

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

НАВЧАЛЬНО НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

«УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ»

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ

ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ

З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

**«КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА
ОБ'ЄКТІВ»**

ХАРКІВ 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Практична робота №1 «Matlab Online (basic) для студентів та викладачів: реєстрація, використання».....	6
Практична робота №2 Комп'ютерне моделювання роботи електричних систем та об'єктів за допомогою SPS-МОДЕЛЕЙ в MATLAB.....	19
Практична робота №3 Комп'ютерне моделювання та дослідження роботи випрямлячів в MATLAB	38
Практична робота №4 Комп'ютерне моделювання та дослідження роботи автономних інверторів в MATLAB	58
Практична робота №5 Комп'ютерне моделювання та дослідження характеристик автономного інвертора напруги в MATLAB	77
Додаток А Зразок титульного листа практичного завдання.....	99

ВСТУП

Комп'ютерне моделювання роботи електричних систем та об'єктів зручно виконувати з використанням системи MATLAB, пакету Simulink та його пакету розширення Specialized Power Systems. Останні є частиною системи MATLAB і повністю з нею інтегруються, дозволяючи користуватися перевагами обробки та візуалізації даних у MATLAB. Ці пакети є досить самостійними інструментами, що дозволяє працювати з ними не знаючи команд MATLAB. Зручність роботи в Simulink і Specialized Power Systems полягає і в тому, що в них реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою та здійснює розрахунки. При цьому, на відміну від класичних способів чисельних розрахунків, не потрібно досконально вивчати мову програмування та чисельні методи, а досить загальних знань, потрібних під час роботи на комп'ютері і знань предметної області, в якій працює система.

Система MATLAB є мовою програмування високого рівня. Головне призначення MATLAB – це виконання інженерних і наукових обчислень та створення засобів моделювання різних пристроїв і систем. Основною відмінністю системи MATLAB від інших відомих пакетів, таких як Mathcad, Maple, Mathematica та інших, є те що вона базується на алгоритмах матричних обчислень з виконанням операцій над групами векторів, що дозволило підвищити швидкість обчислень, забезпечити високу точність розрахунків та ефективно використати ресурси пам'яті.

Система MATLAB має модульний принцип побудови з широкими можливостями модифікації й розширення. Вона налічує декілька десятків пакетів прикладних програм, понад дві сотні додатків та розширень, приблизно 800 функцій у бібліотеці, а також десятки тисяч сторінок документації.

Система MATLAB поділена на пакети програм. Ядро системи утворюють загальні пакети програм, а решта – об'єднані або існують індивідуально у вигляді контейнерів для зберігання інструментів (Toolboxes).

Пакет візуального програмування Simulink призначений для моделювання, імітації та аналізу лінійних й нелінійних динамічних систем. Він дозволяє будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем і вдосконалювати проєкти. Шляхом з'єднання комбінацій компонентів-блоків між собою складаються функціональні моделі пристроїв і систем. Одночасно автоматично формується й вирішується математична модель, що описує поведінку такої системи. Simulink дозволяє і функціонально представити пристрій, і генерувати коди, що використовуються для програмування мікропроцесорів. Такі широкі можливості дозволяють Simulink знаходити застосування в різних галузях: фізиці, математиці, біології, економіці, медицині та інш., тобто скрізь, де завдання описуються математичними та логічними операціями.

На відміну від Simulink, пакет Specialized Power Systems є спеціалізованим і призначений для імітаційного моделювання електротехнічних пристроїв. При роботі з пакетами програми MATLAB є можливість модернізувати бібліотечні блоки, створювати власні, а також складати нові бібліотеки блоків.

Пакет Simulink разом з пакетом розширення Specialized Power Systems (у більш ранніх версіях – Simpowersystems, Power Systems Blockset) є основою для вивчення та дослідження пристроїв силової електроніки і електромеханічних пристроїв. Під час моделювання можна вибирати метод розв'язання диференціальних рівнянь і спосіб зміни часу в моделі (з фіксованим або змінним кроком), а також є можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі, за допомогою спеціальних пристроїв спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць. Перевага пакету Simulink полягає також у тому, що він дає змогу поповнювати бібліотеки блоків за допомогою підпрограм, написаних як мовою MATLAB, так і мовами C++, Fortran і Ada.

Бібліотека пакету Simulink містить блоки, що орієнтовані на моделювання конкретних пристроїв у вигляді функціональних схем. Вона містить джерела масштабуючих сигналів, лінійні й нелінійні блоки, квантувачі, інтегратори, диференціатори, вимірювачі тощо.

Бібліотека пакету розширення Specialized Power Systems містить набір блоків для імітаційного моделювання електротехнічних пристроїв у вигляді пасивних і активних електротехнічних елементів, джерел енергії, електродвигунів, трансформаторів, напівпровідникових елементів.

За допомогою пакету Simulink і його розширення Specialized Power Systems можна імітувати роботу пристроїв у тимчасовій сфері, а також виконувати аналіз їх властивостей – розраховувати опір кола, одержувати амплітудно- та фазочастотні характеристики, виконувати гармонійний аналіз струмів і напруг.

Перевага пакету Simulink і його розширення Specialized Power Systems є те, що побудова моделей складних електротехнічних систем відбувається на основі методів імітаційного й функціонального моделювання.

Наприклад, для побудови силової частини напівпровідникового перетворювача використовуються блоки пакету розширення Specialized Power Systems, що імітують елементи та пристрої, а в його системі керування – функціональні блоки пакету Simulink. Вони відображають алгоритм її роботи без представлення електричної схеми, що спрощує модель, зберігається пам'ять, підвищується швидкість розрахунків і працездатність ПК. При цьому складний етап складання та розв'язання алгебраїчних і диференціальних рівнянь виключається, будується тільки функціональна модель, яка забезпечує візуальний контроль поведінки процесів створеної моделі, які протікають в ній.

Під час побудови моделей з елементами пакету розширення Specialized Power Systems і блоків з бібліотеки Simulink можливе використання функцій самої системи MATLAB, що суттєво може розширити можливості моделювання електротехнічних систем і напівпровідникових пристроїв.

Якщо в бібліотеці Specialized Power Systems відсутній потрібний блок можна розробити свої власні блоки, використовуючи, наявні в бібліотеці елементи і застосовуючи створені підсистеми в Simulink.

Simulink і його розширення Specialized Power Systems є сучасними пакетами зі широкими можливостями моделювання пристроїв силової електроніки, електромеханічних пристроїв і систем автоматичного керування, що постійно розвиваються.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

«MatLab Online (basic) для студентів та викладачів: реєстрація, використання»

- знайомство з однією з найстарших, ретельно пророблених та перевірених часом системою комп'ютерного моделювання MATLAB – MATrix LABoratory (МАТрична ЛАБораторія);
- реєстрація на ресурсі MATHWORKS;
- використання MATLAB ONLINE (BASIC) free;
- використання MATLAB ONLINE license

1 РЕЄСТРАЦІЯ НА РЕСУРСІ MATHWORKS

Компанія **The MathWorks** спеціалізується на розробці програмного забезпечення в області числових обчислень і комп'ютерного моделювання.

Основні продукти The MathWorks: MATLAB, Simulink, Stateflow та спеціалізовані інструментальні пакети розширення до них (ToolBoxes).

Користування програмними продуктами компанії MathWorks передбачає наявність створення акаунту.

Для початку створення акаунту “MatLab Online” потрібно перейти за посиланням <https://www.mathworks.com/products/matlab-online.html>.

Завантажиться вікно з домашньою сторінкою MathWorks (рис. 1.1).

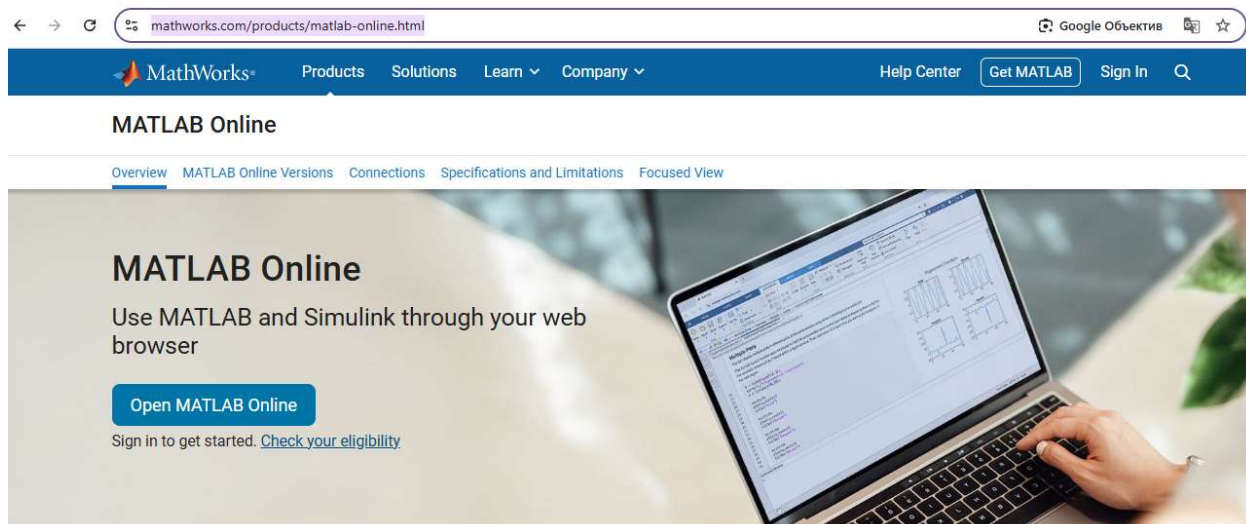


Рисунок 1.1 – Домашня сторінка MathWorks

На цій сторінці для переходу до наступного кроку, натисніть кнопку “Open MatLab Online”. Відкриється вікно входу в акаунт (рис. 1.2). Якщо акаунт вже створений, потрібно ввести свій email і увійти до облікового запису для початку користування. В іншому випадку потрібно зареєструватися. Для реєстрації натиснути “Create Account” (рис. 1.2).

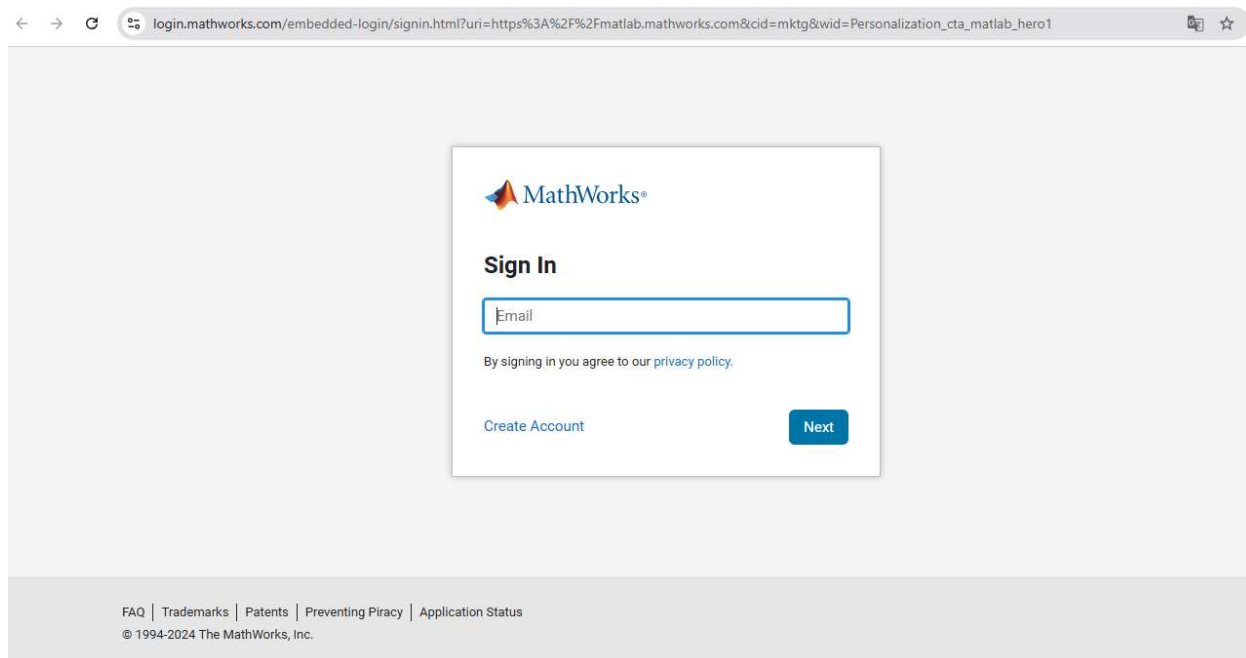


Рисунок 1.2 – Вхід або створення облікового запису акаунту

При натисканні на кнопку “Create Account” відкриється вікно створення облікового запису (рис. 1.3).

ВАЖЛИВО! Зверніть увагу, в цьому вікні є примітка яка говорить, що для коректної роботи і ведення облікового запису правильним є використання робочої електронної пошти (університетської). Тому для реєстрації використовуйте пошту в домені @karazin.ua.

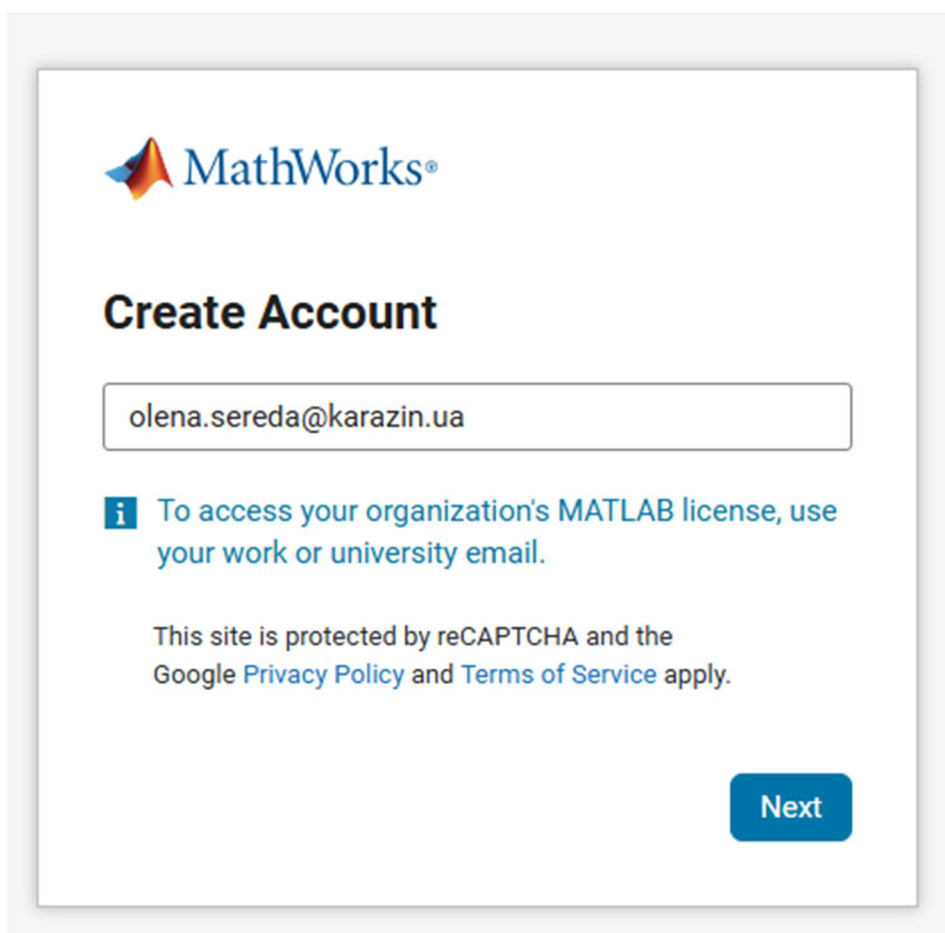


Рисунок 1.3 – Вікно початку створення акаунту

Після введення електронної пошти придумайте надійний пароль (рис. 1.4) та натисніть кнопку “Next”. В цей момент вам на пошту буде відправлено лист з кодом верифікації (рис. 1.5) і відкриється вікно для введення цього коду (рис. 1.6).



← olena.sereda@karazin.ua

Create Account

✗ 8-50 characters

✓ at least one uppercase letter

✗ at least one lowercase letter

✗ at least one number

Confirm Password

Next

Рисунок 1.4 – Вікно створення паролю облікового запису

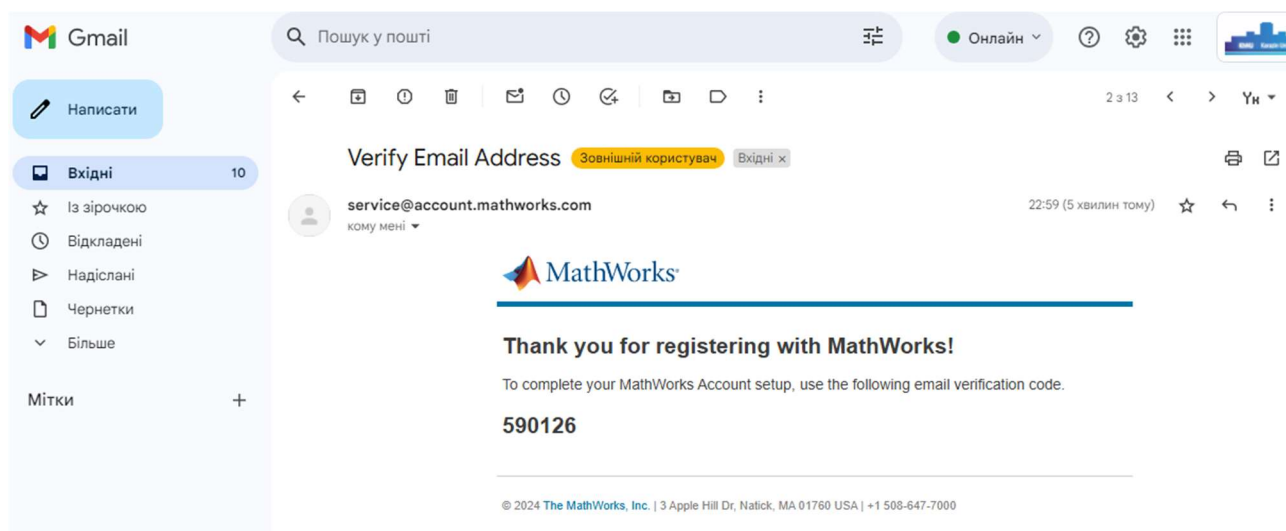
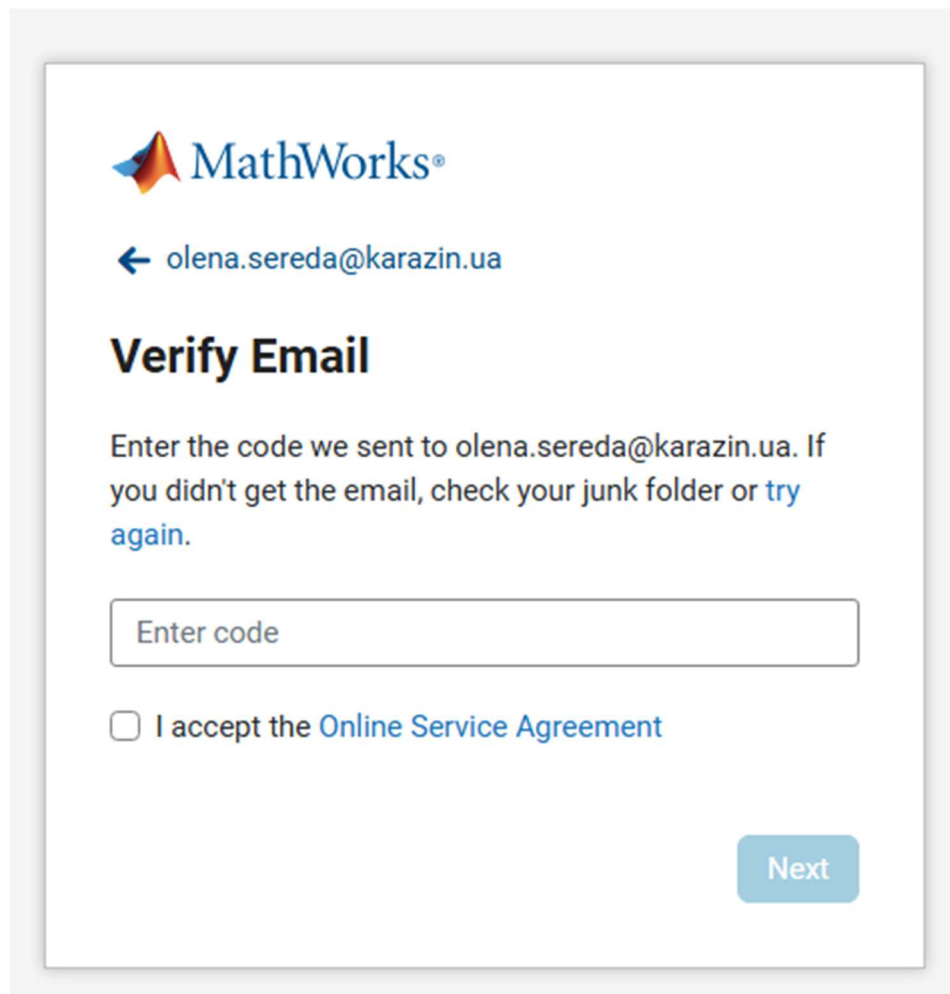


Рисунок 1.5 – Лист з кодом верифікації для підтвердження електронної пошти

The image shows a web interface for verifying an email address. At the top left is the MathWorks logo. Below it, the email address olena.sereda@karazin.ua is displayed with a back arrow icon. The main heading is "Verify Email". Below this, a message states: "Enter the code we sent to olena.sereda@karazin.ua. If you didn't get the email, check your junk folder or try again." There is a text input field with the placeholder "Enter code". Below the input field is a checkbox with the text "I accept the Online Service Agreement". In the bottom right corner, there is a blue button labeled "Next".

MathWorks®

← olena.sereda@karazin.ua

Verify Email

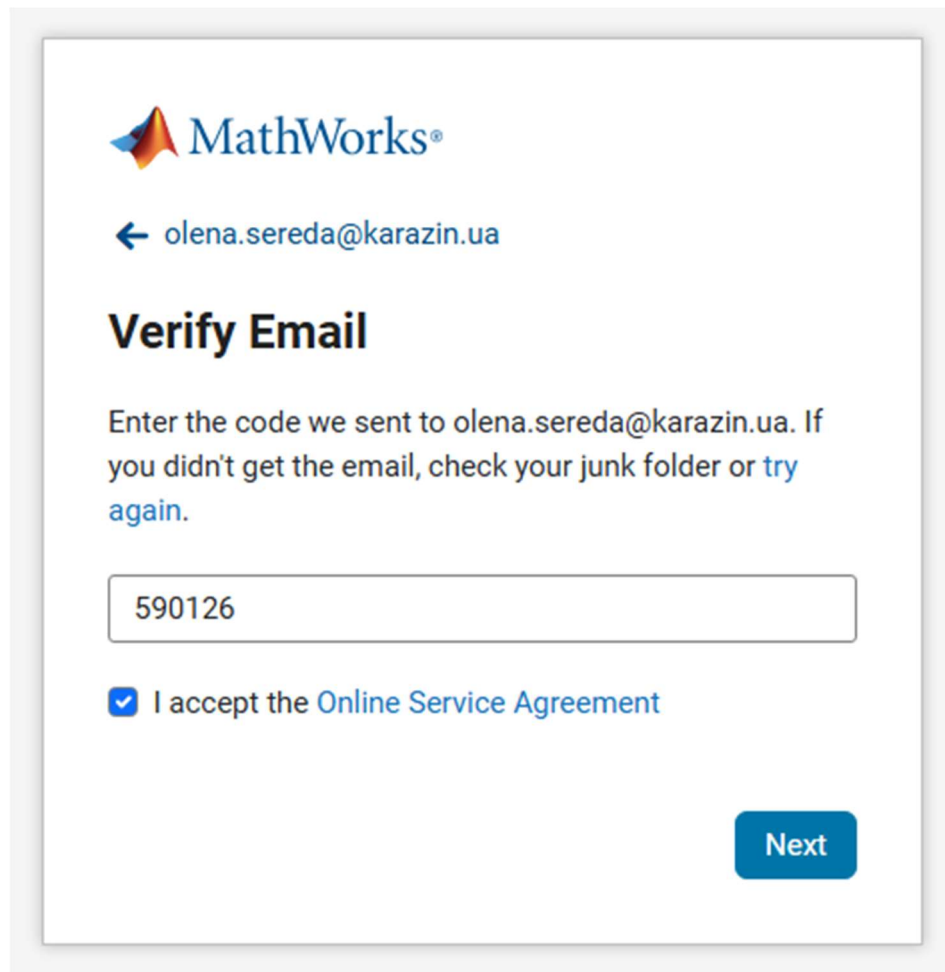
Enter the code we sent to olena.sereda@karazin.ua. If you didn't get the email, check your junk folder or [try again](#).

☐ I accept the [Online Service Agreement](#)

Next

Рисунок 1.6 – Вікно вводу коду верифікації

Ввівши код перевірки, прочитайте умови використання (Online Service Agreement), і після прочитання надайте свою згоду і підтвердження про ознайомлення з умовами, встановленням галочки в чекбоксі (рис 1.7).

The image shows a MathWorks email verification interface. At the top is the MathWorks logo. Below it, a back arrow points to the email address 'olena.sereda@karazin.ua'. The main heading is 'Verify Email'. The text below asks the user to enter a code sent to the email, with a link to check the junk folder or try again. A text input field contains the code '590126'. Below the field is a checked checkbox and the text 'I accept the Online Service Agreement'. A blue 'Next' button is in the bottom right corner.

 MathWorks®

← olena.sereda@karazin.ua

Verify Email

Enter the code we sent to olena.sereda@karazin.ua. If you didn't get the email, check your junk folder or [try again](#).

☒ I accept the [Online Service Agreement](#)

Next

Рисунок 1.7 – Підтвердження ознайомлення з умовами використання

Наступний етап – введення облікових даних. Тут ви вказуєте *Прізвище* та *Ім'я*, *країну*, та свою *роль* (рис. 1.8 та рис. 1.9) як студент або викладач, далі напрям кафедри.

The image displays two sequential screenshots of the MathWorks account creation interface. Both screenshots show the user 'olena.sereda@karazin.ua' on the 'Create a MathWorks Account' page. The form includes fields for First Name (Olena), Last Name (Sereda), and Location (Ukraine). A dropdown menu titled 'Which best describes you?' is open in both images, showing options: 'Select one', 'Student', 'Teacher/researcher in academia', 'Hobbyist', 'Engineer/scientist in government', and 'Engineer/scientist in industry'. In the top screenshot, 'Student' is selected. In the bottom screenshot, 'Teacher/researcher in academia' is selected. The browser's taskbar at the bottom shows various application icons and system status information like 'Cold weather' and the time '23:09'.

MathWorks®
olena.sereda@karazin.ua

Create a MathWorks Account

We just need a little more info to set up your account.

First Name

Last Name

Location

Which best describes you?

- Select one
- Student
- Teacher/researcher in academia
- Hobbyist
- Engineer/scientist in government
- Engineer/scientist in industry

Trust Center | Trademarks | Privacy Policy | Preventing Piracy | Application Status

Cold weather 23:09 Bc 16.02.25

MathWorks®
olena.sereda@karazin.ua

Create a MathWorks Account

We just need a little more info to set up your account.

First Name

Last Name

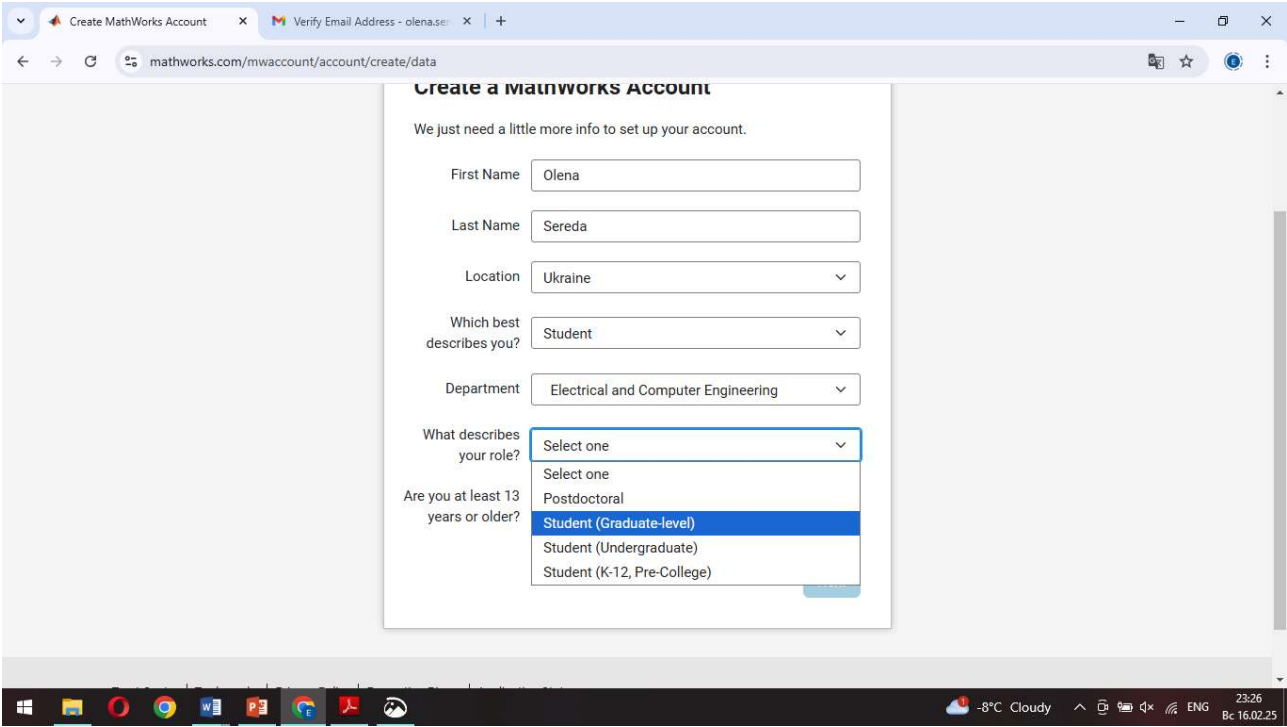
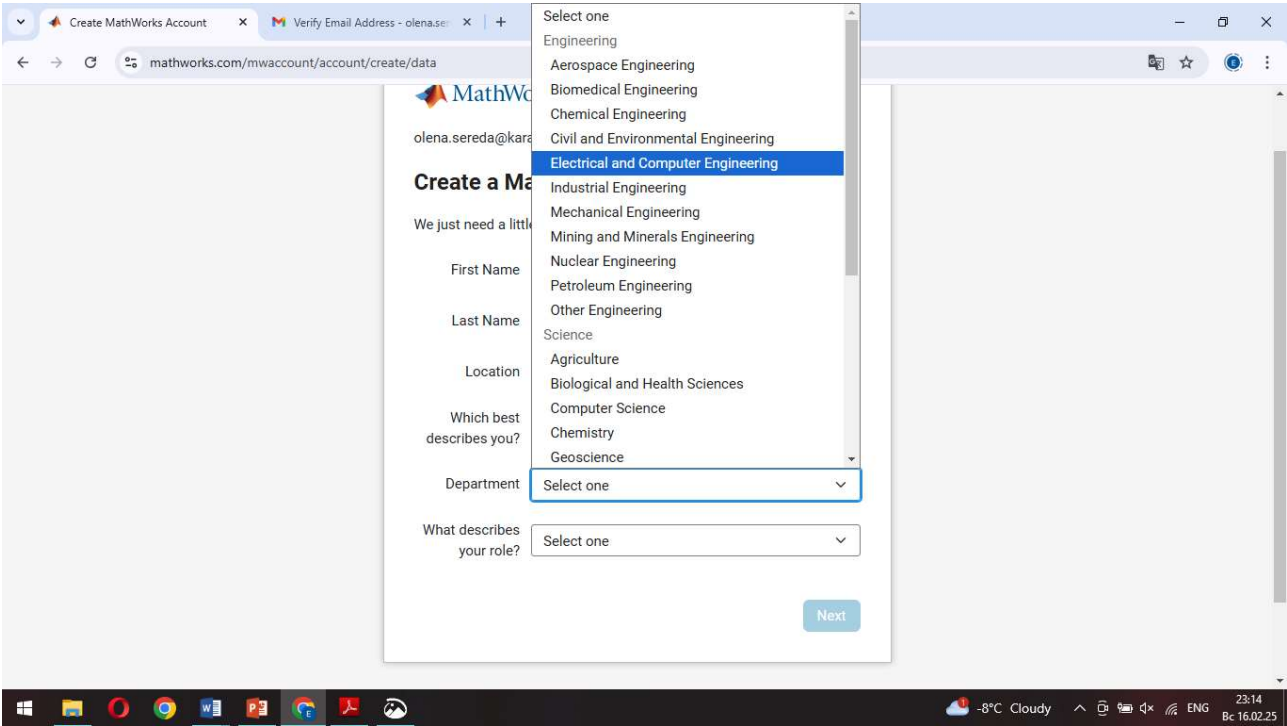
Location

Which best describes you?

- Select one
- Student
- Teacher/researcher in academia
- Hobbyist
- Engineer/scientist in government
- Engineer/scientist in industry

Trust Center | Trademarks | Privacy Policy | Preventing Piracy | Application Status

Cold weather 23:10 Bc 16.02.25



olena.sereda@karazin.ua

Create a MathWorks Account

We just need a little more info to set up your account.

First Name

Last Name

Location

Which best describes you?

Department

What describes your role?

Are you at least 13 years or older? ☒ Yes ☐ No

Next

- Останнім етапом є вказання інформації про навчальний заклад – країна розміщення і повна назва (Рисунок 1.12). Все, після цього вас переміщують на сторінку вашого профілю, де ви можете обирати який продукт та за якими умовами використовувати (Рисунок 1.13). Безкоштовною є версія MatLab Online (basic).



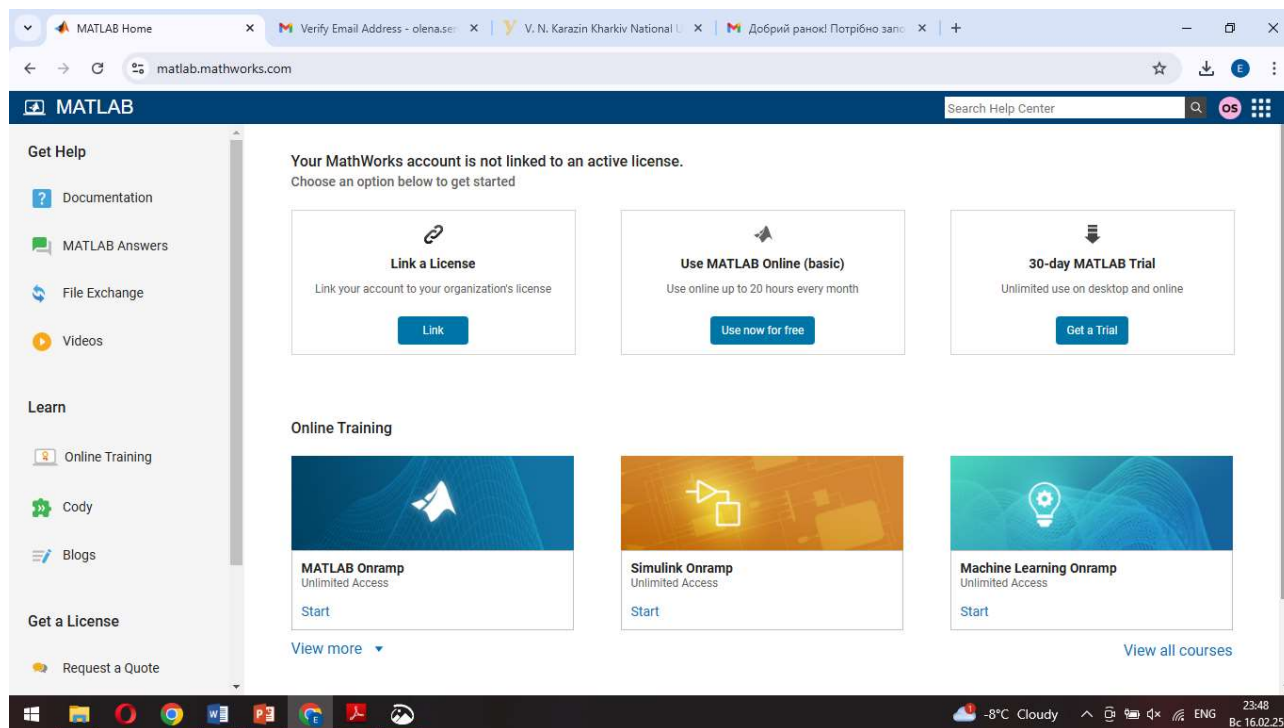
olena.sereda@karazin.ua

Information in English

Location of School/University

School / University

[Next](#)



MATLAB

Search Help Center

Get Help

- Documentation
- MATLAB Answers
- File Exchange
- Videos

Learn

- Online Training
- Cody
- Blogs

Get a License

- Request a Quote

Your MathWorks account is not linked to an active license. Choose an option below to get started

Link a License
Link your account to your organization's license
[Link](#)

Use MATLAB Online (basic)
Use online up to 20 hours every month
[Use now for free](#)

30-day MATLAB Trial
Unlimited use on desktop and online
[Get a Trial](#)

Online Training

MATLAB Onramp
Unlimited Access
[Start](#)

Simulink Onramp
Unlimited Access
[Start](#)

Machine Learning Onramp
Unlimited Access
[Start](#)

[View more](#) [View all courses](#)

2 ВИКОРИСТАННЯ MATLAB ONLINE (BASIC)

2.1 Обмеження

Укладач: к.т.н., доцент кафедри «Електротехніка та Електроенергетика»
СЕРЕДА Олена Геннадіївна

Харків, 2025

Наявність різних версій програмного забезпечення передбачає наявність в кожному з них різного функціоналу. На сторінці продукту та на (Рисунок 2.1 та Рисунок 2.2) ви можете ознайомитись з обмеженнями MatLab Online і, різницею поміж MatLab Online та MatLab Online(basic).

General Limitations

The following MATLAB and Simulink features and commands are not supported in MATLAB Online:

Product	Limitations
MATLAB	- MATLAB Online connects to a remote session running on a Linux system. - MATLAB Online cannot interact with some hardware, including instrument control. Hardware that can be accessed include: - MATLAB Online can interact with USB webcams only through Google Chrome. - MATLAB Online can communicate with Raspberry Pi hardware. - MATLAB Online can interact with audio playback devices through Google Chrome. - Serialport() not supported in MATLAB Online - Packaging tools for add-ons and MATLAB Compiler and MATLAB Compiler SDK are not supported. - Windows-specific components like COM are not supported. - xlsread and xlswrite will work in basic mode. - Using the MEX command to build C/C++ or Fortran MEX-files is not supported. - Files larger than 256 MB cannot be uploaded on MATLAB Online, but can be through MATLAB Drive. - The graphical interface to the profiler is not supported. - Use of the shell escape bang (!) command is not fully supported. - App Designer is only available in Google Chrome and Microsoft Edge
Simulink	Most Simulink features, including editing and simulating models, are supported. Simulink Online can communicate with Raspberry Pi hardware - external mode is not supported. Simulink Online can communicate with Parrot Minidrone hardware - deployment is not supported. Features that are not supported: - Variant Manager - Simulink Debugger Other Simulink Online limitations: - Only Windows® keyboard shortcuts are supported - Screen resolutions larger than 1920x1200 are not supported - Users of Simulink Online outside of the US may experience slow performance.

Загальні обмеження

Наступні функції та команди MATLAB і Simulink не підтримуються в MATLAB Online:

Обмеження продукту

MATLAB • MATLAB Online підключається до віддаленого сеансу, що працює в системі Linux.

- MATLAB Online не може взаємодіяти з деяким апаратним забезпеченням, у тому числі з керуванням інструментами. Устаткування, до якого можна отримати доступ, включає:
 - MATLAB Online може взаємодіяти з веб-камерами USB лише через Google Chrome.
 - MATLAB Online може взаємодіяти з обладнанням Raspberry Pi hardware.
 - MATLAB Online може взаємодіяти з пристроями відтворення аудіо через Google Chrome.
 - Serialport() не підтримується в MATLAB Online.
- Пакети інструментів додаткові і в MATLAB Compiler і в MATLAB Compiler SDK не підтримуються.
- Компоненти Windows, такі як COM, не підтримуються.
- xisread and xiswrite працюватимуть у базовому режимі.
- Використання команди MEX для створення MEX-файлів C/C++ або Fortran не підтримується.
- Файли, розмір яких перевищує 256 МБ, не можна завантажувати в MATLAB Online, але можна завантажувати через MATLAB Drive.
- Графічний інтерфейс профайлера не підтримується.
- Використання команди shell escape bang (!) підтримується не повністю.
- App Designer доступний лише в Google Chrome і Microsoft Edge.

Simulink Більшість функцій Simulink, включаючи релаксування та імітацію моделей, підтримуються.

Simulink Online може взаємодіяти з обладнанням Raspberry Pi hardware – зовнішній режим не підтримується.

Simulink Online може взаємодіяти з апаратним забезпеченням Parrot Minidrone hardware – розгортання не підтримується.

Функції, які не підтримуються:

- Менеджер варіантів
- Налаштовувач Simulink

Інші обмеження Simulink Online:

- Підтримуються лише комбінації клавіш Windows*
- Роздільна здатність екрана більше 1920x1200 не підтримується
- Користувачі Simulink Online за межами США можуть мати низьку продуктивність.

2.2 Використання MatLab Online (basic)

Пройшовши реєстрацію, на сторінці профілю ви можете перейти до використання MatLab Online(basic) натиснувши на відповідну назву (Рисунок 1.13). Відкриється вікно MatLab Online(basic) і ви можете починати працювати. Вам доступний командний рядок, де можна починати працювати, зліва репозиторій з вашими файлами, а зверху в стрічці доступні всі інструменти та надбудови (Рисунок 2.3), як Simulink, натиснувши на піктограму якого відкриється відповідне початкове вікно (Рисунок 2.4), де доступно створення пустої моделі (Рисунок 2.5) або одну зі створених шаблонів.

Вікно бібліотеки MatLab Online(basic) Simulink та приклад створення простої моделі, з вікном властивостей блоку SineWave бібліотеки Simulink

Створення моделей починається з використання бібліотеки Simulink (Рисунок 2.6), де ви знаходите потрібний вам елемент та додаєте його до поля моделі шляхом перетягування. Також кожен доданий вами елемент може бути налаштованим додатково його відкриттям (Рисунок 2.6) подвійним кліком вашого маніпулятора (комп'ютерна мишка, тачпад або тачскрін).

Разом з тим необхідним, і це є доступно – налаштування параметрів моделювання, вікно налаштування показано на Рисунок 2.7

Вікно налаштування параметрів моделювання MatLab Online(basic) Simulink

Одним з результатів моделювання виступає отримання графіків/осцилограм, тощо. На Рисунок 2.8 показано вікно виводу осцилограми складеної моделі за допомогою елемента Scope бібліотеки Simulink.

Вікно виводу результатів моделювання за допомогою блоку Scope бібліотеки Simulink

Вікно збереження моделей MatLab Online(basic) Simulink

Після закінчення моделювання, є можливість зберегти модель

Вікно репозиторію хмарного сховища MatLab Online(basic)

Усі збережені моделі відображаються у вікні MatLab Online(basic) в частині репозиторію

Хмарне сховище MatLab Online(basic)

Відомості про наповненість хмарного сховища в обліковому записі доступно безпосередньо в обліковому записі в частині MatLab Online(basic)

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2

Комп'ютерне моделювання роботи електричних систем та об'єктів за допомогою SPS-МОДЕЛЕЙ в MATLAB

Мета роботи – ознайомитися із принципами та особливостями побудови SPS-моделей та провести моделювання заданих схем.

1 Загальні відомості

Методика побудови моделі на основі пакету розширення Specialized Power Systems (SPS-моделі) така сама, як і методика побудови моделі на основі базової бібліотеки Simulink (S-моделі). Спочатку необхідно виконати розстановку блоків на схемі, встановити параметри, з'єднати блоки і встановити параметри розрахунку моделі в цілому. Для SPS-моделей доступний прискорений режим розрахунку і всі можливості Simulink.

Особливості SPS-моделі:

1. Входи і виходи SPS-блоків, на відміну від блоків Simulink, не показують напрямок передачі сигналу, оскільки фактично є еквівалентами електричних контактів. Таким чином, електричний струм може через вхід або вихід блоку протікати в двох напрямках: як усередину блоку, так і назовні.

2. З'єднувальні лінії між блоками є, по суті, моделями електричних проводів, по яких струм може протікати в двох напрямках. У Simulink-моделях ж інформаційний сигнал поширюється тільки в одному напрямку – від виходу одного блоку до іншого входу.

3. Simulink-блоки і Specialized Power Systems-блоки не можуть бути безпосередньо з'єднані один з одним. Сигнал від S-блоку можна передати до SPS-блоку через керовані джерела струму або напруги, а навпаки – за допомогою вимірювачів струму або напруги.

4. При розрахунку схеми, що містить нелінійні блоки, слід використовувати методи, які дають найкращі результати швидкодії:

Укладач: к.т.н., доцент кафедри «Електротехніка та Електроенергетика»
СЕРЕДА Олена Геннадіївна

Харків, 2025

- ode15s – багатокроковий метод змінного порядку (від 1 до 5), що використовує формули чисельного диференціювання;
- ode23tb – на початку рішення неявний метод Рунге-Кутта, а в подальшому метод зворотного диференціювання 2-го порядку;
- ode23t – метод трапецій з інтерполяцією.

5. На схемі повинен бути присутнім хоча б один вимірювальний блок (Current Measurement, Voltage Measurement, Three Phase VI Measurement or Multimeter). Це пов'язано з особливостями перетворення SPS-моделі в еквівалентну розрахункову S-модель.

6. Для розрахунку SPS-моделі потрібний блок Powergui. Він може знаходитися в будь-якій частині вікна моделі та використовується для зберігання даних про еквівалентну Simulink-модель, побудовану на основі моделі простору станів електричної схеми.

Розглянемо різницю S- і SPS-моделей. Блоки різних бібліотек Simulink можуть бути розділені на дві категорії за принципом своєї дії. До однієї категорії належать блоки, у яких безпосередньо проводиться обробка інформації. До іншої категорії належать блоки, які використовуються тільки для опису фізичної моделі, а обчислення у процесі моделювання виконуються за допомогою інших засобів.

Наприклад, до першої категорії відносяться блоки з основної бібліотеки Simulink, Mixed-Signal Blockset, а до другої категорії відносяться блоки із бібліотек, призначених для моделювання різних фізичних систем (моделей) – це бібліотеки RF Blockset, SimEvents, SimScape. Характерною відмінністю блоків з другої категорії є наявність у них портів спеціального типу Physical Modeling Connection Port або інша назва цих портів PMIOPort.

Порти, якими моделі передаються числові дані від блоку до блоку, позначаються стрілками, а порти, що використовуються для об'єднання блоків у фізичні системи, наприклад електричні схеми, позначаються по-різному, залежно від того до якої бібліотеки вони відносяться. У Specialized Power Systems такі порти позначаються квадратами і імітують клеми для підключення

електричних пристроїв.

Відповідно, не можна з'єднувати один з одним порти різного типу. За допомогою блоків керованих джерел струму та напруги Controlled Voltage Source та Controlled Current Source сигнали, задані числовими даними, перетворюються на відповідні їм значення струму та напруги у електричній схемі. Для вимірювання струму та напруги та отримання їх значень у чисельному вигляді (або для подальших операцій над цими сигналами) використовуються блоки Voltage Measurement та Current Measurement.

Після того, як SPS-модель побудована (з блоків бібліотеки Simulink і Specialized Power Systems), вона може бути запущена на розрахунок так само, як і будь-яка модель Simulink. Перед початком кожного розрахунку відбувається ініціалізація моделі. У процесі ініціалізації відбувається аналіз електричного кола, виявлення його топології (наявність джерел, приймачів, нелінійних елементів тощо).

Для того, щоб Simulink зміг виконати моделювання, електрична схема має бути задана за допомогою диференціальних рівнянь. Тому, в процесі аналізу електричного кола відбувається перевірка правильності з'єднання елементів, якщо є короткі замикання або розірвані ділянки, то виводиться попередження. Після цього нелінійні елементи замінюються на їх еквівалентні моделі, які наводяться в довідці до цих елементів. Еквівалентна модель нелінійного блоку складається з ключів, джерел струму та напруги, лінійних елементів та блоку, що виконує логічні функції та управляє ключем та джерелами.

Для лінійної частини електричної схеми складається система лінійних диференціальних рівнянь у термінах простору станів, тобто у тому вигляді, в якому їх вирішує Simulink. Нелінійні блоки виступають як додаткові джерела керовані сигналом.

При моделюванні в командному вікні MATLAB можуть виводитися попередження, в яких рекомендується змінити налаштування вирішувача. Зазвичай, при використанні нелінійних елементів та ключів в електричній схемі, рекомендується використовувати вирішувач зі змінним кроком у часі

(continuous-time solver). Для досягнення більшої точності в налаштуваннях вирішувача параметр Type встановити Variable-step, а параметр Solver – ode23s (ode23t, ode23tb). Особливо уважним треба бути до вибору обмежень кроку за часом, оскільки Simulink не завжди правильно вибирає його автоматично. Бажано ставити параметр Max step size виходячи з теореми Котельникова.

Для моделювання електричних кіл у моделі обов'язково повинен бути блок Powergui. За допомогою цього блоку можуть бути задані початкові умови для електричного кола, побудовані часові та частотні характеристики лінійних ділянок кола. Для великих складних електричних схем рекомендується проводити дискретизацію моделі (за допомогою блоку Powergui), тоді рішення знаходиться з постійним кроком у часі, за рахунок цього може бути скорочено час моделювання.

У діалоговому вікні блоку Powergui є можливість вибору методу моделювання зі змінним кроком за часом (Continuous-time) або з постійним кроком (Discrete). У разі постійного кроку за часом у тому вікні задається параметр Sample time. Вибір постійного або змінного кроку за часом у блоці Powergui діють незалежно від налаштувань заданих у діалоговому вікні Configuration parameters моделі, оскільки аналіз та моделювання електричного кола виконується не самим Simulink безпосередньо, а іншими засобами в бібліотеці Specialized Power Systems, що призначені для моделювання фізичних систем. Розширення Specialized Power Systems в даному випадку виступає в ролі графічного інтерфейсу для того, щоб зібрати електричне коло.

ЗАВДАННЯ № 1 Комп'ютерне моделювання подільника постійної напруги

2 Постановка завдання

2.1 Побудувати модель резистивного подільника постійної напруги і виміряти його вхідну і вихідну напруги.

Вихідні дані для моделювання та побудови моделі наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	DC Voltage Source	$10 + 0.5 * N \text{ В}$
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	$10 + N * 2 \text{ Ом}$
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Voltage Measurement	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	$20 + N \text{ Ом}$
Simulink\Sinks	Display	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	–
Час моделювання		10 с
Вирішувач		ode45

3 Основні теоретичні відомості

Подільник напруги – пристрій, в якому вхідна і вихідна напруга зв'язані коефіцієнтом передачі. В якості подільника напруги зазвичай застосовують регульовальний опір, який являє собою дві ділянки кола, що називають плечима, сума напруги на яких дорівнює вхідній напрузі. Плече між нульовим потенціалом і середньою точкою називають нижнім, а інше – верхнім. Поділяють лінійні і нелінійні подільники напруги. В лінійних подільниках напруги вихідна напруга змінюється по лінійному закону в залежності від вхідної. Такі подільники використовуються для задання потенціалів робочої напруги в різних точках електронних схем. В нелінійних подільниках напруги вихідна напруга залежить від коефіцієнта передачі нелінійно. Опір може бути як активним, так і реактивним.

Застосування подільників напруги:

- подільники напруги використовуються для регулювання рівня сигналу, для зміщення активних пристроїв в підсилювачах, і для вимірювання напруг. Вимірювальні мости і мультиметри мають у своєму складі подільники напруги;
- потенціометри, які є змінними подільниками струму, використовуються

у різноманітних приладах, зокрема у аудіосистемах та радіоприймачах для регулювання гучності. Подільники напруги також можуть бути використані у схемах з мікроконтролерами для вимірювання опору датчика;

- подільник напруги можна використовувати для стабілізації вхідної напруги, якщо в якості нижнього плеча подільника використовувати стабілітрон;
- подільники напруги широко використовується у якості атенуаторів на низьких частотах.

Подільник напруги – це електротехнічний пристрій, що дозволяє знімати (використовувати) тільки частину наявної постійної або змінної напруги за допомогою елементів електричного кола, що складається з резисторів, конденсаторів або котушок індуктивності. При низьких напругах в якості подільника часто застосовують змінні резистори (потенціометри). У колах змінного струму користуються також ємнісними чи індуктивними подільниками. У колах високої напруги на змінному струмі застосовують ємнісні подільники напруги, а на постійному струмі – резистивні. Подільники напруги використовують у радіотехніці, електроніці, обчислювальній та вимірювальній техніці та ін.

Схеми подільників напруги зображено на рис. 2.1.

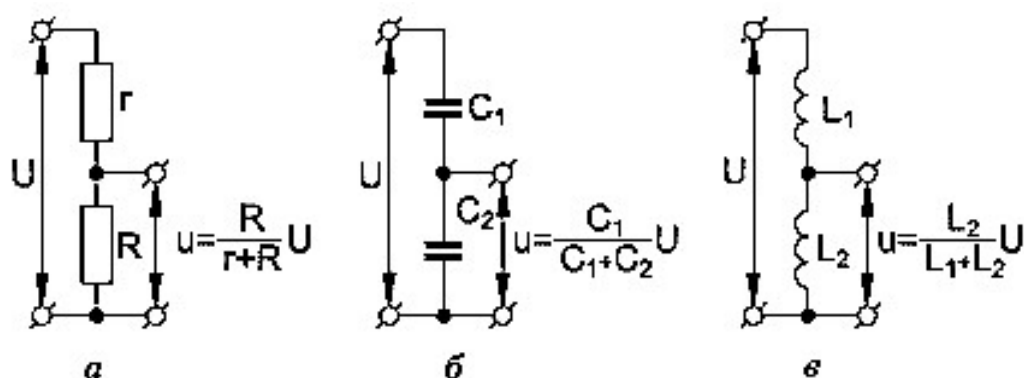


Рисунок 2.1 – Схеми подільників напруги:

а – резистивного; б – ємнісного; в – індуктивного;

u , U – вихідна і вхідна напруги; r , R – резистори; C_1 , C_2 – конденсатори;

L_1 , L_2 – котушки індуктивності

4 Порядок виконання роботи

4.1 Побудувати модель резистивного подільника постійної напруги (рис. 2.2)

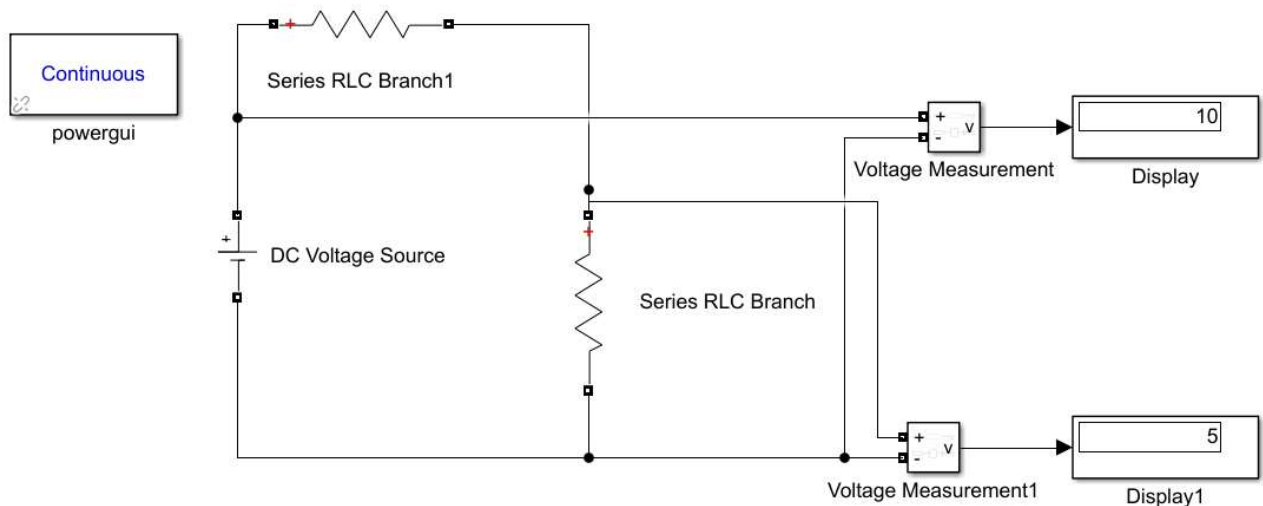


Рисунок 2.2 – Модель резистивного подільника постійної напруги

4.2 Налаштувати блоки:

Блок Series RLC Branch – значення опору резистора X Ом (табл. 2.1), індуктивності – 0 Гн, ємності конденсатора –inf (нескінченність), в текстовому вікні залишаємо рядок None, оскільки прилад Multimeter не використовується.

Блок Series RLC Branch 1 – аналогічно блоку Series RLC Branch.

Блок Voltage Measurement при вимірюванні постійної напруги не вимагає налаштування.

Блок Display при необхідності збільшення числа значущих цифр у вихідному результаті слід викликати вікно налаштування параметрів і замінити в його випадаючому меню Format короткий формат Short на довгий формат Long. Залишимо формат Short.

Після запуску моделі, яка досить проста і з цієї причини немає сенсу замінювати вирішувач ode45 на більш швидкий, отримуємо результат – напруга на вході дільника Display (рис. 2.2) і на виході – Display 1 (рис. 2.2).

ЗАВДАННЯ № 2 Комп'ютерне моделювання перехідного процесу в інтегрованому RL-колі

2 Постановка завдання

2.1 Провести моделювання перехідного процесу в інтегрованому RL-колі з вимірюванням його струму і напруги на виході (на резисторі).

Вихідні дані для моделювання і побудови моделі наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	DC Voltage Source	$50 + 2 \cdot N \text{ В}$
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	$0,5 + 0,1 \cdot N \text{ Гн}$
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Current Measurement	—
	Voltage Measurement	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	$4 + N \text{ Ом}$
Simulink\Sinks	Scope	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	—
Час моделювання		1 с
Вирішувач		ode45

3 Основні теоретичні відомості

RL-коло – електричне коло, що складається з резистора та індуктивності (рис. 2.3). При послідовному включенні – за схемою ділянки напруги – утворює диференціюючу або інтегруючу ланку.

Якщо вхідний сигнал подається на індуктивність, а вихідний знімається з резистора, то таке коло називається колом інтегруючого типу.

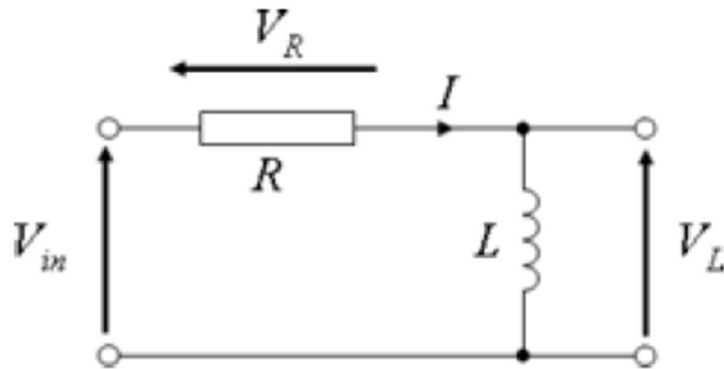


Рисунок 2.3 – Схема RL-кола

4 Порядок виконання роботи

4.1 Побудувати модель досліджуваного RL-кола (рис. 2.4)

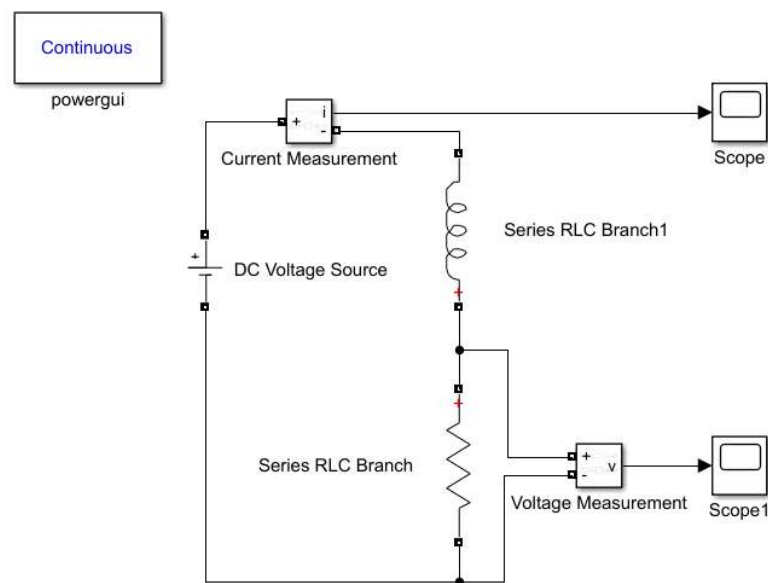
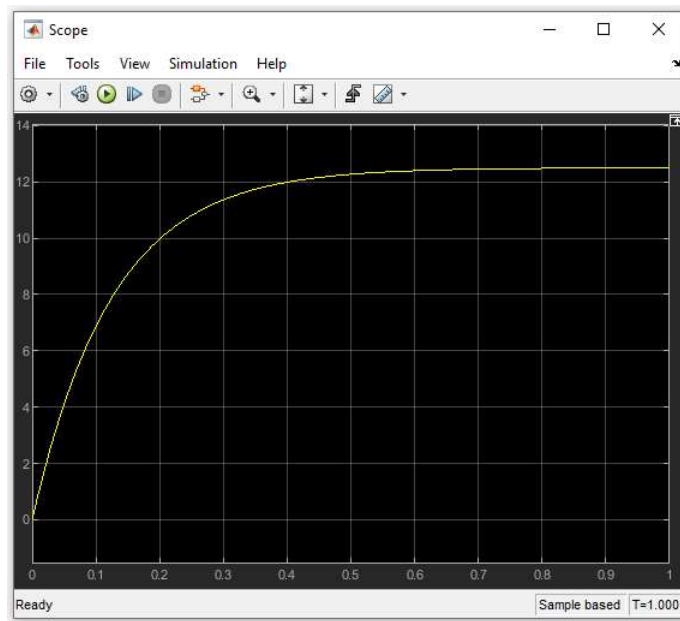


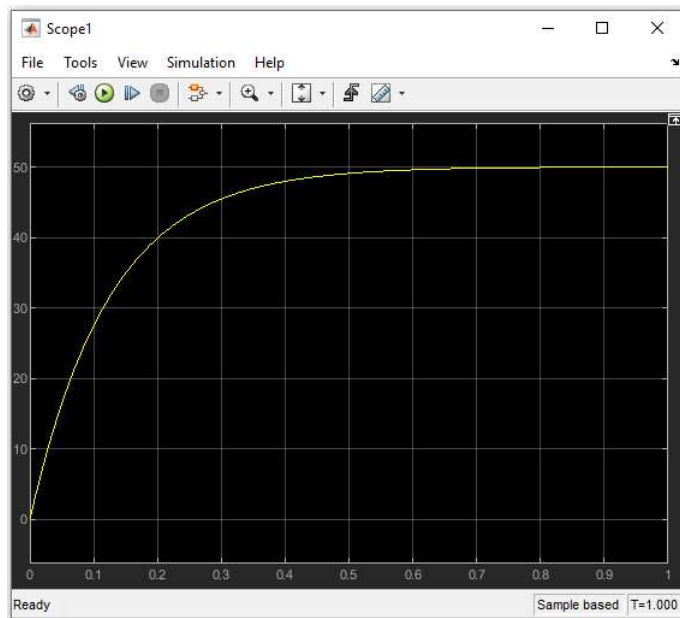
Рисунок 2.4 – Модель досліджуваного RL-кола

4.2 Постійна часу RL-кола $T = L / R = 0,125$ с, і тому час моделювання повинен становити більше 0,675 с (понад $5T$). Вибирається цей час у вікні моделі через меню Simulation і задається час Stop Time рівним 1 с.

Після запуску моделі отримати результат – часові діаграми струму (рис. 2.5, а) і напруги (рис. 2.5, б) на виході.



а



б

Рисунок 2.5 –Часові діаграми струму і напруги на виході

ЗАВДАННЯ № 3 Комп'ютерне моделювання переривчастого режиму роботи RL-кола при живленні змінною напругою

2 Постановка завдання

2.1 Провести моделювання переривчастого режиму роботи RL-кола при живленні змінною напругою.

Вихідні дані для моделювання і побудови моделі наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	AC Voltage Source	$100 + 2 \cdot N \text{ В}$
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	$R = 0,5 \text{ Ом}$ $L = 0,01 \text{ Гн}$
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Current Measurement	—
Simulink/Sources	Pulse Generator	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Grid Elements	Breaker	0,15 с
Simulink/Sinks	Scope	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	—
Час моделювання		10 с
Вирішувач		ode15s
Тривалість імпульсів		70%
Фазовий зсув		0,02 с

3 Основні теоретичні відомості

RL-коло зображено на рис. 2.3.

4 Порядок виконання роботи

4.1 Побудувати модель досліджуваного RL-кола (рис. 2.6)

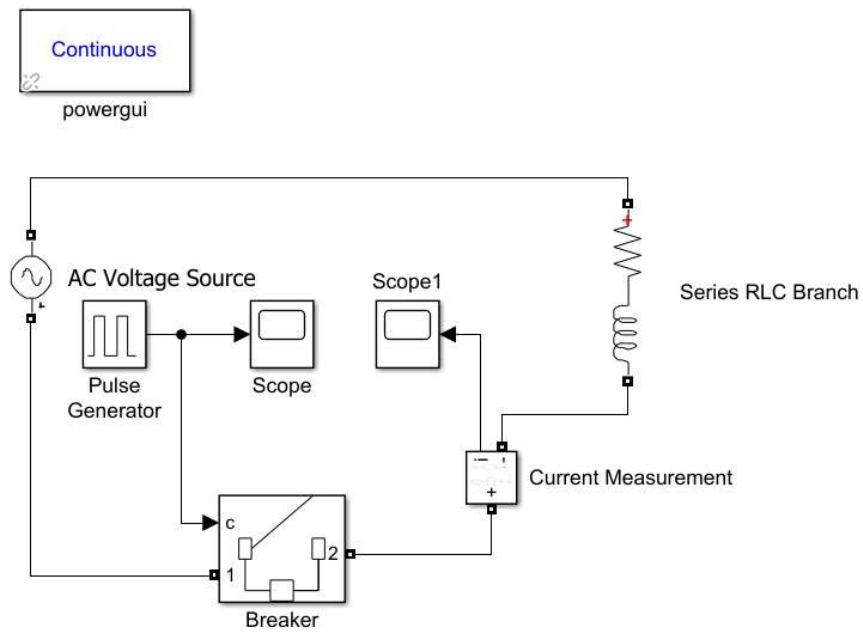


Рисунок 2.6 – Принципова схема моделювання RL -кола

4.2 Налаштувати блоки, як показано на рис. 2.7-2.8.

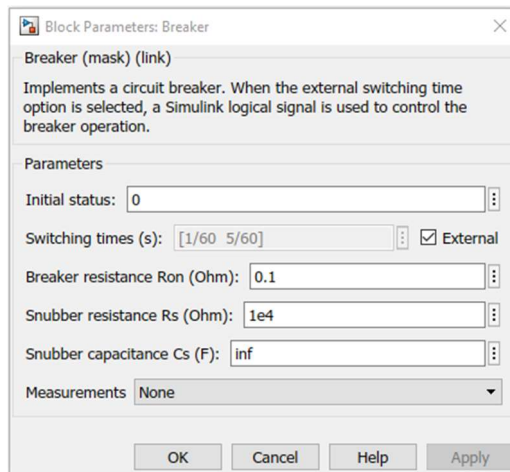


Рисунок 2.7 – Налаштування блоку Breaker

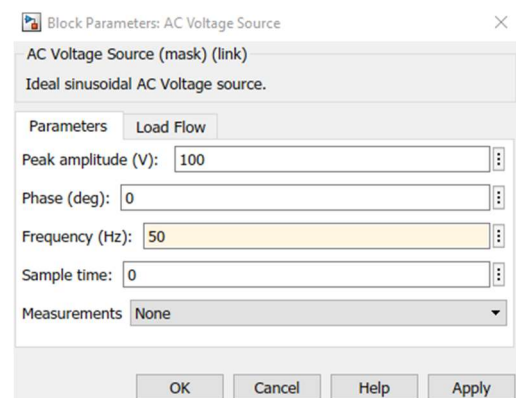


Рисунок 2.8 – Налаштування блоку AC VoltageSource

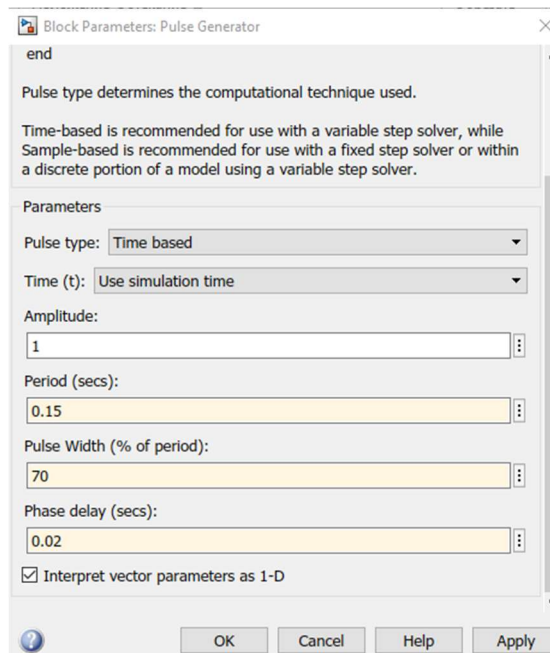
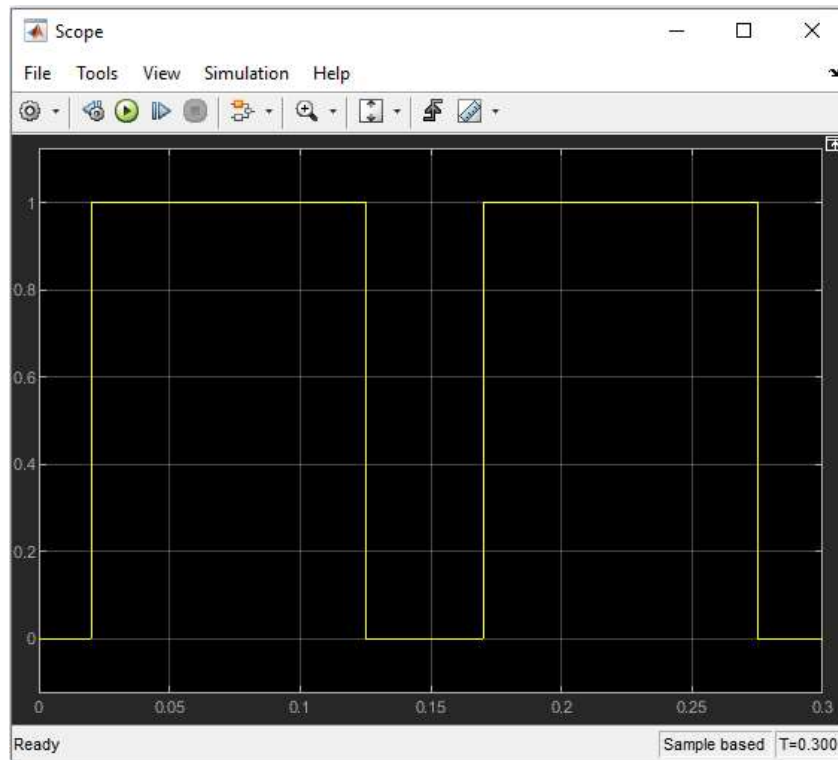
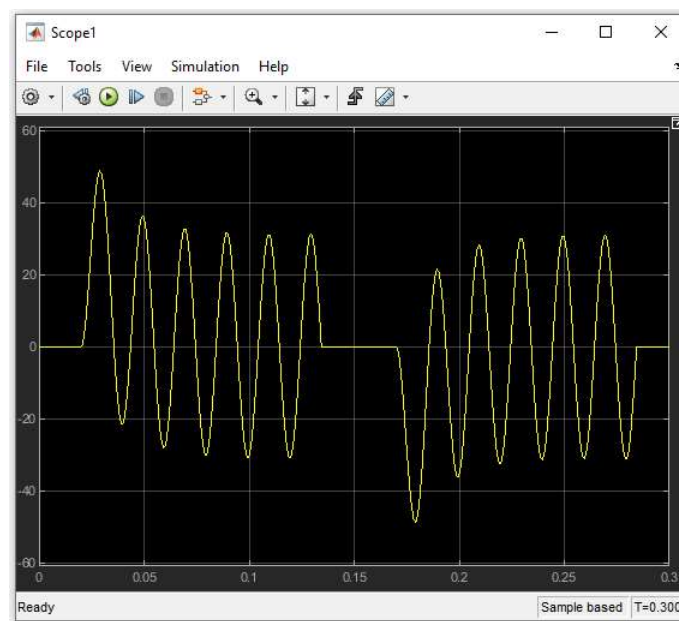


Рисунок 2.9 – Налаштування блоку Pulse Generator

У вікні моделі через меню Simulation / Simulation Parametrs відкриваємо вікно Simulation Parametrs. Виберемо вирішувач ode15s. Вважаємо, що для спостереження достатньо двох періодів низькочастотної складової сигналу по 0,15 с, тобто Stop Time дорівнює 0,3 с. Високочастотна складова сигналу має період 0,02 с, і для нього слід задати хоча б 10 відліків, вибравши крок дискретизації Maxstepsize рівним 0,002 с. Після запуску моделі отримуємо тимчасові діаграми процесів зміни струму в RL-колі (рис. 2.10, а) та сигналу на виході генератора PulseGenerator (рис. 2.10, б).



а



б

Рисунок 2.10 – Часові діаграми процесів зміни струму в RL-ланцюзі (а) та сигналу на виході генератора PulseGenerator (б)

ЗАВДАННЯ № 4 Комп'ютерне моделювання інтегратора з RC -кола

2 Постановка завдання

2.1 Провести моделювання інтегратора з RC -кола при дії імпульсної напруги прямокутної форми, що має постійну складову.

Вихідні дані для моделювання і побудови моделі наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simulink/Sources	Signal Generator	50 В
Simulink/Sources	Constant	15 В
Simulink/MathOperations	Sum	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	Controlled Voltage Source	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Parallel RLC Branch	1 Ом
	Parallel RLC Branch	0,01 Ф
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Voltage Measurement	–
Simulink/SignalRouting	Mux	2
Simulink/Sinks	Scope	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	–
Час моделювання		0,08 с

3 Основні теоретичні відомості

Якщо вхідний сигнал подається на резистор, а вихідний знімається з конденсатора (рис. 2.11), то таке коло називається колом інтегруючого типу. Назва вказує, що напруга на виході (конденсаторі) є інтегральною функцією струму заряджання конденсатора.

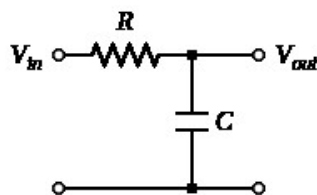


Рисунок 2.11 – Схема RC -кола інтегруючого типу

4 Порядок виконання роботи

4.1 Побудувати модель досліджуваного інтегратора з RC-кола (рис. 2.12)

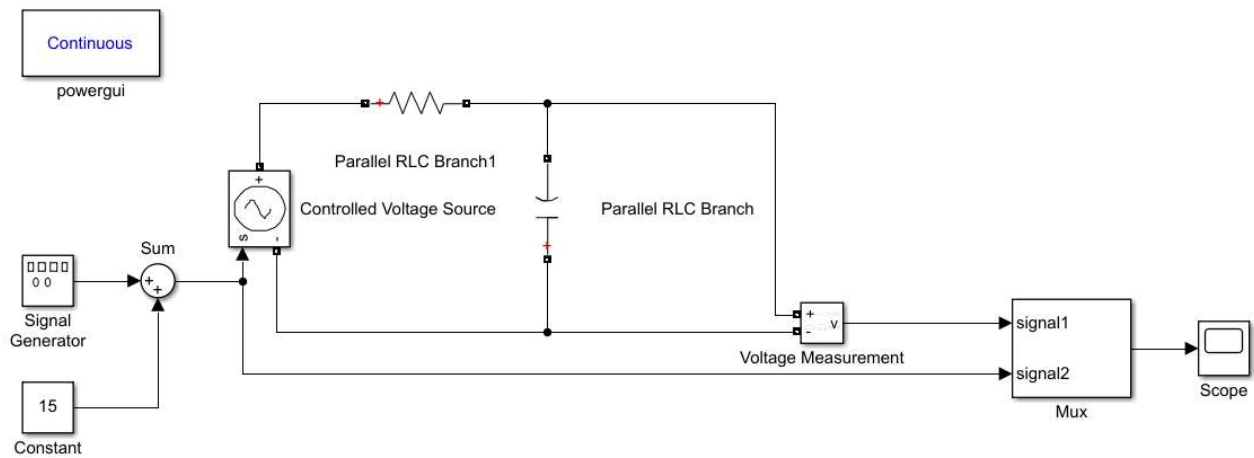


Рисунок 2.12 – Принципова досліджувана схема інтегратора з RC-кола

4.2 Тривалість процесу моделювання Stop Time вибирається 0,08 с, а максимальний крок дискретизації Maxstepsize – 0,001 с (Modeling → Modeling Settings Ctrl+E, рис. 2.13). За рахунок мультиплексора Mux вхідні сигнали об'єднуються в вектор, що дозволяє вивести на екран осцилографа відразу два сигнали, накладених один на одного. Перехідний процес, обумовлений наявністю постійної складової, закінчується на другому періоді прямокутних імпульсів, а вихідні трикутні імпульси мають нелінійний характер наростання і спаду напруги.

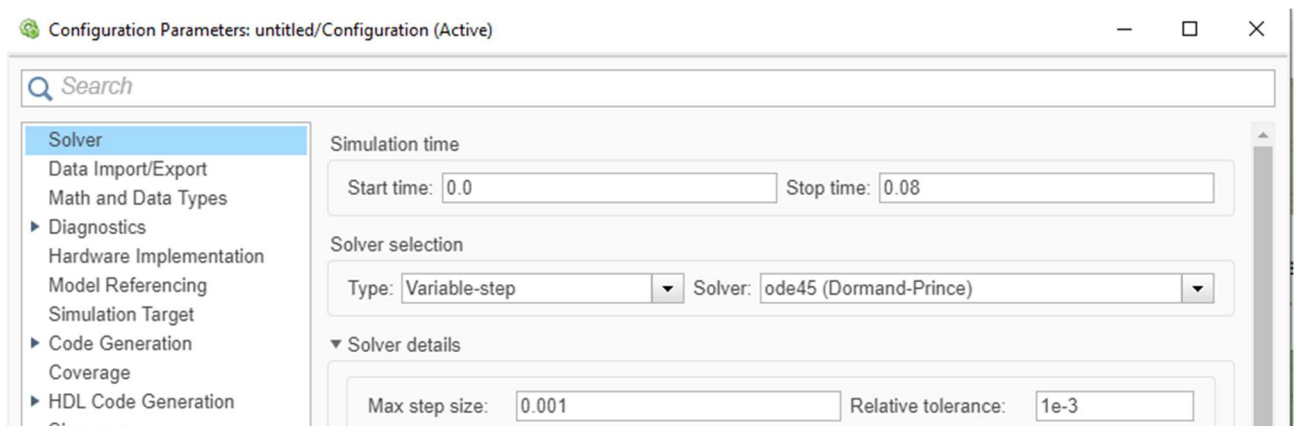


Рисунок 2.13 – Встановлення максимального кроку дискретизації Maxstepsize

4.3 Налаштування блоків (рис. 2.14-2.16).

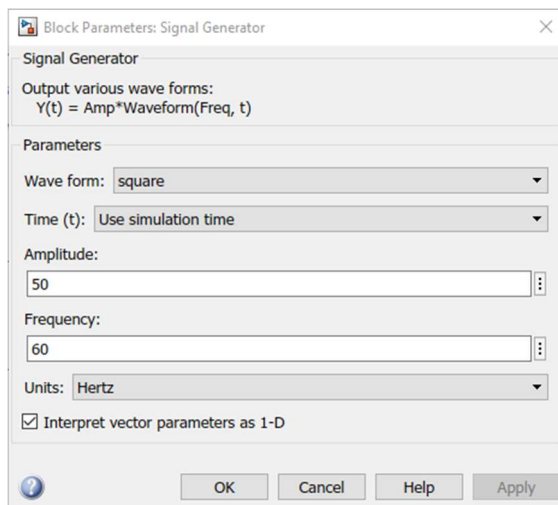


Рисунок 2.14 – Налаштування блоку
Signal Generator

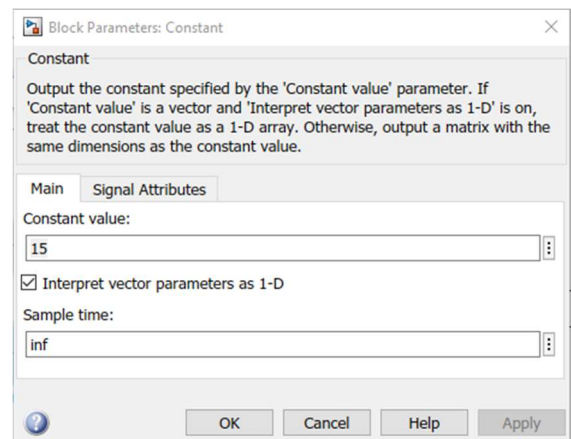


Рисунок 2.15 – Налаштування блоку
Constant

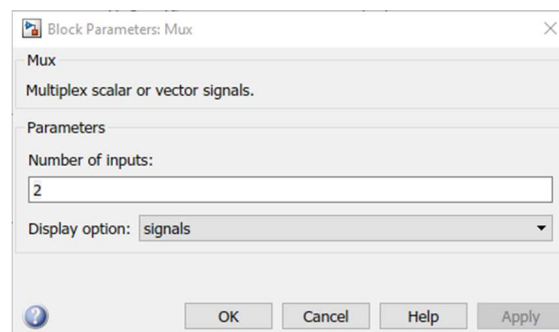


Рисунок 2.16 – Налаштування блоку Mux

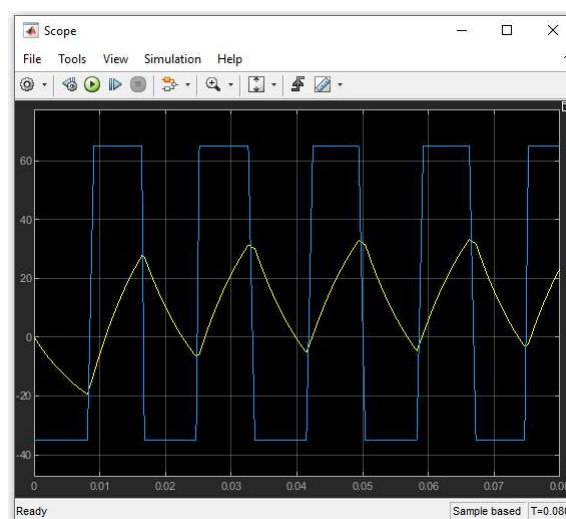


Рисунок 2.17 – Отримані характеристики RC -кола

5 Контрольні питання:

1. Що розуміють під динамічними системами?
2. У чому полягають основні особливості системи MATLAB, які роблять її найбільш придатною для інженерних досліджень?
3. Що таке «візуальне програмування»?
4. Що таке S-модель? У якому вигляді вона зберігається на диску?
5. Що являють собою окремі блоки у пакеті Simulink?
6. З яких етапів складається процес моделювання за допомогою пакету Simulink?
7. Як утворюється блок-схема S-моделі? Які типи блоків мають обов'язково міститися у закінченій блок-схемі?
8. Як дістатися вікна налаштування блоку? У якому виді можна вводити значення параметрів блоку?
9. Присутність яких блоків перетворюють модель у модель динамічної системи?
10. Для чого потрібні блоки-джерела? блоки-приймачі?
11. Що таке «вирішувачі»? Як встановлюються вирішувач та його параметри?
12. Чим вирізняються параметри вирішувачів з фіксованим кроком від параметрів вирішувачів зі змінюваним кроком?
13. Як можна впливати на точність моделювання з фіксованим кроком? зі змінюваним кроком?
14. Як здійснити власне моделювання за готовою блок-схемою?
15. Як забезпечити запис результатів моделювання у робочий простір MATLAB?
16. Що розуміють під дільником напруги? Застосування, види.
17. Що таке інтегруюча та диференціююча ланки?
18. Схема RC-кола, типи, принцип її роботи.
19. Схема RL-кола, типи, принцип її роботи.

6 Оформлення результатів практичних завдань.

Звіт повинен містити *титульний лист* (додаток А), *завдання*, *опис об'єкта моделювання*, *схему моделювання*, *методику*, *хід* та *результати моделювання*.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

**Комп'ютерне моделювання та дослідження роботи випрямлячів в
MATLAB**

Мета роботи – ознайомитися з найпростішими схемами випрямлячів, побудувати моделі та провести моделювання заданих схем випрямлячів, а також побудувати та дослідити основні характеристики випрямлячів.

1 Загальні відомості

Електрична енергія виробляється, розподіляється та споживається переважно у вигляді енергії змінного струму. Для споживачів змінного струму, а саме асинхронних й синхронних електричних двигунів, трансформаторів, люмінесцентних ламп тощо, необхідно, щоб споживаний ними струм був знакозмінним (найкраще – синусоїдальним). Частота зміни знаку струму стандартизована (в Україні – 50 Гц).

Проте є інші споживачі електричної енергії, що потребують, щоб струм був одного знаку. До споживачів постійного струму належать електричні двигуни постійного струму, акумуляторні батареї під час їх заряду, гальванічні та електролізні ванни, зварювальні установки, електронні мікросхеми тощо.

Для таких споживачів інколи виникає потреба використати для їхнього живлення енергію з джерела змінного струму (наприклад, промислової або побутової мережі змінного струму). У такому випадку використовують випрямляч. *Випрямляч* – це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення електричної енергії змінного струму на енергію постійного струму. Випрямляч вмикають між джерелом змінного струму та споживачем постійного струму.

Випрямлячі широко використовуються в блоках живлення комп'ютерів, агрегатах безперебійного живлення, зарядних пристроях для мобільних

телефонів та ноутбуків, на перетворювальних підстанціях електричного транспорту, в електроприводах постійного струму, різноманітних електронних схемах тощо.

Узагальнена структурна схема випрямляча показана на рис. 3.1.

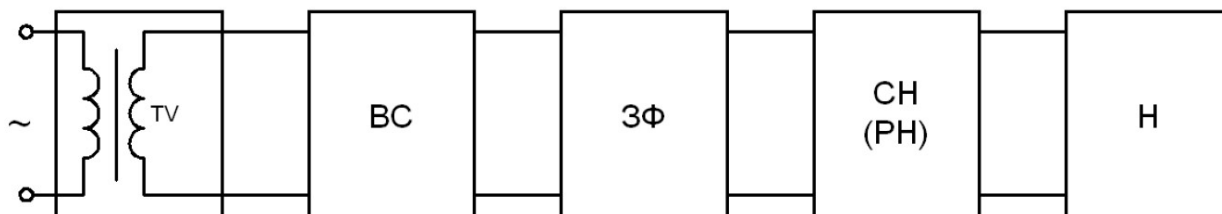


Рисунок 3.1 – Узагальнена структурна схема випрямляча

Випрямляч складається з наступних елементів (рис. 3.1):

TV – трансформатора напруги, який призначений для перетворення величини напруги мережі до значення, необхідного для роботи випрямляча, а також для забезпечення електричного (гальванічного) розв'язку мережі й навантаження;

ВС – вентильної схеми для перетворення змінної напруги у випрямлену – пульсуючу однополярну. Вентильна схема може виконуватись на напівпровідникових ключах;

ЗФ – згладжуючого фільтру для перетворення випрямленої напруги в постійну. Пасивні згладжуючі фільтри виконують на реактивних елементах, що мають властивість накопичувати електричну енергію: конденсаторах, дроселях. Активні згладжуючі фільтри виконують на транзисторах, операційних підсилювачах та реактивних елементах і використовують для живлення радіоелектронних пристроїв;

СН (РН) – стабілізатора (регулятора) напруги, який підтримує напругу на навантаженні на незмінному рівні у разі зміни напруги мережі або навантаження у заданих межах. Стабілізатор напруги є різновидом регулятора напруги, у якого забезпечується автоматичне регулювання за ознакою постійності значення

напруги на навантаженні. Для регулювання напруги на навантаженні за необхідним законом і у заданих межах використовують регулятори напруги. Регулятор (стабілізатор) може бути ввімкнено і з боку змінної напруги (до трансформатора);

Н – навантаження також вважають елементом випрямляча, тому, що зміни його опору в процесі роботи впливають на режим роботи всього пристрою. Тому параметри вузлів випрямляча та їх елементів, режими їх роботи, повинні бути узгоджені з заданими умовами роботи навантаження.

До складу випрямляча можуть не входити згладжуючий фільтр, стабілізатор (регулятор) напруги, а іноді й трансформатор.

Випрямляч у своєму складі може мати вузли і елементи захисту від короткого замикання, перевантаження, зниження напруги мережі: запобіжник, автоматичний вимикач, електронний пристрій захисту, елементи і вузли індикації наявності й значення напруги і струму, а також вузли діагностики працездатності.

Випрямлячі класифікують:

- за числом фаз – однофазні та багатofазні (зазвичай трифазні);
- за потужністю – малої потужності (до 100 Вт), середньої (до 10 кВт) та великої (понад 10 кВт);
- за будовою – некеровані та керовані. Перші будуються на некерованих вентилях – діодах, другі – на керованих, наприклад, на тиристорах.
- за принципом дії – одно- та двотактні. Однотактні – це випрямлячі, у яких по вторинній обмотці трансформатора струм протікає один раз за період напруги мережі й лише у одному напрямку, а двотактні (двонапівперіодними) – два рази за період й у різних напрямках.

Випрямлячі характеризуються **кратністю пульсацій випрямленої напруги m** , тобто відношенням частоти пульсацій випрямленої напруги до частоти мережі. Кратність пульсацій у однотактних випрямлячів відповідає числу фаз мережі, а у двотактних – подвоєному числу фаз.

Робота випрямляча фактично полягає у тому, що навантаження за

допомогою ключів підключається до джерела енергії напруги змінного струму, щоб за тривалість кожного півперіоду його напруги (позитивного і негативного) струм у навантаженні протікав в одному напрямку. Виходячи з цього, найважливішим вузлом випрямляча є вентильна схема – схема випрямлення.

Широкого розповсюдження набули схеми випрямлячів, зображені на рис. 3.2.

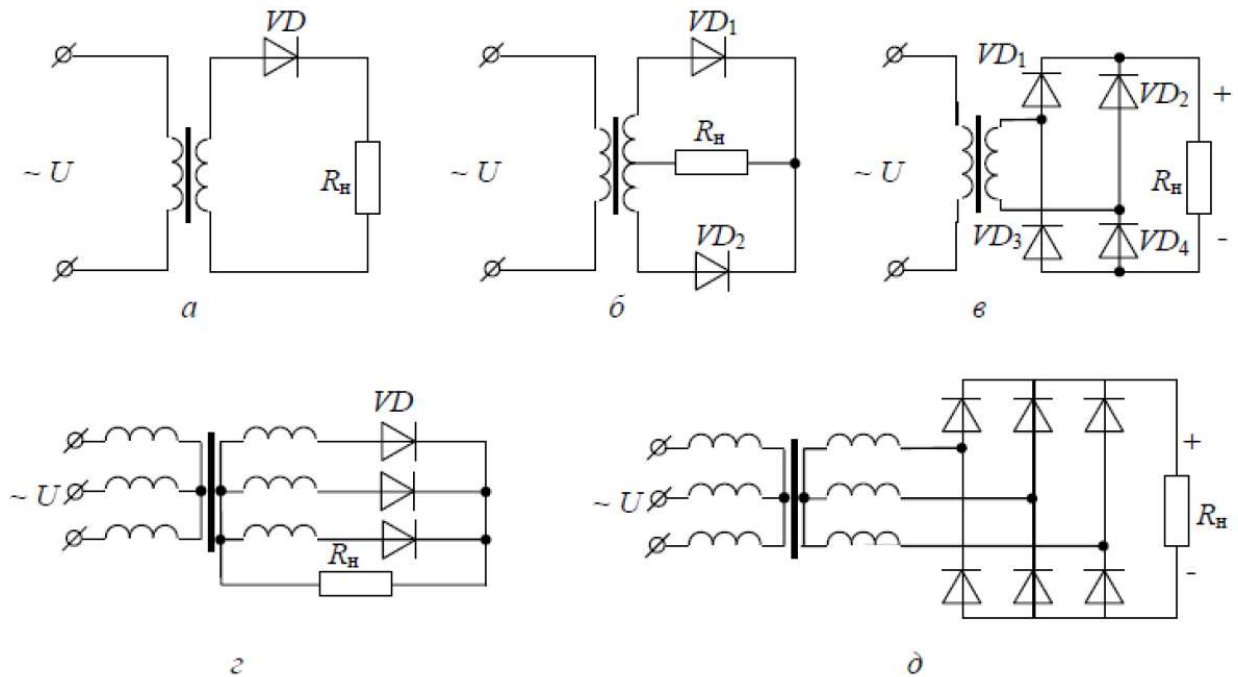


Рисунок 3.2 – Основні схеми випрямлячів:

a – однофазна однопівперіодна; *б* – однофазна з нульовим виводом;
в – однофазна мостова; *г* – трифазна нульова (схема Міткевича); *д* – трифазна мостова (схема Ларіонова)

ЗАВДАННЯ № 1 Комп'ютерне моделювання одноктного випрямляча з *RL* – навантаженням

2 Постановка завдання

2.1 Побудувати модель одноктного випрямляча з *RL* – навантаженням та провести вимірювання струму і напруги на діоді та навантаженні.

Вихідні дані для моделювання та побудови моделі наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	AC Voltage Source	напруга живлення $200 + 4 \cdot N$ В частота змінного струму $f = 50$ Гц
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/ Power Electronics	Diode	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	активний опір навантаження $R = 2 + N \cdot 2$ Ом; індуктивний опір навантаження $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ Гн
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Current Measurement	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Voltage Measurement	—
Simulink/Sinks	Scope	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Utilities	Ground	—
Simulink/ Signal Routing	Demux	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	—
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

3 Порядок виконання роботи

3.1 Побудувати модель одноктного випрямляча з *RL* – навантаженням (рис. 3.3).

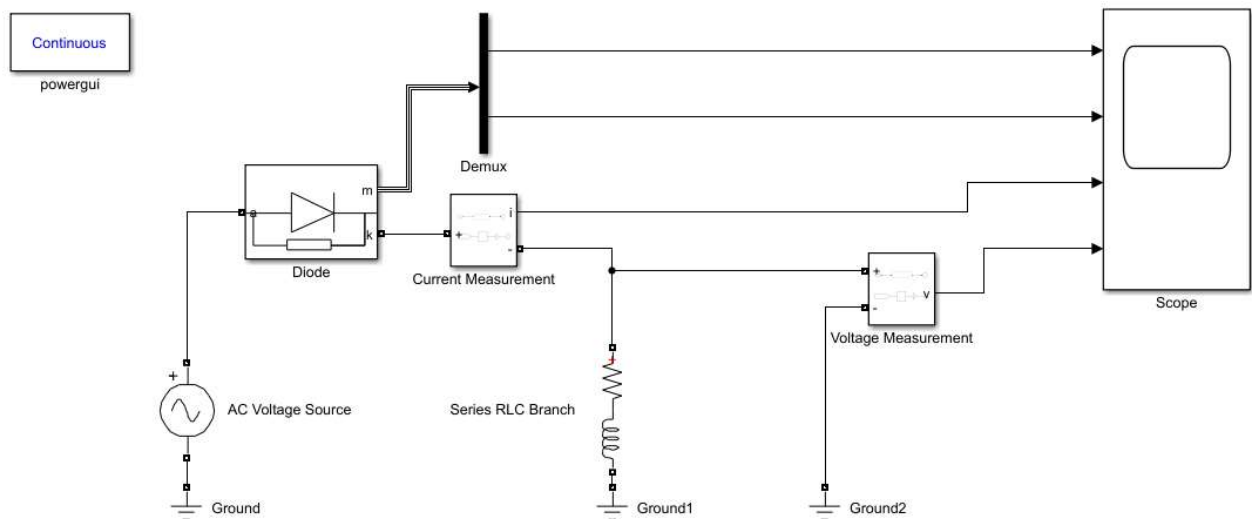


Рисунок 3.3 – Модель однотактного випрямляча з RL – навантаженням

Для побудови моделі необхідно в бібліотеці Simulink Library Browser відкрити дерево Simscape, далі Electrical (електричні елементи), потім Specialized Power Systems і активізувати рядок дерева Sources (джерела електричної енергії). У правій частині вікна відкривається розділ Sources. За допомогою лівої кнопки миші (ЛК) потрібно перетягнути піктограму джерела змінної напруги AC Voltage Source у вікно моделі.

Діючи аналогічно, у вікно моделі по черзі переміщують піктограму послідовного RLC-кола Series RLC Branch з розділу Passives (електротехнічні елементи), піктограми вольтметра Voltage Measurement і амперметра Current Measurement з розділу Sensors and Measurements (вимірювальні та контрольні пристрої). З бібліотеки Simulink – піктограми осцилографа Scope з розділу Sinks (приймачі та вимірники сигналів) і Demux з розділу Signal Routing (блоки, що визначають маршрути сигналів). Проводяться з'єднання блоків у схему (рис. 3.3), в якій до інформаційного порту **m** діода підключається осцилограф Scope через демультимплексор Demux, що виділяє зі загального векторного Simulink-сигналу два окремі сигнали, які виводяться на підключений осцилограф.

Осцилограф має чотири входи. Кількість входів встановлюється після виклику у вікні осцилограм Scope (рис. 3.4) меню View і підменю Configuration

Properties Scope і закладкою Main – загальні параметри, де й установлюється необхідна кількість входів Number of input ports.

У блоці вікна параметрів джерела AC Voltage Source проводяться установки напруги живлення (табл. 3.1), частоти (табл. 3.1), а у блоці вікна параметрів Series RLC Branch – опору, індуктивності і ємності (табл. 3.1).

Вікно параметрів діода з установленими налаштуваннями наведено на рис. 3.5. Якщо в колі, Snubber resistance зменшити опір резистора до величини 10-20 Ом, то на кривій струму навантаження можуть з'явитися високочастотні коливання, що свідчить про необхідність уважного ставлення до вибору параметрів елементів цього кола.

Менш чутливі процеси комутації діода до вибору величини ємності даного кола, але зниження її нижче 10^{-7} Ф також може викликати появу аналогічних коливань. Індуктивність L_{on} починає позначатися на картині процесів у разі значення більш 1...5 мГн.

Допускається вибирати величину цього параметра нескінченно малою або навіть нульовою. Часові діаграми струму і напруги на діоді та струму і напруги на навантаженні наведено на осцилограмах (рис. 3.6).

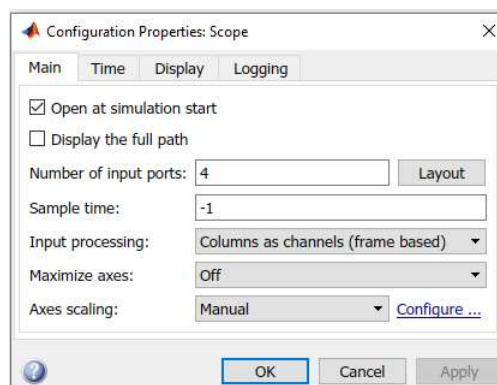


Рисунок 3.4 – Вікно параметрів налаштування блока Scope

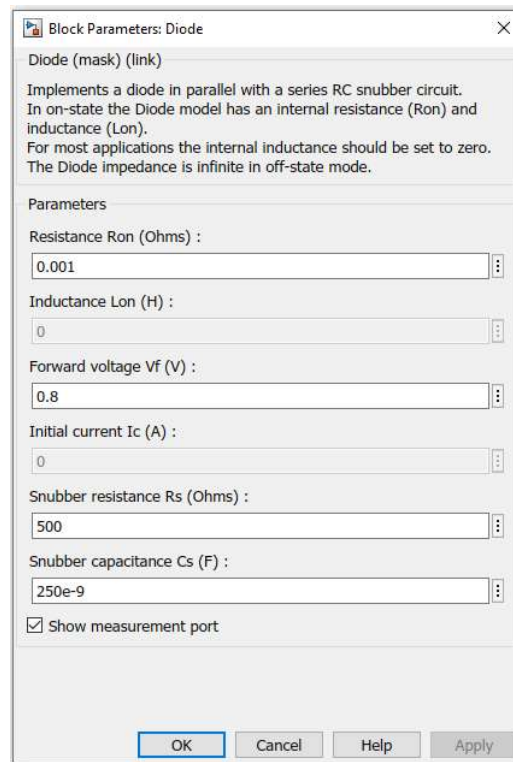


Рисунок 3.5 – Вікно параметрів налаштування блока Diode

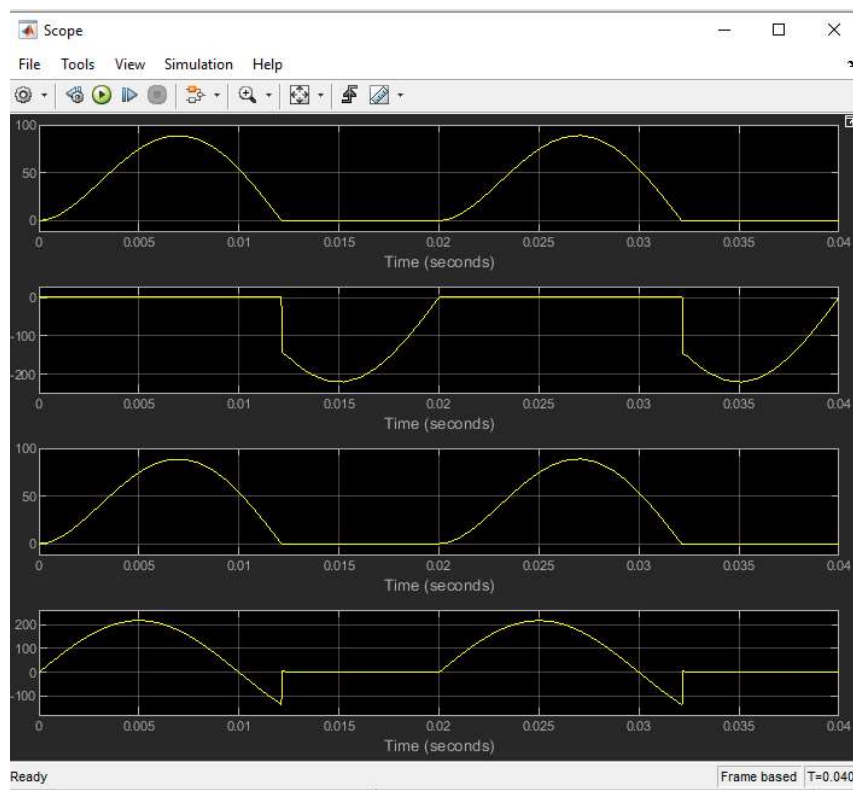


Рисунок 3.6 – Часові діаграми струму і напруги на діоді і навантаженні

ЗАВДАННЯ № 2 Комп'ютерне моделювання однофазного тиристорного випрямляча з RL – навантаженням

2 Постановка завдання

2.1 Побудувати модель однофазного тиристорного випрямляча з RL – навантаженням та провести вимірювання струму і напруги на навантаженні.

Вихідні дані для моделювання та побудови моделі наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	AC Voltage Source	напруга живлення $100 + 5 \cdot N$ В частота змінного струму $f = 50$ Гц
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/ Power Electronics	Thyristor	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	активний опір навантаження $R = 2 + N \cdot 2$ Ом; індуктивний опір навантаження $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ Гн
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Current Measurement	—
	Voltage Measurement	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Utilities	Ground	—
Simulink/Sinks	Scope	—
Simulink/Sinks	Terminator	—
Simulink/ Signal Routing	Pulse Generator	Period = 0,02; Pulse Width = 5%; Phase Delay = 0,02/4
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	—
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

3 Порядок виконання роботи

3.1 Побудувати модель однофазного тиристорного випрямляча з RL – навантаженням (рис. 3.7).

Особливістю розглянутої схеми є те, що відключення тиристора Thyristor здійснюється від генератора Pulse Generator, підключеного до порту **g**, а інформаційний порт **m** тиристора Thyristor заглушений блоком Terminator, що перебуває в розділі Sinks бібліотеки Simulink. У разі відсутності блока Terminator у командному вікні буде видано помилку.

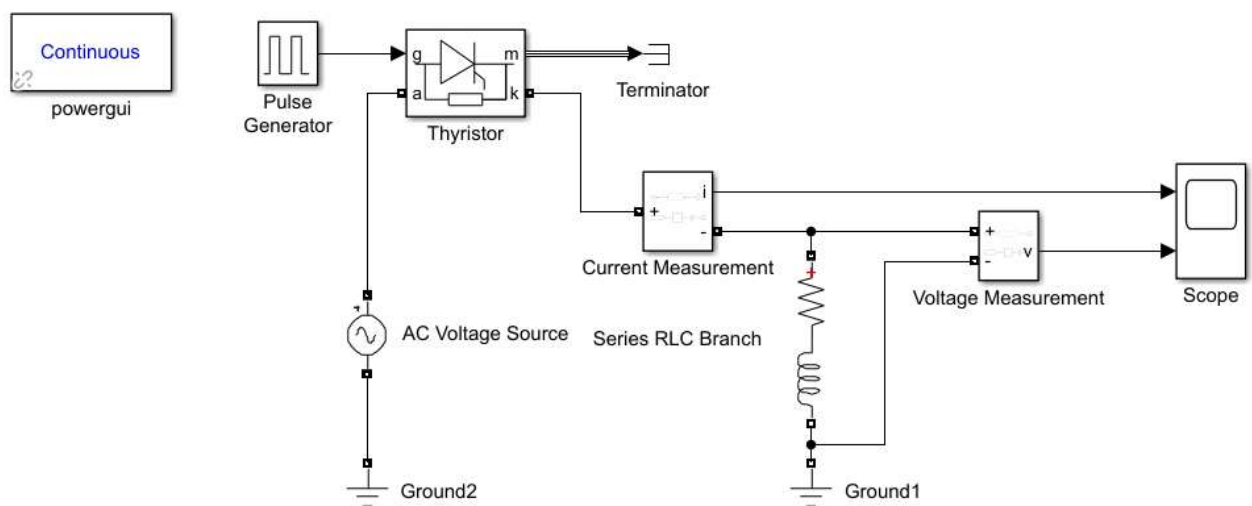


Рисунок 3.7 – Модель однофазного тиристорного випрямляча з RL – навантаженням

Параметри генератора Pulse Generator задані у вікні (рис. 3.8), з якого видно, що період (Period) становить 0,02 с, ширина імпульсу (Pulse Width) – 5% від періоду, зсув фази (Phase Delay) – чверть періоду (90°). Вікно для налаштування параметрів тиристора наведено на рис. 3.9.

Результати моделювання представлені у вигляді часових діаграм струму через навантаження та напруги на навантаженні на рис. 3.10.

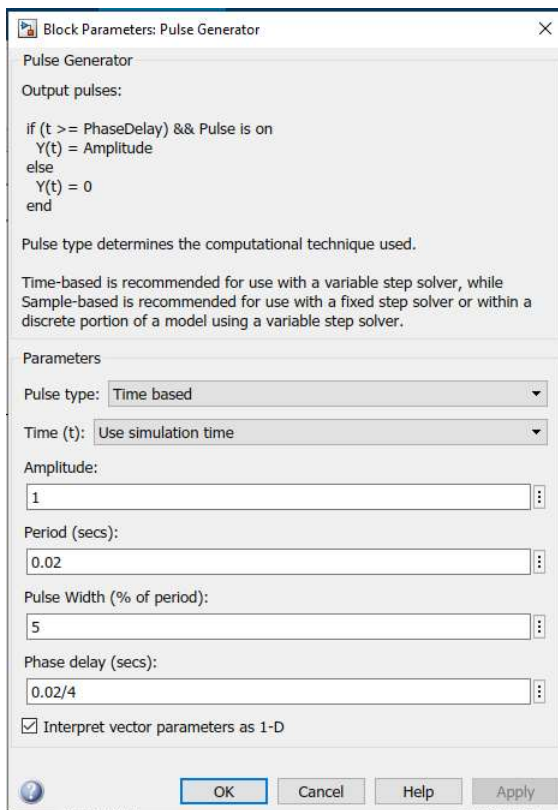


Рисунок 3.8 – Вікно параметрів
настроювання блока Pulse Generator

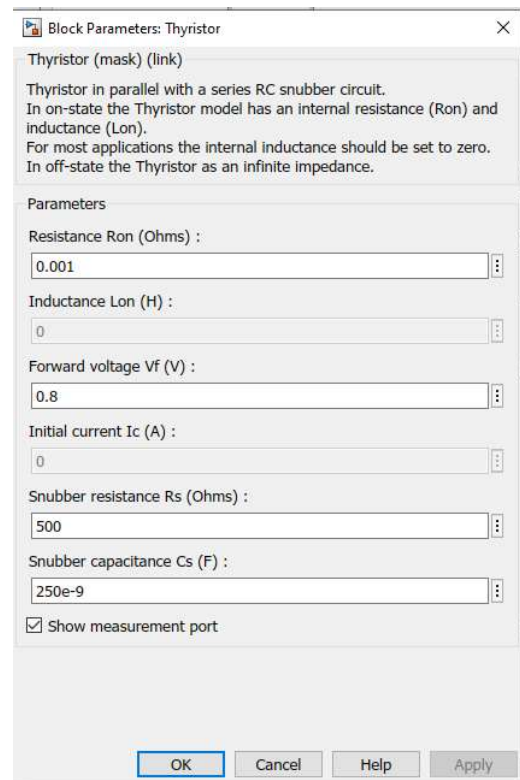


Рисунок 3.9 – Вікно параметрів
настроювання блока Thyristor

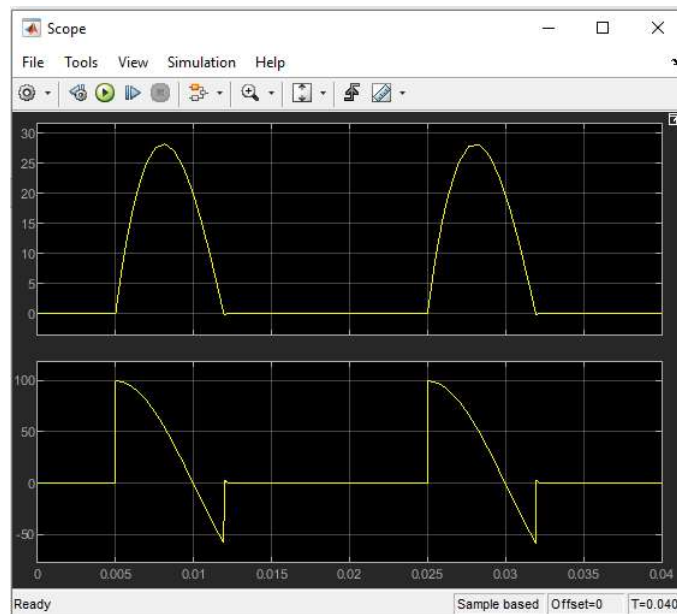


Рисунок 3.10 – Часові діаграми струму і напруги на навантаженні

ЗАВДАННЯ № 3 Комп'ютерне моделювання трифазного випрямляча з R – навантаженням

2 Постановка завдання

2.1 Побудувати модель трифазного випрямляча з R – навантаженням та провести вимірювання напруги на навантаженні.

Вихідні дані для моделювання та побудови моделі наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	Three-Phase Source	напруга живлення $380 + 5 \cdot N$ В частота змінного струму $f = 50$ Гц
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/ Power Electronics	Universal Bridge	Number of bridge arms – 3 Power electronic device – Diodes
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	активний опір навантаження $R = 500 + N \cdot 5$ Ом
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Voltage Measurement	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Utilities	Ground	–
Simulink/Sinks	Scope	–
Simulink/ Signal Routing	Pulse Generator	Period = 0,02; Pulse Width = 5%; Phase Delay = 0,02/4
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	–
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

3 Порядок виконання роботи

3.1 Побудувати модель трифазного випрямляча з R – навантаженням (рис. 3.11).

Схема випрямляча (рис. 3.11) містить трифазне джерело живлення Three-

phase Source (розділ Sources), універсальний випрямний міст Universal Bridge (розділ Power Electronics), опір навантаження Series RLC Branch (розділ Passives), вольтметр Voltage Measurement (розділ Sensors and Measurements) і осцилограф Scope (розділ Sinks).

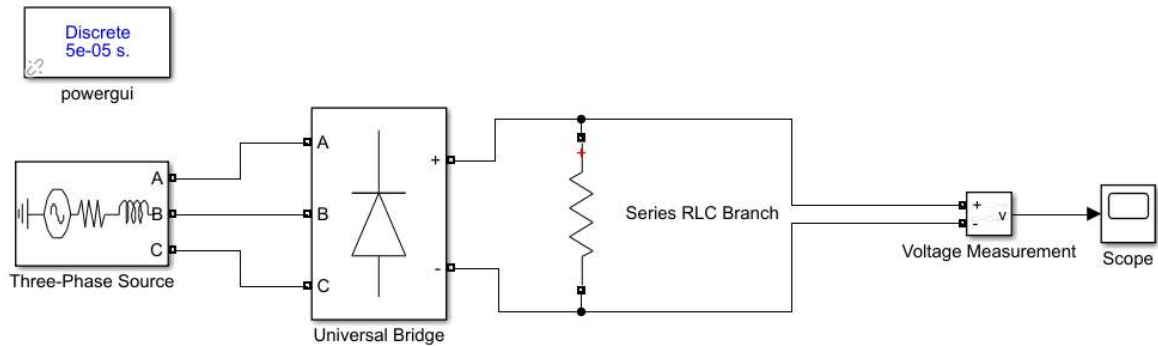


Рисунок 3.11 – Модель трифазного випрямляча з R – навантаженням

Блок Three-Phase Source реалізує збалансоване трифазне джерело напруги з внутрішнім опором RL . Блок з'єднує три джерела напруги Y з нейтральним з'єднанням, яке можна заземлити зсередини або зробити доступним. Також можна вказати внутрішній опір та індуктивність джерела або безпосередньо, ввівши значення R і L , або опосередковано, вказавши рівень індуктивного короткого замикання джерела та відношення X/R .

Налаштування блоку Three-Phase Source показано на рис. 3.12.

Обрати конфігурацію (Configuration) – з'єднання фаз джерела. Значення параметра вибирається зі списку:

Y – зірка;

Yn – зірка з нульовим проводом;

Yg – зірка зі заземленою нейтраллю.

Внутрішнє з'єднання трьох фаз джерел напруги встановити – Yg .

Вкажіть внутрішні напруги для кожної фази (Specify internal voltages for each phase) – off (галочку не ставити).

Встановити діюче значення лінійної напруги (Phase-to-phase voltage (Vrms)) – за варіантом із табл. 3.3.

Встановити початковий фазовий кут у фазі А (градуси) (Phase angle of phase A (deg)) – 90 градусів.

Фазовий кут внутрішньої напруги, що генерує фаза А, в градусах. Три напруги генеруються у позитивній послідовності. З цієї причини внутрішні напруги фази В та фази С відстають від фази А на 120 градусів та 240 градусів відповідно.

Встановити частоту змінної напруги джерела (Frequency (Hz)) – 50 Гц, власний опір джерела (Source resistance (Ohms)) – 0,001 Ом, власну індуктивність джерела (Source inductance (H)) – 0,005 Гн, діюче значення лінійної базової напруги джерела, з урахуванням якого визначена потужність короткого замикання (Base voltage (Vrms ph-ph)) – 25000 В.

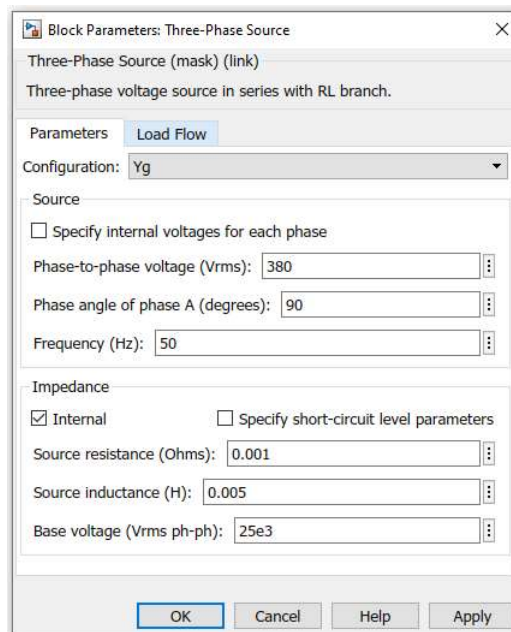


Рисунок 3.12 – Налаштування блоку Three-Phase Source

Блок Universal Bridge (рис. 3.11) реалізує міст обраних пристроїв силової електроніки. Послідовні демпферні кола RC з'єднані паралельно з кожним

комутаційним пристроєм.

Налаштування блоку Universal Bridge показано на рис. 3.13.

Блок powergui (рис. 3.11) встановлює тип моделювання, параметри моделювання та налаштування.

Налаштування блоку powergui показано на рис. 3.14. Встановити тип моделювання (Simulation type) – Discrete, час вибірки (Sample time) – 50 мкс.

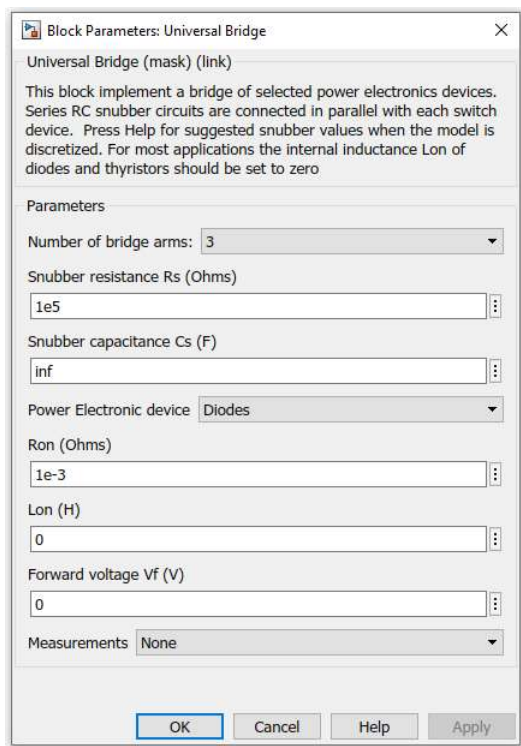


Рисунок 3.13 – Налаштування блоку Universal Bridge

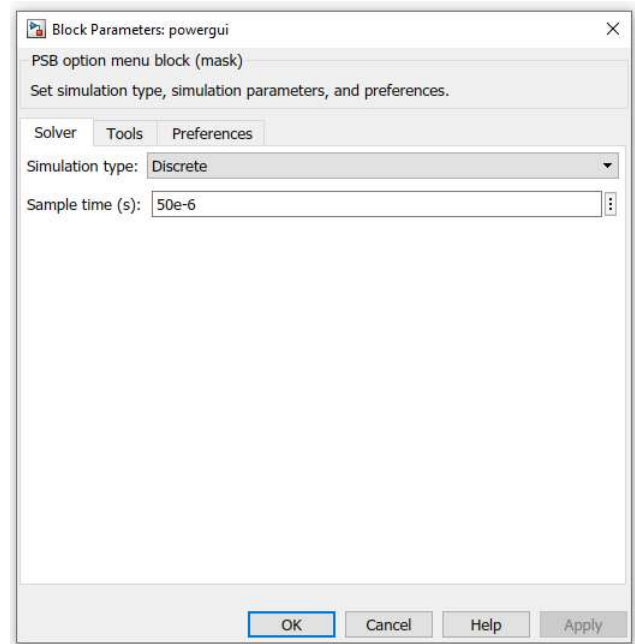


Рисунок 3.14 – Налаштування блоку powergui

Вихідна напруга моделі трифазного випрямляча з активним навантаженням наведена на рис. 3.15.

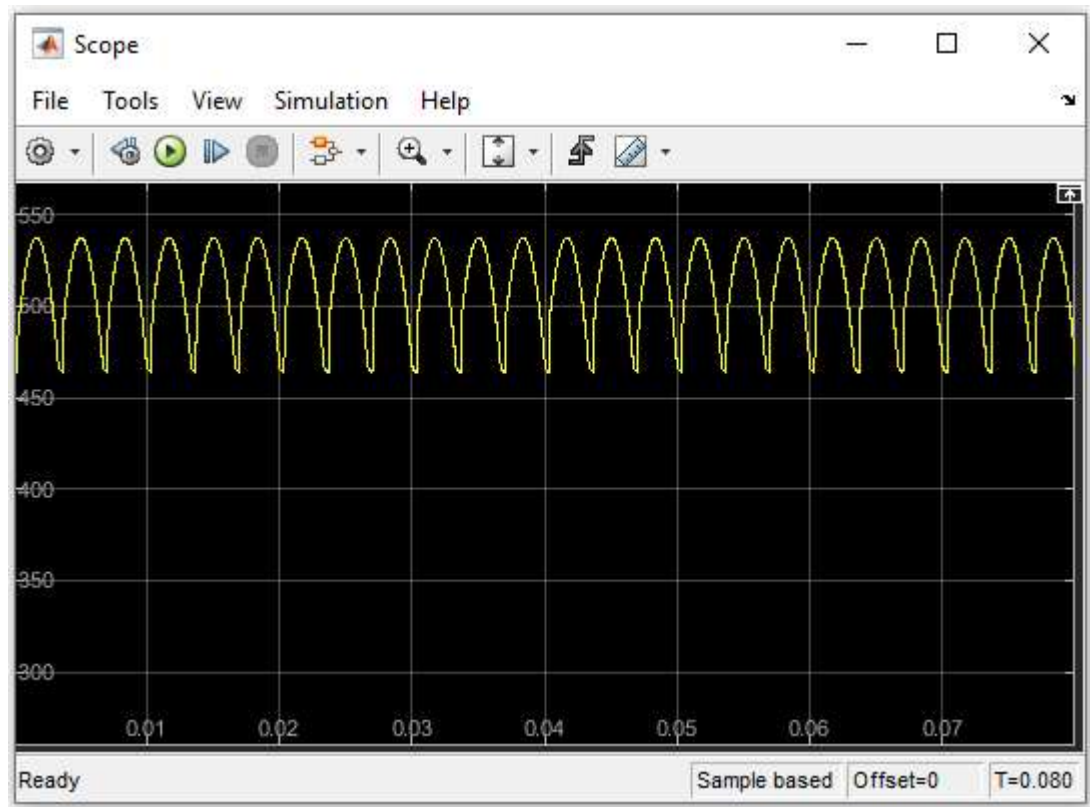


Рисунок 3.15 – Графік вихідної напруги моделі трифазного випрямляча

ЗАВДАННЯ № 4 Комп'ютерне моделювання двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром

2 Постановка завдання

2.1 Побудувати модель двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром та провести вимірювання напруги на навантаженні, струму й напруги на діоді.

Вихідні дані для моделювання та побудови моделі наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	AC Voltage Source	напруга живлення 220 В частота змінного струму $f = 50$ Гц
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/ Power Electronics	Diode	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	активний опір навантаження $R = 20 + N \cdot 5$ Ом
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	ємність $C = (1 + N) 10^{-3}$ Ф
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Voltage Measurement	—
Simulink/Sinks	Scope	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Utilities	Ground	—
Simulink/ Signal Routing	Demux	—
Simulink/Sinks	Terminator	—
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Grid Elements	Linear Transformer	
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	—
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

3 Порядок виконання роботи

3.1 Побудувати модель двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром (рис. 3.16).

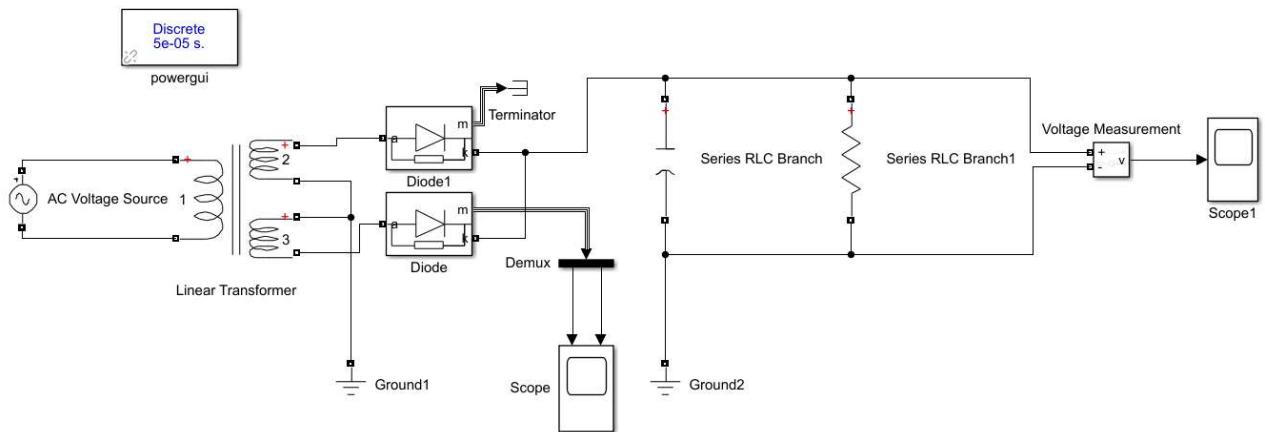


Рисунок 3.16 – Модель двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром

Модель випрямляча (рис. 3.16) містить джерело живлення AC Voltage з напругою 220 В, лінійний трансформатор Linear Transformer (вікно налаштування його параметрів наведене на рис. 3.17), два діоди Diode, C-фільтр, підключений паралельно навантаженню R . Для спостереження через порт m за струмом і напругою на діоді використовуються демультиплексор Demux і осцилограф Scope з двома входами. Інший осцилограф Scope 1 застосовується для одержання тимчасової діаграми вихідної напруги.

Блок Linear Transformer (рис. 3.16) реалізує дво- або триобмотувальний лінійний трансформатор.

Налаштування блоку Linear Transformer показано на рис. 3.17.

Для налаштування моделі у вікнах параметрів блоків слід встановити величини 220 В и частоту 50 Гц живлячої напруги джерела AC Voltage, параметри трансформатора (рис. 3.16), опір навантаження і ємність фільтра із табл. 3.4 за варіантом. Час моделювання задати 0,2 с.

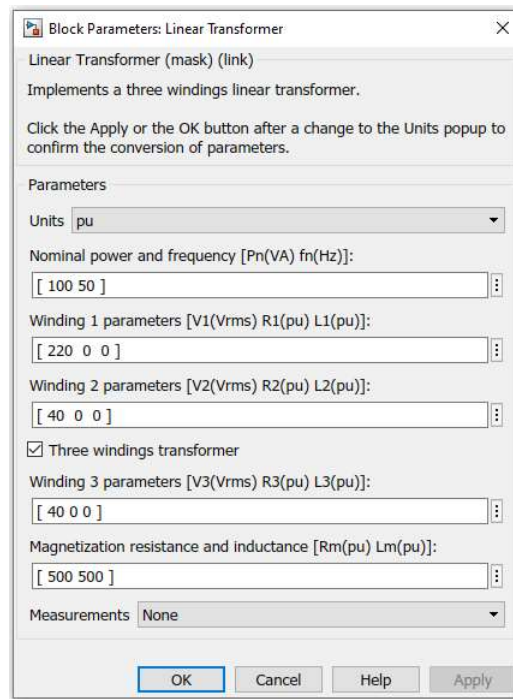


Рисунок 3.17 – Налаштування блоку Linear Transformer

Часові діаграми напруги на фільтрі, струму і напруги на діоді показано на рис. 3.18 та 3.19 відповідно.

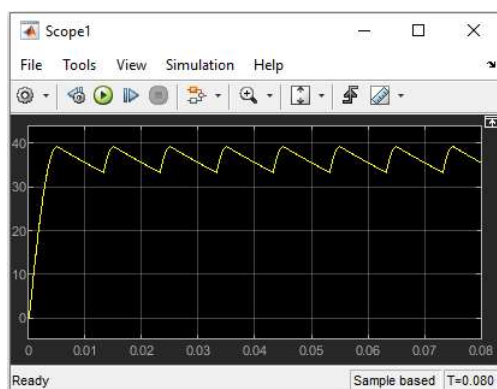


Рисунок 3.18 – Графік напруги на навантаженні

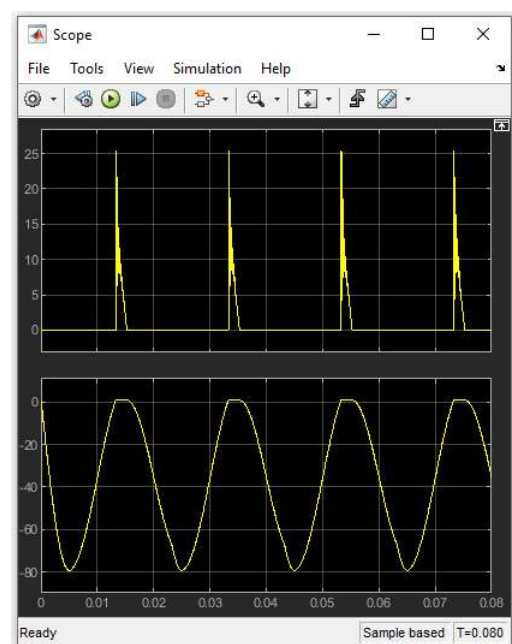


Рисунок 3.19 – Графік струму і напруги на діоді

5 Контрольні питання:

1. Навести структурну схему випрямляча.
2. Призначення кожної складової випрямляча.
3. Навести блоки, з яких складається модель двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром.
4. Класифікація випрямлячів.
5. Класифікація випрямлячів за принципом дії.
6. Навести основні електричні схеми випрямлячів.

6 Оформлення результатів практичних завдань.

Звіт повинен містити *титольний лист* (додаток А), *завдання, опис об'єкта моделювання, схему моделювання, методику, хід та результати моделювання.*

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4

**Комп'ютерне моделювання та дослідження роботи автономних інверторів
в MATLAB**

Мета роботи – ознайомитися з моделями автономних інверторів, побудувати моделі та провести моделювання заданих схем автономних інверторів. Провести гармонійний аналіз для цих схем інверторів.

1 Загальні відомості

Автономні інвертори – це пристрої, що працюють на автономне навантаження і призначені для перетворення напруги постійного струму у напругу змінного струму заданої або регульованої частоти.

Застосування автономних інверторів:

- у системах електроживлення споживачів змінного струму, коли єдиним джерелом живлення є джерело напруги постійного струму (наприклад, акумуляторна або сонячна батарея);
- у системах гарантованого електропостачання у разі зникнення напруги мережі живлення (наприклад, для особистих потреб електростанцій – для живлення пристроїв контролювання, вимірювання та захисту);
- для живлення технологічного обладнання, частота напруги якого відрізняється від промислової частоти 50 Гц;
- для частотного регулювання швидкості асинхронних двигунів;
- для живлення споживачів змінного струму від ліній електропостачання постійного струму;
- для перетворення постійної напруги одного рівня у постійну напругу іншого рівня (конвертування напруг).

Комутаційними елементами в інверторах є тиристори або силові транзистори.

За формою вихідної напруги інвертори бувають:

- з прямокутною формою;
- із ступінчастою формою;
- з синусоїдальною формою (модифікована та чиста синусоїда).

Залежно від специфіки електромагнітних процесів розрізняють інвертори струму та інвертори напруги. На рис. 4.1 зображені приклади їхніх схем.

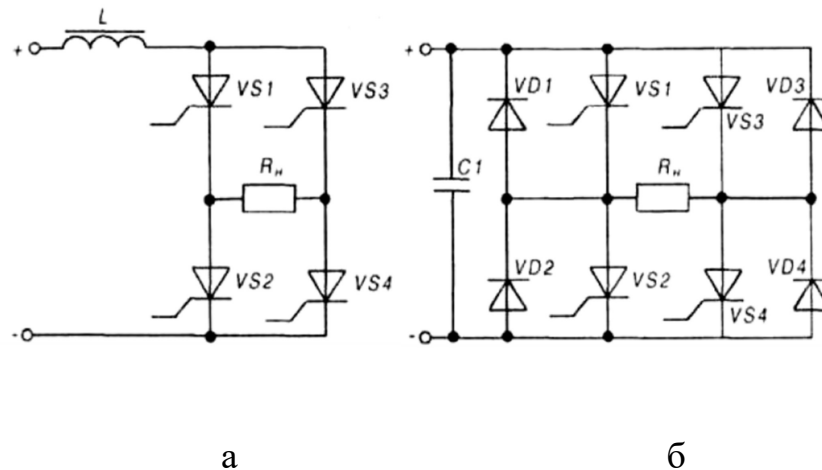


Рисунок 4.1 – Автономні інвертори струму (а) та напруги (б)

В інверторах струму (рис. 4.1) силове коло схеми підключається до джерела постійної напруги через дросель L з великим індуктивним опором, за рахунок чого утворюється джерело постійного струму з властивостями джерела струму.

В інверторах напруги (рис. 4.2) паралельно джерелу живлення вмикається конденсатор великої ємності, чим виключається вплив на роботу пристрою внутрішнього опору джерела (отримуємо джерело напруги).

Таким чином, комутація тиристорів в інверторах струму проводиться при сталому струмі, а в інверторах напруги – при сталій напрузі.

При роботі інвертора схема керування по чергово вмикає пари тиристорів $VS1, VS4$ або $VS2, VS3$, завдяки чому на навантаженні R_n виникає змінна напруга (за допомогою ключової схеми навантаження підключається таким чином, щоб в ньому протікав струм різних напрямків).

Якщо навантаження інвертора напруги має індуктивний або активно-

індуктивний характер, то паралельно тиристорам вмикають зворотні діоди ($VD1$ - $VD4$ на рис. 4.1, б). Цим забезпечується передача накопичуваної в індуктивності енергії назад у джерело живлення.

Основною проблемою при проектуванні інверторів є забезпечення надійного вимикання тиристорів, що знаходяться у провідному стані, перед вмиканням тиристорів, що не проводили струм. Це реалізується використанням схем примусової комутації, що забезпечують запирання тиристорів у колах постійного струму.

Напівмостовий інвертор з RL -навантаженням. Однофазна напівмостова інверторна схема з RL навантаженням включає два перемикачі (зазвичай транзисторів, IGBT, MOSFET, які розташовані послідовно через джерело постійної напруги), два діоди та джерело напруги (рис. 4.2).

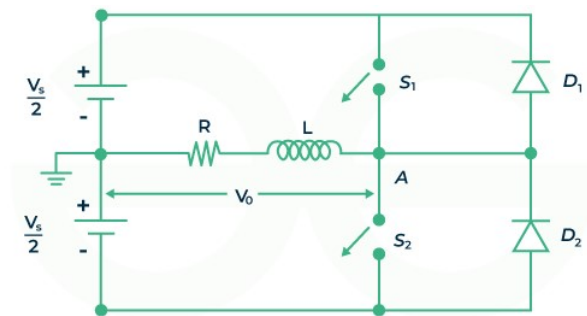


Рисунок 4.2 – Напівмостовий інвертор з RL -навантаженням

Навантаження RL розташоване між двома точками А (середня точка діодів та перемикачів) та О (середня точка джерела постійної напруги), де А позначає позитивний вивід, а О – негативний вивід. Напрямок струму визначається таким чином, що при протіканні від А до О він вважається позитивним, і навпаки, при протіканні від О до А він розглядається як негативний. Перемикачі керують потоком струму через навантаження, що дозволяє інвертору змінювати полярність виходу. Цей змінний струм полегшує перетворення постійного струму з джерела в змінний струм через навантаження, що необхідно для різних пристроїв, таких як приводи двигунів і силова електроніка. Діоди грають

вирішальну роль в забезпеченні зворотного шляху для індуктивних компонентів, забезпечуючи плавну роботу схеми.

Повний мостовий інвертор струму. Повний мостовий інвертор струму – це тип інвертора Н-міст, який використовується для перетворення постійного струму на змінний. На відміну від однофазних напівмостових інверторів, він використовує вдвічі більше компонентів. Схема повного мостового інвертору струму (рис. 4.3) складається з чотирьох діодів та чотирьох керованих ключів, тиристорів або транзисторів BJT, IGBT, MOSFET. Ці ключі відіграють вирішальну роль у процесі інвертування.

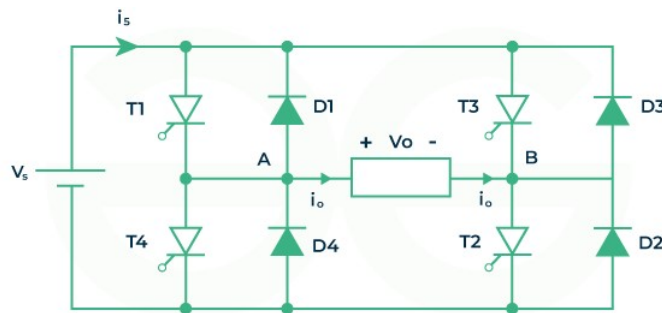


Рисунок 4.3 – Повний мостовий інвертор струму

На силовій схемі повного однофазного мостового інвертора струму (рис. 4.3) чотири тиристори позначені T1-T4, чотири діоди – D1-D4 і двопровідне джерело вхідного постійного струму – V_s . Чотири діоди, також відомі як діоди вільного ходу або діоди зворотного зв'язку, полегшують перенаправлення накопиченої енергії у навантаженні назад до джерела постійного струму, що особливо корисно для нечисто резистивних навантажень. Цей механізм зворотного зв'язку підвищує ефективність та стабільність. Конфігурація інвертора повного моста забезпечує універсальність в адаптації до різних пристроїв і типів навантаження, що робить її широко використовуваною топологією в системах перетворення постійного струму в змінний. Діоди стратегічно розміщені в антипаралельній конфігурації з тиристорами; наприклад, D1 підключений антипаралельно з T1 та аналогічно для інших.

ЗАВДАННЯ № 1 Комп'ютерне моделювання напівмостового інвертора струму з RL –навантаженням

2 Постановка завдання

2.1 Побудувати модель напівмостового інвертора струму з RL – навантаженням та провести вимірювання струму на навантаженні.

Вихідні дані для моделювання та побудови моделі наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	DC Voltage Source	напруга живлення $200 + 4 \cdot N$ В частота змінного струму $f = 50$ Гц
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Electronics	Universal Bridge	Number of bridge arms – 1 Power electronic device – IGBT / Diodes
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Electronics/Power Electronics Control	PWM Generator (2 – Level)	Generator type – Single-phase half-bridge (2 pulses) Mode of operation – Unsynchronized, Frequency carrier – 1080 Гц, Initial phase (degrees) – 90 градусів, Minimum and maximum values – [-1 1], Sampling technique – Natural, Internal generation of reference signal – включена, Modulation index – 0,8, Frequency of reference signal – 50 Гц, Phase (degrees) – 0 градусів, Sample time (s) – $5e-6$ с
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	активний опір навантаження $R = 2 + N \cdot 2$ Ом; індуктивний опір навантаження $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ Гн Measurements: Branch voltage and current
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Multimeter	Поставити галочку на опцію Plot selected measurements
Simulink/Sinks	To Workspace	Variable name: s_out Limit data points to last: inf Decimation: 1 Save format: Structure With Time
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

3 Порядок виконання роботи

3.1 Побудувати модель напівмостового інвертора струму з RL – навантаженням (рис. 4.4).

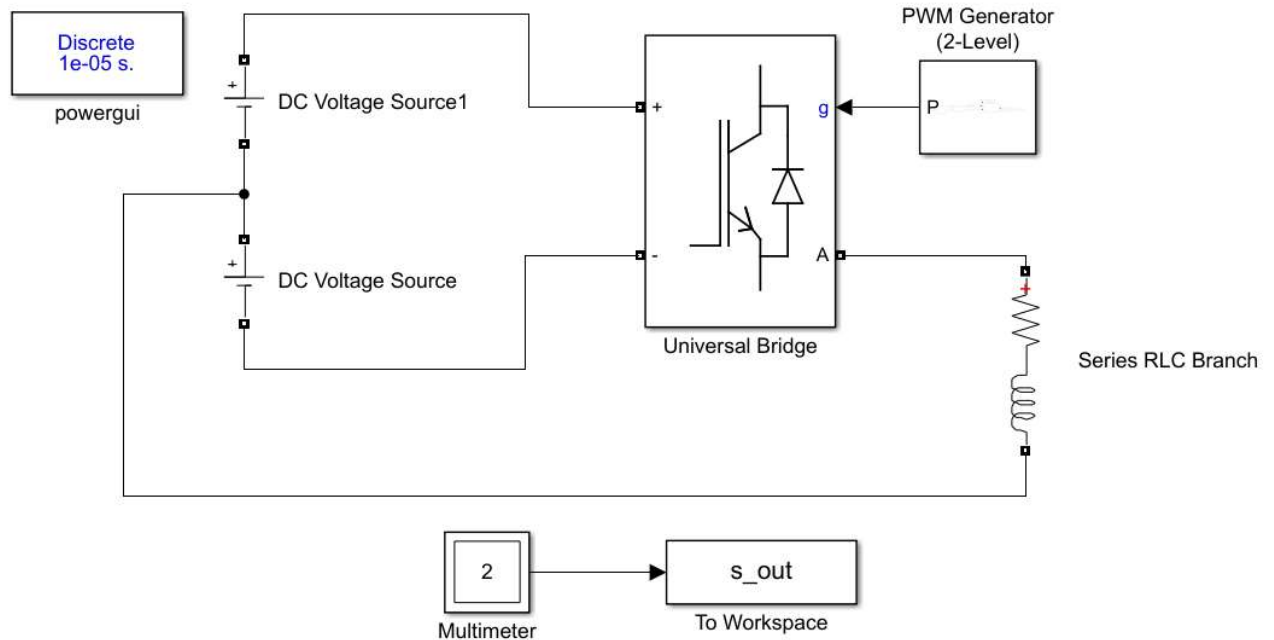


Рисунок 4.4 – Модель напівмостового інвертора струму з RL –навантаженням

Блок DC Voltage Source є ідеальним джерелом постійної напруги.

Налаштування блоку DC Voltage Source показано на рис. 4.5. Встановити значення напруги живлення за варіантом із табл. 4.1.

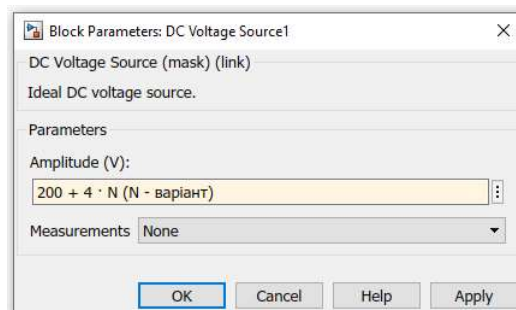


Рисунок 4.5 – Налаштування блоку DC Voltage Source

Блок Universal Bridge (рис. 4.4) реалізує міст обраних пристроїв силової електроніки. Послідовні демпферні кола RC з'єднані паралельно з кожним комутаційним пристроєм.

Налаштування блоку Universal Bridge показано на рис. 4.6.

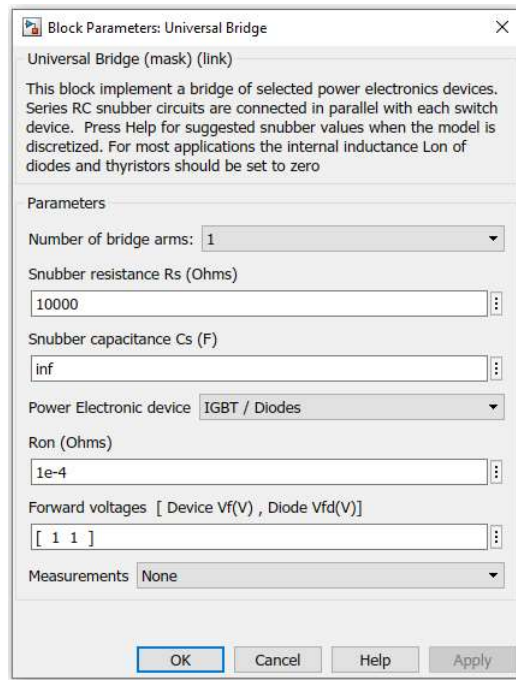


Рисунок 4.6 – Налаштування блоку Universal Bridge

Встановити кількість плечей мосту (Number of bridge arms) – 1, опір демпфера¹ (Snubber resistance) $R_s = 10000$ Ом, ємність демпфера (Snubber capacitance) $C_s = \text{inf}$, силовий електронний пристрій (Power Electronic device) – IGBT / Diodes, внутрішній опір пристроїв, що перемикаються $R_{on} = 0,0001$ Ом, прямі напруги біполярних транзисторів із ізольованим затвором та діодів (Forward voltages [Device $V_f(V)$, Diode $V_{fd}(V)$]) – [1 1], вимірювання (Measurements) – none.

Блок PWM Generator (2 – Level) (рис. 4.4) генерує імпульси для керованого широтно-імпульсної модулятора 2-рівневого перетворювача, використовуючи

¹ Демпфер – пристрій для гасіння (демпування) або запобігання коливанням, що виникають в системах під час їх роботи.

метод дворівневої широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) на основі несучої. Блок може управляти комутаційними пристроями однофазного напівмосту, однофазного повного мосту (уніполярної або біполярної модуляції) або трифазного мосту.

Налаштування блоку PWM Generator (2 – Level) показано на рис. 4.7.

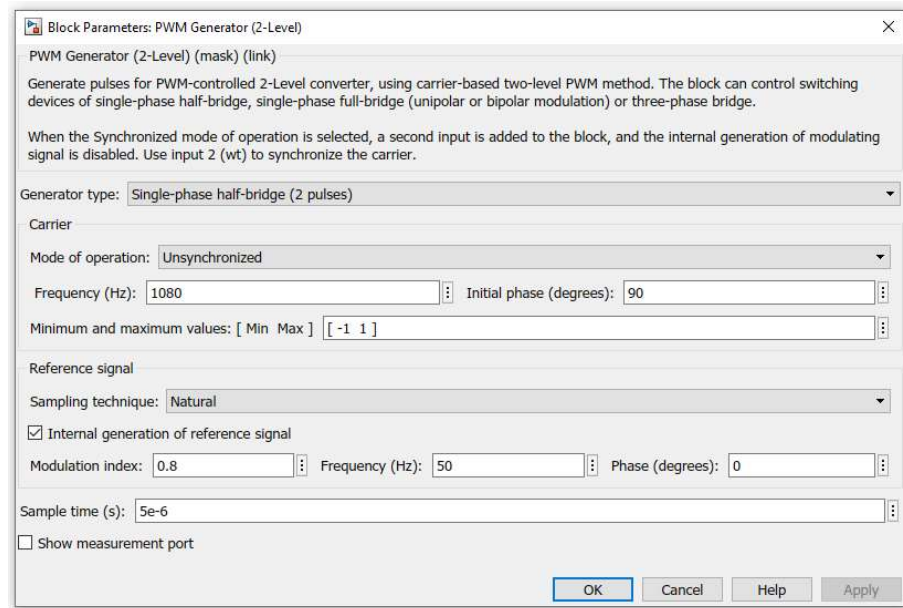


Рисунок 4.7 – Налаштування блоку PWM Generator (2 – Level)

Встановити тип генератора та кількість імпульсів для генерації (Generator type) для запуску самокомутованих пристроїв однофазного напівмостового перетворювача (імпульс 1 запускає верхній пристрій, а імпульс 2 запускає нижній пристрій) – Single-phase half-bridge (2 pulses), режим роботи несучого сигналу (Mode of operation) – Unsynchronized (несинхронізований), частота трикутного несучого сигналу (Frequency) – 1080 Гц, початкова фаза несучої в градусах (Initial phase (degrees)) – 90 (значення 90 градусів означає, що початкове положення трикутної несучої встановлено в середній точці між її мінімальним та максимальним значенням, а нахил позитивний), мінімальні та максимальні значення трикутного несучого сигналу (Minimum and maximum values: [Min Max]) – [-1 1], метод вибірки (дискретизації) опорного сигналу (Sampling technique)

– Natural, внутрішня генерація опорного сигналу (Internal generation of reference signal) – включена (стоїть галочка), тобто під час вибору опорний сигнал генерується блоком, індекс модуляції для керування амплітудою основної складової вихідної напруги перетворювача (Modulation index) – 0,8 (індекс модуляції повинен бути більшим за 0 і меншим або дорівнює 1), частота опорного сигналу використовується для керування частотою основної складової вихідної напруги перетворювача (Frequency (Hz)) – 50 Гц, фаза основної складової вихідної напруги перетворювача (Phase (degrees)) – 0 градусів, час вибірки блоку (Sample time (s)) – 5 мкс.

Блок Series RLC Branch (рис. 4.4) – це блок послідовної гілки RLC, що реалізує один резистор, котушку індуктивності або конденсатор або їхню послідовну комбінацію.

Налаштування блоку Series RLC Branch показано на рис. 4.8.

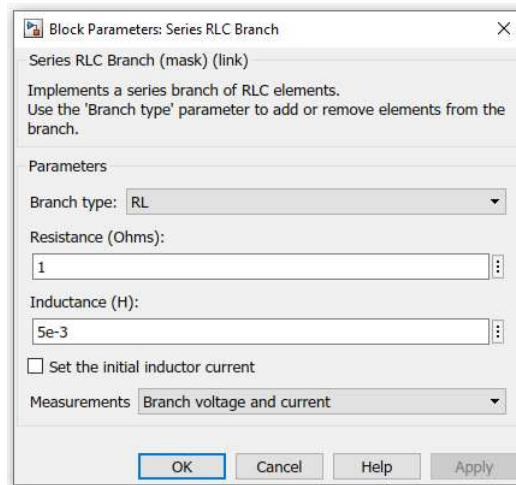


Рисунок 4.8 – Налаштування блоку Series RLC Branch

Встановити тип гілки (Branch type) – RL, опір гілки (Resistance (Ohms)) – за варіантом із табл. 4.1, індуктивність гілки (Inductance (H)) – за варіантом із табл. 4.1, вимірювання для використання під час моделювання (Measurements) – Branch voltage and current (параметр для вимірювання напруги на клеммах та струму, що протікає через блок).

Помістіть блок мультиметра Multimeter (рис. 4.4) в модель, щоб відобразити вибрані виміри в блоці Series RLC Branch під час моделювання. У списку доступних вимірювань блоку мультиметра вимірювання ідентифікується міткою, за якою слідує ім'я блоку (Наприклад, Ub: Series RLC Branch, Ib: Series RLC Branch).

Налаштування блоку Multimeter показано на рис. 4.9. Обрати з вікна Available Measurements необхідні вимірювання і перемістити до вікна Selected Measurements. Опція Plot selected measurements має бути ввімкнута.

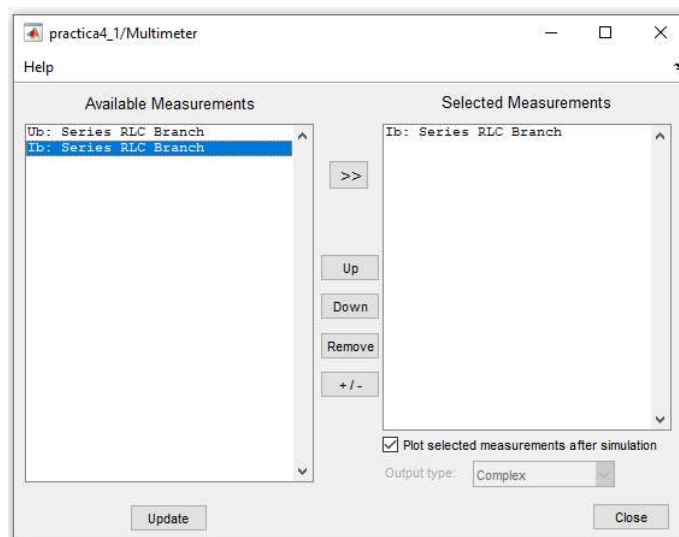


Рисунок 4.9 – Налаштування блоку Multimeter

Для проведення гармонійного аналізу для схем інверторів (рис. 4.2, рис. 4.3) модель має містити блок To Workspace (рис. 4.4) бібліотеки Simulink/Sinks.

Блок To Workspace реєструє дані, підключені до його вхідного порту, в робочій області моделі Simulink. Зазвичай дані, що реєструються, повертаються в базову робочу область. При програмному моделюванні моделі всередині функції, дані, що реєструються, повертаються в робочу область для функції. Під час моделювання дані, що реєструються, передаються в інспектор даних моделювання. Реєстровані дані записуються в робочу область, коли

моделювання припиняється або зупиняється.

Блок To Workspace використовується для реєстрації даних сигналу, шини або масиву шин. Блок To Workspace підтримує реєстрацію скалярних та багатовимірних даних, включаючи дані для сигналів змінного розміру.

Налаштування блоку To Workspace показано на рис. 4.10.

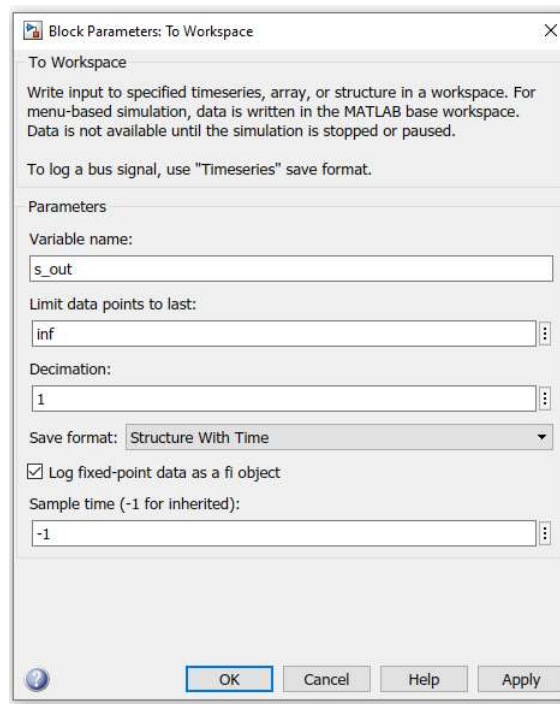


Рисунок 4.10 – Налаштування блоку To Workspace

Налаштувати ім'я змінної, яка зберігає дані, що реєструються блоком To Workspace (Variable name) – `s_out`, і вказати формат даних, що реєструються (Save format) – Structure With Time. За замовчуванням блок To Workspace реєструє дані для всього моделювання, а значення параметра Limit data points to last дорівнює `inf`. Вкажіть фактор децимації (Decimation), щоб зменшити ефективну частоту вибірки для даних, що реєструються – 1.

Блок `powergui` (рис. 4.4) встановлює тип моделювання, параметри моделювання та налаштування.

Налаштування блоку `powergui` показано на рис. 4.11. Встановити тип моделювання (Simulation type) – Discrete, час вибірки (Sample time) – 10 мкс (10^{-5} с).

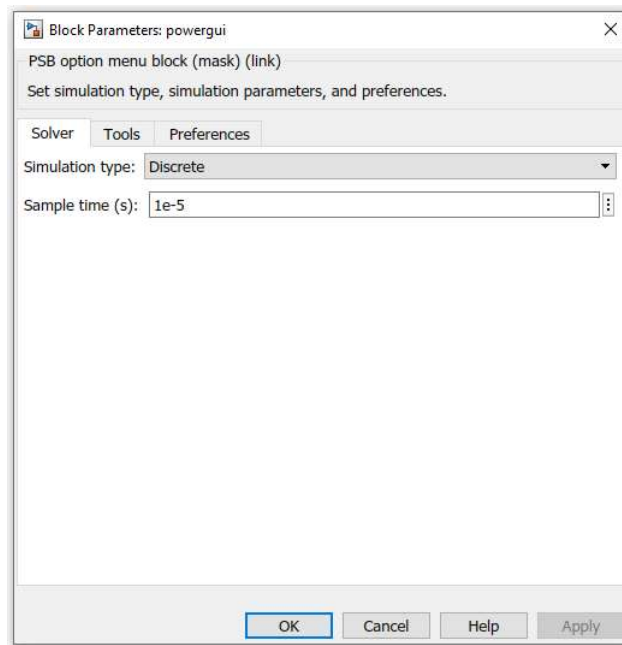


Рисунок 4.11 – Налаштування блоку powergui

Для побудови спектрального складу сигналу необхідно натиснути на кнопку FFT Analysis (рис. 4.12).

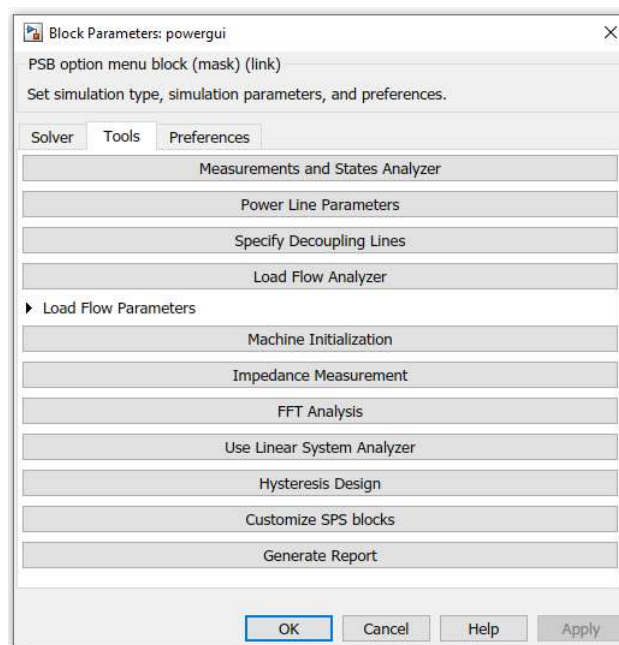


Рисунок 4.12 – Налаштування блоку powergui і побудова спектрального складу сигналу за допомогою додатку FFT Analyzer

Додаток FFT Analyzer дозволяє виконувати аналіз Фур'є даних моделювання та забезпечує доступ до всіх даних моделювання, які визначені як змінні структури з часом у вашому робочому просторі. Програма відображає спектр у вигляді стовпчастої діаграми або списку у відсотках щодо базового значення або постійної складової сигналу.

Налаштування в блоці powergui додатка FFT Analyzer та результат моделювання приведені на рис. 4.13-4.15.

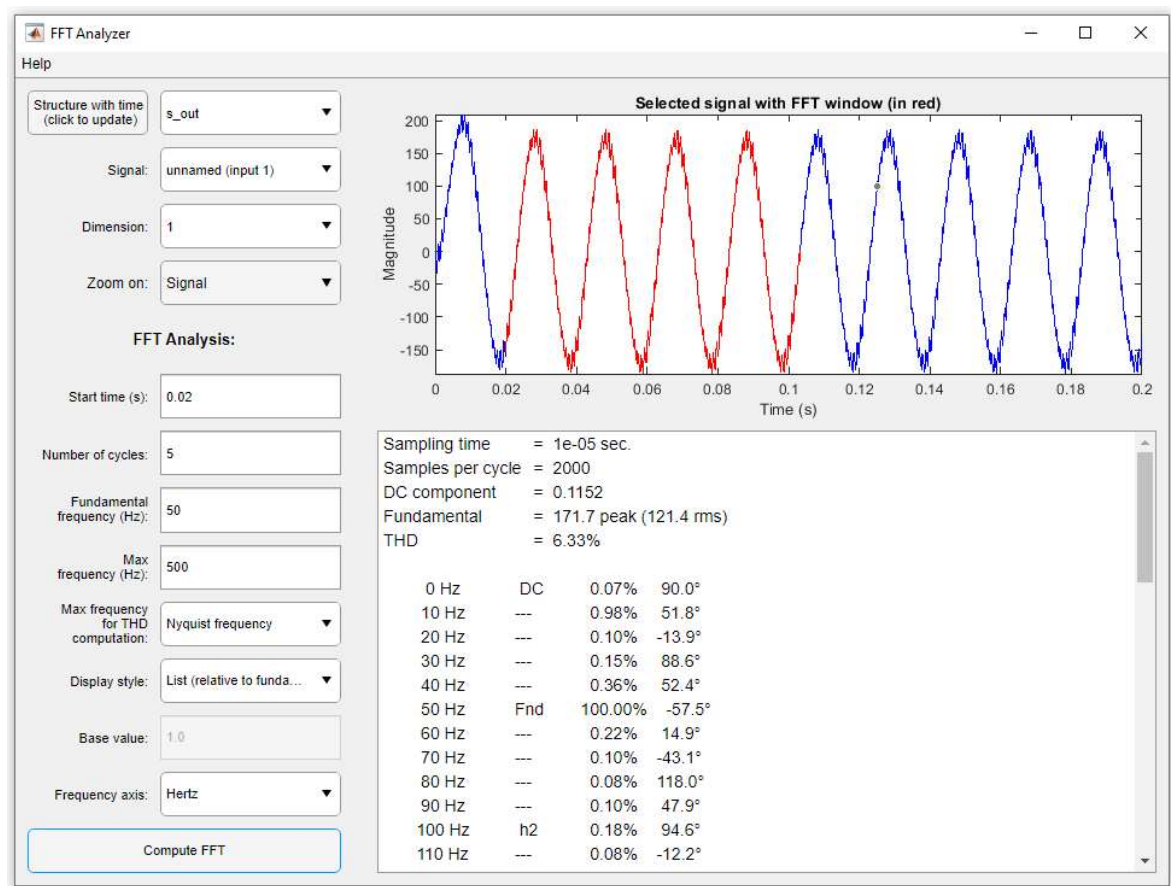


Рисунок 4.13 – Налаштування блоку powergui і побудова спектрального складу сигналу за допомогою додатку FFT Analyzer

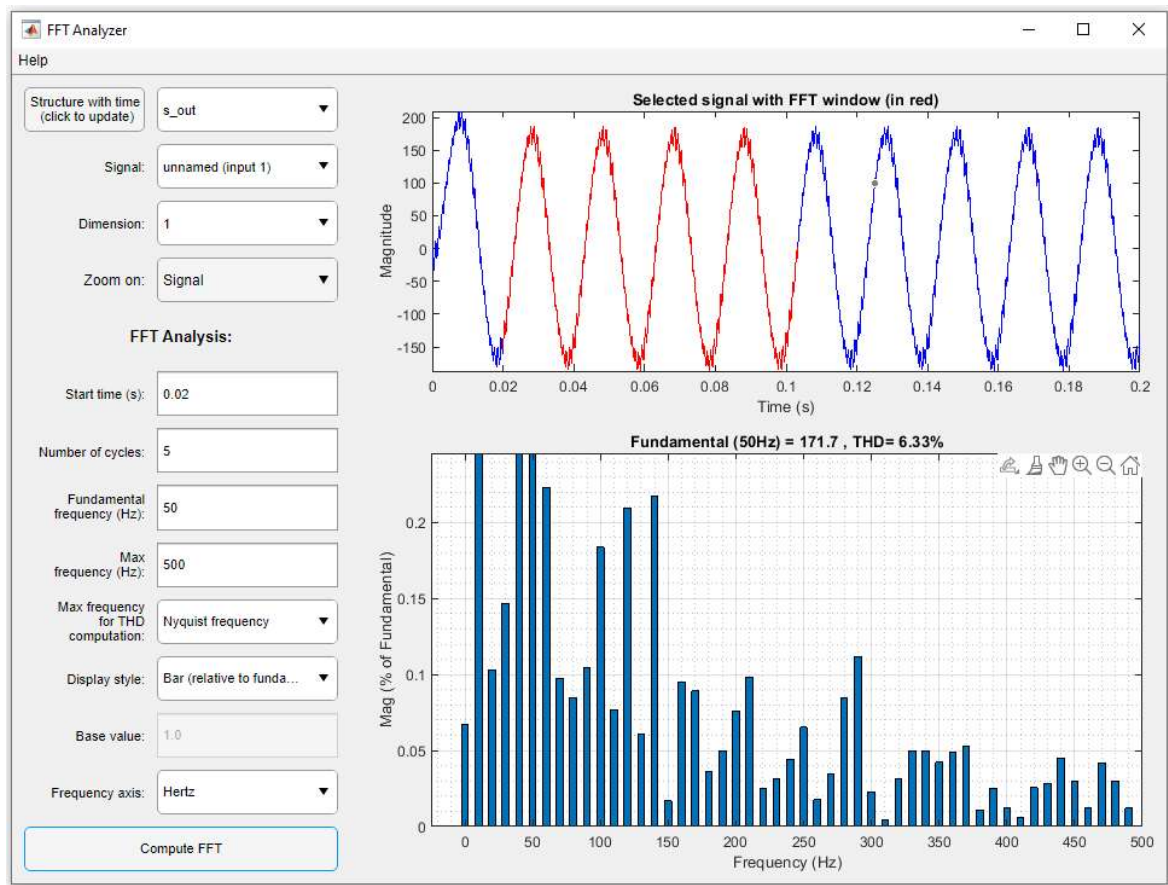


Рисунок 4.14 – Налаштування блоку powergui і побудова спектрального складу сигналу за допомогою додатку FFT Analyzer

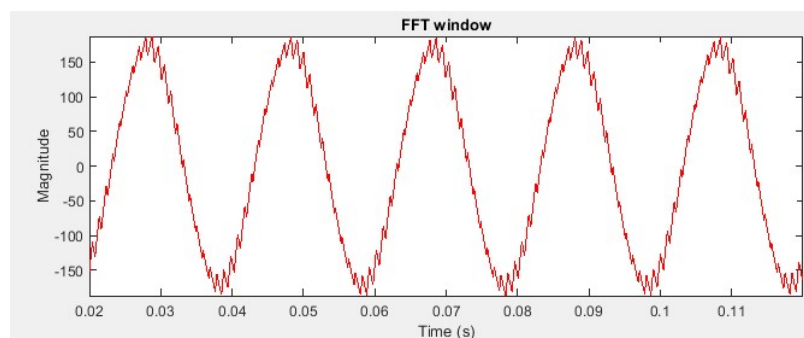


Рисунок 4.15 – Вікно додатку FFT Analyzer

ЗАВДАННЯ № 2 Комп'ютерне моделювання мостового інвертора струму з RL – навантаженням

2 Постановка завдання

2.1 Побудувати модель мостового інвертора струму з RL – навантаженням та провести вимірювання струму на навантаженні.

Вихідні дані для моделювання та побудови моделі наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	DC Voltage Source	напруга живлення $400 + 4 \cdot N$ В частота змінного струму $f = 50$ Гц
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Electronics	Universal Bridge	Number of bridge arms – 2 Power electronic device – IGBT / Diodes
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Electronics/Power Electronics Control	PWM Generator (2 – Level)	Generator type – Single-phase full-bridge (4 pulses) Mode of operation – Unsynchronized, Frequency carrier – 1080 Гц, Initial phase (degrees) – 90 градусів, Minimum and maximum values – [-1 1], Sampling technique – Natural, Internal generation of reference signal – включена, Modulation index – 0,8, Frequency of reference signal – 50 Гц, Phase (degrees) – 0 градусів, Sample time (s) – $5e-6$ с
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	активний опір навантаження $R = 2 + N \cdot 2$ Ом; індуктивний опір навантаження $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ Гн Measurements: Branch voltage and current
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Multimeter	Поставити галочку на опцію Plot selected measurements
Simulink/Sinks	To Workspace	Variable name: s_out Limit data points to last: inf Decimation: 1 Save format: Structure With Time
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

3 Порядок виконання роботи

3.1 Побудувати модель мостового інвертора струму з RL – навантаженням (рис. 4.16) в одному вікні з моделлю напівмостового інвертора струму з RL – навантаженням (рис. 4.4), як показано на рис. 4.17.

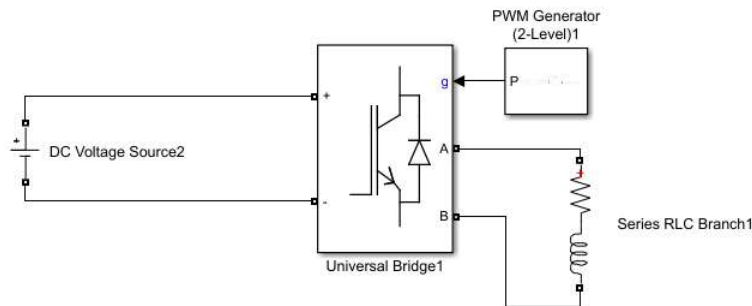


Рисунок 4.16 – Модель мостового інвертора струму з RL –навантаженням

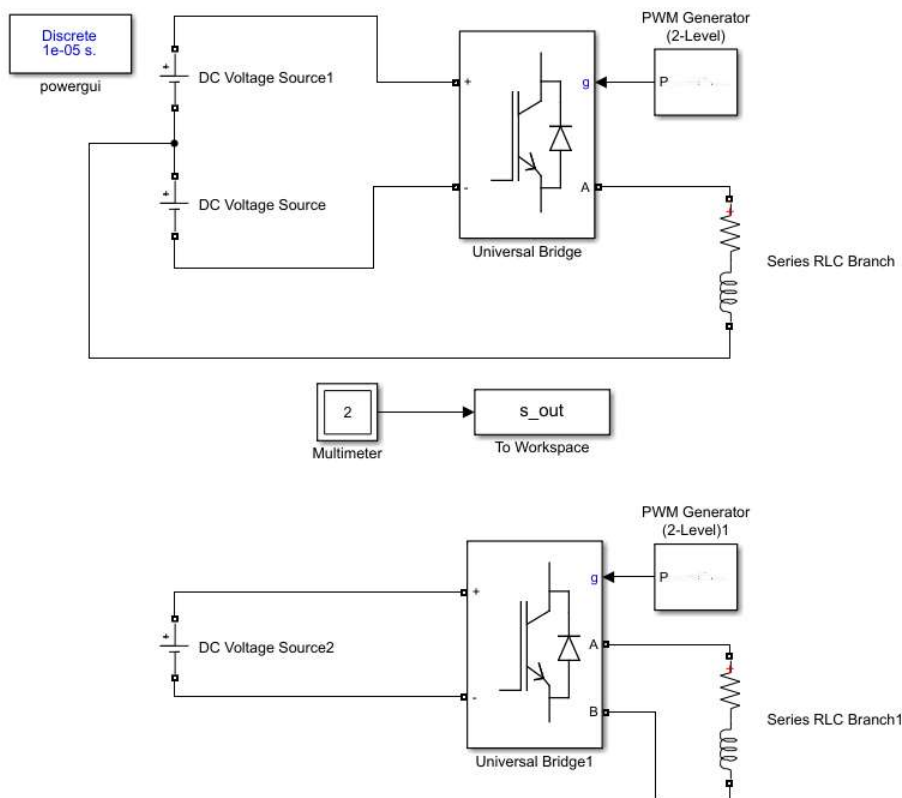


Рисунок 4.17 – Моделі напівмостового і мостового інверторів струму з RL – навантаженням

Налаштування блоку Universal Bridge 1 показано на рис. 4.18.

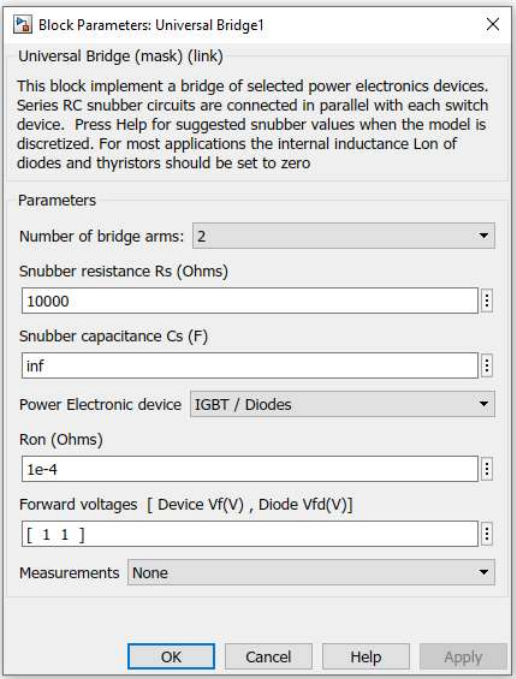


Рисунок 4.18 – Налаштування блоку Universal Bridge 1

Налаштування блоку PWM Generator (2 – Level) 1 показано на рис. 4.19.

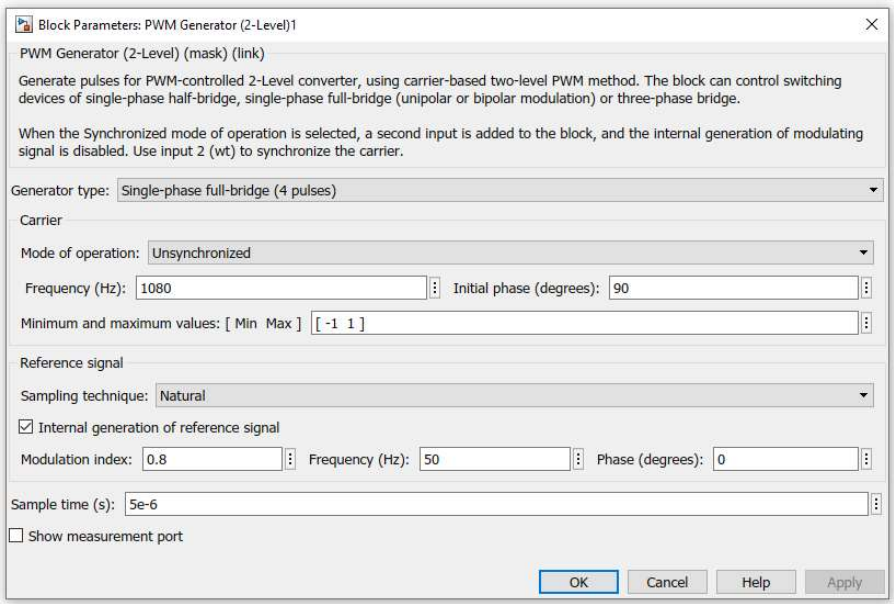


Рисунок 4.19 – Налаштування блоку PWM Generator (2 – Level) 1

Графіки струму навантаження напівмостового та мостового інверторів струму представлені на рис. 4.20.

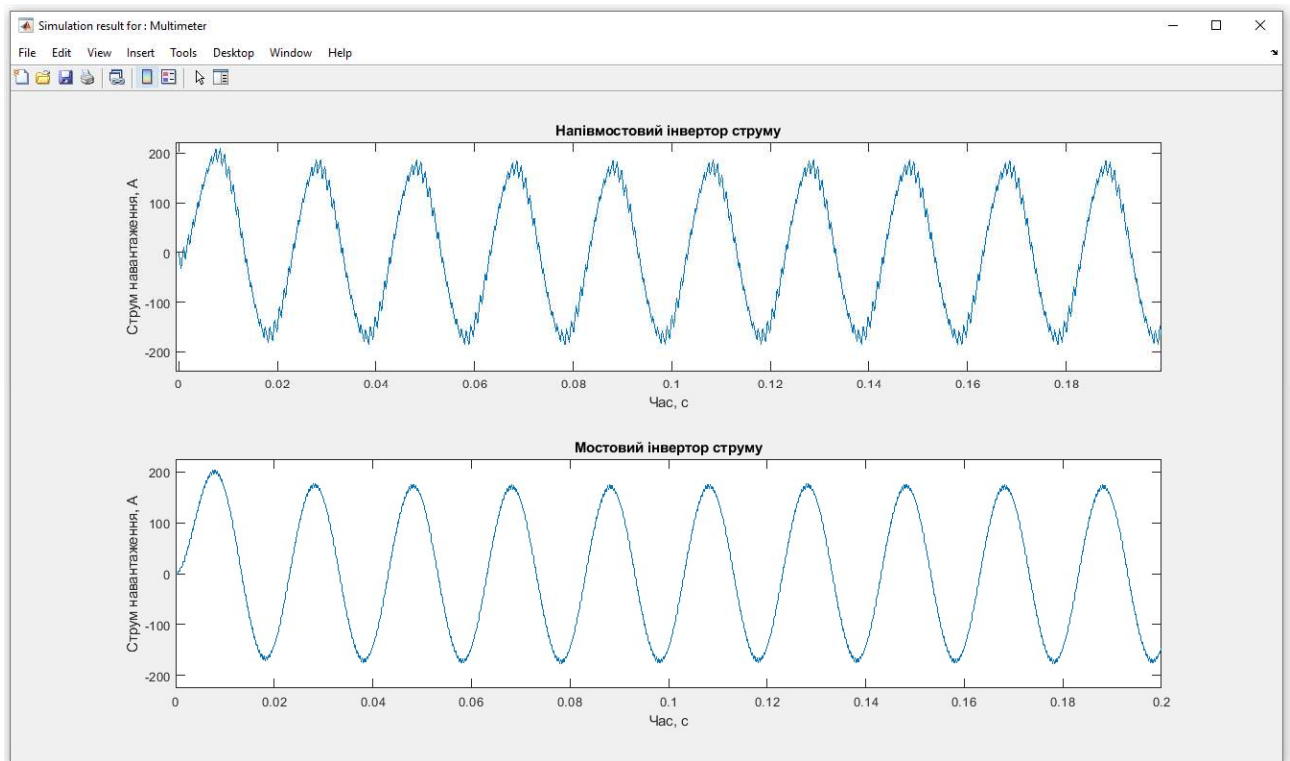


Рисунок 4.20 – Графіки струму навантаження

Гармонійний аналіз необхідно провести для обох варіантів схем інверторів. Результати проведення гармонійного аналізу представлені на рис. 4.13-4.15. Необхідно оцінити коефіцієнт THD для обох схем та зробити відповідні висновки.

5 Контрольні питання:

1. Призначення автономних інверторів.
2. Застосування автономних інверторів.
3. Розкрити суть і пояснити принцип FFT аналізу.
4. Коефіцієнт THD.
5. Назвати та пояснити налаштування основних вимірювальних блоків, які застосовувались у цій роботі.
6. Принцип роботи вимірювальної частини лабораторних схем.

6 Оформлення результатів практичних завдань.

Звіт повинен містити *титольний лист* (додаток А), *завдання, опис об'єкта моделювання, схему моделювання, методику, хід та результати моделювання.*

ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

Комп'ютерне моделювання та дослідження характеристик автономного інвертора напруги в MATLAB

Мета роботи – ознайомитися з моделями та режимами роботи автономного інвертора напруги. Дослідити і побудувати квазіусталені та статичні характеристики автономного інвертора напруги.

1 Загальні відомості

Напівпровідникові перетворювачі перетворюють електричну енергію з параметрами u_1, f_1 в електричну енергію з параметрами u_2, f_2 під впливом сигналів керування, наприклад напругу постійного струму в напругу змінного струму. Крім силових напівпровідникових елементів до складу напівпровідникового перетворювача, як правило, входять й інші елементи, до них, у першу чергу, відносять:

- **реактивні елементи** – конденсатори, котушки індуктивності, дроселі, тощо;
- **електромагнітні перетворюючі елементи** – силові та вимірювальні трансформатори;
- **система керування**, яка в загальному випадку є складним електронним пристроєм, реалізованим на елементах інтегральної мікросхемотехніки або мікроконтролері;
- **система захисту й сигналізації аварійних режимів**.

Властивості систем силової електроніки вивчаються на основі їх основних характеристик, які можна розділити на статичні, квазіусталені та динамічні.

Квазіусталені характеристики:

- миттєві електромагнітні процеси у навантаженні, джерелі живлення та силових напівпровідникових елементах в усталеному режимі роботи напівпровідникового перетворювача;

– спектральні характеристики – спектри напруги й струму в колі живлення та навантаженні перетворювача.

Статичні характеристики встановлюють зв'язок між середніми, діючими (ефективними) або амплітудними значеннями змінних стану.

Статичними характеристиками вважають:

– зовнішні (навантажувальні) характеристики, що є залежностями вихідної напруги від струму навантаження;

– електромагнітні характеристики, що представляють собою залежності амплітуди, діючих (середніх) струмів (напруг) у колі живлення й напівпровідникових елементах перетворювача від струму навантаження;

– енергетичні характеристики – залежності потужності в колі живлення перетворювача, а також потужності втрат у напівпровідникових елементах перетворювача від потужності в навантаженні.

Час є незалежною змінною у разі моделювання. Тому квазіусталені та перехідні характеристики є результатом моделювання і можуть бути легко отримані в результаті моделювання.

Незалежними змінними під час побудови статичних характеристик є діючі або середні значення змінних стану в усталеному режимі. Тому одержання статичних характеристик вимагає спеціального модельного експерименту, під час якого необхідно змінювати незалежну змінну та визначати необхідні залежності в усталеному режимі.

Розглянемо способи одержання перерахованих характеристик і залежностей на прикладі трифазного автономного інвертора напруги (АІН) з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) на несучій частоті.

На сьогодні автономні інвертори все частіше використовуються в електромеханічних системах для керування двигунами змінного струму, системах електроживлення як активні випрямлячі, активні фільтри, компенсатори реактивної потужності тощо. У всіх цих пристроях вхід інвертора під'єднується до джерела напруги постійного струму, а на виході маємо сигнал напруги змінного струму.

Коефіцієнтом модуляції в інверторі називається відношення амплітуди модулюючої напруги до амплітуди пилкоподібної напруги:

$$m = \frac{U_{m \text{ мод}}}{U_{m \text{ нес}}} \quad (5.1)$$

У діапазоні зміни коефіцієнта модуляції $0 < m < 1$ інвертор перебуває в лінійній зоні.

У трифазному АІН моделюючі напруги керування ключами кожного плеча інвертора зміщені на 120 градусів. Ці сигнали порівнюються з пилкоподібною несучою напругою та формують сигнали керування кожним плечем. Відповідно до сигналів керування транзисторами формується напруга на кожній фазі навантаження.

Найбільш поширена схема інвертора напруги (рис. 5.1) складається з чотирьох IGBT транзисторів $VT_1 \dots VT_4$, включених за схемою моста, та чотирьох зворотних діодів, позначених $VD_1 \dots VD_4$, паралельно з'єднаних з керованими напівпровідниковими ключами у зустрічному напрямку. Перетворювач живить активно-індуктивне навантаження.

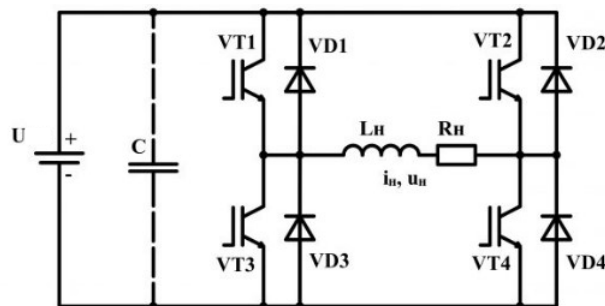


Рисунок 5.1 – Схема інвертора напруги

На схемі (рис. 5.1) зображено джерело живлення U і споживач, що має активно-індуктивний характер ($R_{\text{н}} - L_{\text{н}}$). Якщо джерелом живлення служить діодний випрямляч, вихід його обов'язково шунтується конденсатором C .

У момент часу t_1 відкриваються транзистори VT_1 та VT_4 , а транзистори VT_2 та VT_3 при цьому будуть закриті. Утворюється єдиний шлях для протікання

струму через навантаження:

«+» $U - VT_1$ – навантаження $R_H L_H - VT_4$ – «-» U .

Таким чином, на інтервалі часу $t_1 - t_2$ створюється замкнуте коло для протікання i_H у відповідному напрямку (рис. 5.2).

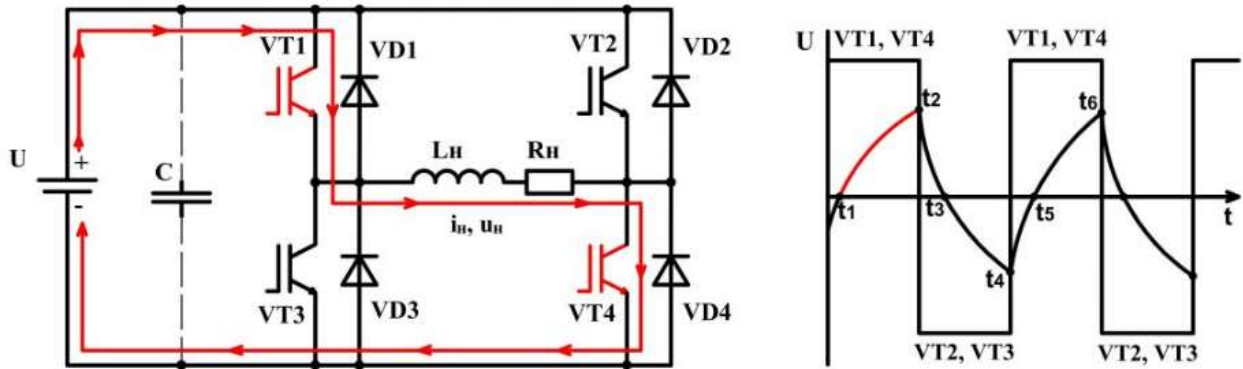


Рисунок 5.2 – Шлях для протікання струму на інтервалі часу $t_1 < t < t_2$

Режим роботи схеми. Для зміни напрямку i_H знімаються управляючі імпульси з баз транзисторів VT_1 і VT_4 і подаються сигнали на відкриття другого та третього транзисторів VT_2 , VT_3 (рис. 5.3). У точці t_2 на осі часу t , перший VT_1 і четвертий VT_4 транзистори закриті, а другий VT_2 і третій VT_3 – відкриті. Однак, оскільки навантаження активно-індуктивне, то i_H не може миттєво змінити напрямок на протилежний. Цьому перешкоджатиме енергія, запасена на індуктивності L_H . Тому він зберігатиме колишній напрям до тих пір, поки не розсіється вся енергія, запасена на індуктивності у вигляді магнітного поля, що дорівнює $W_M = (L_H \cdot i^2)/2$.

У зв'язку з цим, на відрізку часу $t_2 - t_3$ струм протікатиме через діоди VD_2 і VD_3 , зберігаючи колишній напрямок через $R_H - L_H$, але пройде у зворотному напрямку через U або конденсатор C , якщо джерелом енергії є діодний випрямляч. Тому необхідно обов'язково встановити конденсатор C , якщо перетворювач підключений до діодного випрямляча. Інакше перерветься шлях протікання i_H , внаслідок чого виникне сильна перенапруга, яка може пошкодити ізоляцію споживача та виведе з ладу напівпровідникові прилади.

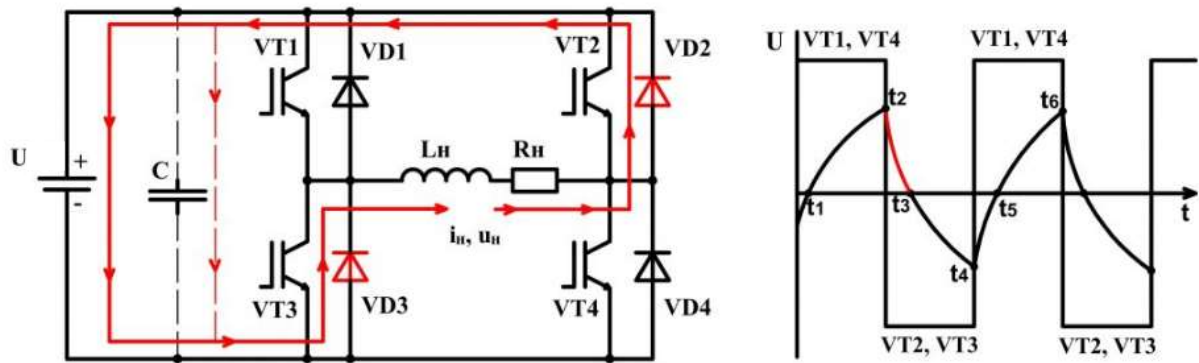


Рисунок 5.3 – Шлях для протікання струму на інтервалі часу $t_2 < t < t_3$

У момент часу t_3 вся запасена на індуктивності енергія знизиться до нуля. Починаючи з моменту t_3 до моменту t_4 під дією прикладеної напруги U через відкриті напівпровідникові ключі VT_2 і VT_3 протікатиме струм i_n через $L_n - R_n$ вже в іншу сторону (рис. 5.4).

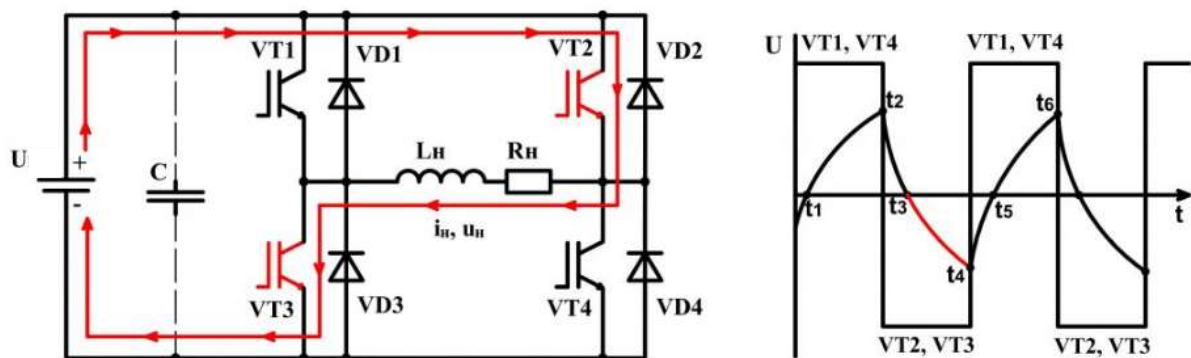


Рисунок 5.4 – Шлях для протікання струму на інтервалі часу $t_3 < t < t_4$

У точці t_4 , розташованої на осі часу t , знімається сигнал з транзисторів VT_2 , VT_3 , а VT_1 і VT_4 відкриваються. Однак i_n продовжує протікати в той же бік, доки не витрачається енергія, запасена в індуктивності. Це відбуватиметься на інтервалі часу $t_4 - t_5$ (рис. 5.5).

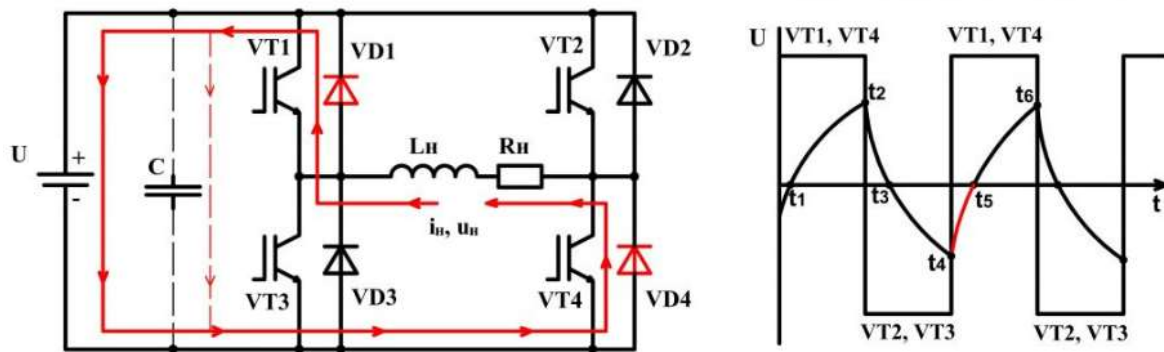


Рисунок 5.5 – Шлях для протікання струму на інтервалі часу $t_4 < t < t_5$

Починаючи з моменту t_5 струм i_n змінить напрямок і потече від U через $L_n - R_n$ шляхом через VT_1 і VT_4 . Далі всі процеси, що протікають в електричному колі, повторюватимуться. На $L_n - R_n$ форма напруги буде прямокутною, але струм на активно-індуктивному навантаженні матиме пилкоподібну форму за рахунок наявності індуктивності, яка не дозволяє йому миттєво вирости і знизитися. Якщо споживач має суто активний характер (індуктивність і ємність практично дорівнюють нулю), форми i_n і u_n буде у вигляді прямокутників.

Оскільки $VT_1 \dots VT_4$ попарно відкривалися по всій протяжності відповідних напівперіодів, то на виході перетворювача формувалося максимально можливе u_n , тому через $L_n - R_n$ протікав струм i_n максимальної величини. Однак часто потрібно забезпечити плавне наростання потужності у споживача, наприклад, для поступового збільшення яскравості освітлення або частоти обертання валу двигуна.

Сигнали, що надходять із системи керування, подаються не відразу на бази напівпровідникових ключів, а за допомогою драйвера. Так як сучасні системи керування побудовані на базі мікроконтролерів, які видають малопотужні сигнали, що не здатні відкрити IGBT, то для збільшення потужності імпульсу, що відкриває, застосовується проміжна ланка – драйвер. Крім того, драйвер часто виконує безліч додаткових функцій – захищає транзистор від короткого замикання, перегріву тощо.

Трифазні інвертори напруги. Найпростішою схемою трифазного інвертора напруги є трифазний мостовий інвертор (рис. 5.6). Навантаження такого інвертора можна з'єднати трикутником або зіркою. Найбільше розповсюдження одержали алгоритми перемикання керованих вентилів (транзисторів, тиристорів) з кутом провідності $\lambda_{VT} = 180^\circ$ і $\lambda_{VT} = 120^\circ$.

При $\lambda_{VT} = 180^\circ$ (рис. 5.7) завжди одночасно відкриті три транзистори різних фаз, що забезпечує незалежність форми кривої вихідної напруги на навантаженні при зміні її параметрів. Як видно з алгоритму перемикання транзисторів, у трифазному мостовому інверторі можливі шість незалежних сполучень відкритих станів транзисторів, кожному з яких відповідає своя еквівалентна схема (рис. 5.8, а, б). З еквівалентних схем видно, що при з'єднанні навантаження зіркою кожна фаза ввімкнена або паралельно іншій фазі та послідовно з третьою, або послідовно з двома іншими фазами, з'єднаними паралельно. Тому до кожної фази прикладається напруга, яка дорівнює $U_d/3$ або $2U_d/3$ (при рівних опорах фаз), і фазна напруга на навантаженні має двоступеневу форму (рис. 5.9).

При навантаженні, з'єднаному трикутником, до кожної фази навантаження прикладається або напруга джерела живлення, або на протязі $1/6$ частини періоду фаза замкнена сама на себе (закорочена), тобто фазна напруга має прямокутну форму з нульовою паузою (рис. 5.10).

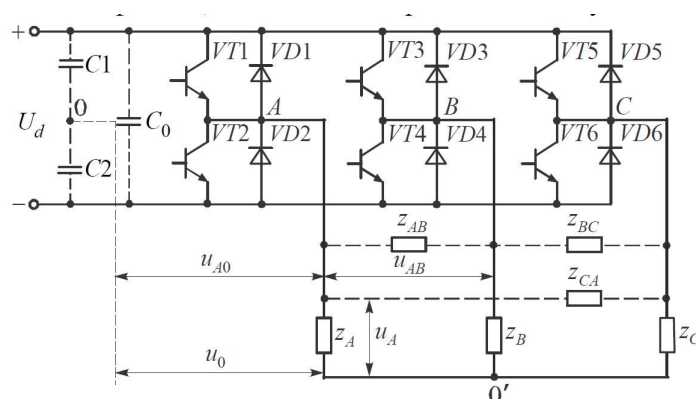
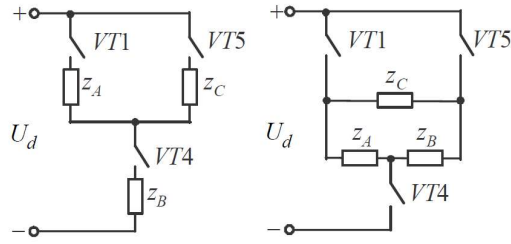
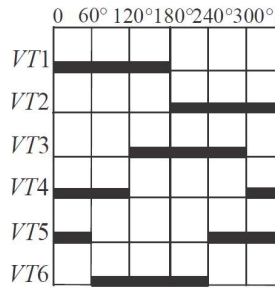


Рисунок 5.6 – Найпростіша схема трифазного інвертора напруги

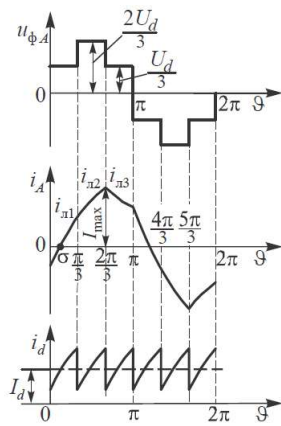


а

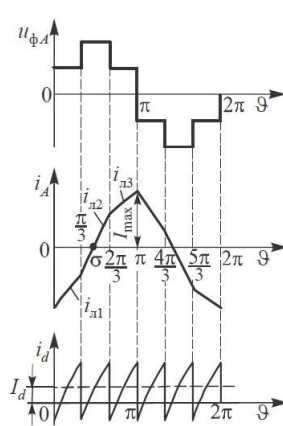
б

Рисунок 5.7 –
Алгоритм
перемикання
транзисторів

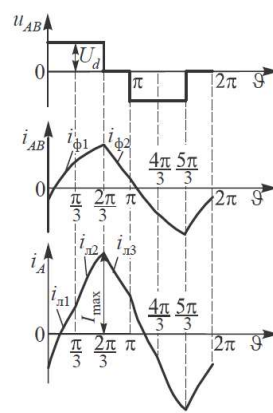
Рисунок 5.8 – Еквівалентні схеми незалежних сполучень
відкритих станів транзисторів



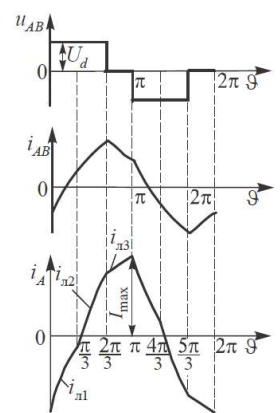
а



б



в



г

Рисунок 5.9 – Часові діаграми струмів і напруг для коефіцієнтів потужності
 $\lambda > 0,528$ (а, в) і для $\lambda < 0,528$ (б, г)
при з'єднанні навантаження зіркою (а, б) та трикутником (в, г)

ЗАВДАННЯ

Комп'ютерне моделювання автономного інвертора напруги і дослідження його квазіусталених характеристик

Квазіусталені процеси є основою для вивчення фізичних явищ в інверторі для реалізації спектрального аналізу й, зрештою, одержання основних аналітичних співвідношень для розрахунків перерахованих вище статичних характеристик.

Для одержання основних характеристик інвертора використовуються різні моделі, що відрізняються в основному блоками вимірювання та запису результатів вимірювання в робочий простір MATLAB. Під час цього, сам інвертор, його блок живлення, керування й навантаження залишаються без змін, вони представлені на рис. 5.10. Параметри моделі наведено у табл. 5.1.

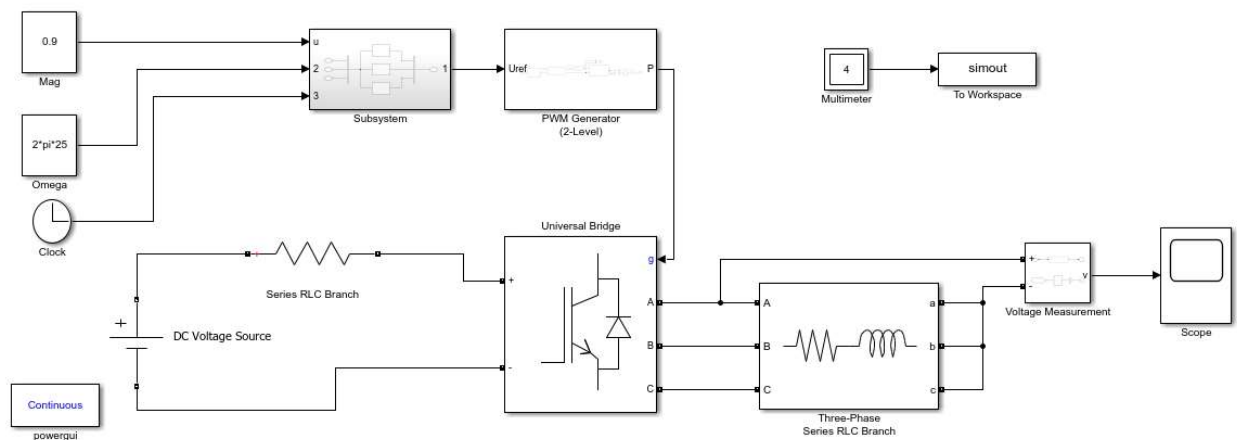


Рисунок 5.10 – Модель інвертора для отримання характеристик електромагнітних квазіусталених процесів

2 Постановка завдання

2.1 Побудувати модель автономного інвертора напругу (рис. 5.10).

Вихідні дані для моделювання та побудови моделі наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink

Бібліотека	Блок	Параметри
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems	powergui	–
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources	DC Voltage Source	напруга живлення $500 + 4 \cdot N \text{ В}$
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Electronics	Universal Bridge	Number of bridge arms – 3 Power electronic device – IGBT / Diodes
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Electronics/Power Electronics Control	PWM Generator (2 – Level)	Generator type – Three-phase bridge (6 pulses) Mode of operation – Unsynchronized, Frequency carrier – 500 Гц, Initial phase (degrees) – 90 градусів, Minimum and maximum values – [-1 1], Sampling technique – Natural
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Three-Phase Series RLC Branch	Branch type: RL $R = 2+2 \cdot N \text{ Ом}$, $L = (5+N) \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ Measurements: Branch voltage and current
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Passives	Series RLC Branch	Branch type: R активний опір навантаження $R = 0,1 \text{ Ом}$; Measurements: Branch current
Simulink/Sources	Clock	–
Simulink/Sources	Constant (Mag)	Constant value: 0.9
Simulink/Sources	Constant (Omega)	Constant value: $2 \cdot \pi \cdot 25$
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Multimeter	Поставити галочку на опцію Plot selected measurements
Simulink/Sinks	To Workspace	Variable name: out Limit data points to last: 400 Decimation: 1 Sample time: $1e-4$ Save format: Array
Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sensors and Measurements	Voltage Measurement	–
Simulink/Sinks	Scope	–
Simulink/Signal routing	Mux	Number of inputs: 3
Simulink/User-Defined Functions	MATLAB function	Відповідно до виразів (5.2)...(5.4) та рис. 5.16
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

3 Порядок виконання роботи

3.1 Побудувати модель автономного інвертора напругу (рис. 5.10).

Налаштування блоків DC Voltage Source, Series RLC Branch, Universal Bridge, Three-Phase Series RLC Branch, PWM Generator (2 – Level) показано на рис. 5.11 – рис. 5.11.

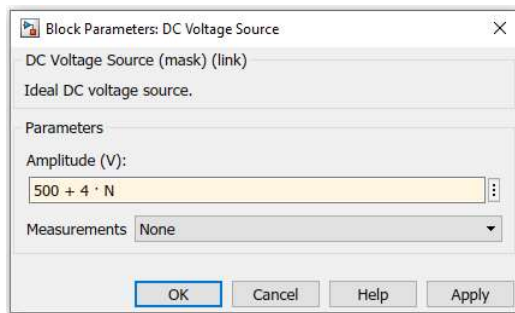


Рисунок 5.11 – Налаштування блоку DC Voltage Source

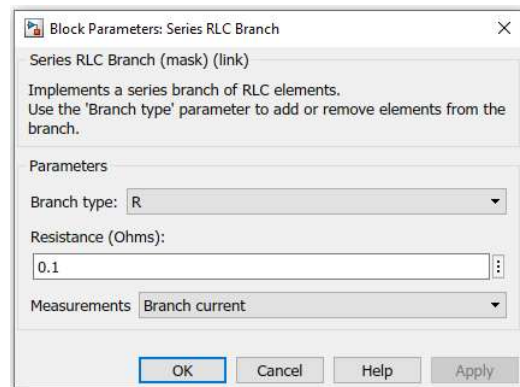


Рисунок 5.12 – Налаштування блоку Series RLC Branch

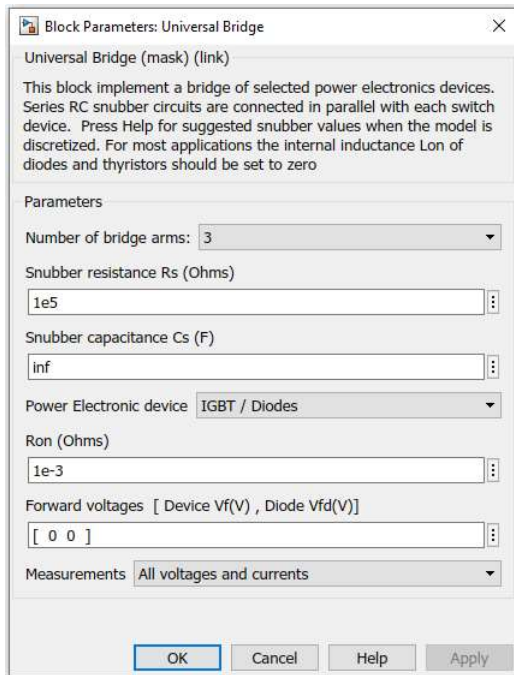


Рисунок 5.13 – Налаштування блоку Universal Bridge

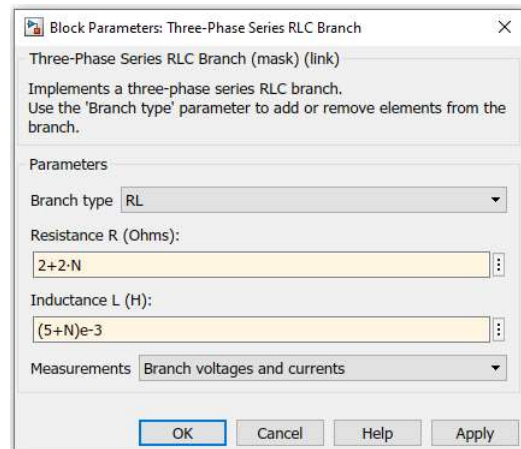


Рисунок 5.14 – Налаштування блоку Three-Phase Series RLC Branch

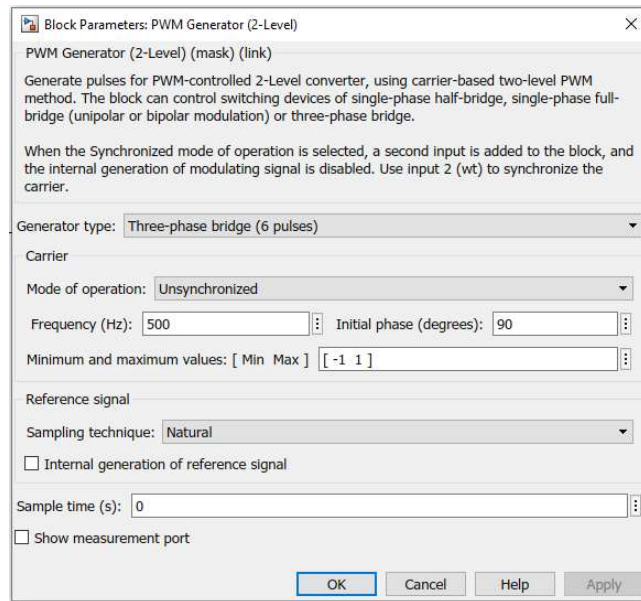


Рисунок 5.15 – Налаштування блоку PWM Generator (2 – Level)

Блок підсистеми Subsystem утворюється шляхом збирання у модельному вікні схеми представленої на рис. 5.16.

Підсистема – це фрагмент Simulink-моделі, оформлений у вигляді окремого блоку. Використання підсистем при складанні моделі має такі позитивні сторони:

1. Зменшує кількість блоків, що одночасно відображаються на екрані, що полегшує сприйняття моделі (в ідеалі модель повністю повинна відображатися на екрані монітора).
2. Дозволяє створювати та налагоджувати фрагменти моделі окремо, що підвищує технологічність створення моделі.
3. Дозволяє створювати власні бібліотеки.
4. Дає можливість синхронізації паралельно працюючих підсистем.
5. Дозволяє включати до моделі власні довідкові засоби.
6. Дає можливість пов'язувати підсистему з будь-яким m-файлом, забезпечуючи запуск цього файлу під час відкриття підсистеми (нестандартне відкриття підсистеми).

Використання підсистем та механізму їх блоків дозволяє створювати

блоки, які не поступаються стандартним за своїм оформленням (власне вікно параметрів блоку, піктограма, довідка тощо).

Кількість підсистем у моделі не обмежена, крім того підсистеми можуть включати інші підсистеми. Рівень вкладеності підсистем одна в одну також необмежений.

Зв'язок підсистеми з моделлю (або підсистемою верхнього рівня ієрархії) виконується за допомогою вхідних (блок Inport бібліотеки Sources) та вихідних (блок Outport бібліотеки Sinks) портів. Додавання до підсистеми вхідного або вихідного порту призводить до появи на зображенні підсистеми мітки порту, за допомогою якої зовнішні сигнали передаються всередину підсистеми або виводяться в основну модель. Перейменування блоків Inport або Outport дозволяє змінити мітки портів, які відображаються на піктограмі підсистеми зі стандартних (In та Out) на ті, які потрібні користувачеві.

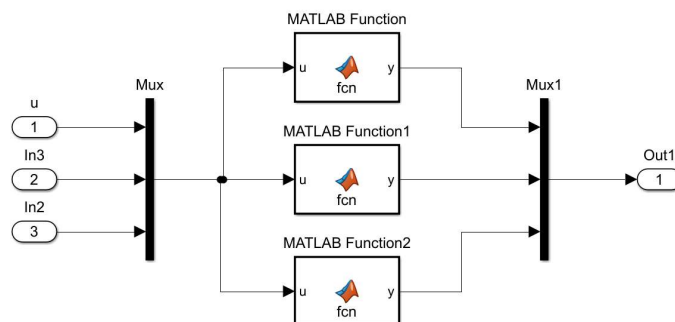


Рисунок 5.16 – Модель блоку Subsystem з блоками функцій MATLAB Function модулюючого сигналу керування транзисторами у плечах А, В, С інвертора відповідно

Блоки MATLAB Function в блоці Subsystem (рис. 5.16) інтегрують MATLAB функції у моделі Simulink.

Блоки функцій MATLAB Function обчислюють модулюючі сигнали керування транзисторами у плечах A (5.2), B (5.3), C (5.4) інвертора відповідно за виразами

$$u(1) \cdot \sin(u(2) \cdot u(3)) \quad (5.2)$$

$$u(1) \cdot \sin\left(u(2) \cdot u(3) - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (5.3)$$

$$u(1) \cdot \sin\left(u(2) \cdot u(3) + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (5.4)$$

Пилкоподібна напруга несучої частоти має амплітуду 1 В. Тому величина сигналу блока Meg дорівнює коефіцієнту модуляції інвертора. На вхід блока Subsystem (рис. 5.12) подано три сигнали:

- $u(1)$ – амплітуда модулюючої напруги (блок Mag);
- $u(2)$ – кутова частота модулюючої напруги $\omega = 2\pi f$, де $f = 25$ Гц (блок Omega);
- $u(3)$ – поточний час (блок Clock).

У всіх моделях крок дискретизації (Max Step Size = 1e-4).

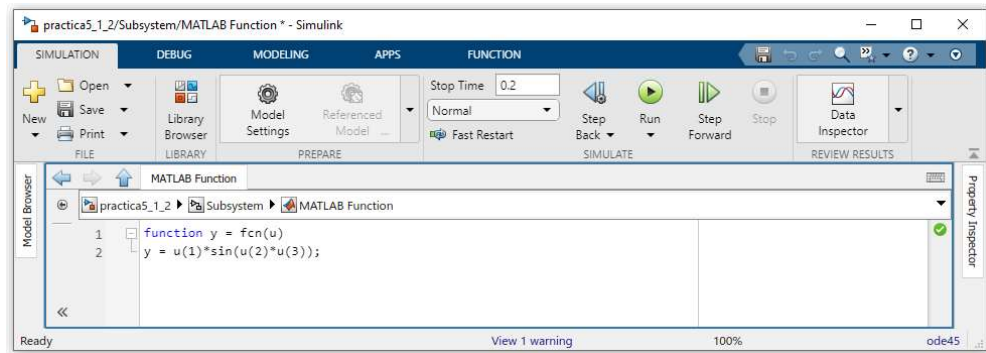
Налаштування блоків функцій MATLAB Function показано на рис. 5.17.

Із бібліотеки Simulink/Sources вставити блок Constant та перейменувати його у Mag. Так само зробити і для блоку Omega.

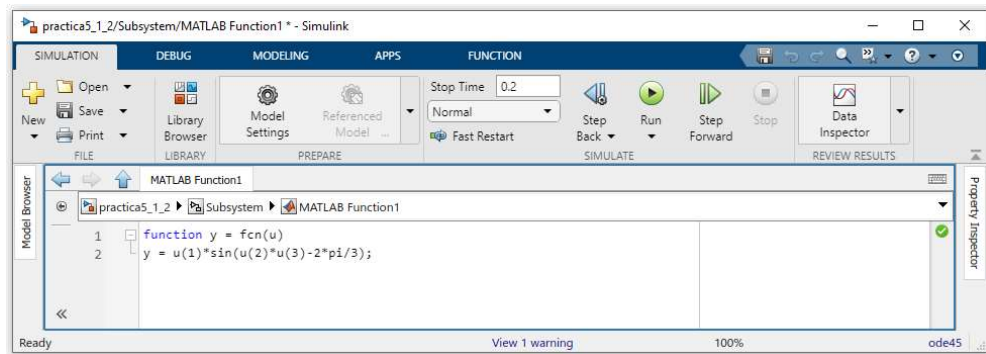
Налаштування блоків Mag, Omega, Clock, Mux показано на рис. 5.18, а блоків Scope та To Workspace – рис. 5.19, рис. 5.20.

Ширина імпульсу змінюється за синусоїдальним законом з частотою 25 Гц, коефіцієнт модуляції $m = 0,9$. Опір ($r = 0,1$ Ом), включений в коло джерела живлення, моделює внутрішній опір джерела та дає змогу виміряти струм джерела блоком Multimeter. Цей блок послідовно вимірює струм навантаження, струм у напівпровідникових ключах $SW1$, $SW2$ плеча A інвертора та струм у колі живлення.

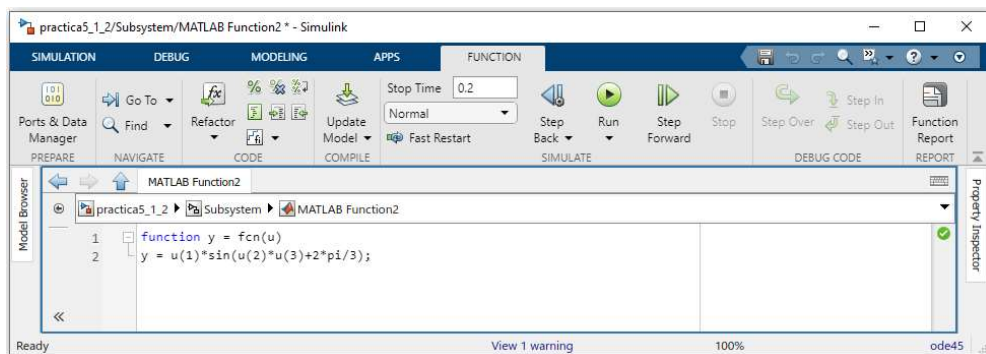
Налаштування блоку Multimeter показано на рис. 5.21.



а

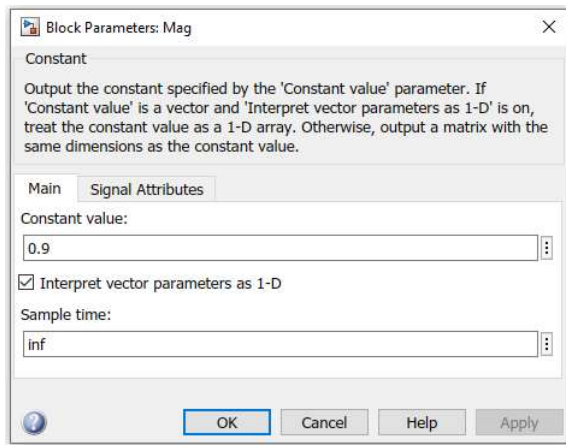


б

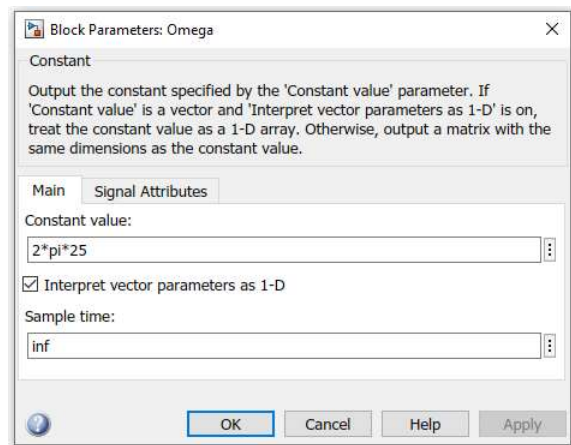


в

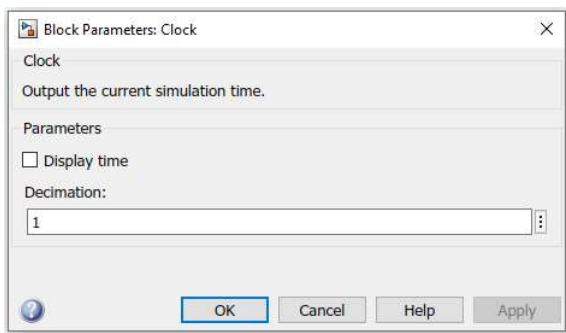
Рисунок 5.17 – Налаштування блоків функцій MATLAB function для обчислення модулюючих сигналів керування транзисторами у плечах:
а – A за виразом (5.2), б – B за виразом (5.3), в – C за виразом (5.4)



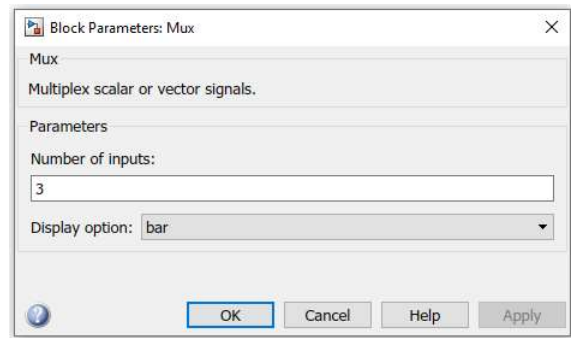
а



б



в



г

Рисунок 5.18 – Налаштування блоків:

а – Mag, б – Omega, в – Clock, г – Mux

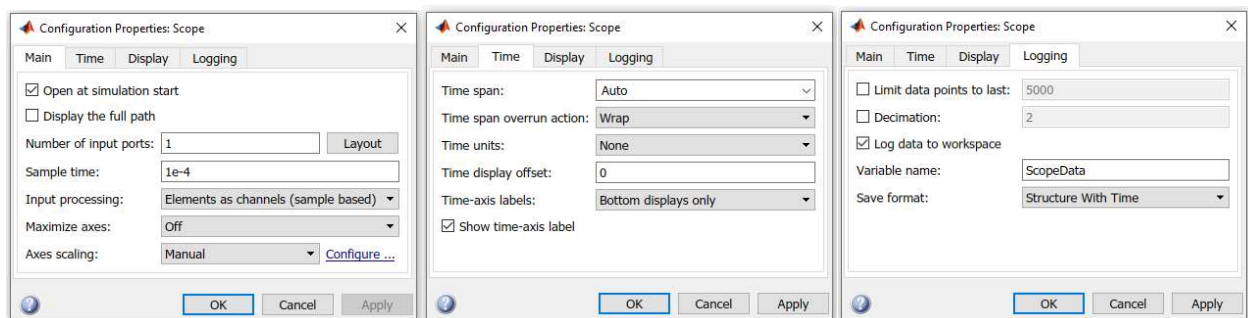


Рисунок 5.19 – Налаштування блоку Scope

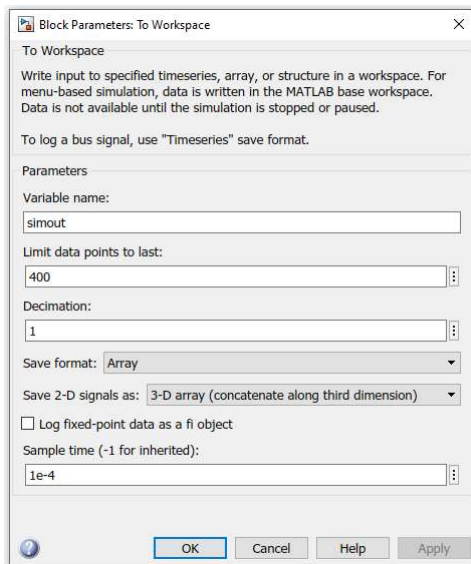


Рисунок 5.20 – Налаштування блоку To Workspace

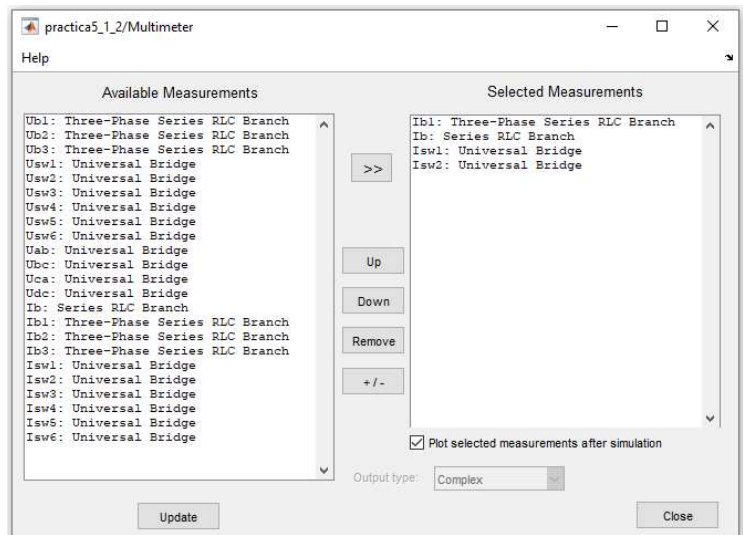


Рисунок 5.21 – Налаштування блоку Multimeter

Напруга у навантаженні фази A показана на рис. 5.22.

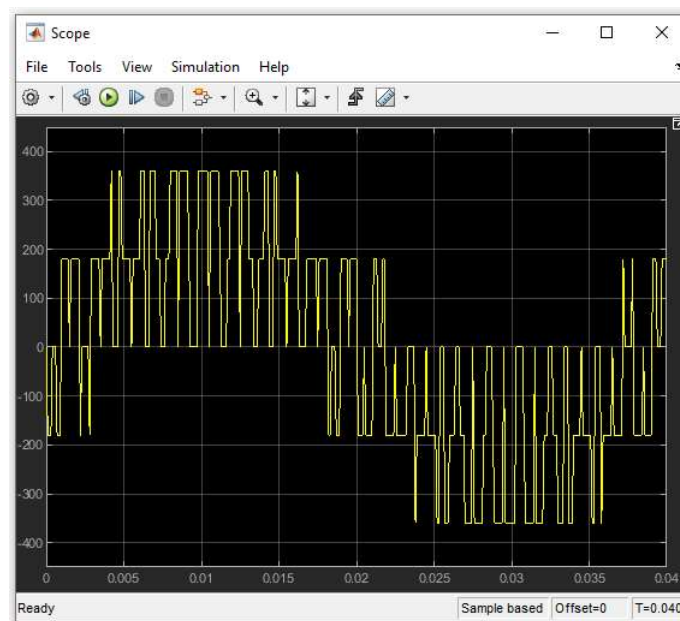


Рисунок 5.22 – Напруга у навантаженні фази A

Гармонійні складові фазної напруги на виході інвертора та відповідні налаштування FFT Analysis представлено на рис. 5.23.

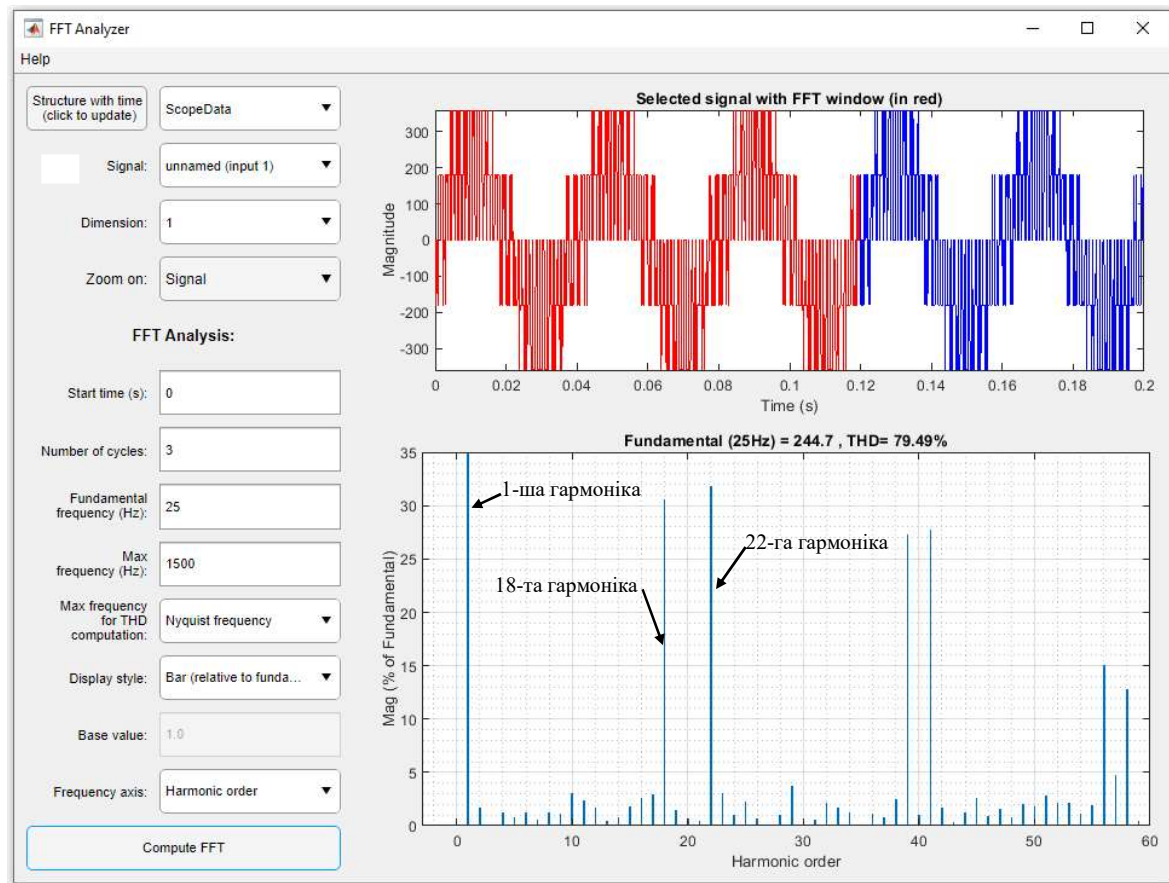


Рисунок 5.23 – Гармонійні складові фазної напруги на виході інвертора

З рис. 5.23 випливає, що спектр напруги містить основну частоту модуляції (25 Гц) і бокові частоти, що розташовуються праворуч і ліворуч від гармонік, кратних відношенню несучої частоти (500 Гц у нашому випадку) до частоти модуляції.

Результати моделювання записуються в робочий простір блоком To Workspace, квазіусталені струми будуються під час виконання програми, представленої в лістингу 1.

Для створення програми, код якої відображено у лістингу 1, необхідно у робочому вікні Matlab ввести edit list, програма видасть запит на створення файлу з іменем list1, після чого відкриється вікно Editor, в яке необхідно вставити код з лістингу 1. Виконання програми призводить до побудови графіків квазіусталених процесів, показаних на рис. 5.24.

Лістинг 1

```

t=0:1e-4:399*1e-4; % Задаємо час
i_Load=simout(:,1); % Створюємо змінну струму навантаження
i_dc=simout(:,2); % Створюємо змінну струму живлення
i_SW1=simout(:,3); % Створюємо змінну струму SW1
i_SW2=simout(:,4); % Створюємо змінну струму SW2
%Побудова графіків струму навантаження та живлення
subplot(2,1,1)
plot (t,i_Load, t,i_dc);
ylabel ('Струм, А');
xlabel ('Час, с');
grid on;
legend ('Струм фази А навантаження, А','Струм кола генератора, А',
'Location', 'Best');
%Побудова графіків струму в напівпровідникових ключах
subplot (2,1,2);
plot (t,i_SW1,t,i_SW2);
ylabel ('Струм, А');
xlabel ('Час, с');
grid on;
legend('Струм через SW1, А','Струм через SW2, А', 'Location', 'Best');

```

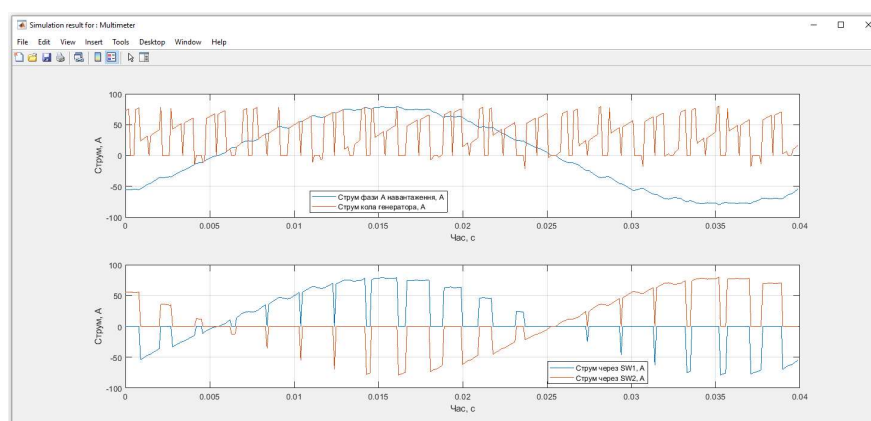


Рисунок 5.24 – Графіки квазіусталених процесів у автономному інверторі напруги

З розгляду електромагнітних процесів випливає, що струм навантаження дорівнює алгебраїчній сумі струмів ключів SW1, SW2. Під час цього на напівперіоді, коли модулююча напруга позитивна, струм тече через VT1, а у разі його запирання внаслідок наявності індуктивності в навантаженні струм перемикається на діод D2. Аналогічно під час негативної модулюючої напруги струм проводять VT2 і D1. Струм навантаження містить першу гармоніку і пульсуючу складову, величина якої залежить від частоти несучого пилкоподібного сигналу та постійної часу навантаження. Амплітуда першої гармоніки визначається з виразу

$$I_m(1) = \frac{U_m(1)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (5.5)$$

де $U_m(1)$, $I_m(1)$ – амплітудні значення перших гармонік фазної напруги та струму навантаження.

Амплітуду пульсуючої складової можна визначити за наближеною формулою, урахувавши у разі цього, що вона визначається гармоніками, які розташовані ближче всіх до першої. У даному випадку – це 18-та і 22-га гармоніки. Оскільки амплітуди гармонічних напруг на цих гармоніках приблизно рівні, то маємо

$$\Delta I_m = \sqrt{\left(\frac{U_m(18)}{\sqrt{R^2 + (18\omega L)^2}}\right)^2 + \left(\frac{U_m(22)}{\sqrt{R^2 + (22\omega L)^2}}\right)^2} + \frac{\sqrt{2}U_m(18)}{\sqrt{R^2 + (18\omega L)^2}} = I_m\sqrt{2}, \quad (5.6)$$

де $U_m(18)$, $U_m(22)$ – амплітуда напруги на 18-й і 22-й гармоніках.

Під час розрахунків втрат у напівпровідникових елементах інвертора слід мати на увазі, що конструктивно інвертор (або, принаймні, плече інвертора), як правило, являє собою інтегрально модульну конструкцію, у якій теплові втрати розподіляються рівномірно. Тому такі втрати слід розраховувати на все плече. Оскільки пряме спадання напруги й прямий опір відкритого транзистора й діода

практично однакові, то втрати в плечі інвертора у квазіусталеному режимі можна розрахувати за формулою

$$P_{SW} = \frac{R_{on}(I_m^2(1) + \Delta I_m^2)}{2} + \frac{2U_f I_m(1)}{\pi} = R_{on}(I^2(1) + I_m^2(18)) + \frac{2U_f I_m(1)}{\pi}, \quad (5.7)$$

де P_{SW} – потужність втрат у плечі інвертора;

R_{on} – опір відкритого напівпровідникового ключа;

U_f – падіння напруги на відкритому ключі;

$I(1) = \frac{I_m(1)}{\sqrt{2}}$ – діючий струм першої гармоніки.

Повна та активна потужності у навантаженні визначаються за виразами

$$S_{load} = \frac{3U_m(1)I_m(1)}{2}; \quad (5.8)$$

$$P_{lo} = \frac{3U_m(1)I_m(1)}{2} \cos \varphi. \quad (5.9)$$

Потужність джерела живлення

$$S_{source} = U_{DC} I_{DC}. \quad (5.10)$$

5 Контрольні питання:

1. Призначення автономного інвертора.
2. Складові елементи напівпровідникових перетворювачів.
3. Квазіусталені характеристики АІН.
4. Статичні характеристики АІН.
5. Визначення і призначення коефіцієнта модуляції в інверторі.
6. Призначення та функція основних елементів модельних схем.
7. Принцип дії основних схем лабораторної роботи.
8. Призначення основних елементів робочих схем лабораторної роботи.

6 Оформлення результатів практичних завдань.

Звіт повинен містити *титольний лист* (додаток А), *завдання, опис об'єкта моделювання, схему моделювання, методику, хід та результати моделювання.*

Додаток А

ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

НАВЧАЛЬНО НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

«УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ»

КАФЕДРА «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА»

ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

з навчальної дисципліни

«Комп'ютерне моделювання електричних систем та об'єктів»

Виконав студент

Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Група (№ групи)

Варіант (№ варіанта)

Прийняв

Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Рік