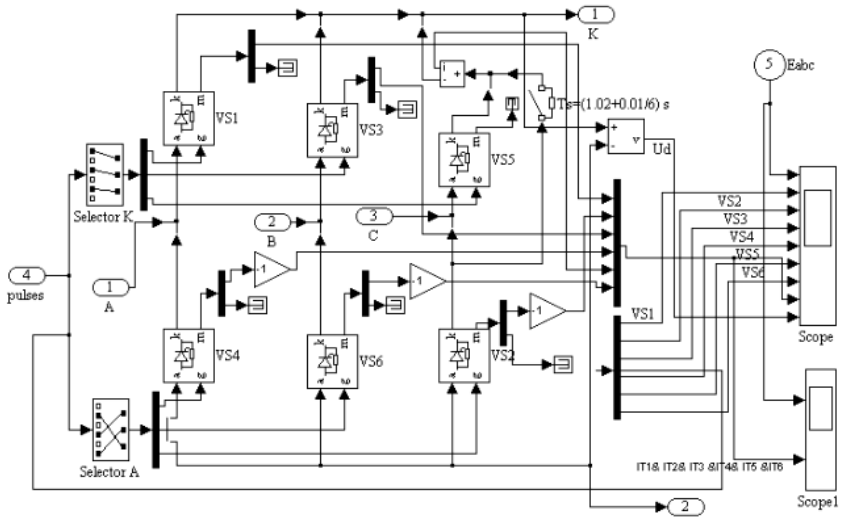
$$R_s = 1e6 \text{ Ohms};$$

$$C_s = \text{inf};$$

$$\text{Switching times} = [1.02 + 0.01/6] \text{ s}.$$



а



б

а – силова схема; б – тиристорний блок VS Bridge

Рисунок 6.3 – Модель для дослідження внутрішнього короткого замикання

Параметри симуляції:

Start time = 1.0;

Stop time = 1.06;

Type - variable-step; ode 23t(mod.stiff/Trapezoidal);

Max step size – 0.00001.

Інші параметри за замовчуванням.

Запустіть модель на симуляцію.

Спостерігайте криві фазних напруг **Ea, Eb, Ec**, імпульсів керування, що подаються на тиристори **VS1 – VS2**, також струми вентилів **I_{T1} – I_{T6}** і напруги навантаження **Ud** на екрані віртуального осцилографа **Scope**. Деталізовані осцилограми **Ea, Eb, Ec** та **I_{T1} – I_{T6}** відображає **Scope1**.

Визначте струми уставки системи захисту для блокування імпульсів керування до 1-й комутації (**I_{ycr1}**) і між 1-й й 2-й комутаціями (**I_{ycr2}**).

Досліджуйте вплив кута керування α на ударні струми вентилів.

6.5 Моделювання внутрішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча із блокуванням імпульсів керування

Зберіть модель силової схеми згідно з рисунком 6.4.

Параметри блоків силової схеми відповідають рисунку 6.4.

Параметри тиристорів (блоки **VS1 – VS6**) указані в п. 6.4.

Параметри блоку **Relay**:

Switch on point – 0.01;

Switch off point – -0.01;

Output when off – 0;

Output when on – 1.

Установите параметр блоку **Hit Crossing**:

Hit Crossing offset – **I_{ycr1}**.

Запустіть модель на симуляцію.

Спостерігайте криві фазних напруг **Ea, Eb, Ec**, імпульсів керування, що подаються на тиристори **VS1 – VS2**, також струмів вентилів **I_{T1} – I_{T6}** і напруги навантаження **Ud** на екрані віртуального осцилографа **Scope**. Деталізовані осцилограми **Ea, Eb, Ec** та **I_{T1} – I_{T6}** відображає **Scope1**.

Встановіть параметр блоку **Hit Crossing**:

Hit Crossing offset – **I_{ycr2}**.

Повторіть симуляцію.

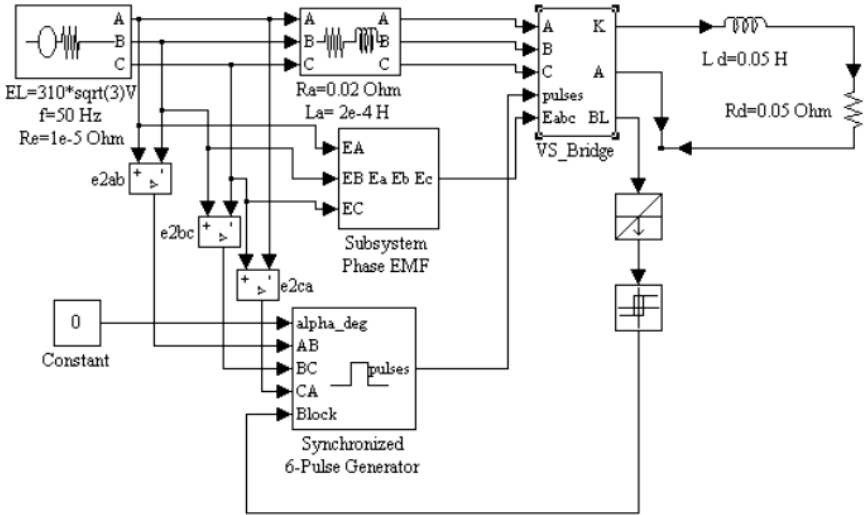


Рисунок 6.4 – Модель внутрішнього короткого замикання трифазного мостового керованого випрямляча із блокуванням імпульсів керування

Порівняйте сценарії розвитку аварії та ударних струмів тиристорів без блокування подачі імпульсів керування і результати віртуальних експериментів з двома способами блокування.

6.6 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері і повинен містити:

6.6.1 Назву, тему й ціль роботи.

6.6.2 Досліджувані моделі відповідно до пп.6.2...6.5.

6.6.3 Діаграми результатів проведених досліджень.

6.6.4 Висновки, що повинні пояснювати результати експериментів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. <http://e-library.zp.edu.ua>
2. <http://www.zntu.edu.ua/naukova-biblioteka>
3. <https://moodle.zp.edu.ua/course/view.php?id=5023>
4. https://moodle.zp.edu.ua/pluginfile.php/231501/mod_resource/content/1/Конспект%20лекцій_АЕМКС.pdf
5. <https://zp.edu.ua>
6. <https://zp.edu.ua/kafedra-elektrichnih-ta-elektronnih-aparativ>
7. Zhorniak, Liudmyla. Optimization Method for Electromagnetic Systems of Electrical Apparatus / Oleksiy Sadovoy, Vyacheslav Shebanin, Larisa Vakhonina, Natalia Potryvaieva and Liudmyla Zhorniak// IEEE Kremenchuk University Week: 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005689>
8. Афанасьєв О.І. Електроапаратне обладнання систем електропостачання енергоємних виробництв / О. І. Афанасьєв, Л. Б. Жорняк, О. В. Немикіна, В. М. Щусь; за заг. ред. П. Д. Андрієнко. – Запоріжжя : НУ Запорізька політехніка, 2023. – 432 с.
9. Барандич, К. С. Системи автоматизованого проєктування: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерно інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / К.С. Барандич, О.О. Подолян, М.М. Гладський. – Електронні текстові дані (1 файл 3,05 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 97 с.
10. Говорун, Т. П. Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів: навч. посіб. / Т. П. Говорун, А. Ф. Будник, В. Б. Юскаєв. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – 255 с.
11. Лавріненко, Н. М. Кінцево-елементне моделювання в інженерних розрахунках : Підручник. М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган Барановського, Нац. ун-т харч. вир-в, Ін-т техн. теплофізики НАН України // Н. М. Лавріненко, В. О. Сукманов, А. О. Авраменко, А. І. Українець, Д. С. Афенченко, А. В. Шульга. – Донецьк : ДонНУЕТ, Норд-Прес, 2008. – 668 с.
12. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту за фахом студентами спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітні програми «Електричні та елект-

ронні апарати» та «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв») всіх форм навчання / уклад.: П. Д. Андрієнко, Л. Б. Жорняк, В. В. Василевський. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 43 с.

13. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Мікроелектронні та мікропроцесорні пристрої та системи» освітніх програм «Електричні та електронні апарати, Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка всіх форм навчання. /Укл.: М.О. Поляков, – Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехніка», 2022.– 35 с.

14. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з курсу "Моделювання електромеханічних систем" для студентів спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» усіх форм навчання / укладачі: Т. М. Корнус, Л. С. Скрупська – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – 35 с.
<http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/3473>

15. Методичні вказівки до дипломного проектування за темою «Автоматизоване проектування перетворювачів постійної напруги» за освітніми програмами «Електричні та електронні апарати, Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка всіх форм навчання. /Укл.: М.О. Поляков, – Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехніка», 2022.– 16 с.

16. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни «Електричні апарати високої напруги» для студентів всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / уклад. О. І. Афанасьєв, В. В. Василевський. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 28 с.

17. Мороз, В. І. Основи автоматизації проектування: Конспект лекцій /В. І. Мороз, О. В. Братченко, О. А. Логвіненко. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 98 с.

18. Осташевський, М. О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник [Текст] / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Міліх. – Харків: ФОП Панов А. М. , 2017. – 452 с.

19. Павленко, П. М. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб / П. М. Павленко, С. Ф. Філоненко, О. М. Чередніков, В. В. Трейтяк. – К. : НАУ, 2017. – 392 с.

20. Панов, Є.М. Визначення теплопровідності твердих тіл за допомогою приладу ИТ-λ-400./ Є.М. Панов, Т.Б. Шилович [Електронний ресурс] – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 30 с.

21. Снігірьов, В. М. Електромеханічні апарати автоматики / В. М. Снігірьов, Л. Б. Жорняк. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016 – 120 с. Електронний ресурс: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/3991>

22. Сорочак, А.П. Програмне забезпечення інженерних розрахунків: конспект лекцій для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання / Укладач: Сорочак А.П. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 128 с.