

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет**  
(повне найменування вищого навчального закладу)

**Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій**  
(повне найменування факультету)

**Кафедра електроніки та телекомунікацій**  
(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ  
ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА  
ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ**

**COMPUTER MODELLING OF TRANSIENT PROCESSES  
IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC DEVICES**

спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Електроніка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ЕЛМ-21  
Антонюк Віктор Володимирович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент  
Лишук Віктор Васильович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«02» грудня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент  
Заблоцький Валентин Юрійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій  
Кафедра електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти: магістр  
Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
Спеціальність: 171 Електроніка  
Освітня програма: «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ  
«15» січня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Антонюку Віктору Володимировичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Комп'ютерне моделювання перехідних процесів в електротехнічних та електронних пристроях

Керівник роботи: к.т.н., доцент Лишук В. В.

затверджені наказом вищого навчального закладу від «15» січня 2025 р. №23/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «1» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Онлайн та демо-версії прикладних пакетів MATHLAB, MULTISIM; MATHCAD; теорія диференціального числення, алгебро-диференціальні рівняння; числові методи; методи та засоби комп'ютерного моделювання; математичний апарат електротехнічних та електронних пристроїв.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми магістерської роботи

Розділ 2 Теоретична частина

Розділ 3 Практична частина

Розділ 4 Спеціальна частина

5. Перелік графічного матеріалу:

15 слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		<u>22,25%</u>	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «04» лютого 2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми кваліфікаційної роботи магістра</i>	до 10.09.2025 р.	
2	<i>Теоретична частина</i>	до 01.10.2025 р.	
3	<i>Практична частина</i>	до 20.10.2025 р.	
4	<i>Спеціальна частина</i>	до 10.11.2025 р.	
5	<i>Висновки</i>	до 15.11.2025 р.	
6	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 22.11.2025 р.	
7	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 29.11.2025 р.	
8	<i>Нормоконтроль</i>	до 13.12.2025 р.	
9	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 13.12.2025 р.	
10	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	до 30.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ Антонюк В. В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Лишук В. В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Антонюк В. В. Комп'ютерне моделювання перехідних процесів в електротехнічних та електронних пристроях. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел. У першому розділі здійснено аналіз джерел щодо дослідження перехідних процесів у електротехнічних та електронних пристроях шляхом математичного моделювання. У другому розділі розглянуто методологію комп'ютерних та експериментальних досліджень. У третьому розділі розглянуто питання ієрархії математичних моделей та макромоделювання. У четвертому розділі змодельовано перехідні процеси в різних електротехнічних та електронних пристроях.

Ключові слова: математична модель, фізичний та обчислювальний експеримент, прикладні програмні пакети.

## ANNOTATION

Antonyuk V. Computer modeling of transient processes in electrical and electronic devices. Manuscript.

Master's qualification work EP «Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of sources used, and appendices. The first section analyzes the sources on the study of transient processes in electrical and electronic devices by mathematical modeling. The second section considers the methodology of computer and experimental research. The third section considers the issue of the hierarchy of mathematical models and macro modeling. The fourth section simulates transient processes in various electrical and electronic devices.

Keywords: Mathematical Model, Physical and Computational Experiment, Applied Software Packages.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА.....	10
1.1 Огляд літературних джерел в напрямку дослідження.....	10
1.2 Основні поняття теорії математичного моделювання.....	16
1.3 Постановка задач оптимізації, організація та проведення натурального експерименту.....	20
1.4 Вимоги до моделей.....	22
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА .....	25
2.1 Методологія комп'ютерних та експериментальних досліджень....	25
2.2 Математичне моделювання електричних кіл та процесів.....	31
2.3 Метод перемінних стану для аналізу в часовій області.....	34
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	36
3.1 Ієрархія математичних моделей у САПР .....	36
3.2 Методика макромоделювання.....	39
3.3 Структурний синтез та параметрична оптимізація.....	41
РОЗДІЛ 4 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	46
4.1 Програмне забезпечення для моделювання процесів.....	46
4.2 Моделювання перехідних процесів у електронних пристроях.....	48
4.3 Моделювання перехідних процесів у електротехнічних пристроях	58
ВИСНОВКИ .....	73
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТКИ.....	75

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

У цій пояснювальній записці застосовують такі скорочення:

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

АІН – автономний інвертор напруги;

ММ – математична модель;

ШІР – широтно-імпульсне регулювання;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ЧІМ – частотно-імпульсна модуляція;

ПЗ – програмне забезпечення;

СІФК – система імпульсно-фазового керування;

СК – силовий ключ;

САПР – система автоматизованого проектування;

ІППН – імпульсний перетворювач постійної напруги;

РН – регулятор напруги.

## ВСТУП

Моделювання динамічних перехідних процесів в електротехніці та електроніці є актуальною прикладною задачею, що дає змогу полегшити етапи проектування, аналізу та діагностики електричних чи електронних пристроїв. Наявність потужної комп'ютерної техніки з багатьма прикладними пакетами символного чи програмного типу, добре розвинена теорія інтегрування диференціальних рівнянь розв'язує задачі такого типу з мінімальними затратами комп'ютерного часу та високою адекватністю моделі до фізичного прототипу. З іншого боку дуже часто фізичний експеримент важко реалізувати із-за дороговизни елементної бази або невизначеності вхідних параметрів чи складності прийняття допущень.

Диференціальні рівняння стану роботи того чи іншого пристрою визначають саме перехідні процеси. Тобто, фізичним розв'язком можуть бути двовимірні часові залежності струмів, напруг чи механічних величин (для обертових електричних машин) та тривимірні, що отримуються при розв'язанні диференціальних рівнянь другого порядку чи рівнянь з частинними похідними (задачі розрахунку електромагнітного чи температурного полів).

При розробці та дослідженні сучасних електротехнічних та електронних пристроїв і систем виникають задачі, розв'язок яких, як правило пов'язаний з аналізом нелінійних диференціальних рівнянь. Використання аналітичних методів дослідження надзвичайно трудомістке, а в ряді випадків і неможливе, тому застосування швидкодіючих обчислювальних машин стає необхідним. Ця трудомісткість приводить до необхідності розділення дослідження на два етапи: вивчення електромагнітних (електричних чи електронних) процесів та вивчення теплових процесів.

Удосконалення персональних комп'ютерів і прийомів програмування зробили в останні роки засоби обчислювальної техніки досягненням в галузі електротехніки та електроніки. Чисельні методи явного чи неявного типу

придатні для інтегрування диференціальних рівнянь і точно описують процеси в згаданих пристроях.

Суть комп'ютерного моделювання полягає в заміні реального пристрою чи системи чи окремих їх елементів моделлю, яка знаходиться з ними в деякій відповідності і здатна в тій чи іншій мірі відтворювати властивості чи характеристики реальної системи. Процеси, що відбуваються в системі можна легко реєструвати, перевіряти їх відповідність результатам теоретичного аналізу, замінювати аналітичні розрахунки процесів їх безпосереднім спостереженням, тобто ефективно вирішувати всі основні задачі експериментального дослідження. В загальнотеоретичному трактуванні моделювання означає здійснення будь-яким способом відображення або відтворення дійсності для вивчення її об'єктивних закономірностей.

В наш час розрізняють два основних методи моделювання: фізичне і математичне. Фізичне являє собою моделювання, при якому дослідження оригіналу замінюється дослідженням моделі тої ж фізичної природи. Єдність матеріальної матерії призводить до точної ідентичності рівнянь, що описують процеси в різних областях техніки.

Моделювання, коли модель і оригінал різні за своєю природою, але описуються однаковими за формою рівняннями називають математичним моделюванням.

Актуальність теми випускної роботи магістра зумовлена широким використанням апарату математичного моделювання як зручного засобу дослідження електротехнічних та електронних пристроїв.

Метою роботи є застосування оптимальних підходів щодо побудови моделей електротехнічних та електронних пристроїв з подальшою верифікацією результатів моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. Обґрунтовано способи побудови перетворювачів електричних сигналів.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати можуть бути застосовані при проектуванні, аналізі та синтезі пристроїв силової електроніки та електротехніки.

Поставлена мета реалізується розв'язанням таких задач:

- провести огляд інформаційних джерел з точки зору стратегії математичного моделювання електротехнічних і електронних пристроїв;
- проаналізувати сучасні методи та підходи щодо побудови працездатних математичних моделей електротехнічних та електронних пристроїв та перехідні процеси, що в них відбуваються;
- застосувати відповідний математичний апарат та прикладні пакети для аналізу перехідних процесів у таких пристроях;
- перевірити адекватність розроблених математичних моделей з теоретичними розробками, а також з фізичними прототипами пристроїв.

Об'єкт дослідження: перехідні процеси в електротехнічних та електронних пристроях.

Предмет дослідження: способи та методи моделювання.

Результати кваліфікаційної роботи були апробовані публікацією тез (додаток А) «Найпростіша математична модель однофазного випростувача» у XIII-Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління», м. Луцьк, 28 листопада 2025 року. С.86-89.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

### 1.1 Огляд літературних джерел в напрямку дослідження

Моделювання електромагнітних перехідних процесів є розвиненою галуззю, яка відіграє важливу роль у проектуванні сучасних електротехнічних та електронних систем. Сьогодні значні зусилля спрямовані на розробку нових методів і більш потужних програмних засобів. Складні моделі, комплексні моделі, складні методи розв'язання та потужні засоби моделювання були розроблені для проведення досліджень, які мають першочергове значення при проектуванні сучасних електротехнічних та електронних пристроїв. Основні аспекти слід враховувати при виконанні досліджень електромагнітних перехідних процесів (методи розв'язання, визначення параметрів, моделювання).

Аналіз і моделювання електромагнітних перехідних процесів став фундаментальною методологією для розуміння продуктивності електричних систем, визначення номінальних параметрів компонентів системи, пояснення збоїв в роботі обладнання або тестування пристроїв захисту.

Перехідні явища в електротехніці та електроніці пов'язані зі збуреннями, спричиненими несправностями, перемиканнями, зміною параметрів або коливаннями навантаження. Ці явища можуть викликати аварію обладнання. Першочергове значення їх вивчення пов'язане з впливом, який вони можуть мати на продуктивність системи або збоями, які вони можуть спричинити при її роботі [3].

Перехідні явища в системах можуть спричинити два типи напруг: надструми, які можуть пошкодити обладнання через надмірне тепловиділення, та перенапруги, які можуть спричинити пробій ізоляції (пробій через тверду або рідку ізоляцію) або дугу (пробій ізоляції через повітря). Тому необхідний захист від цих напруг. Цей захист може бути забезпечений спеціалізованим

обладнанням, робота якого спрямована або на ізоляцію ділянки системи, де виникло порушення (наприклад, відмова силового компонента, що спричинила коротке замикання), або на обмеження напруги в системі.

Перехідні процеси виникають під час будь-яких змін режиму електричного кола: під час під'єднання та від'єднання кола, під час зміни навантаження, під час виникнення аварійних режимів (коротке замикання, обрив дроту). Зміни в електричному колі можна представити у вигляді тих чи інших перемикань, які в загальному випадку називаються комутацією. Фізично перехідні процеси являють собою процеси переходу від енергетичного стану, відповідного до комутаційного режиму, до енергетичного стану, відповідного після комутаційного режиму [3, 5].

Дослідження перехідних процесів реалізуються методами математичного моделювання. Однією з програм є MatLab зі своїм додатком Simulink. Simulink виконує симуляції роботи модельованих систем і пристроїв. Метою роботи є вивчення виникнення перехідних процесів, їхніх видів, особливостей і способів обмеження. Завдання дослідження – визначення рівнів струмів у перехідному процесі. Під час аналізу перехідних процесів в електричних колах вважається, що рубильники вмикаються і розмикаються миттєво, час перехідного процесу, теоретично нескінченно тривалий, сталий режим після комутації розраховують за умови  $t \rightarrow \infty$ . Аналіз перехідних процесів проводять шляхом розв'язання диференціальних рівнянь, складених для досліджуваного електричного кола на основі законів Кірхгофа або методу контурних струмів.

На практиці електромеханічні та статичні перетворювачі енергії в більшості випадків представлені обертовими електричними машинами та напівпровідниковими силовими перетворювачами різних видів струму.

Електротехнічні та електронні пристрої за обсягом виробництва, за потужністю і різномаяттям постійно розвиваються. При цьому електричні машини розглядаються в комплексі з системами керування, побудованих на елементній базі силової електроніки. Успіхи у названих напрямках

визначаються розвитком теорії, методів моделювання та експериментальних досліджень. Особливе значення має розвиток цих методів з урахуванням забезпечення оптимальних параметрів, характеристик пристроїв, впливу на процеси зміни активних та індуктивних опорів, нелінійності магнітного опорів, нелінійності магнітного кола, характеру зв'язків між машиною та елементами керування.

Математичний опис процесів в електротехнічних пристроях у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь, які важко піддаються аналізу та розв'язанню сьогодні є перспективним способом аналізу. Функції електричного перетворення енергії є основою функціонування таких систем.

Аналіз та моделювання перехідних процесів стало фундаментальною методологією для розуміння продуктивності електротехнічних та електронних систем, визначення номіналів компонентів, пояснення відмови обладнання або тестування пристроїв. Вивчення перехідних процесів – це відома галузь, яка може бути використана при проектуванні сучасних електротехнічних систем. З моменту перших кроків у цій галузі відбулися значні зусилля були спрямовані на розробку нових методів та потужніших програмних інструментів. Були розроблені складні моделі, комплексні методи розв'язання та потужні інструменти моделювання та дослідження, що мають першорядне значення при проектуванні сучасних систем. Перші розробки інструментів для аналізу перехідних процесів були здебільшого спрямовані на розрахунок електричних напруг та струмів [5].

Аналіз перехідних процесів електричних систем включають в себе методи розв'язання, інструменти та застосування дослідження продуктивності та якості електричних показників, для яких детальні моделі та точні рішення можуть бути надзвичайно важливими. Перехідні явища в електротехнічних чи електронних пристроях можуть спричиняти основні два типи поломок: перевантаження по струму, які може пошкодити силове обладнання через надмірне тепловиділення, та перенапруги, які можуть спричинити пробій ізоляції.

Сьогодні дослідження та моделювання перехідних процесів у реальних пристроях та системах проводиться за допомогою комп'ютера. Перехідні процеси можуть бути електромагнітними, коли необхідно проаналізувати взаємодію між (електричною) енергією, що зберігається в конденсаторах, та (магнітною) енергією, що зберігається в індуктивностях, або електромеханічний, коли аналіз включає взаємодію між електричною енергією, що зберігається в елементах кола та механічною енергією, що накопичується в обертових машинах. Фізичні явища, пов'язані з перехідними процесами, роблять необхідним такі дослідження.

Поведінка електричного обладнання дуже залежить від перехідних явищ: вона залежить від діапазону частот, пов'язаних з перехідними процесами. Точне математичне представлення будь-якого силового пристрою у всьому діапазоні частот перехідних процесів дуже складне, і для більшості компонентів практично неможливе.

Незважаючи на потужні числові методи, засоби моделювання та графічні інтерфейси користувача, що існують на даний момент при дослідженні електромагнітних перехідних процесів, постає проблема з обмеженнями моделі, доступними в пакетах для перехідних процесів, відсутність вхідних даних та процедур перетворення для параметрів [3].

Після вибору математичної моделі необхідно зібрати інформацію, яка могла б бути корисною для отримання значень параметрів, які потрібно вказати. Для деяких компонентів ці значення можна отримати з геометрії; для інших компонентів ці значення не є легкодоступними та їх необхідно визначити шляхом випробування компонента в лабораторії. У такому випадку для отримання кінцевих значень параметрів знадобиться процедура перетворення даних. Ідеалізоване (спрощене) представлення деяких компонентів можна розглядати, коли пристрій, який потрібно моделювати, занадто складний. Таке представлення дозволить редагувати файл даних та спростити аналіз результатів моделювання.

Постійно зростаючі можливості апаратного та програмного забезпечення призвели до розвитку потужних засобів моделювання, які можуть впоратися з великими та складними системами. Сучасне програмне забезпечення для аналізу перехідних процесів включає в себе методи розв'язання, інструменти, потужні та зручні графічні інтерфейси користувача, які можуть бути дуже корисними під час створення вхідного файлу моделі тестової системи.

Моделювання електромагнітних перехідних процесів може бути використане, серед іншого, для визначення параметрів компонентів в електричних схемах. Аналіз результатів моделювання є важливим аспектом усієї процедури, оскільки кожне з цих досліджень може включати ітеративну процедуру, в якій значення моделей та параметрів необхідно коригувати.

Аналіз електромагнітних перехідних процесів можна виконувати як у часовій, так і в частотній області. Хоча методи розв'язання в часовій області є найпоширенішим варіантом, аналіз у частотній області пропонує певні функції, які доповнюють переваги аналізу в часовій області [6].

Інструменти для моделювання перехідних процесів класифікуються на дві основні категорії: офлайн та в режимі реального часу. Метою офлайн-інструменту моделювання є проведення моделювання на звичайному комп'ютері. Офлайн-інструменти розроблені для використання числових методів та методів програмування без будь-яких обмежень у часі і можуть бути максимально точними в межах доступних даних, моделей та відповідної математики.

Інструменти моделювання в реальному часі (онлайн) здатні генерувати результати синхронно з моделюванням у реальному часі і мають перевагу в можливості взаємодії з фізичними пристроями та підтримки обміну. Обчислення в реальному часі накладають важливі обмеження на проектування таких інструментів, але вони можуть бути надзвичайно корисними для тестування та проектування потужностей обладнання.

Незважаючи на потужні числові методи, інструменти моделювання та графічні інтерфейси користувача, доступних на даний момент, брак достовірних даних, стандартних тестів та засобів перетворення процедури зазвичай роблять визначення параметрів одним із найскладніших аспектів при створенні моделі. Розвиток пристрої енергетичної електроніки на сучасному етапі відбувається як по шляху удосконалення схемних рішень, так і в напрямі ускладнення алгоритмів керування. Перший шлях потребує:

- на етапі дослідження проведення детального аналізу функціонування пристроїв в усталених і перехідних процесах при робочих номінальних та аварійних режимах;

- на етапі схемотехнічного проектування пошуку оптимальних параметрів вибраного технічного рішення.

У роботі методичними основами процесів дослідження і проектування служать заміна реальних фізичних об'єктів їх математичними моделями, а фізичних експериментів – обчислювальними. За природою відображуваних математичних процесів моделі можна розбити на три класи, характеристики яких наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Узагальнення математичних процесів

Характеристика моделі	Способи запису моделі	Бажані методи моделювання
Аналогові (неперервні системи)		
Всі вхідні, вихідні величини і параметри станів є неперервними в часі, змінюваними сигналами	Алгебраїчні, лінійні та нелінійні (векторні) звичайні і диференціальні рівняння, передавальні функції	Перетворення Лапласа, аналогове і цифрове моделювання, методи інтегрування
Системи імпульсного регулювання		
Вхідні і вихідні величини – дискретні в часі. Параметри станів є неперервними сигналами, що керуються в дискретні моменти часу вхідними величинами і спостерігаються з допомогою вихідних величин	Диференціальні рівняння, трансцендентні передавальні функції	Дискретне перетворення Лапласа, гібридне і цифрове моделювання
Дискретні (двійкові системи)		
Всі вхідні, вихідні величини і параметри станів можуть приймати тільки дискретні значення	Булева алгебра, теорія автоматів, графи станів, диференціальні рівняння	Дискретне перетворення та інтеграл Лапласа, цифрове моделювання

## 1.2 Основні поняття теорії математичного моделювання

Сьогодні методи моделювання широко застосовуються в будь-якій сфері людської діяльності. Вироблення необхідної методології дослідження спрямоване на впорядкування отримання і опрацювання інформації про об'єкти, що існують поза нашою свідомістю і взаємодіють між собою та зовнішнім середовищем на основі диференціальних рівнянь, що описують процеси у об'єктах.

У наукових дослідженнях в області електротехніки та електроніки велику роль відіграють гіпотези, тобто певні передбачення, що ґрунтуються на невеликій кількості дослідних даних, спостережень та допущень. Швидка і повна перевірка висунутих гіпотез може бути проведена в ході спеціально поставленого експерименту.

Заміщення одного об'єкту іншим з метою отримання інформації про найважливіші властивості та характеристики об'єкту-оригіналу з допомогою об'єкту-моделі називається моделюванням. Таким чином, моделювання може бути визначено як представлення об'єкта моделлю для отримання інформації про цей об'єкт шляхом проведення експериментів з його моделлю. Теорія заміщення одних об'єктів (оригіналів) іншими об'єктами (моделями) і дослідження властивостей об'єктів на їхніх моделях є пріоритетним напрямом на сьогодні [4].

При цьому адекватність моделі залежить від мети моделювання та прийнятих критеріїв. Узагальнено моделювання можна визначити як метод опосередкованого пізнання, за якого досліджуваний об'єкт-оригінал перебуває в певній відповідності із заміщуваним об'єктом.

При аналізі та синтезі складних електротехнічних пристроїв і систем набув розвитку системний підхід, який відрізняється від класичного індуктивного підходу. Останній розглядає досліджувану систему шляхом переходу від часткового до загального і синтезує (конструює) її шляхом злиття її компонентів, що розробляються окремо. На відміну від цього системний

підхід передбачає послідовний перехід від загального до часткового, коли в основі розгляду лежить мета, причому досліджуваний об'єкт виокремлюють із навколишнього середовища.

Важливим для системного підходу є визначення структури системи, тобто сукупності зв'язків між елементами системи, що відображають їхню взаємодію. Відповідно до цього намітилася низка підходів до дослідження структури системи з її властивостями, до яких слід насамперед віднести структурний і функціональний.

При структурному підході виявляють склад виділених елементів системи і зв'язки між ними. Сукупність елементів і зв'язків між ними дає змогу судити про структуру системи. Найзагальніший опис структури – це топологічний опис, який дає змогу визначити в найзагальніших поняттях складові частини системи і добре формалізується на базі теорії графів.

На сьогодні розрізняють основні два напрями моделювання – аналітичне та імітаційне. Під час імітаційного моделювання алгоритм, що реалізує модель, відтворює процес функціонування електротехнічної системи в часі, при цьому імітуються елементарні явища, що відображають перехідні процеси зі збереженням їхньої логічної структури та послідовності перебігу в часі, що дає змогу за вихідними даними одержати відомості про стани роботи в певні моменти часу, які дають змогу оцінити характеристики та параметри досліджуваної системи [4, 7].

Основною перевагою імітаційного моделювання в порівнянні з аналітичним є можливість розв'язування складніших задач. Імітаційні моделі електротехнічних та електронних пристроїв дають змогу досить просто враховувати такі фактори, як наявність дискретних і безперервних елементів, нелінійні характеристики (характеристики намагнічення, вольт-амперні характеристики) елементів системи, випадкові впливи та збурення, що часто становлять труднощі під час аналітичних досліджень.

Отже, імітаційне моделювання це найефективніший метод дослідження великих систем, а часто і єдиний практично доступний метод отримання

інформації про поведінку системи, особливо на етапі її проектування. Це дає змогу розв'язувати задачі аналізу великих систем, включно із задачами оцінювання: варіанти структури системи, ефективності різних алгоритмів керування системою впливу зміни різних параметрів системи.

Імітаційне моделювання може бути покладено також в основу структурного, алгоритмічного та параметричного синтезу великих технічних систем, коли потрібно створити систему, із заданими характеристиками за певних обмежень, що є оптимальною за деякими критеріями оцінки ефективності [6].

При реальному моделюванні використовується можливість дослідження різних характеристик або на реальному пристрої в цілому або на його складових. Такі дослідження можуть проводитися при номінальних режимах роботи, так і при аварійних для оцінки інших характеристик, що дасть змогу оцінити роботу чи аварію пристроїв чи систем в таких режимах.

Натурне моделювання є різновидом реального і проводиться з метою дослідження дослідження на реальному об'єкті з подальшою обробкою результатів експерименту на основі теорії подібності. При функціонуванні об'єкта відповідно до поставленої мети вдається виявити закономірності протікання реального процесу.

Треба зазначити, що при натурному експерименті виробничий експеримент і комплексні випробування мають високу ступінь достовірності та адекватності.

Виділимо основні етапи моделювання.

На першому етапі формулюється математична модель або «математичний образ» досліджуваного об'єкта.

На другому етапі створюється математична модель, вивчається її поведінка, тобто розв'язуються рівняння, що входять до неї. Для цього використовується основний теоретичний апарат обчислювальної математики – числові методи, тобто обчислювальні алгоритми. Вони дають змогу з потрібною точністю отримати наближений розв'язок складних. Таким чином,

вибір обчислювального алгоритму являє собою другий етап математичного моделювання.

На третьому етапі на одній з алгоритмічних мов складається програма для ЕОМ, що реалізує обраний алгоритм, тобто перекладає його на зрозумілу для обчислювальної машини мову.

Зараз розроблено велику кількість алгоритмів, призначених для розв'язання широкого класу задач, зокрема дослідження динамічних режимів в електротехнічних пристроях. Як правило, математичне моделювання крім основних етапів містить два допоміжні, пов'язані з визначенням специфічних властивостей середовища (теплофізичні, термодинамічні, оптичні, електричні) та опрацюванням даних реального і математичного чи комп'ютерного експериментів [5]. На четвертому етапі, що є допоміжним може проводитись додатковий експеримент. Тут шукані характеристики середовища можуть залежати як від досліджуваного об'єкта, так і від вибору вихідної моделі.

На п'ятому етапі здійснюється обробка даних експериментів. Для більшості реальних експериментів безпосереднє вимірювання величин, що характеризують стан досліджуваного об'єкта, становить великі труднощі, а іноді взагалі неможливе, тому результати вимірювань необхідно обробляти математичними засобами, використовуючи поняття екстраполяції, інтерполяції тощо. Під час обробки даних натурного експерименту потрібно також вибрати математичну модель і провести весь цикл математичного моделювання.

На шостому етапі проводяться обчислення на ЕОМ за складеними програмами, в результаті чого отримується масив результатів, що описує поведінку об'єкту. На завершальному сьомому етапі проводиться аналіз результатів, співставлення їх з теоретичними прогнозами і даними натурного експерименту.

Звідси стає ясно, чи оптимально вибрані математична модель і обчислювальний алгоритм. При необхідності вони уточнюються і цикл математичного моделювання повторюється у більш досконалії формі.

### 1.3 Постановка задач оптимізації та організація проведення натурального експерименту

В технічному поступі ріст рівня вимог до якості та складності створюваних систем, технологій і процесів. Протиріччя між врахуванням складних процесів в пристроях і системах та традиційними підходами до їх проектування визначає концепцію розробки методології проектування. Тоді на її основі є можливість створення систем автоматизованого проектування електротехнічних та електронних систем, що дають змогу вирішити завдання синтезу. Ця концепція містить у собі розробку методів і алгоритмів, що допомагають здійснити пошук оптимальних характеристик і структур, а також дають змогу контролювати зміну цих характеристик у процесі розробки пристроїв чи системи в цілому та її експлуатації.

У будь-якій технічній оптимізаційній задачі існує багато етапів, що збігаються. Найважливішим етапом є моделювання розглянутого фізичного перехідного процесу з метою отримання математичної функції, яку необхідно мінімізувати, а також визначення обмежень, якщо такі існують. Потім слід вибрати відповідну процедуру для здійснення мінімізації. Ця процедура має бути реалізована на практиці, що визначає використання ЕОМ для виконання великого обсягу обчислень. І, нарешті, математичний результат має бути інтерпретований у термінах фізичного змісту задачі [7].

Методи оптимізації дають змогу:

- виконати загальну постановку задачі, в якій описується об'єкт дослідження з вибором найкращої стратегії;
- побудувати математичну модель об'єкта та скласти функцію якості й отримати явну залежність функції від керуючих впливів;
- скласти критерії оптимізації щодо мінімуму або максимуму функції;
- розв'язати екстремальну задачу з допомогою вибраного критерію оптимізації.

Для розв'язання задач оптимізації існує величезна кількість різних математичних методів. Вибір найкращого серед них є надзвичайно важким завданням при мінімізації широкого класу функцій. Ефективність того чи іншого методу визначається постановкою задачі, складністю обчислення функції та її похідних, поведінкою функції тощо. Обчислення цільової функції пов'язане зі зверненням до чисельної моделі і займає основну частку часу при розв'язання задачі [3].

Методи однокритеріальної оптимізації спрямовані на пошук оптимуму єдиної цільової функції. Методи багатокритеріальної оптимізації забезпечують процедури отримання розв'язку при багатьох критеріях, зокрема зведення векторної задачі до послідовності скалярних задач.

Методи оптимізації поділяють також на детерміновані і стохастичні. Стохастичні алгоритми використовують елемент випадковості під час вибору напрямку або довжини кроку в процесі оптимізації.

На сьогодні концепція статистичного моделювання електричних систем у реалізаційному плані нерозривно пов'язана з обмеженістю ресурсів ЕОМ. Тому під час розгляду теоретичних проблем комп'ютерної імітації в розділі математичної статистики, необхідно враховувати особливості та можливості поточного опрацювання експериментальної інформації на ЕОМ. Успіх імітаційного експерименту з моделлю системи істотно залежить від правильного вирішення питань опрацювання та подальшого аналізу й інтерпретації результатів моделювання. Особливо важливо вирішити проблему поточного опрацювання експериментальної інформації під час використання моделі для цілей автоматизації проектування систем [5].

Найважливішою складовою частиною наукових досліджень є експерименти. Основною метою експерименту є перевірка теоретичних положень (підтвердження робочої гіпотези), а також більш широке і глибоке вивчення теми наукового дослідження. Експеримент має бути проведений за можливості в найкоротший термін з мінімальними витратами при найвищій якості отриманих результатів.

Лабораторні досліді проводять із застосуванням типових приладів, спеціальних моделювальних установок, стендів, обладнання тощо. Лабораторні досліді в разі досить повного наукового обґрунтування експерименту (математичне планування) дають змогу отримати достовірну наукову інформацію з мінімальними витратами.

Можливі три випадки проведення математичного експерименту. Перший – теоретично отримано аналітичну залежність, яка однозначно визначає досліджуваний процес. У цьому випадку обсяг експерименту для підтвердження даної залежності мінімальний, оскільки функція однозначно визначається експериментальними даними. Другий випадок проводиться теоретичним шляхом установлено лише характер залежності. Третій випадок використовується тоді, коли теоретично не вдалося отримати будь-які залежності. Розроблено лише припущення про якісні закономірності процесу [4, 5].

Проведення натурального експерименту з використанням сучасних засобів експерименту, пов'язане з використанням обчислювальної техніки. Метою натурального експерименту є отримання необхідного об'єму даних за мінімальний час. Для досягнення поставленої мети, необхідно, щоб засоби натурального експерименту мали певні властивості: наявністю необхідних засобів автоматизації експерименту з широкою номенклатурою датчиків для вимірювання різних фізичних величин, високою продуктивністю введення інформації в комп'ютер та її обробкою, широкими можливостями подання графічної інформації та мережевим зв'язком з іншими комп'ютерами, автоматичним представленням необхідних протоколів, звітів та графіків.

#### **1.4 Вимоги до моделей**

Правильність побудови математичних моделей є запорукою успішного їх аналізу і подальшої розробки змодельованих прототипів. Модель повинна бути адекватною, універсальною та економічною з точки зору затрат комп'ютерного часу.

Модель вважається адекватною, якщо відображає задані властивості об'єкту з прийнятною точністю. Точність визначається як ступінь збігу значень вихідних параметрів моделі та об'єкта.

Відносна похибка моделі по вихідному параметру  $j$  обчислюється за формулою (1.1):

$$E_j = (\tilde{g}_j - g_j) / g_j, \quad (1.1)$$

де  $\tilde{g}_j$  –  $j$ -й вихідний параметр, розрахований за допомогою моделі,

$g_j$  – той же параметр, що має місце в об'єкті, що моделюється.

Похибка моделі за сукупністю вихідних параметрів, що враховуються, оцінюється однією з норм вектора, наприклад:

$$E_M = \sqrt{\sum_{j=1}^m E_j^2}. \quad (1.2)$$

Точність моделі різна у різних умовах функціонування об'єкта. Ці умови характеризуються зовнішніми параметрами. Якщо задатися гранично припустимою похибкою  $E_{\text{п}}$ , можна в просторі зовнішніх ознак виділити область, у якій виконується умова  $E_M < E_{\text{п}}$ . Найбільш просто область адекватності визначається двосторонніми нерівностями за формулою (1.2):

$$g'_k \leq g''_k \leq g'''_k, \quad k = \overline{1:p}, \quad (1.3)$$

де  $g_k$  –  $k$ -й зовнішній параметр;

$p$  – розмірність простору зовнішніх ознак.

При визначенні області адекватності (рис. 1.2) необхідно вибрати сукупність зовнішніх параметрів і сукупність вихідних параметрів, що відображають моделі, що враховуються в моделі.

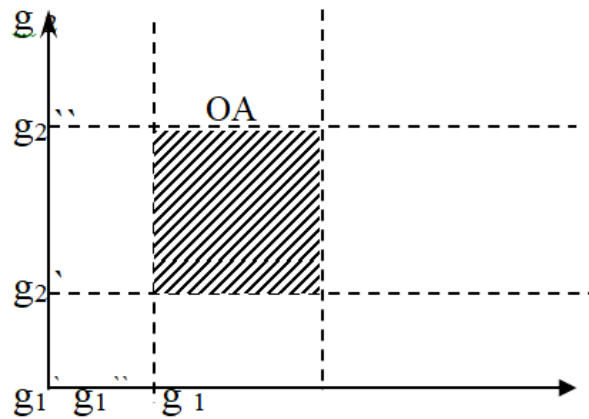


Рисунок 1.2 – Щодо пояснення області адекватності в двомірному просторі [5]

Типовими зовнішніми параметрами є параметри навантаження та параметри зовнішніх впливів. Збільшення числа зовнішніх факторів, що враховуються, розширює застосовність моделі, але ускладнює роботу з визначення області адекватності. Вибір сукупності вихідних параметрів теж неоднозначний, проте, більшість об'єктів число і перелік вихідних параметрів досить стабільні і становлять типовий набір вихідних параметрів. Універсальність моделі визначається числом і складом зовнішніх і вихідних параметрів, що враховуються в моделі.

Економічність моделі характеризується витратами обчислювальних ресурсів на її реалізацію, тобто витратами машинного часу та витратами пам'яті. Загальні витрати виконання в САПР будь-якої проектної процедури залежить як від особливостей обраної моделі і від методів розв'язку.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Методологія комп'ютерних та експериментальних досліджень

Найбільш важливою складовою наукових досліджень є математичні експерименти, зокрема комп'ютерні у вигляді складання програм (мови C+, PASCAL, FORTRAN, MATHCAD) або побудови електричних чи електронних кіл у символному вигляді (MATHLAB, MULTISIM, ORCAD). Це один з основних способів отримати нові наукові знання та результати з подальшим їх аналізом та в кращому випадку впровадженням розроблених прототипів у серійне виробництво. В основі експериментального дослідження лежить фізичний чи комп'ютерний експеримент з прийнятими вхідними припущеннями [1, 8].

Основною метою експерименту є перевірка теоретичних положень або підтвердження робочої гіпотези щодо процесів, які протікають в електротехнічних пристроях з виявленням нових, зокрема й нестандартних, відмінних від номінальних режимів їх роботи. Експеримент має бути проведений з мінімальними витратами реального чи комп'ютерного при найвищій якості отриманих результатів.

Лабораторні дослідження проводять із застосуванням типових приладів, спеціальних моделюючих установок, стендів, обладнання тощо. Дослідження дозволяють найбільш повно та якісно, з необхідною повторюваністю вивчити вплив одних характеристик при варіюванні інших.

Лабораторні дослідження у разі достатнього наукового обґрунтування експерименту (математичного планування) дозволяють отримати високу наукову інформацію, що іноді неможливо отримати в ході проведення математичногоексперименту. Однак такі експерименти не завжди повністю відображають реальний хід досліджуваного процесу, тому виникає потреба у проведенні комп'ютерного моделювання.

Для комп'ютерного моделювання необхідна наявність різновидів виробничих експериментів та збирання матеріалів (масиву вхідних даних), які накопичують їх за стандартними формами. Такі дані добре піддаються обробці методами статистики та теорії ймовірностей.

Як відомо, у ряді випадків на експеримент витрачається багато коштів. Дослідник проводить величезну кількість вимірювань, отримує безліч діаграм, графіків, виконує невиправдано велику кількість випробувань.

Методологія експерименту – це загальна структура (проект) експерименту, тобто постановка та послідовність виконання експериментальних досліджень. Методологія експерименту включає наступні основні етапи:

- розробку плану-програми експерименту;
- оцінку вимірювань та вибір засобів для проведення експерименту;
- проведення експерименту;
- обробку та аналіз експериментальних даних.

Наведена кількість етапів справедлива для традиційного експерименту. Останнім часом широко застосовують математичну теорію експерименту, що дозволяє різко підвищити точність та зменшити обсяг експериментальних дослідження.

У цьому випадку методологія експерименту включає такі етапи: розробку плану-програми експерименту; оцінку вимірювання та вибір коштів для проведення експерименту; математичне планування експерименту з одночасним проведенням експериментального дослідження, обробкою та аналізом даних. Зупинимось детальніше на етапах експериментального дослідження.

План-програма включає найменування теми дослідження, робочу гіпотезу, методику експерименту, перелік необхідних матеріалів, приладів, установок та наявного програмного забезпечення ПК. У ряді випадків включають роботи з конструювання та виготовлення електротехнічних апаратів та пристроїв.

Основа плану-програми – методика експерименту. Один з найбільш важливих етапів складання плану-програми – це визначення мети та завдань експерименту. Кількість завдань має бути невеликою. Для конкретного (не комплексного) експерименту оптимальною кількістю є 3...4 завдання. У великому, комплексному експерименті може бути 8...10. Необхідно правильно вибрати фізичні фактори, що варіюють, тобто встановити основні та другорядні характеристики та залежності, що впливають на досліджуваний процес .

Спочатку аналізують розрахункові (теоретичні) схеми процесу. На основі цього класифікують всі фактори і складають з них спадний важливості для даного експерименту ряд. Правильний вибір основних та другорядних факторів відіграє важливу роль в ефективності експерименту, оскільки експеримент і зводиться до знаходження залежностей між цими факторами. У тих випадках, коли важко відразу виявити роль основних та другорядних факторів, виконують невеликий за обсягом пошуковий експеримент.

Основним принципом встановлення ступеня важливості характеристик електротехнічних чи електронних пристроїв є їх роль у досліджуваному процесі. Для цього вивчають процес у залежно від якоїсь однієї змінної за інших постійних. Такий принцип проведення експерименту виправдовує себе лише у випадках, коли змінних характеристик мало (до трьох). Якщо змінних величин багато, доцільно застосувати принцип багатofакторного аналізу.

У методології детально проектують процес проведення експерименту. На початку становлять послідовність (черговість) проведення операцій вимірювань та розрахунків. Потім ретельно описують кожну операцію окремо з урахуванням особливостей проведення експерименту.

Важливим розділом методики є вибір методів обробки та аналізу експериментальних даних чи даних комп'ютерних даних. Обробка даних зводиться до систематизації всіх цифр, їх класифікації та аналізу. Результати експериментів мають бути зведені в легкочитані форми запису – таблиці, графіки, масиви тощо [8].

Особливу увагу в методології має бути приділено математичним методів обробки та аналізу дослідних даних – встановлення емпіричних залежностей, апроксимації зв'язків між варіюючими характеристиками, встановленню критеріїв та ін.

Після встановлення методики знаходять обсяг та трудомісткість експериментальних досліджень, які залежать від глибини теоретичних розробок, ступеня точності прийнятих засобів вимірів. Чим чіткіше сформульована теоретична частина дослідження, тим менший обсяг експерименту.

Можливі три випадки проведення експерименту. У першому теоретично отримано аналітичну залежність, яка однозначно визначає досліджуваний процес. Наприклад, функція  $y = 3e + 4x$ . В цьому випадку обсяг експерименту для підтвердження даної залежності мінімальний, оскільки функція однозначно визначається експериментальними даними [1, 2].

У другому випадку теоретичним шляхом встановлено лише характер пропорційної залежності. Наприклад,  $y = ae \sim kx$ . У цьому випадку має місце сімейство кривих. Експериментальним шляхом необхідно визначити  $a$  і  $k$ . При цьому об'єм обчислень зростає.

Третій випадок відповідає моменту, коли теоретично не вдалося отримати будь-яких залежностей. Розроблено лише припущення про якісні закономірності процесу. У багатьох випадках доцільний пошуковий експеримент. Об'єм експериментальних робіт різко зростає. Тут доречний метод математичного планування експерименту.

Проведення експерименту є найважливішим та найбільш трудомістким етапом. Експериментальні дослідження необхідно проводити у відповідно до затвердженого плану-програми та особливо методики експерименту. Приступаючи до експерименту, остаточно уточнюють його методику проведення, послідовність випробувань.

Одночасно з вимірюваннями дослідник має проводити попередню обробку результатів та їх аналіз. Тут особливо повинні виявлятися його творчі

здібності. Такий аналіз дозволяє контролювати досліджуваний процес, коригувати експеримент, покращувати методику та підвищувати ефективність експерименту.

Спочатку результати вимірювань зводять у таблиці за варіюючими характеристиками для різних досліджуваних процесів. Встановлюють точність обробки досвідчених даних.

Особливе місце відведено аналізу експерименту – завершальної частини, на основі якої роблять висновок про підтвердження гіпотези наукового дослідження. Аналіз експерименту – це творча частина дослідження. Іноді за цифрами важко чітко уявити фізичну суть процесу. Тому потрібно особливо ретельне зіставлення фактів, причин, що зумовлюють перебіг того чи іншого процесу та встановлення адекватності гіпотези та експерименту [6, 8].

При обробці результатів вимірювань та спостережень широко використовують методи графічного зображення. Графічне зображення дає найбільш наочне уявлення про результати експериментів дозволяє краще зрозуміти фізичну сутність досліджуваного процесу, виявити загальний характер функціональної залежності змінних величин, що вивчаються, встановити наявність максимуму чи мінімуму функції.

Для графічного зображення результатів вимірів (спостережень), зазвичай застосовують систему прямокутних координат. Перш ніж будувати графік, необхідно знати уяву про досліджуване явище. Якісні закономірності та форма графіка орієнтовно відомі з теоретичних досліджень.

Різке викривлення графіка пояснюється похибками вимірів. При графічному зображенні результатів експериментів велику роль відіграє вибір системи координат чи координатної сітки. У рівномірних координатних сіток ординати та абсциси мають рівномірну шкалу. Наприклад, у системі прямокутних координат довжина відкладаються одиничних відрізків обох осей однакова. З нерівномірних координатних сіток найбільш поширені напівлогарифмічні, логарифмічні, імовірнісні. Напівлогарифмічна сітка має рівномірну ординату та логарифмічну абсцис.

Логарифмічна координатна сітка має обидві логарифмічні осі; імовірнісна – ординату, зазвичай рівномірну, і абсцис – імовірнісну шкалу.

Призначення нерівномірних сіток різне. Найчастіше їх застосовують для більш наочного зображення функцій. Так, багато криволінійних функцій будують на логарифмічних сітках. Імовірнісна сітка застосовується в різних випадках: при обробці вимірювань для оцінки їх точності, при визначення розрахункових характеристик. Відомо, що чим більший масштаб, тим вища точність значень, що знімаються [1, 8].

У деяких випадках будують номограми, які суттєво полегшують застосування для систематичних розрахунків складних теоретичних або емпіричних формул у певних межах вимірювання величин.

Номограмовані можуть бути будь-які вирази алгебри. У результаті складні математичні вирази можна вирішувати порівняно просто графічними способами. Побудова номограм – трудомістка операція. Однак, будучи вкотре побудованою, номограма може бути використана для знаходження будь-якої зі змінних, що входять до номограмовані рівняння. Застосування ЕОМ суттєво знижує трудомісткість при номограмуванні.

У процесі експериментальних вимірювань одержують статистичний ряд вимірів двох величин функцій, що об'єднуються:  $Y = F(X)$ . Кожному значенню функції  $y_1, \dots, y_n$  відповідає певне значення аргументу  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . На основі експериментальних даних можна підібрати алгебраїчні вирази, що називають емпіричними формулами. Такі формули підбирають лише у межах виміряних значень аргументу  $x_1 - x_n$ . Емпіричні формули мають тим більшу цінність, чим більше вони відповідають результатам експерименту.

Необхідність у підборі емпіричних формул виникає у багатьох випадках. Так, якщо аналітичний вираз  $Y = F(X)$  складний і вимагає громіздких обчислень та складання програм на ЕОМ, то часто ефективніше користуватися спрощеною наближеною емпіричною формулою. Досвід показує, що емпіричні формули бувають незамінні для аналізу виміряних величин. До емпіричних формул пред'являють дві основні вимоги – по можливості вони

повинні бути найбільш простими і точно відповідати експериментальним даним в межах зміни аргументу.

Таким чином, емпіричні формули є наближеними виразами аналітичних. Заміну точних аналітичних виразів наближеними, простішими називають апроксимацією, а функції – апроксимуючими. Процес підбору емпіричних формул складається з двох етапів. На першому етапі дані вимірювань наносять на сітку прямокутних координат, з'єднують експериментальні точки плавної кривої та вибирають орієнтовно вид формули. На другому етапі обчислюють параметри формул, які найкраще відповідали прийнятій формулі.

Підбір емпіричних формул необхідно починати з найпростіших виразів. Криві, побудовані за експериментальними точками, вирівнюють відомими у статистиці методами. Наприклад, методом вирівнювання, який полягає в тому, що криву, побудовану за експериментальними точках, що представляють лінійною функцією.

У процесі проведення експерименту виникає потреба перевірити відповідність експериментальних даних теоретичним передумовам, тобто перевірити гіпотезу дослідження. Перевірка експериментальних даних на адекватність необхідна також у всіх випадках на стадії аналізу теоретико-експериментальних досліджень. Методи оцінки адекватності засновані на використанні довірчих інтервалів, що дозволяють із заданою довірчою ймовірністю визначати шукані значення оцінюваного параметра. Суть такої перевірки полягає у зіставленні отриманої або передбачуваної теоретичної функції  $Y = F(X)$  з результатами вимірів [1, 3].

## **2.2 Математичне моделювання електричних кіл та процесів**

Виклад теорії моделювання електричних кіл, як правило, пов'язують із програмами математичного моделювання динамічних систем, до яких відносять: VisSim, Simulink (MATLAB), Easy5, Multisim, MathCAD та ін.

У теорії моделювання основними проблемами є розробка універсальних підходів до побудови моделей та точності симуляції, оцінки адекватності одержуваних результатів і величин похибок, ідентифікації досліджуваних систем, синтезу технічних пристроїв і перевірки гіпотез [2, 4].

Завдання загальної теорії моделювання полягають у вирішенні перерахованих проблем. Під час пошуку рішень використовують:

- методи теорії подібності;
- методи теорії кіл;
- методи теорії автоматичного керування;
- чисельні методи.

Програми математичного моделювання динамічних систем побудовані із застосуванням двох технологій. Перша технологія передбачає використання так званої, потокової моделі управління під час виконання математичних перетворень. Друга технологія передбачає подання моделі у вигляді текстового запису системи рівнянь, яку модельні програми обробляють у пакетному режимі.

Модель програмування, у якій інструкції, процедури або функції виконуються тільки тоді, коли всі вхідні дані, тобто параметри, початкові та граничні умови готові. Потенційні можливості програм із потоковою моделлю керування можна оцінити, ознайомившись із програмним комплексом LabVIEW.

Техніка структурного моделювання заснована на використанні моделей у вигляді блоків, що перетворюють сигнали. Зв'язки між вхідними та вихідними сигналами встановлюються за допомогою завдання передавальних функцій. Оскільки структурні блоки мають виражені входи і виходи, побудовані згідно з цією технікою моделі іноді називають спрямованими сигнальними графами [4].

Таким чином, техніка структурного моделювання, що використовує моделі у формі передавальних функцій, вимагає наявності лише явного обчислювача, який підключається до всіх інтеграторів моделі і, з тією чи

іншою точністю, інтегрує відповідні сигнали, забезпечуючи тим самим розв'язання диференціальних рівнянь.

Математичне ядро застосовується в різних продуктах і реалізується на основі відомих обчислювальних методів. Саме ж завдання моделювання зводиться до розв'язання систем рівнянь. Завдання розробників пов'язані з побудовою зручного і розвиненого інтерфейсу, а також зі створенням алгоритмів та методів відповідно до поставлених граничних умов у дослідницьких задачах, представленням перехідних процесів у вигляді систем лінійних або нелінійних алгебраїчних або диференціальних рівнянь. Математичним моделюванням електричних кіл і процесів розуміють заміщення схеми-об'єкта математичною моделлю та отримання адекватних результатів, що описують особливості поведінки вихідного об'єкта.

Різновидом математичного моделювання будемо вважати схемотехнічне моделювання – схемотехнічну реалізацію вихідної задачі із застосуванням моделей і макромоделей типових елементів електричних схем у мовному базисі теорії кіл.

У зв'язку з викладеним вище, у подальшому розгляді будемо реалізовувати методологію, засновану на пріоритетному вивченні фундаментальних основ теорії та найбільш ефективних методів моделювання. Це зумовлено досить складним і різномірним математичним апаратом, а також громіздкістю деяких обчислювальних алгоритмів.

Для моделювання електричних та електронних кіл, систем керування зручно застосовувати програмно-методичне забезпечення, що включає крім програмного забезпечення необхідні бібліотеки математичних моделей. Як засоби реалізації процедури моделювання нижче розглянуто використання методу змінних стану, методу розширених вузлових рівнянь, методу LU-розкладання, інтегрованого в програмному середовищі, методу Ньютона-Рафсона, методу дискретних моделей, методу накладення та деяких інших, для розв'язання специфічних задач моделювання.

### 2.3 Метод перемінних стану для аналізу в часовій області

Одним з найпоширеніших методів побудови математичної моделі електротехнічного пристрою, що формують аналітичне рішення диференціального рівняння, є метод змінних стану. Даний метод заснований на описі стану електричного кола системи диференціальних рівнянь першого порядку в нормальній формі Коші, записаної щодо похідних шуканих змінних, які отримали назву змінних стану. При цьому для лінійного електричного кола основою формування системи є рівняння, складені за законами Кірхгофа [4].

Метод змінних стану широко застосовується в якості аналітичного рішення з використанням матричного обчислювального апарату при розрахунках перехідних процесів в електричних колах електротехнічних пристроїв, що включають джерела електричної енергії, а також активні та реактивні елементи. Аналіз [1] показує, що в більшості випадків методом змінних стану розглядаються приклади розрахунку перехідних процесів в електричних колах із постійними джерелами ЕРС та струмів. При цьому параметри реактивних та активних елементів зазвичай підібрані таким чином, щоб корені відповідних диференціальних рівнянь були дійсними. Відповідно знаходження аналітичних рішень перехідних процесів подібних до електричних кіл за допомогою методу змінних стану особливих труднощів не викликає.

З іншого боку застосування методу змінних стану зумовлено його універсальністю та відносною простотою машинної інтерпретації методу для електротехнічних задач. МЗС ґрунтується на розв'язанні двох груп рівнянь, які записують у матричній формі. Перша група – це диференціальні рівняння кола щодо змінних стану. Їх записують у канонічній формі Коші, тобто представляють розв'язаними відносно перших похідних змінних стану за часом. Такий запис у вигляді формули (2.1) зручний для розв'язання на ЕОМ:

$$[Y] = [A] \cdot [x] + [B] \cdot [u], \quad (2.1)$$

де  $[Y]$  – матриця похідних по часу від перемінних стану;

$[x]$  – матриця похідних стану;

$[A]$  – матриця стану;

$[u]$  – матриця похідних стану;

$[B]$  – матриця коефіцієнтів.

Як перемінними стану користуємось величинами, які відповідають першому та другому законам комутації, тобто це струми в індуктивностях і напруги на ємностях.

Матриця стану  $[A]$  завжди квадратна, розміром  $n \times n$ , де  $n$  – число перемінних стану. Якщо  $n = 2$ , матриця стану матиме вигляд:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

Використовуючи матрицю стану запишемо характеристичне рівняння:

$$p^2 + bp + c = 0. \quad (2.3)$$

Друга група рівнянь складається з алгебраїчних. Вони пов'язують матрицю вихідних величин  $[Y]$  з матрицями перемінних стан  $[x]$  і зовнішніх збурень  $[u]$ :

$$[Y] = [C] \cdot [x] + [D] \cdot [u]. \quad (2.4)$$

Розроблені різні способи формування рівнянь за цим методом, зокрема методом накладення та інші.

## РОЗДІЛ 3

### ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Ієрархія математичних моделей у САПР

Ієрархічний підхід до проектування включає як свою основу ієрархію математичних моделей. Розподіл моделей за ієрархічними рівнями (рівнями абстрагування) відбувається за ступенем деталізації описуваних властивостей та процесів, що протікають в об'єкті. На кожному ієрархічному рівні використовуються поняття «система» та «елемент». Система  $k$ -го рівня сприймається як елемент у сусідньому, вищому рівні [6].

Уявімо структуру деякого об'єкта у вигляді безлічі елементів і зв'язків між ними (рис. 3.1). Виділимо деякі підмножини елементів та назвемо їх блоками (позначені штриховими лініями).

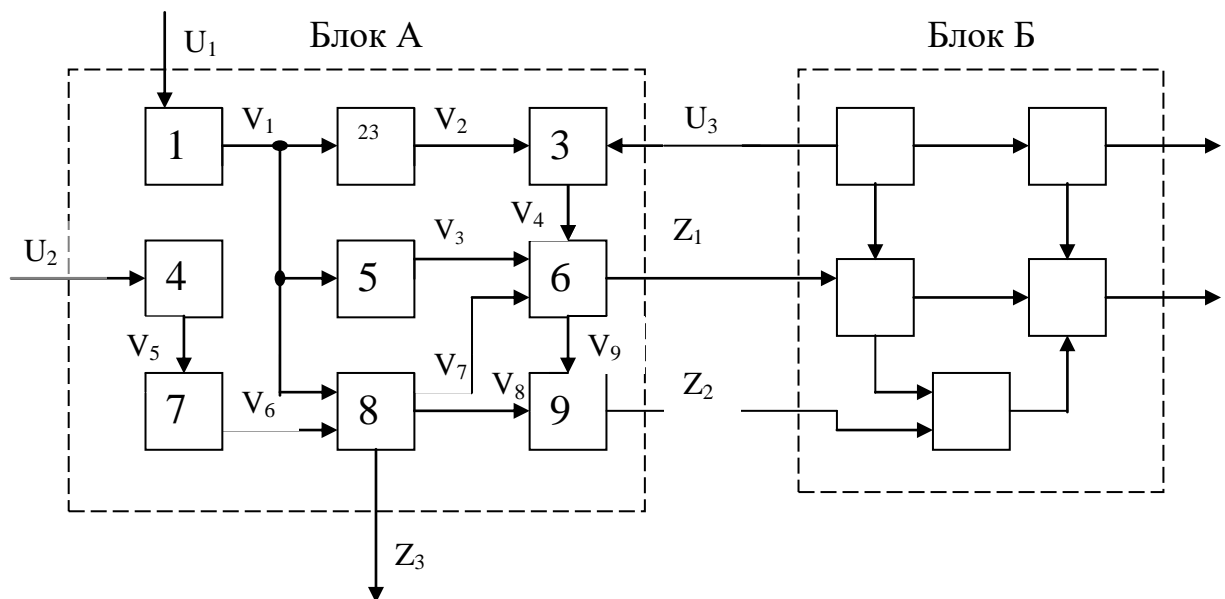


Рисунок 3.1 – Структура об'єкта як множини елементів і зв'язків між ними:  
 $V_i$  – Внутрішні зв'язки між елементами даного блоку;  $Z_j$  – виходи блоку;  
 $U_k$  – входи блоку

Нехай стан кожного зв'язку характеризується однією фазовою змінною.

Фазові змінні – це залежні змінні, тобто величини, що характеризують стан об'єкта. Вектор фазових змінних – це сукупність фазових змінних.

Для функціональних моделей існують поняття повної моделі та макромоделі.

Повна модель блоку – модель, складена із моделей елементів з урахуванням міжелементних зв'язків, тобто модель, що описує як стан виходів, і стан кожного з елементів блоку.

Моделями елементів блоку  $A$  є рівняння, що зв'язують вхідні та вихідні змінні:

$$\left. \begin{aligned} f_1(V_1; U_1) &= 0; \\ f_2(V_1; V_2) &= 0; \\ f_3(V_2; U_3; V_4) &= 0; \\ f_9(V_9; V_8; Z_2) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Повною моделлю блоку буде система рівнянь (3.2):

$$\vec{F}(\vec{V}; \vec{U}) = 0; \quad \vec{Z} = \vec{\Psi}(\vec{V}, \vec{U}), \quad (3.2)$$

де  $\vec{V}; \vec{Z}; \vec{U}$  – повні вектори внутрішніх, вихідних та вхідних фазових змінних блоків.

При великій кількості елементів розмірність вектора  $V$  та порядок системи рівнянь (3.2) стають надмірно більшими та потрібні спрощення.

При переході до вищого ієрархічного рівня спрощення ґрунтуються на виключенні з моделі вектора внутрішніх змінних  $V$ . Отримана в результаті модель являє собою систему рівнянь:

$$\vec{\phi} = (\vec{Z}; \vec{U}) = 0. \quad (3.3)$$

Ця система має значно меншу розмірність, ніж повна модель (3.2) і називається макромоделлю.

Макромодель характеризує процеси взаємодії даного блоку з іншими у складі системи блоку та описує процеси всередині блоку.

Моделі (3.2) і (3.3) відносяться одна до одної як повна модель і макромодель на  $n$ -му рівні ієрархії. На вищому  $(n-1)$ -му рівні блок  $A$  розглядається як елемент і макромодель (3.3) стає моделлю елемента  $A$ . Моделі (3.1) та (3.3) відносяться один до одного як моделі елементів сусідніх ієрархічних рівнів. З моделей типу (3.3) можна скласти повну модель системи на  $(n-1)$ -му рівні.

Залежно від складності об'єкта при його проектуванні використовують більшу чи меншу кількість рівнів абстракції. Виділяють три укрупнені рівні, споріднені за характером використовуваного математичного апарату.

Мікрорівень використовує ММ, що описують фізичний стан та процеси у суцільних середовищах. Для моделювання застосовують апарат рівнянь математичної фізики.

Типова ММ цього рівня – диференціальні рівняння у частинних похідних (рівняння електродинаміки, теплопровідності, пружності, газової динаміки тощо). Типові фазові змінні цього рівня – електричні.

Незалежними змінними є час та просторові координати. Як оператори  $\vec{F}$  та  $\vec{\Psi}$  рівняння (3.2) фігурують диференціальні та інтегральні оператори.

Рівняння (3.2), доповнені крайовими умовами, становлять ММ об'єктів на мікрорівні (розподіл моделі).

Макрорівень використовує уявлення про середовище як дискретний простір з виділенням в якості елементів окремих деталей, електро-радіоелементів. Елементи цього рівня: резистори, конденсатори, транзистори тощо. З-поміж незалежних змінних виключаються просторові координати.

Функціональні моделі на макрорівні є системи звичайних диференціальних або алгебраїчних рівнянь. Фазові змінні цьому рівні: напруга, струми, сили, швидкості, тиск, концентрація частинок, густини струмів, механічні напруги, температури тощо. Ці фазові змінні характеризують прояви зовнішніх з'єднань елементів при їх взаємодії між

собою та зовнішнім середовищем в електронних схемах чи механічних конструкціях.

На метарівні за допомогою подальшого абстрагування від характеру фізичних процесів вдається отримати прийнятний за складністю опис інформаційних процесів, що протікають в об'єктах, що проектуються [6].

На метарівні для моделювання аналогової РЕА застосовують апарат аналізу систем автоматичного управління, для моделювання цифрової РЕА – математичну логіку, теорію кінцевих автоматів.

Математичні моделі на метарівні являють собою системи звичайних диференціальних рівнянь, системи логічних рівнянь, імітаційні моделі систем масового обслуговування.

### **3.2 Методика макромоделювання**

Методика макромоделювання складається з наступних етапів:

- визначення властивостей об'єкта, які мають відбиватися моделлю. (встановлюються вимоги до ступеня універсальності моделі);
- збір апріорної інформації про властивості об'єкта, що моделюється (наприклад, довідкові дані, математичні моделі, результати експлуатації існуючих аналогічних об'єктів);
- одержання загального виду рівнянь моделі (структури моделі). Часто зручно оперувати не рівняннями, а еквівалентними схемами, за допомогою яких простіше встановлювати фізичне значення різних елементів моделі;
- визначення чисельних значень параметрів моделі можливі наступні прийоми виконання цього етапу: використання розрахункових співвідношень з урахуванням відомостей, зібраних на етапі 2;
- оцінка точності отриманої моделі та визначення сфери її адекватності. За незадовільних точнісних оцінок виконують ітераційне наближення до бажаного результату повторенням етапів 3...5;

– представлення отриманої моделі у формі, прийнятій у бібліотеці моделей, що використовується.

Макромоделі, що використовуються під час автоматизованого схемотехнічного проектування – це спрощені уявлення функціональних вузлів інтегральних схем, які з достатньою точністю відображають характеристики інтегральної мікросхеми [5].

Так як інтегральні мікросхеми можуть містити 10-100 тисяч мільйонів елементів на кристалі, то методи проектування, засновані на моделях R, L, C елементах, моделях діодів та транзисторів не забезпечують проведення схемотехнічного аналізу та оптимізацію параметрів. Розмір завдання стає настільки більшим, що перевищує можливості САПР. У зв'язку з цим виникає необхідність зниження розмірів задач схемотехнічного проектування. Одним із найбільш раціональних методів є складання моделей інтегральних схем ІВ не з традиційних моделей компонентів електронних кіл, а з моделей підсхем, моделей спрощених структур, тобто, з інших макромоделей [2].

Макромодель підсхеми описується системою рівнянь меншого порядку чи простим алгоритмом розрахунку вихідних змінних проти розгорнутим уявленням тієї ж підсхеми.

Все це забезпечує зниження обчислювальних витрат та зменшення розміру завдань моделювання загалом. У той самий час зниження обчислювальних витрат за використання макромоделі досягається ціною деякого зменшення точності моделювання. Однак час моделювання зменшується у десятки та сотні разів, а точність знижується на 5...10 %.

Макромоделі як цифрових, так і аналогових ІС поділяються на два типи:

– фізичні макромоделі як спрощених електричних схем заміщення, котрим розрахунок проводиться з урахуванням законів Кірхгофа;

Найбільш доцільним є уявлення у вигляді макромоделей підсистем, топологія та властивост яких багаторазово повторюються. Із таких макромоделей організовують бібліотеки САПР.

### 3.3 Структурний аналіз та параметрична оптимізація

Завдання структурного синтезу технічного об'єкта включають створення структури проєктованого та розрахунок його основних параметрів. Ці дві частини синтезу називають відповідно структурний та параметричний синтез.

Завдання структурного синтезу полягає у пошуку оптимальної чи раціональної структури чи схеми технічного об'єкта для реалізації заданих функцій у межах обраного принципу дії.

Результати структурного синтезу видаються у вигляді:

- схеми розташування елементів структури із зазначенням їх типів;
- переліку елементів разом із таблицею сполук;
- схеми алгоритму.

Завдання структурного синтезу відносять до найскладніших завдань проєктування з погляду формалізації. Складність формалізованого синтезу структур полягає насамперед у наявності великої кількості факторів, що впливають на синтезовані структури, а також у труднощі вирішення задач оптимізації за високого ступеня деталізації опису об'єктів, що синтезуються.

Велика розмірність завдань структурного синтезу робить доцільним блочно-ієрархічний підхід, у якому процес проєктування розбивається взаємопов'язані ієрархічні рівні. Синтезується не вся складна система цілком, але в кожному рівні синтезуються певні функціональні блоки з відповідним рівнем деталізації [2].

Існують різні методи класифікації завдань структурного синтезу.

Залежно від стадії проєктування розрізняють такі процедури структурного синтезу.

1. Вибір основних принципів функціонування проєктованої системи.
2. Вибір технічного рішення у межах заданих принципів функціонування.
3. Розробка структури проєктованого об'єкта.
4. Випуск технічної документації.

Залежно від можливості формалізації розрізняють чотири варіанти.

1. Завдання, у яких можливий повний перебір відомих рішень.
2. Завдання, які неможливо вирішити шляхом повного перебору за прийнятний час.
3. Завдання пошуків варіантів структур у лічильній множині допустимих варіантів.
4. Завдання синтезу, розв'язання яких є проблематичним.

У загальному випадку для вирішення завдання необхідний перебір варіантів та скорочення обсягу перебору, що є актуальною проблемою. Ієрархічний підхід зменшує кількість варіантів кожному рівні і робить вирішення завдання певної оптимальної структури реальним.

Структура об'єктів визначається природою елементів, що входять до нього, і фізичною реалізацією зв'язків між ними всередині або у складі об'єкта.

Структура наочно зображує, як влаштований об'єкт, із яких частин він і як ці частини пов'язані друг з одним. Однією із форм математичного опису структури є граф. Вершини графа ототожнюються з елементами об'єкта на рівні деталізації, а дуги графа – зі зв'язками між відповідними елементами.

Інженерна форма відображення структур – це схема. Схема і граф тотожні за змістом, але різняться формою. Процес проектування структури складного технічного об'єкта є багатоетапною процедурою, що здійснюється за блочно-ієрархічним принципом.

1-й етап. Побудова допустимої множини (каталогу) принципово можливих типів, що входять в об'єкт елементів. Каталоги входять до складу інформаційного забезпечення САПР.

2-й етап. Вибір безлічі допустимих систем елементів, що використовуються під час структурного синтезу об'єктів. Оскільки різні елементи, що входять до каталогу елементів, що застосовуються, можуть бути реалізовані на основі різноманітних фізичних принципів і за допомогою різних технічних рішень, не всі елементи можуть стикуватися один з одним.

Тому основним завданням даного етапу є визначення вимог до параметрів та принципів функціонування окремих елементів, що входять до складу проєктованого об'єкта.

3-й етап. Побудова варіантів структур об'єкта з урахуванням їхньої технічної реалізації. При структурному синтезі об'єкта невеликої складності можлива побудова повної множини допустимих структур об'єкта. При синтезі складних об'єктів прямий перебір вже неможливий і потрібна розробка процедур алгоритмів спрямованого пошуку оптимальної структури об'єкта, що синтезується.

Такі процедури ґрунтуються на використанні:

- дискретного програмування;
- послідовних та ітераційних алгоритмів синтезу;
- мережевих та графових моделей проєктування;
- методів теорій евристичних рішень та методів вирішення винахідницьких завдань.

4-й етап. Оцінка варіантів та вибір компромісної структури синтезованого об'єкта. Оцінка варіантів структури вимагає формування та аналізу математичної моделі синтезованої структури об'єкта та виконання параметричної оптимізації. Для об'єктивної оцінки порівнюваних варіантів структур необхідно мати оптимальне значення параметрів структур. Ці процедури складні, і повний перебір варіантів практично неможливий. Для зменшення складності цього етапу використовуються або непрямі критерії переваги варіанта або шукаються оцінки варіантів структур без дослідження математичної моделі.

За такого підходу вводять параметричні характеристики якості об'єкта. Це може бути кількість елементів в об'єкті, його вартість, габарити, потужність, вага тощо.

Інший шлях зменшення складності – організація діалогового режиму розробника з ЕОМ на 3-му та 4-му етапах синтезу. При цьому розробник сам

вирішує, які програми аналізу та оптимізації використовуватиме оцінки варіанта.

5-й етап. Корекція технічного завдання. Під корекцією ТЗ розуміють зміну заданих обмежень у випадках, коли немає варіантів структур, які забезпечують необхідні обмеження. Якщо корекція зроблена, то відповідні етапи проектування проводять знову за нових значень обмеження. Особливістю завдань структурного синтезу і те, що з отримання оптимального варіанта структури проектного об'єкта, необхідна наявність його математичної моделі, що є формальний опис безлічі структур об'єкта прийнятому рівні деталізації. У цьому випадку завдання структурного синтезу зводиться до вибору компромісного варіанта в лічильному множині можливих реалізацій.

Завдання параметричного синтезу полягає у визначенні найменших значень параметрів для обраної структури об'єкта з урахуванням всіх вимог ТЗ. Функціонування будь-якої проектнової технічної системи підпорядковується певним фізичним законам. Закон функціонування технічної системи описується аналітичними співвідношеннями між вхідними, внутрішніми та вихідними змінними системами. Ці змінні пов'язані між певними співвідношеннями із змінними проектування [7].

$\vec{X}$  – змінні проектування, під якими розуміються внутрішні змінні, що допускають варіювання. У процесі параметричного синтезу, зміна внутрішніх змінних  $\vec{X}$ , веде до зміни вихідних параметрів  $\vec{Y}$ .

$\vec{Y}$  – вихідні параметри проектнової системи. Для постановки та розв'язання задачі параметричного синтезу необхідне формування цільової функції.

$F(\vec{X})$  – цільова функція, що відображає якість функціонування проектнової системи або об'єкта. Формально завдання параметричного синтезу можна як завдання знаходження вектора:  $\vec{X} \in E^m$  ( $E^m$  –  $m$  мірний простір параметрів проектування).

$F(\vec{X}) \rightarrow \min$ , при обмеженнях  $g(\vec{X}) = 0$   $h(\vec{X}) = 0$  де  $g(\vec{X})$  і  $h(\vec{X})$  – векторні функції від  $X$ , що описують систему обмежень на параметри проектування  $X$ . Як цільову функцію може служити цільова функція (3.4) максимального модуля відношення характеристик об'єкта від заданих:

$$F(\vec{X}) = \max |Y_j^{(o)} - Y_j^{(P)}|, \quad (3.4)$$

де  $j = 1, m$  – цільова функція;

$$F(\vec{X}) = \sqrt{\sum_{j=1}^m Y_j^{(o)} - Y_j^{(P)}(\vec{X})} - \text{середньоквадратична цільова функція};$$

$Y_j^{(o)}$  – задане значення параметра  $Y_j$ ;

$Y_j^{(P)}$  – реальне значення цього параметра.

Ці функції у задачах оптимізації слід мінімізувати. Оптимізація може бути здійснена різними методами, які включають досить складні аналітичні та чисельні математичні процедури. Якщо всі змінні проектування є безперервними, то для вирішення задачі параметричного синтезу можуть бути використані методи розв'язання задач нелінійного програмування, що базуються на добре розроблених методах та процедурах пошуку екстремуму функції.

Для вирішення задачі оптимізації при проектуванні об'єктів з дискретними значеннями параметрів методи оптимізації відносять до завдань дискретного програмування. При оптимізації частина параметрів може бути дискретною, а частина матиме безперервний характер. І тут застосовуються методи частково-дискретного програмування.

## РОЗДІЛ 4

### СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 4.1 Програмне забезпечення для моделювання процесів

Комп'ютерне моделювання в електротехніці та електроніці спрямовано на створення прототипів різного роду об'єктів та складних систем, що залежать від сукупності взаємопов'язаних або навіть випадкових факторів. Комп'ютерне моделювання дає змогу значно зменшити витрати на проведення експериментів і теоретичних досліджень, скоротити терміни створення і аналізу натурних моделей, а також отримати необхідні результати в максимально зручній формі.

Спеціалізовані комп'ютерні програми в електроніці в даний час використовуються:

- при проектуванні і конструюванні нових приладів і пристроїв (Sentaurus, Silvaco, Simulink);
- при проектуванні інтегральних схем і друкованих плат (Cadence, Mentor Graphics, Altium Designer);
- для збору даних і цифрової обробки сигналів (LabView, DAC Tools, ThermaCAM, CodeVisionAVR).

За допомогою сучасного програмного забезпечення можна моделювати:

- технологічні процеси (Suprem, Sentaurus Process);
- електронні прилади та пристрої (Pisces, Medici, Atlas, Minimos);
- електричні кола (Spice, Spectre, MathCAD);
- електромеханічні пристрої (Ansys, Coventor);

Найбільш широко використовуваними програмами, призначеними для імітаційного моделювання (симуляції) електричних кіл, є програми типу симулятора Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). В даний час ця система стала стандартом для розроблюваних і вже експлуатованих комерційних пакетів схемотехнічного моделювання (HSpice, Spectre, Pspice, Micro-Cap) і має ряд переваг у порівнянні з багатьма іншими системами

подібного роду: вона не вимоглива до ресурсів і має некомерційні версії, такі, наприклад, як AIM-Spice [11, 12].

Аналогові симулятори електричних схем типу Spice дають змогу моделювати як електричні кола в цілому, так і окремі ділянки цих кіл, що містять електричні двигуни, резистори, конденсатори, індуктивності, джерела напруги і струму, довгі лінії, електронні ключі (транзистори, діоди, тиристори тощо). Метою моделювання, як правило, є виконання числового аналізу електричних кіл, тобто визначення розподілу вхідних і вихідних напруг і струмів, опис динамічних перехідних процесів тощо. Для цього кожен елемент електричного кола представляється у вигляді математичної моделі і у всіх вузлах схеми забезпечується виконання законів Кірхгофа. Потім – чисельно вирішується відповідна система нелінійних диференціальних рівнянь, що містить електричні величини, які підлягають визначенню [10, 12].

Спочатку розраховані для моделювання саме схем симулятори типу Spice передбачають наявність готових моделей їх елементів, фізичні, технологічні та інші параметри яких є заданими.

Для моделювання таких процесів доцільно використовувати не якийсь один, а різні комбінації симуляторів. Можливості для створення таких комбінацій надає система Simulink програмного пакета MatLab або більш складні спеціалізовані системи схемотехнічного моделювання, які входять в САПР для розробки інтегральних схем, друкованих плат та інших елементів електроніки, що містять електричні кола.

Відзначимо, що система Simulink дозволяє створювати з окремих блоків комбінації не тільки електричних і механічних, а також електромеханічних симуляторів. При цьому час машинне обчислення може суттєво скорочуватися в порівнянні з розрахунками в реальному часі.

Для електротехнічних систем, зокрема електромеханіки (MEMS – Micro Electro Mechanical Systems), що поєднують в собі властивості електричних і механічних пристроїв, постає проблема імітаційного моделювання цих систем

і складних взаємопов'язаних фізичних явищ. Крім уже згаданих тут систем Simulink пакета MatLab відносяться і програмний продукт Ansys.

MathCAD в даний час відіграє роль головної математичної системи і зручним користувальницьким інтерфейсом і ретельно відібраними та орієнтованими на потреби більшості користувачів математичні можливості.

Унікальна властивість MathCAD – можливість опису математичних алгоритмів у природній математичній формі. Такий підхід значно полегшує сприйняття математичної сутності задачі і позбавляє користувача від вивчення деякої проміжної мови програмування.

Можна сказати, що в MathCAD ідея вирішення математичних задач без їх програмування доведена до досконалості: переважна більшість задач вимагають лише коректного формульного опису і не потребують підготовки програм в їх загальноприйнятому вигляді .

Як в електронних таблицях, будь-яка зміна вмісту робочого документа MathCAD викликає оновлення всіх результатів і перебудову графіків. MathCAD дозволяє легко аналізувати дані і піддавати їх будь-якій обробці.

## **4.2 Моделювання сигналів в системах керування електротехнічними пристроями**

### **4.2.1 Моделювання періодичних послідовностей імпульсів та сигналів**

Періодичні послідовності сигналів та імпульсів широко використовуються в системах керування напівпровідниковими перетворювачами. Знання форми і законів зміни цих сигналів дасть змогу правильно проектувати системи керування імпульсними перетворювачами, що в свою чергу підвищить ефективність та точність їх роботи і в кінцевому варіанті отримати оптимальні характеристики проєктованих пристроїв [10].

При аналізі і синтезі електричних кіл та пристроїв з використанням моделювання часто виникають задачі дослідження кіл на предмет перетворення чи передачі сигналів без їх спотворення.

В загальному випадку математичне представлення періодичної послідовності імпульсів має вигляд:

$$x_n(t) = \begin{cases} x(t), & \text{якщо } t_3 + nT_i \leq t \leq t_3 + \tau + nT_i, \\ 0, & \text{при інших значеннях } t, \end{cases} \quad (4.1)$$

де  $x(t)$  – математичний запис детермінованого одиничного імпульсу;

$t_3$  – часовий зсув імпульсів відносно моменту часу  $t = 0$ ;

$n$  – номер імпульсу в послідовності:  $n = 0, 1, 2, \dots, N_i - 1$ ;

$N_i$  – кількість імпульсів в послідовності.

$T_i$  – період слідування імпульсів;

$\tau$  – тривалість імпульсу.

Найпростішим прикладом сигналів є періодична послідовність однополярних прямокутних імпульсів, яка отримується при підстановці у рівняння (4.1)  $x(t) = A_0$ .

Для реалізації цієї послідовності в програмі Mathcad можна використати вбудовану функцію if. Формат функції: if(cond, x1, x2), де cond – деяка умова, при виконанні якої математична функція  $x_n(t) = x1$ . Якщо умова не виконується, то  $x_n(t) = x2$ .

На рисунку 4.1 показано моделювання одиночного прямокутного імпульсу, а на рисунку 4.2 кінцевої послідовності імпульсів при  $N_i = 5$ .

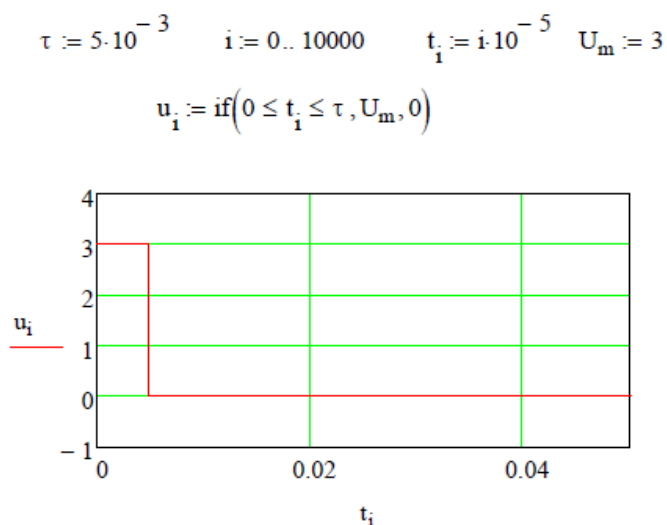


Рисунок 4.1 – Моделювання одиночного прямокутного імпульсу

$$\tau := 5 \cdot 10^{-3} \quad i := 0..10000 \quad t_i := i \cdot 10^{-5} \quad U_m := 3$$

$$T_u := 20 \cdot 10^{-3} \quad t_3 := .3 \cdot \tau \quad n := 5$$

$$u_{n_i} := \begin{cases} 3 & \text{if } (t_3 + T_u \cdot k \leq t_i \leq t_3 + \tau + T_u \cdot k, U_m, 0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

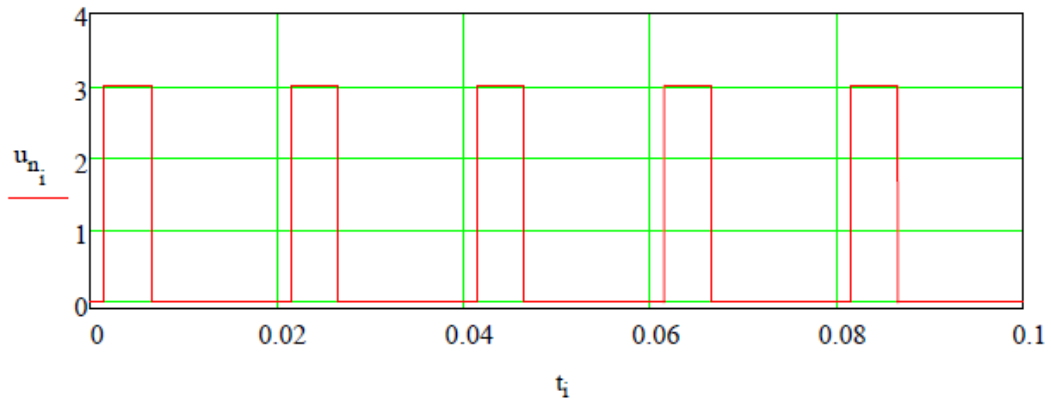


Рисунок 4.2 – Моделювання кінцевої послідовності імпульсів

Моделювання періодичних послідовностей імпульсів, форма яких відрізняється від прямокутної, можливе із застосуванням програми. Приклад періодизації різнотипного за характером електричного імпульсу, зображеного на рисунку 4.3, показаний на рисунку 4.4.

Тут періодизацію виконуємо з допомогою вбудованої функції  $\text{floor}(z)$ , яка повертає найбільше ціле, менше або таке, що дорівнює  $z$  (в тому числі з урахуванням знаку).

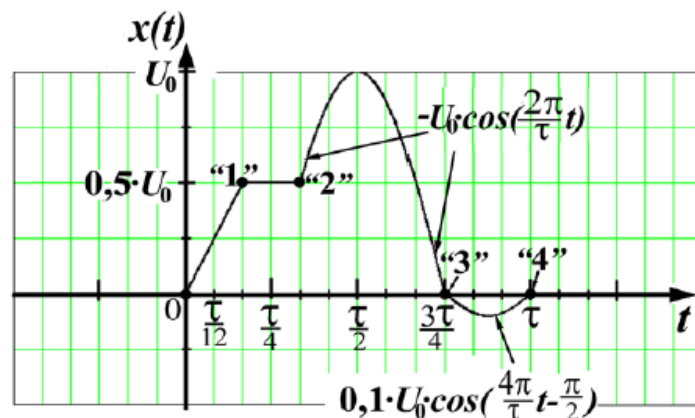


Рисунок 4.3 – Розбиття на періодизацію електричного імпульсу

## Лістинг 4.1

$$T_u := 10 \cdot 10^{-3} \quad t_3 := 0$$

$$x_1(t) := \begin{cases} \tau \leftarrow .001 \\ U_0 \leftarrow 10 \\ \frac{3 \cdot U_0}{\tau} \cdot t & \text{if } t_3 \leq t < t_3 + \frac{\tau}{6} \\ .5U_0 & \text{if } t_3 + \frac{\tau}{6} \leq t < t_3 + \frac{\tau}{3} \\ -U_0 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau} \cdot t\right) & \text{if } t_3 + \frac{\tau}{3} \leq t < t_3 + \frac{3\tau}{4} \\ .1 \cdot U_0 \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\tau} \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) & \text{if } t_3 + \frac{3 \cdot \tau}{4} \leq t < t_3 + \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$x_{\text{pos1}}(t) := \begin{cases} k \leftarrow \text{floor}\left(\frac{t}{T_u}\right) \\ t' \leftarrow t - k \cdot T_u \\ x_1(t') \end{cases}$$

$$t := -T_u, \frac{\tau}{100} - T_u, 2 \cdot T_u$$

Закінчення лістингу

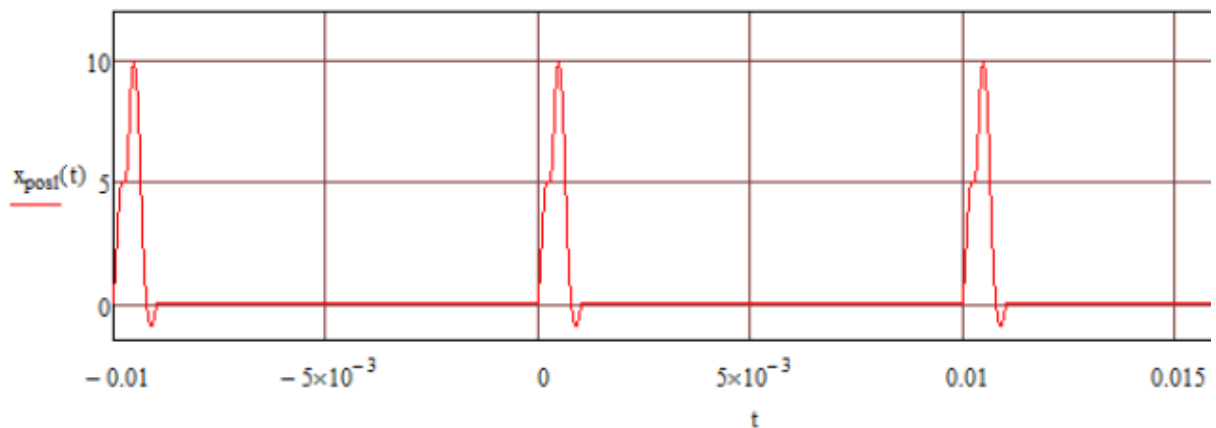


Рисунок 4.4 – Приклад періодизації імпульсу

## 4.2.2 Моделювання дискретних і модульованих сигналів

При потенціальному кодуванні інформації сигнал в цифрових пристроях послідовного типу має вид неперіодичної послідовності прямокутних імпульсів з однаковими амплітудами, тобто дискретними. При цьому напруга, що відповідає логічній одиниці або логічному нулю в цифровому коді,

підтримується незмінною протягом деякого часу, так званим тактовим інтервалом.

Оскільки чередування логічних нулів і одиниць в двійковому коді є довільним і залежить тільки від вмісту вихідної інформації, тривалості прямокутних імпульсів в розглядуваній імпульсній послідовності, і як правило не однакові.

Для моделювання задамо масив значень двійкового коду і часові інтервали, протягом яких підтримуються ці значення. Приклад моделювання дискретного сигналу для одного байту даних виду  $d = [10111001]$  показаний на рисунку 4.5.

Масив значень  $d$  вводиться у вигляді вектора-стовпця, тактовий інтервал позначений  $dT = 1$  мс, амплітуда сигналів становить 3,5 В, що саме підходить вимогам рівнів напруг для спрацювання чи роботи транзисторно-транзисторної логіки.

$$i := 0..1000 \quad t_i := i \cdot 10^{-5} \quad dT := 0.001 = 1 \times 10^{-3} \quad k := 8 \quad Um := 3.5$$

$$d := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad U_{\text{diskr}_i} := \left[ \sum_{j=0}^{k-1} \text{if} \left[ j \cdot dT \leq t_i < (j+1) \cdot dT, d_j \cdot Um, 0 \right] \right]$$

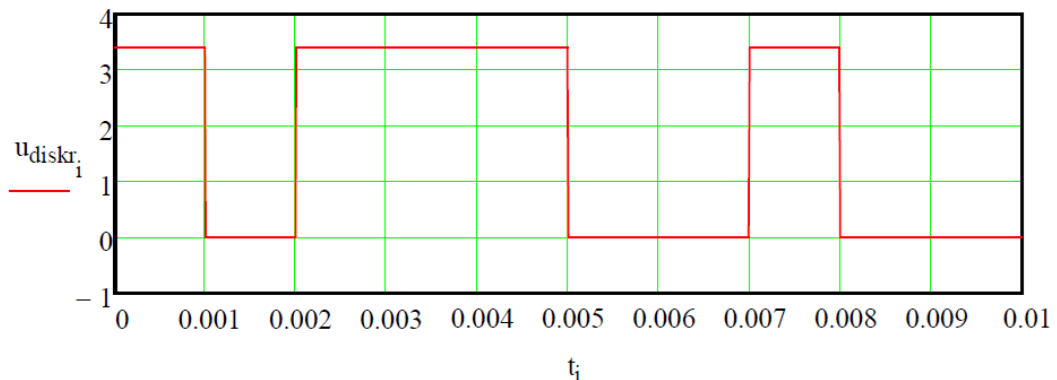


Рисунок 4.5 – Моделювання дискретного сигналу

Модуляція широко застосовується в пристроях електротехніки та електроніки для забезпечення необхідної форми імпульсів, тому розуміння процесів і модульованих сигналів є важливим.

Модульовані електричні сигнали використовуються в системах імпульсно-фазового керування тиристорними чи транзисторними перетворювачами для забезпечення формування керуючих імпульсів необхідної амплітуди, тривалості та частоти слідування, а також в широтно-імпульсних перетворювачах.

Гармонічне коливання характеризується трьома параметрами – амплітудою, частотою та фазою. Тобто, передавана інформація може бути закладена в амплітуді, частоті або фазі. Для цього розрізняють амплітудну модуляцію (АМ), частотну (ЧМ) і фазову (ФМ).

Розглянемо деякі приклади моделювання деяких видів сигналів з аналоговою модуляцією.

Амплітудно-модульований сигнал в загальному виді може бути записана у вигляді (4.2):

$$u_{AM}(t) = U_0 \left[ 1 + k_{AM} \cdot s_{mod}(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \psi_0) \right], \quad (4.2)$$

де  $U_0$  – амплітуда несучого сигналу;

$k_{AM}$  – коефіцієнт пропорційності;

$s_{mod}(t)$  – вхідний сигнал для модуляції;

$\omega_0$  – кутова частота несучого сигналу;

$\psi_0$  – початкова фаза несучого сигналу.

В найпростішому випадку модульований сигнал  $s_{mod}(t)$  найчастіше може бути гармонійним косинусоїдним.

$$s_{mod}(t) = U_m \cos(\Omega_M t + \theta_0). \quad (4.3)$$

Ввівши позначення  $M = U_M/U_0$  рівняння (4.3) перепишемо у вигляді (4.4):

$$u(t) = U_0 \left[ 1 + M \cos(\Omega_M t + \theta_0) \right] \cdot \cos(\omega_0 t + \psi_0), \quad (4.4)$$

де  $U_m$  – амплітуда модульованого сигналу;

$\Omega_M$  – кутова частота модульованого сигналу;

$\theta_0$  – початкова фаза модульованого сигналу.

Приклад моделювання на основі рівняння (4.4) показано на рисунку 4.6.

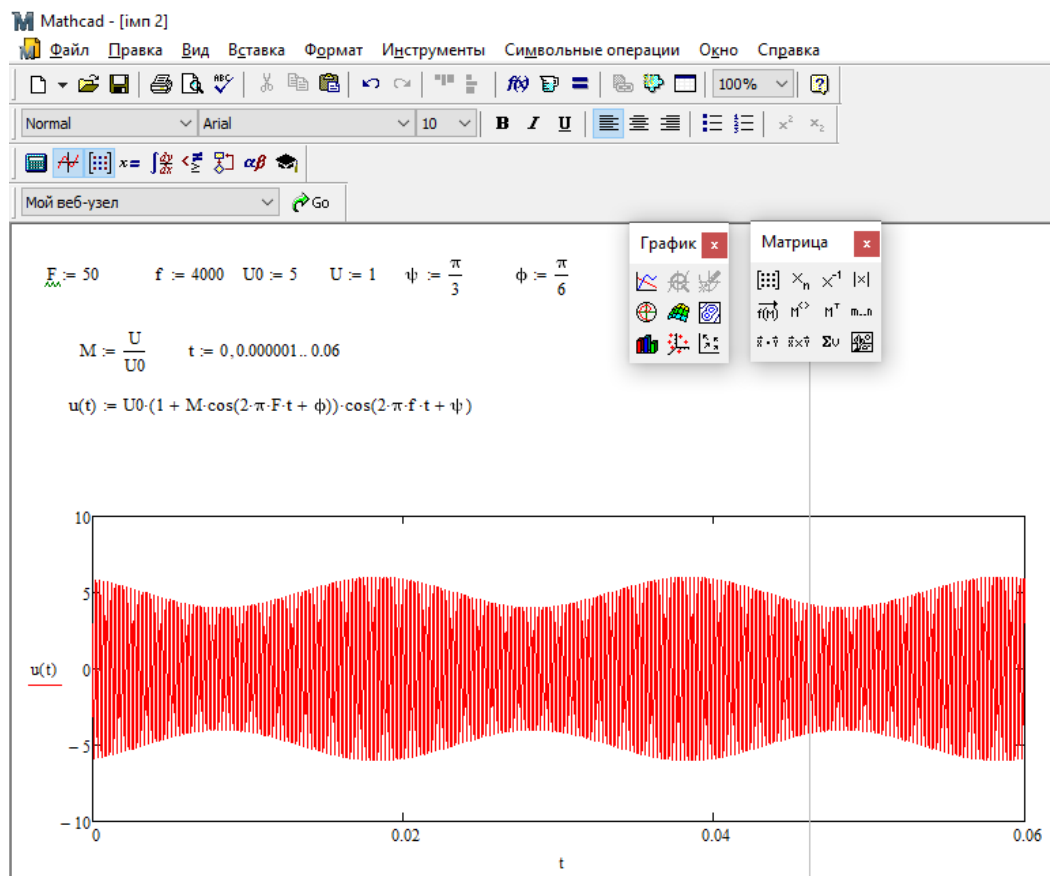


Рисунок 4.6 – Перехідний процес при амплітудній модуляції

Модель сигналу з частотною модуляцією при постійній амплітуді модульованого колювання може бути представлена у вигляді (4.5):

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \beta_{\text{ЧМ}} \cdot \sin(\Omega_M t) + \psi_0), \quad (4.5)$$

де  $\beta_{\text{чМ}} = \frac{k_{\text{чМ}} U_M}{\Omega_M}$  – індекс частотної модуляції.

Задавшись параметрами модуляції, побудуємо графіки (рис. 4.7) при частотній модуляції сигналів.

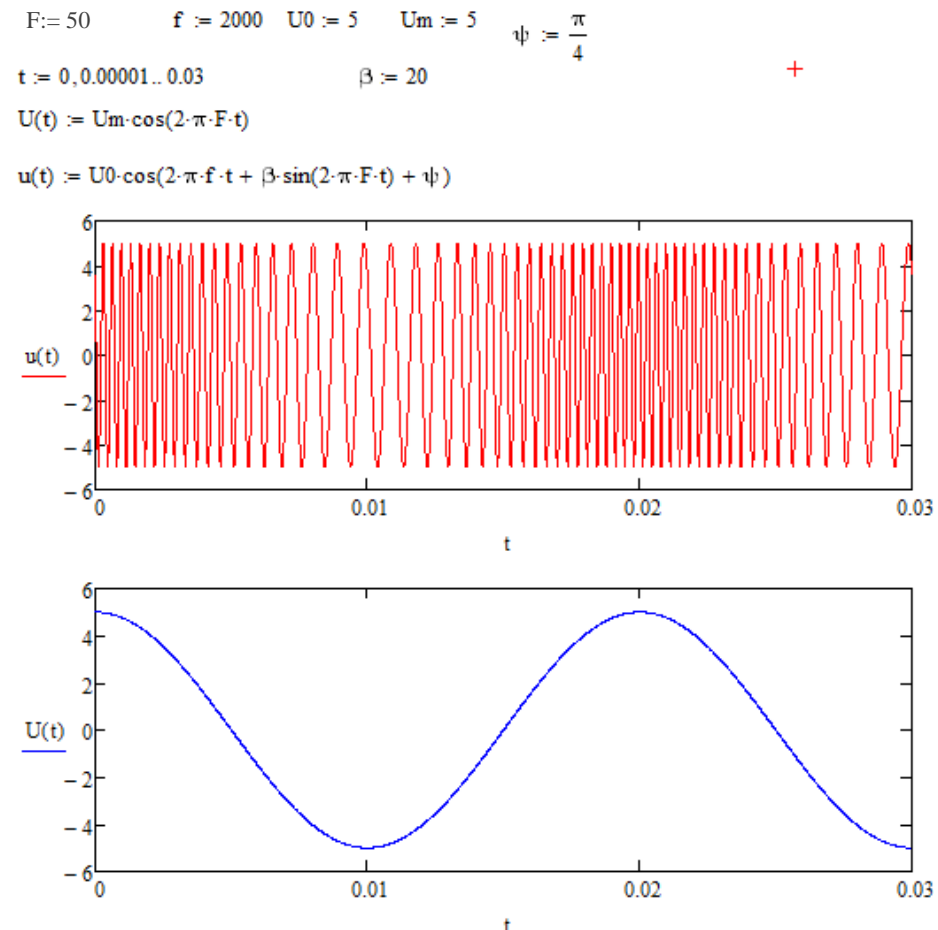


Рисунок 4.7 – Результат моделювання при частотній модуляції

#### 4.2.3 Моделі імпульсно-модульованих сигналів

У практиці інформаційно-вимірювальних і керуючих систем широко знаходять застосування імпульсно-модульовані коливання. Таке коливання являє собою строгу періодичну послідовність електричних прямокутних імпульсів, один з параметрів яких змінюється за законом модулюючого коливання [9].

Імпульсне несуче коливання в загальному випадку може бути представлено виразом (4.6):

$$u(t) = U_m \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_1(t - t_0 - kT), \quad (4.6)$$

де  $u_1(t)$  – функція, що описує форму одиночного імпульсу;

$U_m$  – амплітуда імпульсів;

$t_0$  – часовий зсув середини першого імпульсу відносно нуля;

$T$  – період повторення імпульсів.

Ще одним параметром, що характеризує імпульсну послідовність, є тривалість імпульсу  $\tau_i$ . Залежно від того, який параметр імпульсного несучого коливання піддається модуляції, розрізняють такі види імпульсної модуляції: амплітудно-імпульсну (АІМ), широтно-імпульсну (ШІМ), фазо-імпульсну (ФІМ) та частотно-імпульсну (ЧІМ).

Приклад моделювання амплітудно-імпульсного коливання при модуляції гармонічним коливанням показаний на рисунку 4.8.

Модульований сигнал змінюється за законом:  $S_{mod} = U_m + 2\pi Ft$ , а сигнал згенерований амплітудно-імпульсною модуляцією згідно рівняння

$$U_m(t) = U_m + \Delta U(t) = U_m + k_{AIM} \cdot s_{mod}(t). \quad (4.7)$$

Параметри модуляції:  $F = 500$ ,  $U_m = 1$ ,  $\tau_3 = 0.0001$ ,  $T_{\Pi} = 3\tau_3$ .

« При широтно-імпульсній модуляції ширина імпульсу в модульованій імпульсній послідовності пропорційна амплітуді модульованого коливання, а амплітуди імпульсів однакові. Якщо як коливання використати гармонічне коливання з амплітудою, що дорівнює одиниці, то модульоване коливання буде змінюватись за рівнем в діапазоні  $s_{mod} \in [-1; 1]$  » [4]:

$$T = T_i + ms_{mod}(kT), \quad (4.8)$$

де  $s_{mod}(kT)$  – значення модульованого коливання в моменти, що відповідають початкам імпульсів в несучому коливанні;

$k = 0, 1, 2, \dots$  – порядковий номер імпульсу в несучому коливанні.

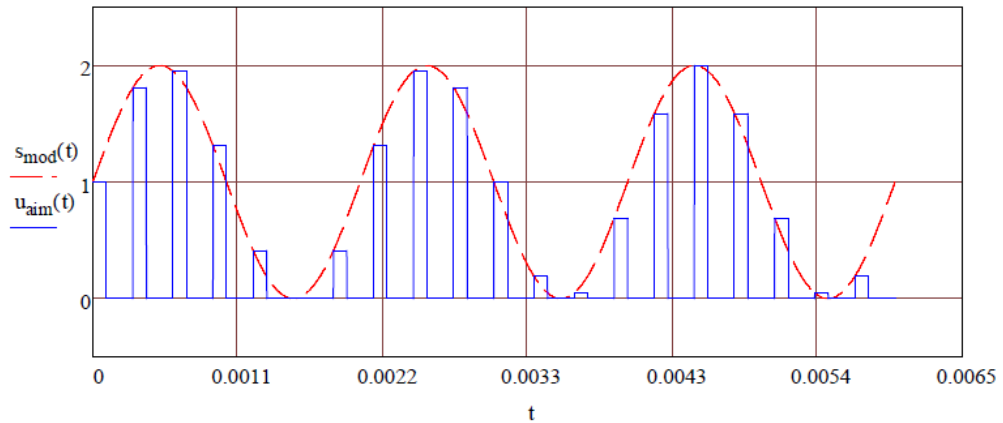


Рисунок 4.8 – Графік амплітудно-модульованих сигналів

Коефіцієнт пропорційності  $m$ , який є глибиною модуляції доцільно вибирати в діапазоні  $m = (0,5 \dots 0,8)T_i$ . На рисунку 4.9 наведено приклад варіанту програми моделювання ШІМ-коливання в програмі МATHCAD.

$$\begin{aligned} \tau_u &:= .0001 & T_n &:= 3\tau_u & t &:= 0, .01\tau_u.. 20T_n \\ F_m &:= 500 & U_m &:= 1 \\ s_{mod}(t) &:= \sin(2\pi \cdot F \cdot t) & m &:= .00008 \\ u_{shim}(t) &:= \begin{cases} 1 & \text{if } (T_n \cdot k \leq t \leq \tau_u + T_n \cdot k + m \cdot s_{mod}(k \cdot T_n), U_m, 0) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \end{aligned}$$

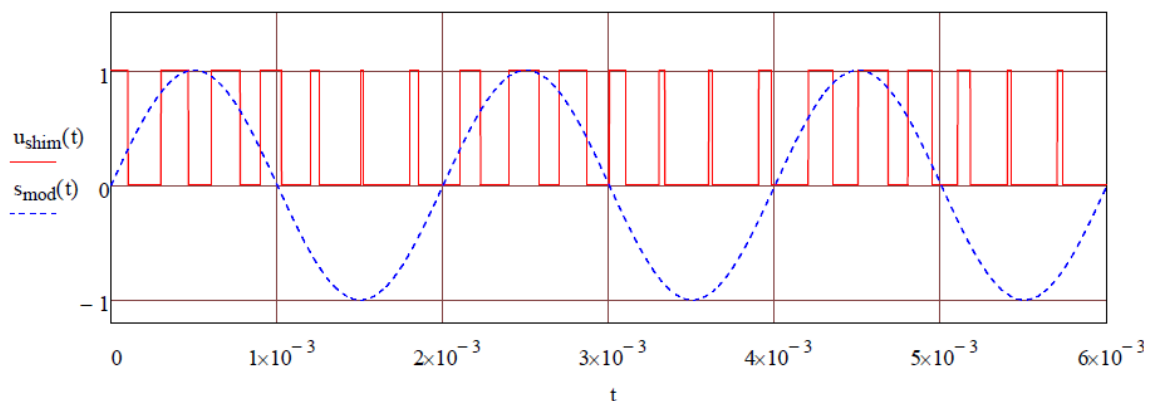


Рисунок 4.9 – Перехідний процес при ШІМ-модуляції

Таким чином, програма MATHCAD продемонструвала високі показники при моделюванні сигналів в системах керування електротехнічними пристроями.

### **4.3 Моделювання перехідних процесів у електротехнічних пристроях**

#### **4.3.1 Математична модель системи імпульсно-фазового керування**

Схемні рішення побудови СІФК на стадії проектування можуть бути реалізовані з допомогою різних програмних продуктів. Продемонструємо аналіз перехідних процесів з допомогою програми Multisim. Ця програма дає змогу детально дослідити статичні та динамічні процеси в електричних та електронних схемах. Модель одного каналу цифрового блоку СІФК регулятора змінної напруги показана на рисунку 4.10.

Модель складається з схеми синхронізації, АЦП, чотирьохрозрядного таймера, генератора, реверсивного лічильника, формувача тривалості керуючого імпульсу і перетворювача змінної напруги. Форма, тривалість і фази керуючих і вихідних напруг контролюються з допомогою віртуального 4-х каналного осцилографа. Результати моделювання і регулювання вихідної напруги при роботі перетворювача на активне навантаження показані на рисунку 4.11.

Позиції 1, 2 показують імпульси керування по каналах, а третя позиція – вихідну напругу. Регулювання амплітуди на виході перетворювача встановлюється напругою по входу АЦП. Її величина пропорційна площі кривої 3. Відомий і інший спосіб регулювання амплітуди вихідної напруги. Це широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), яку частіше всього реалізують на базі транзисторних перетворювачів. В цьому випадку СІФК дещо відрізняється від попередньої, оскільки працює з повністю керованими ключами. Схема на рисунку 4.12 включає в себе наступні блоки: блоки синхронізації, генератор регульованої шпаруватості (ГРШ), пристрій модуляції сигналів керування, блок формування імпульсів та транзисторний регулятор.



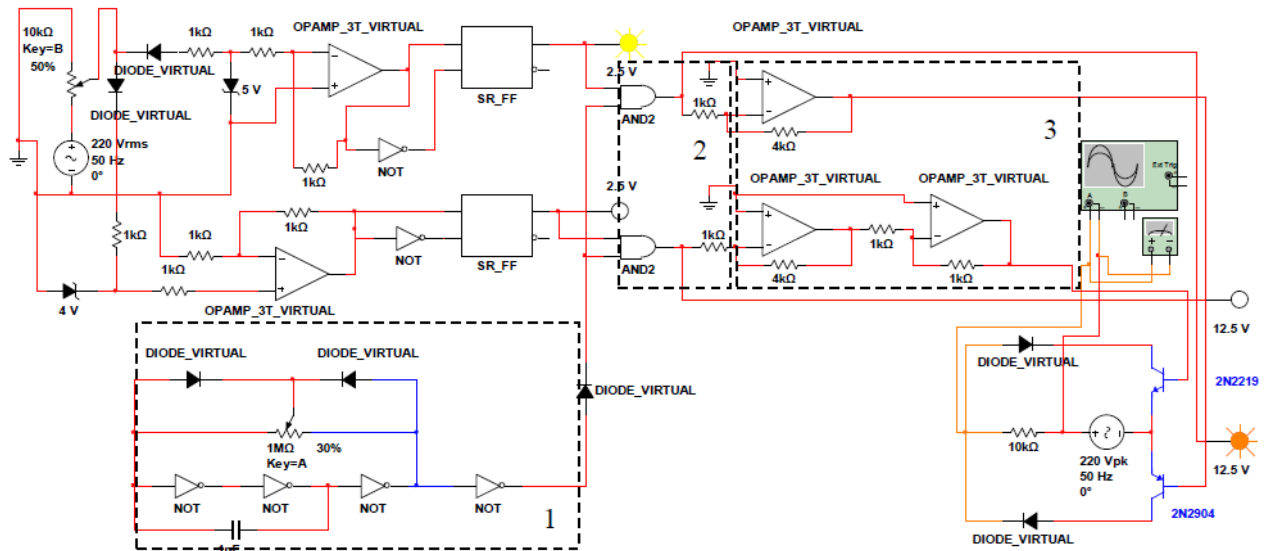


Рисунок 4.12 – Змодельована СІФК, що реалізує широтно-імпульсний принцип регулювання напруги

Принципово амплітуда напруг для обох випадків визначається однаково. Тобто її величина пропорційна площі інтервалів відкриття ключів. ШІМ із СІФК в порівнянні з фазними схемами простіша і відповідно має вищу надійність. В інших аспектах системи керування можна рахувати рівноцінними. На рисунку 4.13 показано імпульсний принцип регулювання напруги з допомогою ШІМ.

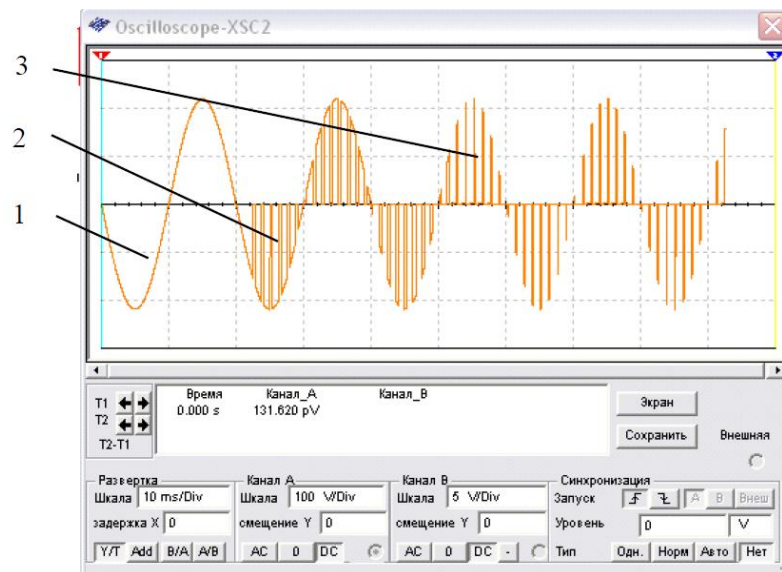


Рисунок 4.13 – Перехідні процеси при ШІМ регулюванні

Моделювання СІФК з ШІМ виконано під час роботи перетворювача на активне навантаження. У процесі моделювання регулювалася шпаруватість генератора імпульсів. На позиції 1 (рис. 4.13) показана ситуація, за якої практично відсутні імпульси генерації з одночасною наявністю імпульсів синхронізації. Випадки 2 та 3 ілюструють збільшення інтервалу часу перебування ключів у вимкненому стані, що супроводжується зниженням рівня вихідної напруги.

#### 4.3.2 Моделювання та дослідження таймеру NE555

Такий таймер широко використовується в електроніці завдяки своїй компактності, швидкодії та надійності, зокрема для побудови генераторів ШІМ.

Побудуємо в Multisim схему генератора імпульсів. Параметри елементів R-C, що утворюють обв'язку мікросхеми такі:  $C = 0,1$  мкФ,  $R_1 = 100$  кОм,  $R_2 = 10$  кОм. Перевіримо працездатність змодельованої схеми шляхом аналізу осцилограм.

Розрахуємо частоту вихідного сигналу генератора:

$$f_r = \frac{1}{[(R_1 + 2R_2)C_1 \ln 2]} = \frac{1}{(100+20) \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \ln 2} = 120,7 \text{ Гц}. \quad (4.9)$$

Заміряємо і порівняємо частоту вихідного сигналу з допомогою частотоміру XFC1. Вона становить 121 Гц, що є близьким значенням до розрахованого.

Розрахуємо тривалість імпульсу  $\tau_1$  і тривалість паузи  $\tau_2$ :

$$\begin{aligned} \tau_1 &= (R_1 + R_2)C_1 \ln 2 = (100+10) \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \ln 2 = 7,6 \text{ мс}. \\ \tau_2 &= R_2 C_1 \ln 2 = 20 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \ln 2 = 1,38 \text{ мс}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Заміряємо і порівнюємо ці тривалості імпульсів з допомогою частотоміру XFC1. Вони становить відповідно 7,5 мс та 1,4 мс, що також є близькими значеннями до розрахованих.

На рисунку 4.14 показано часові діаграми в програмі Multisim, на рисунку 4.15 – модель лічильника імпульсів.

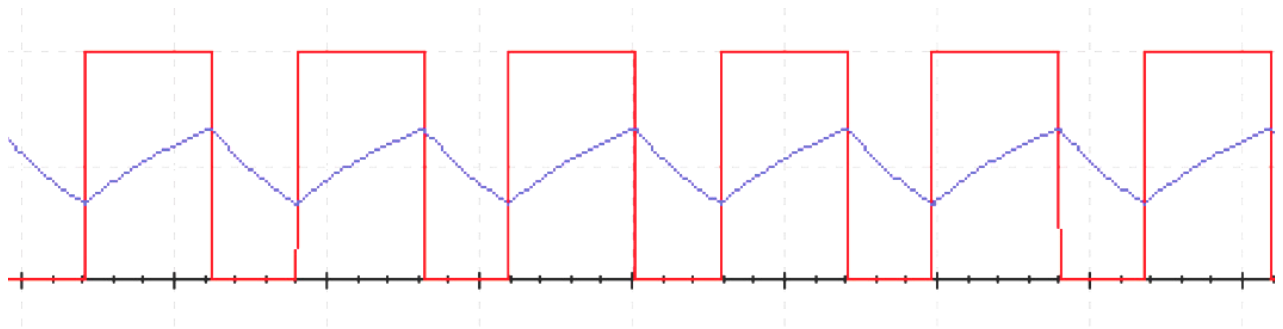


Рисунок 4.14 – Перехідні процеси в лічильнику імпульсів

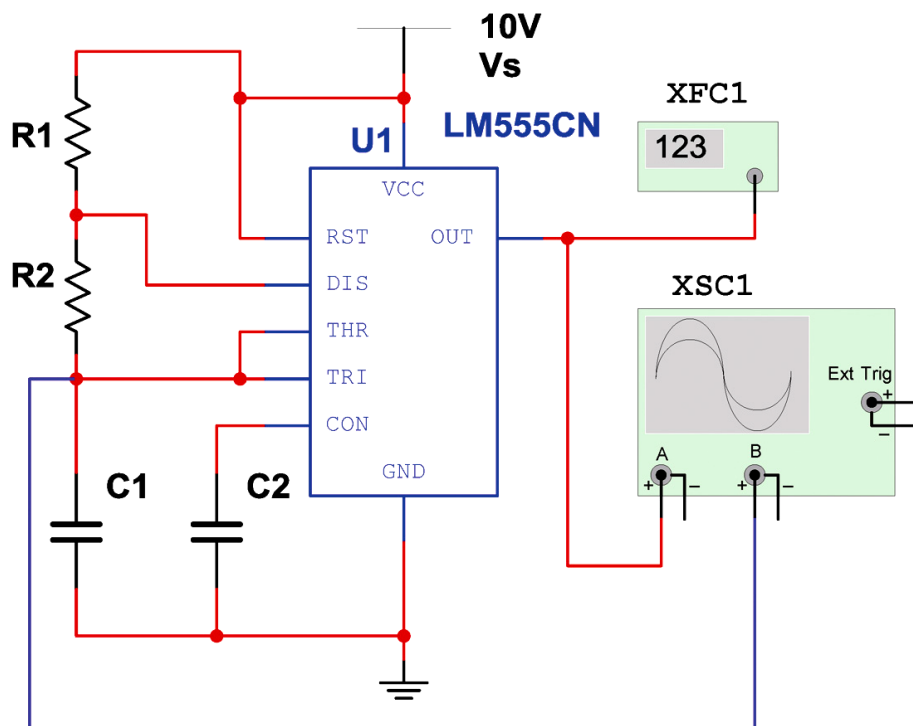


Рисунок 4.15 – Модель лічильника імпульсів

Складемо схему ШІМ з параметрами, що показані на рисунку 4.16. Для цього встановимо мультиметр ХММ1 в режим вимірювання постійної напруги. Перехідні процеси таймера показані на рисунку 4.17.

Знімемо за допомогою вольтметра залежності середнього значення напруги, тривалості імпульсів та шпаруватості  $q = T/\tau_1$  від положення змінного резистора R1. Тут  $T = \tau_1 + \tau_2$  – період слідування імпульсів. Результати занесемо в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань сигналів у таймері, що реалізує ШІМ

R1, %	10	20	40	60	80	100
$U_{cp}$ , В	9	8	6	4	2	0
$\tau_1$ , мкс	19	33	60	88	116	144
$\tau_2$ , мкс	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
q, в.о.	1,28	1,16	1,09	1,06	1,047	1,038

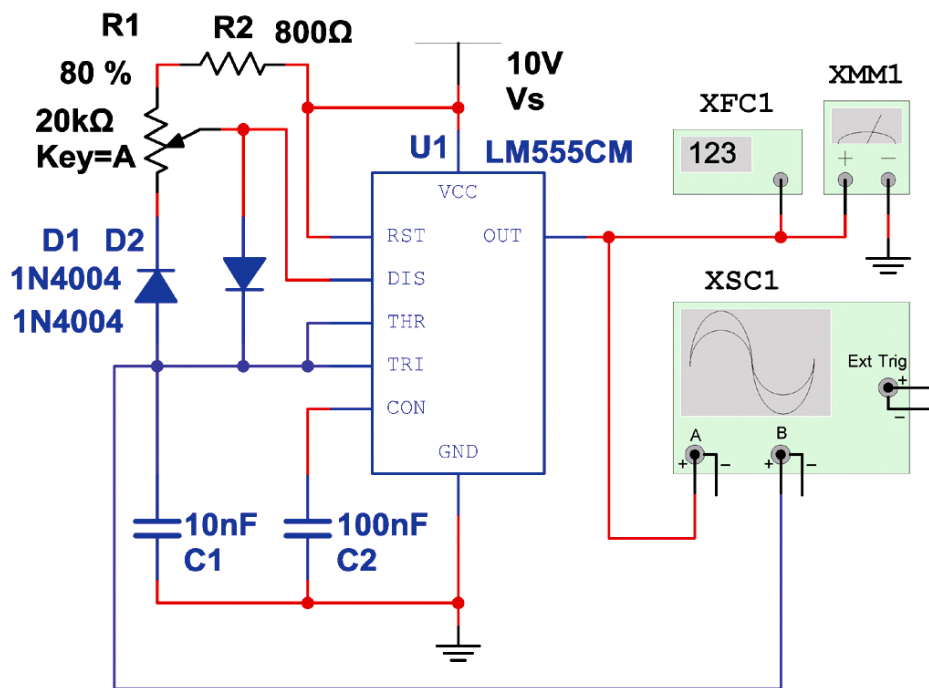


Рисунок 4.16 – Модель таймеру

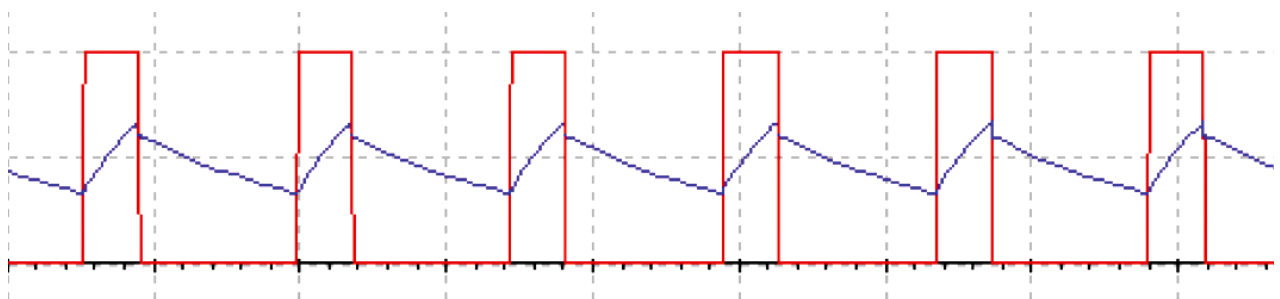


Рисунок 4.17 – Перехідні процеси в таймері

Таким чином, модель таймера з ШІМ повністю співпадає з його розрахунком, а часові діаграми показують ефективність регулювання напруги на виході мікросхеми шляхом зміни шпаруватості імпульсів змінним потенціометром R1.

#### 4.3.3 Модель імпульсного підвищуючого конвертера постійної напруги

Модель підвищуючого перетворювача напруги включає в себе триполосник зі змінною конфігурацією (транзисторний ключ), кероване джерело постійної напруги, що генерує сигнал, що пропорційний коефіцієнту шпаруватості імпульсів модулятора.

На рисунку 4.18 показано схему імпульсного перетворювача в програмі Mathlab. Вхідна дія моделі неперервна, що отримується сумуванням напруг постійного впливу величиною 0,5 і синусоїдної з амплітудою 0,025 і частотою 100 Гц з блоку Sine Wave.

У цій моделі неперервний сигнал перетворюється на дискретні значення з допомогою ШІМ з періодом  $T = 0,02$  мс. Транзисторний ключ інтерпретується блоками Ideal Switch. Обов'язковими в схемі є снаберні RC-ланки і внутрішній опір транзистора ( $r_k = 0,001$  Ом,  $R_{ch} = 100$  Ом,  $C_{ch} = 10^{-9}$  Ф). Вони вибрані так, щоб модель комутаційного електронного ключа наближалася до ідеального ключа.

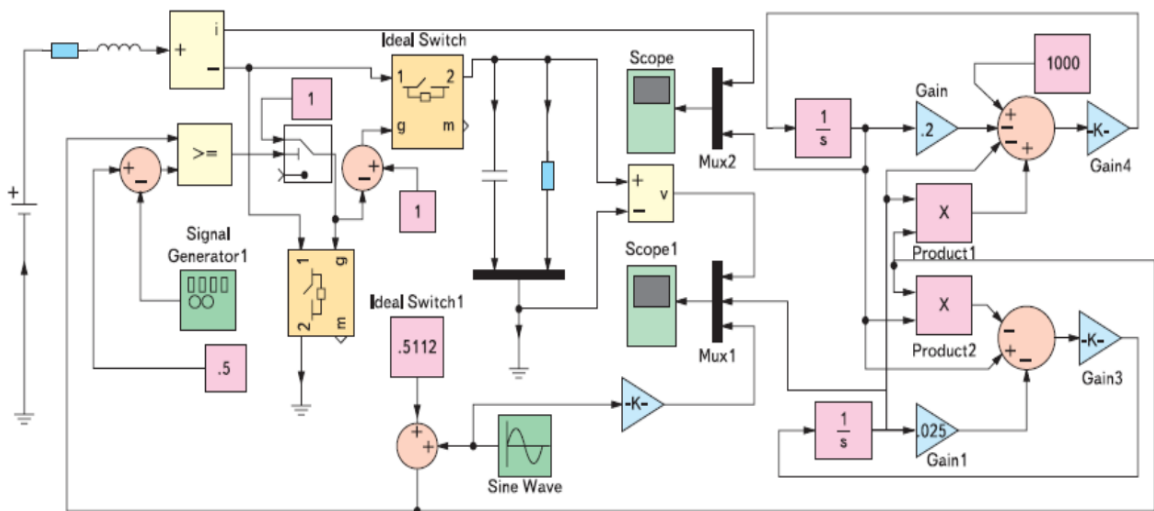


Рисунок 4.18 – Модель перетворювача в середовищі MATHLAB

До складу неперервної моделі входять блоки множення (Product) і інтегратори (1/S). Блоки підсилення Gain, Gain1, Gain2, Gain3 мають такі коефіцієнти:  $k = r = 0,2$ ;  $k_1 = 1/R_H = 0,025$ ,  $k_2 = 1/C = 70 \cdot 10^3$ ,  $k_3 = 1/L = 145$  відповідно.

На рисунку 4.19 показані графіки вихідних напруг, побудованих для дискретної (крива 1) та неперервної моделей (крива 2). З рисунку 4.18 видно, неперервна модель має менші пульсації напруги.

При моделюванні початкові умови є нульовими, а коефіцієнт заповнення імпульсів становить  $\gamma = 0,5$ .

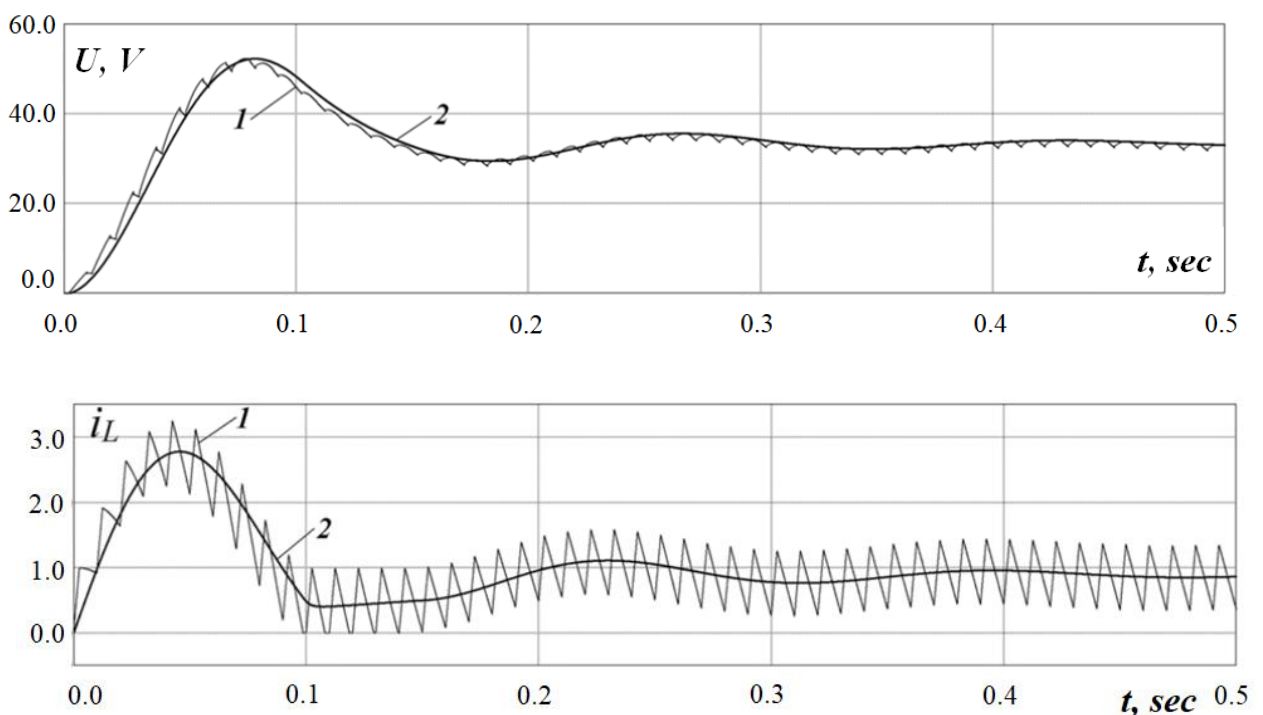


Рисунок 4.19 – Осцилограми напруг та струмів перетворювача

« У практично важливих випадках високої частоти комутації імпульсні перетворювачі напруги постійного струму для корисної складової вихідної напруги можна розглядати як безперервні системи, що описуються звичайними диференціальними рівняннями. Підвищувальні перетворювачі постійного струму описуються нелінійними рівняннями, коефіцієнти яких залежать від відносної тривалості імпульсів  $\gamma$ , що є для перетворювача «параметричним» керуючим впливом. За граничною неперервною моделлю

перетворювача в більшості випадків можна визначати корисну складову вихідної напруги з достатньою точністю » [7].

#### 4.3.4 Моделювання інвертора напруги

Розглянемо синтез математичної моделі автономного інвертора напруги і приведемо результати математичного моделювання в програмі MATLAB. Це перетворювач постійного струму в однофазний чи трифазний змінний, частота якого визначається системою керування, а величина і форма напруги залежить від характеру і параметру навантаження. На вході АІН підключене джерело ЕРС, напруга на виході вентиляційної групи прямокутна, а форма струму визначається характером навантаження. Напруга на навантаженні перемикається миттєво, тлму навантаження може бути авктивним чи активно-індуктивним.

Математична модель на рисунку 4.20 формує опорну пилкоподібну і керуючі напруги, в результаті яких формується ШІМ-сигнал. Напруга проміжного контуру АІН становить 200 В. Формування прямокутного імпульсу отримується обмеженням синусоїдного сигналу великої амплітуди з глтбиною модуляції  $\lambda$ :

$$u_{нес} = u_m \sin \omega t = 10000 \sin \omega_{нес} t. \quad (4.11)$$

Якщо  $u_{нес} > 1$ , то  $u_{прям} = 1$ , якщо  $u_{нес} < -1$ , то  $u_{прям} = -1$ , якщо виконується умова ( $-1 < u_{нес} < 1$ ), то  $u_{прям} = u_{нес}$ .

Тоді:

$$\frac{du_{или}}{dt} = u_{прям} \frac{4}{u_{нес}}. \quad (4.12)$$

Тут  $u_{кер} = \lambda \sin \omega t$ .

Глибина модуляції – це основна характеристика модуляції або відношення різниці між максимальним і мінімальним значеннями амплітуд модульованого сигналу до суми цих значень, що виражається у відсотках.

На рисунку 4.21 показано підсистему, що формує керуючий сигнал фази В.

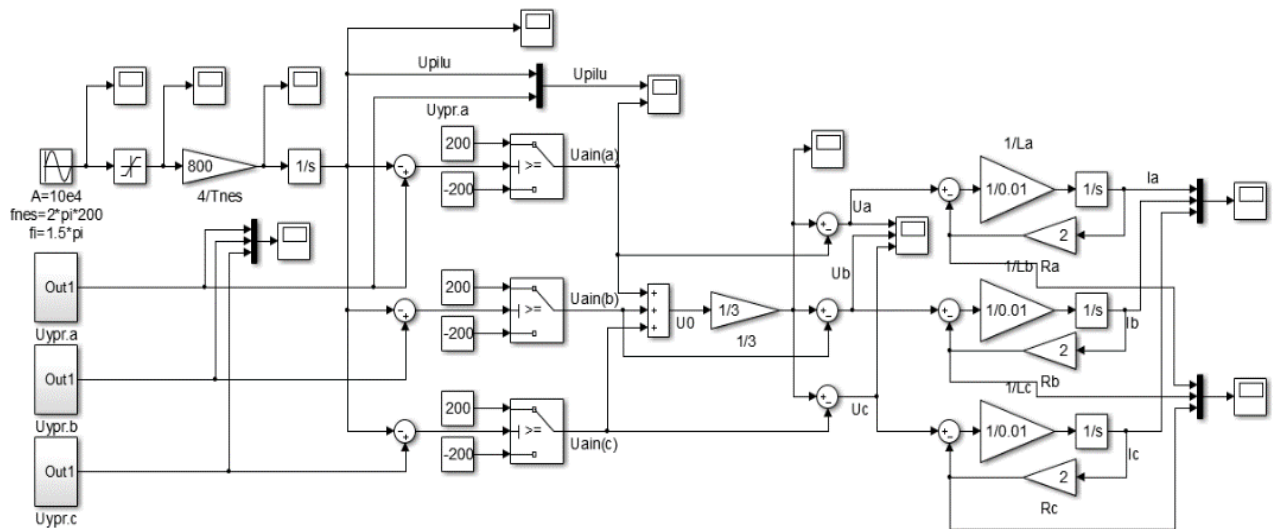


Рисунок 4.20 – Математична модель трьохфазного АІН

Якщо  $u_{кер} \geq u_{нули}$ , то  $u_{вих} = +200$  В. Якщо  $u_{кер} < u_{нули}$ , то  $u_{вих} = -200$  В.

Підключивши до виходу АІН активно-індуктивне навантаження, ШІМ сигнал перетворюється в синусоїдну вихідну напругу. Рівняння на навантаженні описується рівнянням:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{u_{вих} - i_a R_a}{L}. \quad (4.13)$$

Керований сигнал задамо у вигляді синусоїди:

$$u_{кер} = u_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (4.14)$$

На рисунках 4.22 та 4.23 показані осцилограми напруг інвертора та напруги на виході.

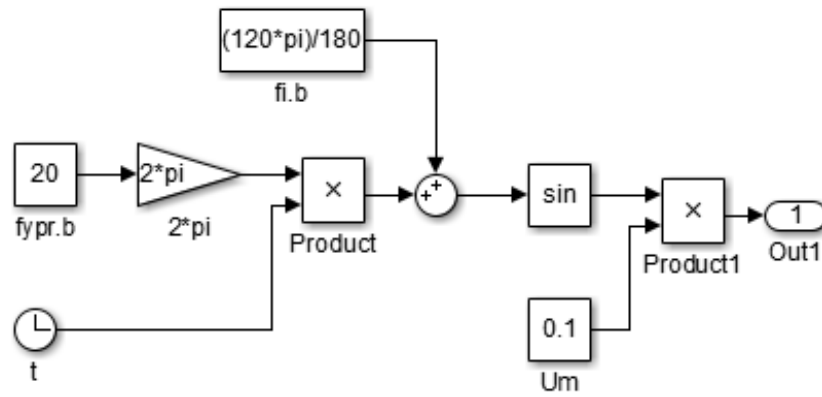


Рисунок 4.21 – Підсистема, що формує керуючий сигнал фази В

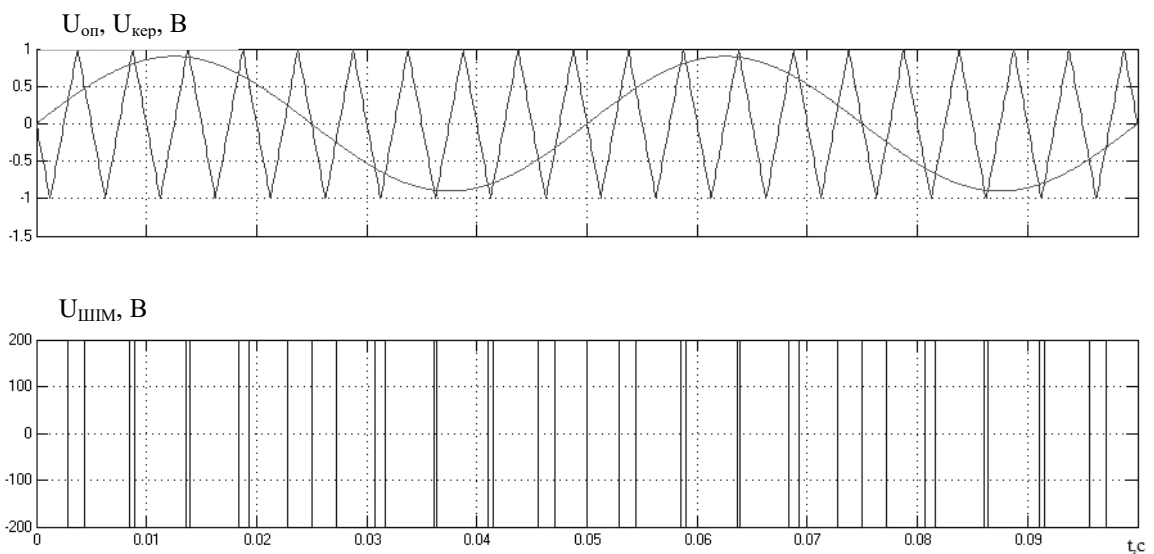


Рисунок 4.22 – Осцилограми напруг інвертора

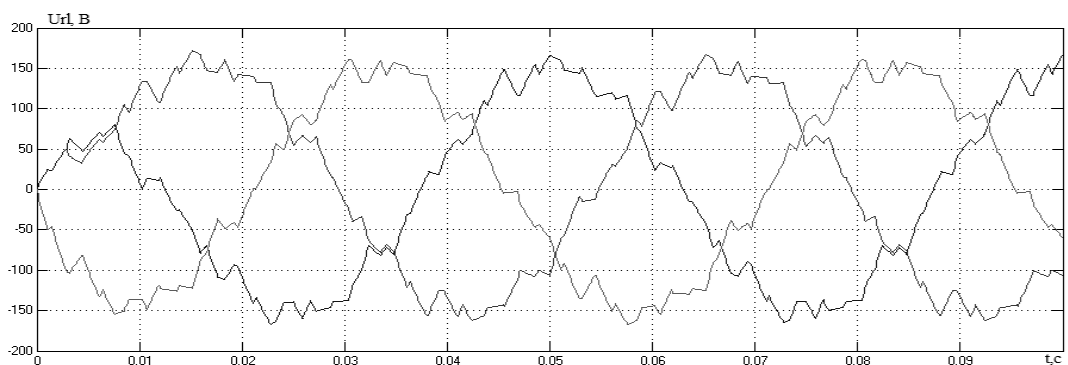


Рисунок 4.23 – Осцилограми напруг на навантаженні при частоті комутації

Із графіку (рис. 4.23) видно, що вихідний сигнал має гармонічні спотворення в своєму складі. Для того, щоб згладити сигнал необхідно підвищити частоту комутації електронних ключів.

#### 4.3.5 Розрахунок та моделювання імпульсного трансформатора

Імпульсні трансформатори знаходять широке застосування в системах силової електроніки, зокрема для формування імпульсів керування електронними ключами.

Розглянемо проектування імпульсного трансформатора з тороїдним сердечником і оцінимо на виході параметри LC-фільтру. Імпульсний трансформатор є підвищувальним: напруга первинної обмотки трансформатора  $U_1 = 100$  В, напруга вторинної обмотки  $U_2 = 10$  кВ, струм вторинної обмотки  $I_2 = 5$  мА, частота вхідних імпульсів  $f = 10$  кГц.

Для забезпечення нормального режиму роботи трансформатора в заступній електричній схемі необхідно, щоб індуктивність намагнічування була як найбільшою. Це можна отримати, вибравши сердечник із матеріалу з високою відносною магнітною проникністю  $\mu \geq 10^5$ , що дасть змогу у багато разів збільшити індуктивність намагнічування, практично не змінюючи індуктивність розсіювання трансформатора [1]. В якості магнітного сердечника був вибраний тороїдний сердечник типу ГМ501 ОЛ 155/135-10.

Розрахунок імпульсного тороїдного підвищувального трансформатора будемо проводити, використовуючи методики, описані в [2]. Результати розрахунку трансформатора приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри імпульсного трансформатора

Параметр	Величина
Число витків первинної (вторинної) обмотки	85 (13160) витків
Індуктивність намагнічування	0,135 Гн
Індуктивність первинної (вторинної) обмотки	135 мкГн (3,3 Гн)

На рисунках 4.24 та 4.25 показано тривимірні моделі первинної та вторинної обмоток.

Для перевірки правильності розрахунку параметрів трансформатора в MATLAB/Simulink була зібрана схема (рис. 4.25) для моделювання необхідних режимів роботи.

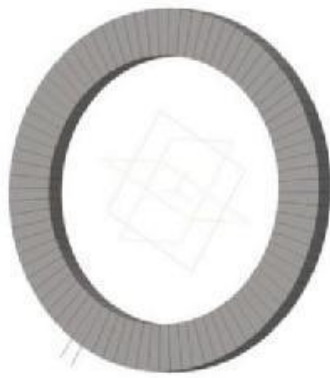


Рисунок 4.24 – Тривимірна модель первинної обмотки



Рисунок 4.25 – Тривимірна модель вторинної обмотки

Схема складається з двох ідеальних джерел живлення постійної напруги, двох транзисторів, що формують на первинній обмотці трансформатора прямокутні імпульси і задаючого генератора сигналу керування транзисторами і власне імпульсний трансформатор.

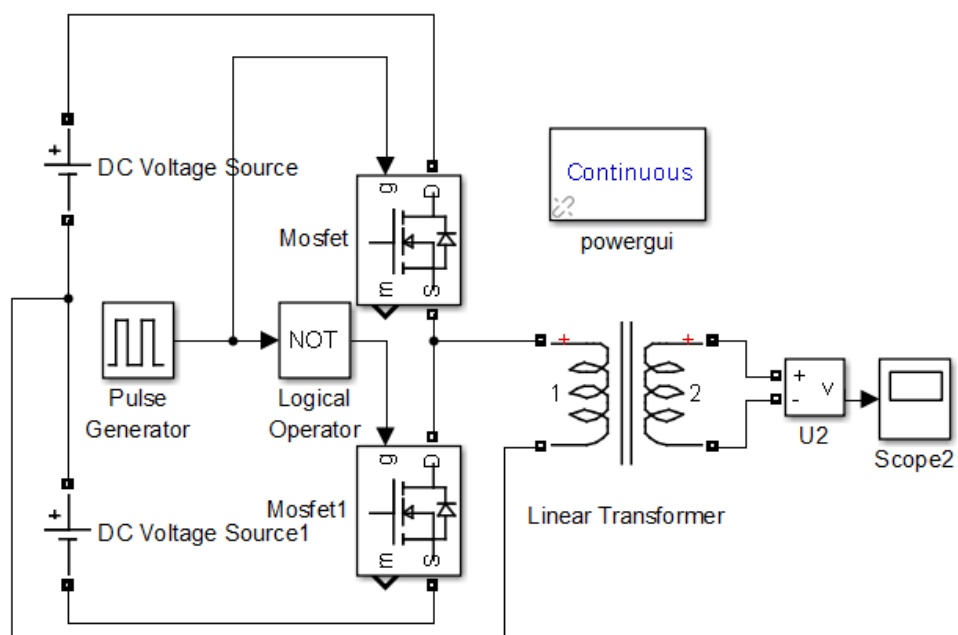


Рисунок 4.26 – Тестова схема перевірки режимів роботи трансформатора

В схемі на рисунку 4.26 на вхід імпульсного трансформатора подається змінний імпульсний сигнал з частотою 10 кГц і амплітудою  $U_1 = 100$  В, що формується двома транзисторними ключами, що працюють в ключовому

режимі. Напряга на вторинній обмотці трансформатора повторює вхідну напругу, а амплітуда вторинної обмотки становить  $U_2 = 10$  кВ, що відповідає заданій амплітуді у вихідних даних. На рисунку 4.27 показано часові діаграми напруг імпульсного трансформатора.

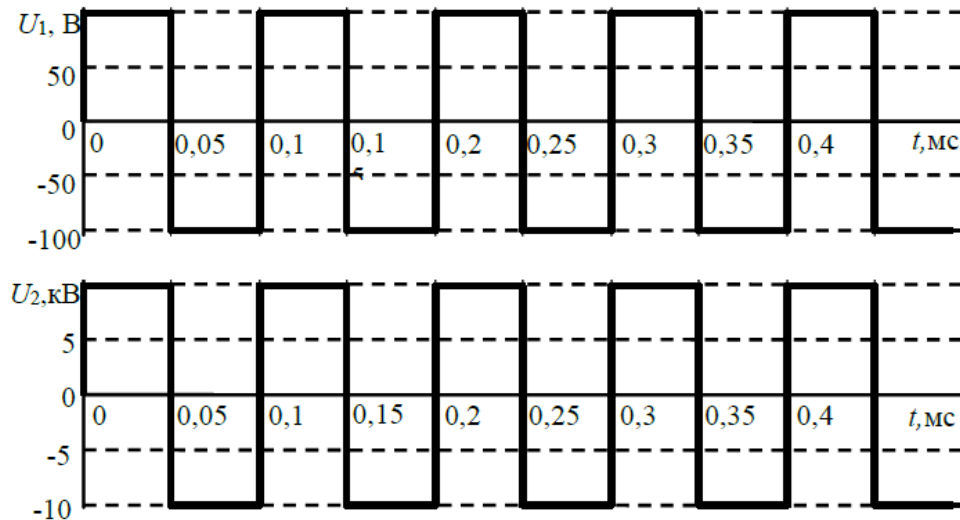


Рисунок 4.27 – Результати моделювання роботи трансформатора при імпульсному вхідному сигналі

Сформовані транзисторними ключами імпульси подаються на трансформатор і підсилюються до амплітуди 10 кВ, а до вторинної обмотки під'єднуються низькочастотний LC-фільтр (рис. 4.28).

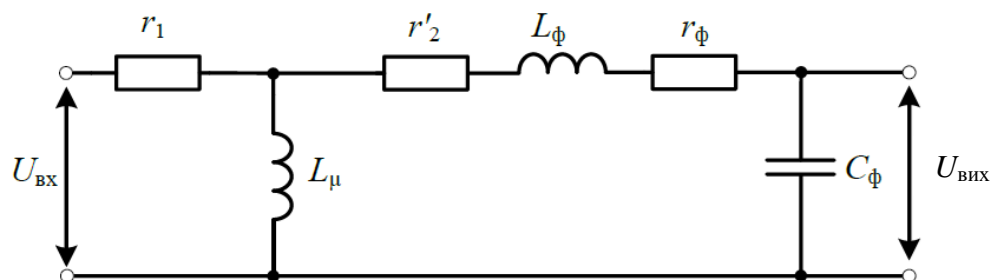


Рисунок 4.28 – Спрощена схема заміщення трансформатора і LC-фільтра

Передаточна функція, наведена на рисунку 4.27 визначається з алгебраїчного виразу [4]:

$$W(p) = \frac{L_{\mu} p}{(L_{\mu} p + R_1) \cdot (C_{\phi} L_{\phi} p^2 + C_{\phi} (r_2' + r_{\phi}) p + 1)}. \quad (4.15)$$

На рисунку 4.29, а представлена логарифмічна АЧХ, отримана із виразу (4.7) при відомих параметрах трансформатора. Отримані на основі аналізу ЛАЧХ ємність та індуктивність LC-фільтра були вибрані на рівні  $C_{\phi} = 1$  нФ,  $L_{\phi} = 1$  Гн. Кількість витків фільтра можна розрахувати використовуючи наближену формулу з урахуванням вибраного типу сердечника:

$$N = \sqrt{\frac{L_{\phi}}{A_L}} = \sqrt{\frac{10^{-3}}{60 \cdot 10^{-6}}} = 4 \text{ витки}. \quad (4.8)$$

Тут  $A_L$  – індуктивний фактор (коефіцієнт індуктивності) Гн. Для обраного типу сердечника  $A_L = 60 \dots 70$  мкГн.

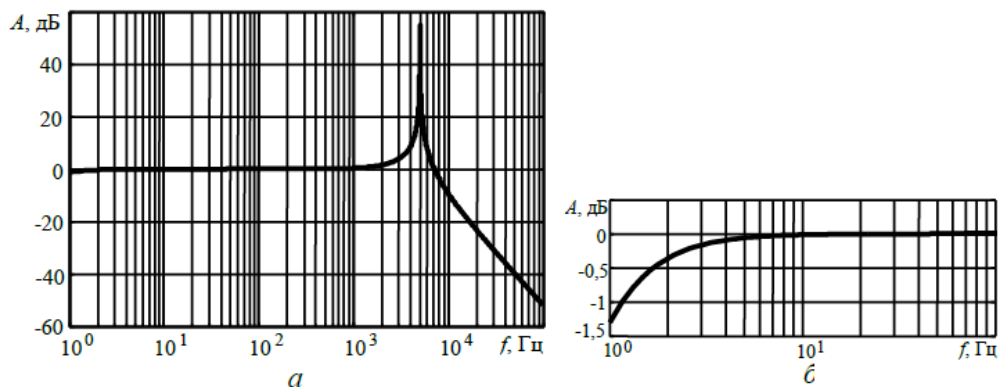


Рисунок 4.29 – ЛАЧХ, отримана по передавальній  $\phi_{\dots}$  (4.7) (а),  
низькочастотний участок ЛАЧХ (б)

Таким чином, при проектуванні імпульсного трансформатора на тороїдному сердечнику були досягнуті потрібні параметри, а результати розрахунків перевірені моделюванням на тестовій схемі. В результаті застосування методу оцінки параметрів LC-фільтра вдалося спроектувати компактний високовольтний фільтр.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано огляд вітчизняної та зарубіжної літератури в області побудови математичних моделей та дослідження перехідних процесів в електротехнічних та електронних пристроях. Сучасні програмні пакети моделювання дають змогу дослідити динамічні процеси в пристроях електроніки та електротехніки. Це дасть змогу автоматизувати усі етапи проектування таких пристроїв, а також дослідити нестандартні режими роботи, які можуть виникнути на практиці і які важко реалізувати з допомогою натурного експерименту.

2. Проаналізовано та вибрано оптимальні методи та засоби дослідження перехідних процесів в пристроях силової електроніки та електротехніки. Сучасні комп'ютерні експерименти дають змогу вдосконалити технологію аналізу процесів з отриманням достовірних результатів.

3. З допомогою комп'ютерних програм змодельовано перехідні процеси в системах керування, електротехнічних та електронних пристроях. Це показано на прикладі моделювання сигналів, що використовуються в системах керування та основних електронних та електротехнічних пристроях. Результати моделювання підтверджують теоретичні положення, а також є адекватними з точки зору їх верифікації в області електротехніки та електроніки.

4. Обґрунтовано адекватність математичних моделей шляхом верифікації результатів моделювання, тобто відповідність комп'ютерного експерименту з фізичним. Моделювання дає змогу провести аналіз та дослідження й отримати більш якісну картину процесів й електричні характеристики досліджуваних пристроїв.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dominik Kasprowicz, Grzegorz Kasprowicz. Generative Modeling of Semiconductor Devices for Statistical Circuit Simulation, 2024, 13(11), p.113-122.
2. Electronics tutorials. URL: [https://www.Electronics-tutorials.ws/power/switch mode – power-supply.html](https://www.Electronics-tutorials.ws/power/switch-mode-power-supply.html). (дата звернення 26.09.2025 р.).
3. Electronic keys. URL: <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/educ/2024>. (дата звернення 30.10.2025 р.).
4. Fiore James. Semiconductor Devices: Theory and application. 2E. Version 2.0.8, 24.10.2024, 485 p.
5. Samira Shamsir. Semiconductor Device Modeling and Simulation for Electronic Circuit Design. April 2020, p.176-192.
6. Sanjay Kumar Roy, Manwinder Singh, Kamal Kumar Sharma and Brahmadeo Prasad Singh. Mathematical Modelling of Semiconductor Devices and Circuits: A Review. EasyChair Preprint, № 2954, March 14, 2020, p.71-82.
7. Shynkarenko N., Maikut S., Tsybulskyi L., Kuzmichev A. Physical-Topological Modeling of Electronic Devices with Induction Heating of Particle Emitters. April 2022. Microsystems Electronics and Acoustics, 27(1), p.263-277.
8. Spellman Frank R. The Science of Electric Vehicles: Concepts and Applications CRC Press, 2023, 233 p.
9. Бондаренко І. М. Моделювання в електроніці. Національний університет радіоелектроніки. Харків : ХНУРЕ, 2020, 163 с.
10. Денисюк С. П., Дерев'янку Д. Г., Белоха Г. С. Силова електроніка в системах електропостачання. Навчальний посібник. Електронне мережне навчальне видання. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського 2022, 130 с.
11. Лишук В. В., Євсюк М. М., Селепина Й. Р., Копилець Н. Ю. Математичні моделі пристроїв перетворювальної техніки. «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». №39, 2020, с.55-59.
12. Перегудов С. М. Моделювання пристроїв МСТ: Комп'ютерний практикум. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2021, 78 с.

**International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students**

об'єктно-орієнтовані технології

ЕОМ

КОНТРОЛЕР

ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ

МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА

# **ACTUAL PROBLEMS OF AUTOMATION AND CONTROL**

conference materials

АСУ

АСУ ТП

ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ЕОМ

Інформаційні системи

**Issue № 13**

**Lutsk - 2025**

**ОРГАНІЗАТОРИ**

**ORGANIZERS**

Луцький національний технічний  
університет, Луцьк (Україна)

Lutsk National Technical University,  
Lutsk (Ukraine)

Вінницький національний технічний  
університет, Вінниця (Україна)

Vinnitsia National Technical University,  
Vinnitsia (Ukraine)

Національний університет «Львівська  
Політехніка» (Україна)

Lviv Polytechnic National University  
(Ukraine)

Тернопільський національний  
технічний університет імені Івана  
Пулюя, Тернопіль (Україна)

Ivan Puluj Ternopil National Technical  
University, Ternopil (Ukraine)

Люблінська Політехніка, Люблін  
(Польща)

Lublin University of Technology, Lublin  
(Poland)

Політехнічний інститут Браганса,  
Браганса (Португалія)

Bragança Polytechnic Institute (Portugal)

Університет Глїндвор, Рексем  
(Великобританія)

Glyndwyr University, Wrexham (United  
Kingdom)

AGH Університет науки і  
техніки імені Станіслава Сташица,  
Краків (Польща)

AGH University of Science and  
Technology, Krakow (Poland)

Каунаський університет технологій  
(Литва)

Kaunas University of Technology  
(Lithuania)

## International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

### ГОЛОВА ПРОГРАМНОГО КОМІТЕТУ

**I. ВАХОВИЧ** – д.е.н., професор, ректор Луцького національного технічного університету (Україна)

### ЗАСТУПНИК ГОЛОВИ

**О. ПОВСТЯНОЙ** – д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

### ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

**О. БІСІКАЛО** – д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій Вінницького національного технічного університету (Україна)

**О. ГОЛОТЕНКО** – к.т.н., доцент, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Україна)

**Б. ПАЛЬЧЕВСЬКИЙ** – д.т.н., професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету (Україна)

**Ю. ВАШКУРАК** – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету "Львівська Політехніка" (Україна)

**PAWEL KOMADA** – доктор інженерії, заступник директора інституту електроніки та інформаційних технологій Люблінської Політехніки (Польща)

**LUÍS FRÖLÉN RIBEIRO** – координатор професор кафедри механічних технологій Політехнічного інституту Браганса (Португалія)

**PAULO LEITAO** – координатор професор Політехнічного інституту Браганса; Координатор Центру дослідження цифрових технологій та інтелектуальної робототехніки (CeDRI) Політехнічного інституту Браганса (Португалія)

**АЛІСОН МАКМІЛЛАН** – професор, стратег і лідер у галузі досліджень і технологій, що спеціалізується на обчислювальних та математичних методах для інженерії (Великобританія)

**МІХАЛ БЕМБЕНЕК** – професор кафедри виробничих систем факультету машинобудування та робототехніки (Польща)

**Joris VĚŽYS** – професор кафедри машинобудування, Каунаський університет технологій (Литва)

### CHAIRMAN OF THE PROGRAM COMMITTEE

**I. VAKHOVYCH** – Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector of Lutsk National Technical University (Ukraine)

### DEPUTY CHAIRMAN

**O. POVSTIANOI** – D.Sn, Professor, Head of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

### PROGRAM COMMITTEE

**O. BISIKALO** – D.Sn, Professor, Head of the Department of Automation and Intelligent Information Technologies at Vinnytsia National Technical University (Ukraine)

**O. HOLOTENKO** – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Ivan Puluj National Technical University of Ternopil (Ukraine)

**B. PALCHEVSKYI** – D.Sn, Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies of Lutsk National Technical University (Ukraine)

**Y. VASHKURAK** – PhD, Associate Professor, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lviv Polytechnic National University (Ukraine)

**PAWEL KOMADA** – Doctor of Engineering, Deputy Director of the Institute of Electronics and Information Technology of Lublin University of Technology (Poland)

**LUÍS FRÖLÉN RIBEIRO** – Coordinator Professor of Mechanical Technology Department of Bragança Polytechnic Institute (Portugal)

**PAULO LEITAO** – Coordinator Professor at Polytechnic Institute of Bragança; Coordinator of the Research Centre in Digitalization and Intelligent Robotics (CeDRI) of Bragança Polytechnic Institute (Portugal)

**ALISON MACMILLAN** – Professor, strategist, and leader in research and technology specializing in computational and mathematical methods for engineering (United Kingdom)

**MICHAL BEMBENEK** – Professor, Department of Production Systems, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics (Poland)

**JORIS VĚŽYS** – Professor, Department of Mechanical Engineering, Kaunas University of Technology (Lithuania)

**ГОЛОВА ОРГАНІЗАЦІЙНОГО  
КОМІТЕТУ**

**Л. ГУМЕНЮК** – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

**ЗАСТУПНИК ГОЛОВИ**

**Р. ГРУДЕЦЬКИЙ** – проректор з науково-педагогічної роботи та цифрової трансформації Луцького національного технічного університету

**ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ**

**І. КОНДІУС** – к.е.н., доцент, декан факультету комп'ютерних та інформаційних технологій Луцького національного технічного університету

**П. ГУМЕНЮК** – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

**О. РЕШЕТИЛО** – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

**Ю. ЛАПЧЕНКО** – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

**Л. МАРКІНА** – ст. викладач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

**CHAIRMAN OF THE ORGANIZING  
COMMITTEE**

**L. GUMENIUK** - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

**DEPUTY CHAIRMAN**

**R. GRUDETSKYI** – Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work and Digital Transformation of Lutsk National Technical University

**ORGANIZING COMMITTEE**

**I. KONDIUS** - Ph.D., Associate Professor, Dean of the Faculty of Computer and Information Technology of Lutsk National Technical University

**P. HUMENIUK** - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

**O. RESHETYLO** - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

**Y. LAPCHENKO** - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

**L. MARKINA** – Senior Lecturer, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lutsk National Technical University

**ЗМІСТ**

**СЕКЦІЯ «АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА»**

<b>Алексюк О. М.</b> Моделювання процесів створення пористих порошкових матеріалів на основі відходів промислового виробництва з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій .....	8
<b>Ваць Д. М.</b> Моделювання ущільнення порошкових фільтруючих елементів при радіально-ізостатичному пресуванні .....	12
<b>Маркіна Л. М., Вісин А. О.</b> Концепція автоматизованої системи керування роботизованим комплексом гнуття листового металу .....	17
<b>Прус Д. В.</b> Модельні дослідження формування засипки порошоків з урахуванням властивості матеріалу на базі моделей випадкової упаковки .....	20
<b>Ткачук В. М., Приходько О. С., Фурс Т. В.</b> Компенсація інструментальних спотворень при відборі кварцових резонаторів із використанням методів статистичного та інтелектуального аналізу даних .....	24
<b>Хвищун М.В., Ключук М.С., Хвищун Д.М., Панасюк І.В., Драницький Б.О.</b> Створення мобільного застосунку для віддаленого керування розумним будинком .....	27
<b>Цьома О. В., Федік Л. Ю., Смолянкін О. О.</b> Автоматизація технологічного процесу виробництва сульфоаммофосу .....	32
<b>Шабанов Г. В., Андрєєв Ю. М.</b> Практична реалізація програмного комплексу для розрахунку і моделювання роботехнічного комплексу .....	38

**СЕКЦІЯ «АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ У СФЕРІ ОСВІТИ, НАУКИ ТА ВИРОБНИЦТВА»**

<b>Голіков Т. Ю.</b> Автоматизована система керування технологічним процесом пошиву сорочок .....	42
<b>Домашенко А. О.</b> Автоматизована система управління вступною кампанією закладу фахової передвищої освіти .....	46
<b>Закревський В. Л., Приходько О. С.</b> Розробка адаптивного алгоритму керування БПЛА на основі навчання з підкріпленням .....	50
<b>Нежурін В. І., Куваєв В. Ю., Самойленко Ю. О.</b> Дослідження розподілення енергії в робочому просторі ванни електропечі РПЗ-48(63) при виплавці марганцевих феросплавів шлаковим процесом .....	53
<b>Решетило О. М., Лисенко В. Ю.</b> Аналіз технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму як об'єкта керування .....	57
<b>Решетило О. М., Соботович М. І.</b> Аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів як об'єкта керування .....	64
<b>Савчук М. В., Сацик В. О.</b> Автоматизована система керування технологічним процесом виготовлення круасанів .....	69
<b>Стьопкін В. В., Коба В. В., Ваколюк А. О.</b> Розробка мікроконтролерної системи керування асинхронним двигуном з фазним ротором на базі електромеханічної станції з контролером НТ-51 .....	73
<b>Тимченко С. В.</b> Розробка Web-орієнтованої системи управління розкладом навчальних занять на базі Next.js та Prisma ORM .....	78

**СЕКЦІЯ «МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ»**

<b>Крупський О. В., Приходько О. С., Вавринюк К. В.</b> Розробка інструменту для генерації анотованих датасетів для навчання AI-агентів .....	83
<b>Лишук В., Крутій П., Антонюк В.</b> Найпростіша математична модель однофазного випростувача .....	86
<b>Міщенко Д. О.</b> Оцінка соціально-економічних переваг впровадження систем управління на базі DC-мікромереж у сільських населених пунктах з альтернативними джерелами енергії .....	89
<b>Нечипорук Р. О.</b> Система інтелектуальної діагностики стану електроенергетичного обладнання на основі багатосенсорних даних та гібридних моделей штучного інтелекту .....	92
<b>Стьопкін В. В., Білий В. В., Морозов М. В.</b> Розробка математичної моделі електропривода постійного струму зі спостерігачем стану та пружними ланками .....	94
<b>Юрченко Ю. В., Заковоротний О. Ю.</b> Підготовка та аналіз джерел фінансових даних, як початковий етап стохастичного моделювання часових рядів методами машинного навчання .....	99

**СЕКЦІЯ «МЕХАТРОНІКА ТА РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ»**

<b>Гончар А. В., Охримович М. Б.</b> Вплив технологічних факторів на кінематичну точність циліндричних зубчатих коліс .....	104
<b>Павлович А. О.</b> Удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв та особливості їх проектування .....	108
<b>Слабкий А. В., Котик С. І.</b> Аналіз конструкцій та перспективи модернізації універсальних випробувальних машин .....	114

**СЕКЦІЯ «АВТОМАТИКА В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ»**

<b>Герман Б. А., Бартошик О. В., Цюпящук Я. В.</b> Дистанційне керування сигналізацією за допомогою модуля GSM .....	117
<b>Євсюк М. М., Ковалюк Н. В.</b> Розроблення мікроконтролерного терміналу для автоматизованого керування системами вуличного освітлення .....	121
<b>Заблоцький В. Ю., Гикавий С. В.</b> Розроблення системи відеоспостереження промислового підприємства .....	124
<b>Лишук В., Денисюк К.</b> Застосування принципів спектрального ущільнення для збільшення пропускної здатності оптоволокна .....	131
<b>Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О.</b> Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання .....	134
<b>Хвищун М. В., Кречик А. П., Хвищун Д. М., Рубльов В. В.</b> Розроблення бездротового комунікаційного пристрою на основі STM32 та LoRa .....	137
<b>Хвищун М. В., Сидорук В. В., Хвищун Д. М., Бернасюк М. В.</b> Розроблення інтелектуальної системи керування домашнім опаленням з використанням Raspberry Pi 4 .....	142
<b>Шумік А. О., Шибенюк Р. А., Захарчук М. Д., Хвищун М. В.</b> Система розпізнавання голосових команд на базі Raspberry Pi .....	148
<b>Якимчук Н. М., Карпінський Н. К.</b> Організація UART-комунікації в STM32 для системи комутації кінцевих пристроїв .....	152
<b>Якимчук Н. М., Лишук В. В.</b> Методологія інтегрованого моделювання та спільного проектування в сучасних електронних системах .....	156

УДК 621.313

Лишук В., Крутий П., Антонюк В.

Луцький національний технічний університет

v.lyshuk@lntu.edu.ua

## НАЙПРОСТІША МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО ВИПРОСТУВАЧА

У статті запропоновано математичну модель однофазного мостового випрямляча, рівняння якого записані у вигляді комутаційних функцій. Показано, що така модель є найбільш ефективною для аналізу різноманітних режимів роботи. Розв'язок комутаційних функцій реалізується із застосуванням сучасних методів з допомогою комп'ютерної техніки.

*Ключові слова:* математична модель, однофазний випрямляч, комутаційні функції.

**Lyshuk V., Krutyi P., Antoniuk V. The simplest mathematical model of a single-phase rectifier.**

The article proposes a mathematical model of a single-phase bridge rectifier, the equations of which are written in the form of switching functions. It is shown that such a model is the most effective for the analysis of various operating modes. The solution of switching functions is implemented using modern methods with the help of computer technology.

*Keywords:* mathematical model, single-phase rectifier, switching functions.

**Постановка проблеми.** Некеровані випрямлячі відносяться до перетворювачів електричної енергії змінного струму в електричну енергію постійного струму. В даний час вони виконуються в основному на силових напівпровідникових вентилях і знаходять широке застосування в якості вторинного джерела живлення.

На сьогодні задача випрямлення синусоїдного струму дуже часто зустрічається на практиці, зокрема в електротехніці, електроніці, телекомунікаціях, зокрема при створенні резервних джерел живлення, бо значна частина електроприймачів за своїм принципом роботи вимагає постійного струму. Важливим завданням при побудові моделі є врахування показників якості (пульсації, коливання) вихідних параметрів, зокрема струмів та напруг [3].

Математичне моделювання є потужним інструментом при дослідженні та аналізі електротехнічних та електронних пристроїв. Рівняння, які є основою побудови таких моделей, розв'язуються відповідними числовими методами з допомогою персональних комп'ютерів. У роботі ми скористаємось простішою методикою, а саме комутаційними функціями.

**Основна частина.** Розглянемо особливості математичного моделювання найпростішого однофазного мостового випрямляча. Силове коло однофазного випрямляча, що працює на навантаження  $R_n$  приведено на рисунку 1. Змінна напруга  $u$  з вторинної обмотки трансформатора надходить у діагональ мостового однофазного випрямляча, представленого у вигляді чотирьох ідеальних ключів, побудованих на діодах  $VD1...VD4$ .

З появою позитивної півхвилі напруги  $u$  за рахунок природної комутації відкриті ключі  $VD2...VD4$ . Струм у цьому випадку протікає від вузла через ключ  $VD4$  – навантаження ( $L, R_n$ ) – ключ  $VD2$  – на другу клему  $x$  вторинної обмотки трансформатора. З появою негативної півхвилі напруги  $u$  на виході трансформатора відкриваються ключі  $VD1$  та  $VD3$ . Напрямок струму  $i_d$  при цьому не змінюється.

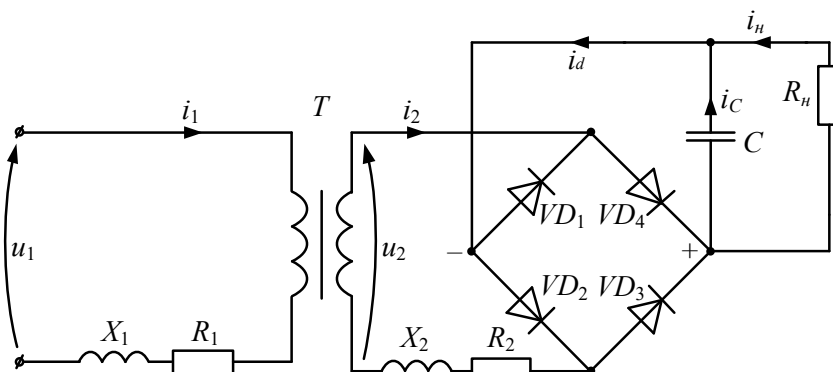


Рисунок 1 – Електрична схема випрямляча

Діоди змодельовано ідеальними ключами [2], що змінюватиме структуру електричного кола. При цьому для кожної окремої комбінації відкритих і закритих діодів необхідно записати свою систему алгебричних рівнянь. Це дещо створює складності при аналізі роботи таких пристроїв, але завжди можна звести множину систем таких рівнянь до однієї системи, вівши додаткові логічні змінні.

При природній комутації вентилів умовою для відкриття ідеального ключового елемента (ІКЕ) є сигнальні функції, значення яких визначаються фазою напруги вторинної обмотки трансформатора. Так, для ідеальних ключових елементів VD1 та VD3 комутаційну функцію можна записати у вигляді:

$$f_1(\theta) = 0,5\text{sign}(\sin(\theta)+1), \quad (1)$$

а для ІКЕ VD2 та VD4:

$$f_2(\theta) = 0,5\text{sign}(\sin(\theta)-1). \quad (2)$$

Напруга на вторинній обмотці трансформатора описується рівнянням

$$u_2(t) = U_m \cos(\omega t), \quad (3)$$

де  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  - частота первинної мережі,  $\theta = \omega t$ .

Значення напруги  $U_d = U_c$  можна у вигляді

$$U_d = (f_1(\theta) + f_2(\theta)) u_2(t). \quad (4)$$

Струм  $i_d$  визначається значенням струму, що протікає по вторинній обмотці трансформатора і параметрами паралельно ввімкнених резистора  $R$  елементів та ємності  $C$ . Струм, що протікає по ємнісному елементу, випереджає прикладену до нього напругу за фазою на кут  $\pi/2$ . Для інтервалу часу, протягом якого заряджається ємність, значення струму вторинної обмотки трансформатора можна представити як

$$I_n = i_d + i_c, \quad (5)$$

де  $i_c = \omega C U_d \cos(\omega t + \pi/2 - \varphi) \cdot f_3(\theta_1)$ , а  $i_d = (U_m/R) \cdot [\cos(\omega t + \varphi) \cdot (f_3(\theta_1) + f_4(\theta_1))]$ .

Значення комутаційних функцій для струмів  $f_3(\theta_1)$  і  $f_4(\theta_1)$  даного інтервалу часу, з урахуванням впливу параметрів схеми, можна записати у вигляді:

$$f_3(\theta_1) = 0,5 \cdot (\text{sign}(\sin(\omega t + \varphi) + 1)); \quad f_4(\theta_1) = 0,5 \cdot (\text{sign}(\sin(\omega t + \varphi) - 1)). \quad (6)$$

Значення постійної складової  $i_0$  струму  $i_d$  визначають як

$$i_0 = \alpha_0 \cdot U_m / R, \quad (7)$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт постійної складової ряду Фур'є можна подати у вигляді співвідношення (8):

$$\alpha_0 = (\sin \varphi + \varphi \cos \varphi) / [\pi(1 - \cos \varphi)]. \quad (8)$$

Таким чином, алгоритм програми для моделювання некерованого випрямляча можна подати у вигляді схеми, зображеної на рисунку 2.

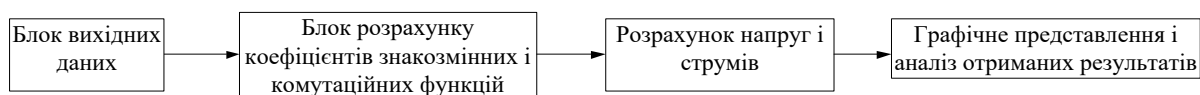


Рисунок 2 – Алгоритм програми

При математичному моделюванні, як електричних перетворювачів користуються системою відносних одиниць [1, 2]. Тому вихідні дані в блоку вихідних даних записують у відносних одиницях. Вихідними даними для математичної моделі некерованого випростувача в цьому випадку

є значення частоти обертання узагальненого вектора напруги живлення  $\omega$  у відносних одиницях дорівнює 1, значення ємності і опору навантаження  $R_n$ .

Приклад математичної моделі однофазного мостового випростувача, реалізованої у програмі MATHCAD наводиться нижче.

Вихідні дані:  $\omega = 1$ ,  $C = 1.5$ ,  $R = 1.5$ ;  $i(t) = \sin(t)$ ;  $u(t) = 10\sin(t)$ .

1. Визначення комутаційних функцій для відкриття ІКЕ

$f_1(t) = 0,5\text{sign}(i(t)+1)$ ,  $f_2(t) = 0,5\text{sign}(i(t)-1)$

$t = 0, 0.01 \dots 1000$

На рисунку 3 показано графіки комутаційних функцій.

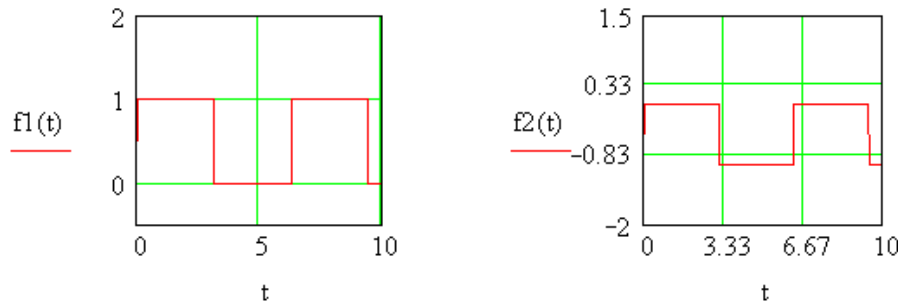


Рисунок 3 – Графіки комутаційних функцій

$$U_d(t) := [f_1(t) + f_2(t)] \cdot u_2(t),$$

де  $f_1(t)$  та  $f_2(t)$  – комутаційні функції, що визначають відповідно стан діодів VD1, VD3 і VD2, VD4, а  $U_d(t)$  – напруга на виході випростувача.

Комутаційні функції  $f_3(t)$  та  $f_4(t)$  визначають реакцію навантаження та її вплив на струми  $i_d$  та  $i_c$ . У даному прикладі не розрахована і не представлена часова залежність напруги  $U_c(t)$  на ємності C. На рисунку 4 представлені часові залежності струмів і напруги  $U_d(t)$ , отримані з допомогою розглядуваної в якості прикладу моделі.

$U_m = 10.0$ ;  $\varphi = \text{atan}(\omega CR)$ ;  $\varphi = 1.153$ ;  $i_1(t) = \sin(t - \varphi)$ ;  $f_3(t) = 0,5\text{sign}(i_1(t)+1)$ ;  $f_4(t) = 0,5\text{sign}(i_1(t)-1)$ ;

$i_c = \omega C U_d \cos(\omega t + \pi/2 - \varphi) \cdot f_3(t)$ ;  $\alpha_0 = 0.239$ ;  $i_0 = 1.59$ ;  $i_d(t) = (10/R) \cdot \sin(\omega t - \varphi) \cdot (f_3(t) + f_4(t))$ ;

$i_n(t) = i_d(t) + i_0 + i_c(t)$

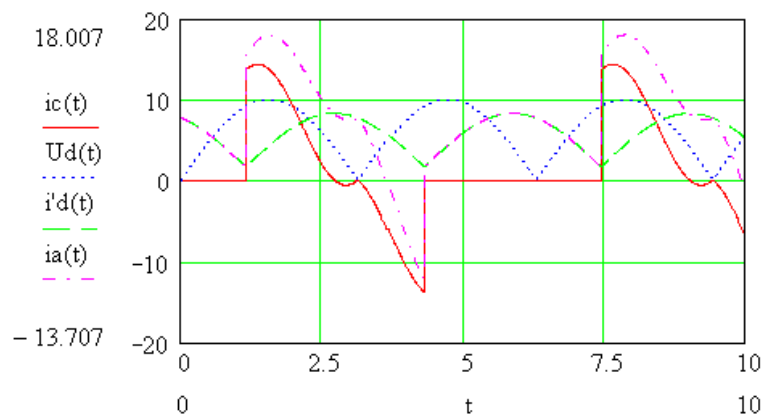


Рисунок 4 – Залежності струмів і напруги  $U_d(t)$

**Висновки.** Аналіз залежності струму  $i_n(t)$  дозволяє зробити висновок, що некерований випрямляч є нелінійним приймачем електричної енергії, що споживає значну реактивну потужність. При моделюванні випрямляча було використано систему відносних одиниць електричних величин, що значно спрощує аналіз.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бондаренко І. М. Моделювання в електроніці. Національний університет радіоелектроніки. Харків : ХНУРЕ, 2020, 163 с.

2. Денисюк С. П., Дерев'янко Д. Г., Белоха Г. С. Силова електроніка в системах електропостачання. Навчальний посібник. Електронне мережне навчальне видання. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського 2022, 130 с.

3. Чабан В. Математичне моделювання електромеханічних процесів. Львів : Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1997, 342 с.

УДК 620.9

**Міщенко Д.О.**

НТУ «ХПІ», аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем» Харків, Україна

Denys.Mishchenko@sgt.khpi.edu.ua

denismishchenko11@gmail.com

### **ОЦІНКА СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ ПЕРЕВАГ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА БАЗІ DC-МІКРОМЕРЕЖ У СІЛЬСЬКИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

У статті досліджено проблематику енергозабезпечення сільських населених пунктів України в умовах кризового стану централізованої енергосистеми та зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Проведено комплексний порівняльний аналіз ефективності використання традиційних розподільчих мереж змінного струму (АС) та низьковольтних мікромереж постійного струму (DC) при інтеграції сонячних електростанцій та систем накопичення. Доведено, що перехід на DC-архітектуру дозволяє усунути етапи подвійного перетворення струму, що підвищує загальний ККД системи на 10–15% та знижує нормовану вартість електроенергії (LCOE). Обґрунтовано соціально-економічні переваги впровадження DC-мікромереж, серед яких: зниження операційних витрат домогосподарств, підвищення надійності живлення критичної інфраструктури в автономному («острівному») режимі та створення технічних умов для розвитку локального ринку енергії (P2P-торгівлі). Визначено, що DC-мікромережі є оптимальним рішенням для забезпечення сталості та енергонезалежності малих громад.

*Ключові слова:* DC-мікромережі, низьковольтні мережі постійного струму (LVDC), альтернативні джерела енергії, енергоефективність, сільські населені пункти, соціально-економічний ефект, LCOE, енергетична безпека, прозюмер.

**Mishchenko D. O. Assessment of the social -economic advantages of implementing DC-based microgrid management systems in rural settlements with alternative energy sources.** The article examines the challenges of power supply in rural settlements of Ukraine amidst the crisis state of the centralized energy system and the increasing share of renewable energy sources (RES). A comprehensive comparative analysis was conducted regarding the efficiency of using traditional alternating current (AC) distribution networks versus low-voltage direct current (DC) microgrids when integrating solar power plants and energy storage systems. It is proven that the transition to a DC architecture allows for the elimination of double current conversion stages, increasing overall system efficiency by 10–15% and reducing the Levelized Cost of Energy (LCOE). The socio-economic benefits of implementing DC microgrids are substantiated, including: reduced operational costs for households, increased power supply reliability for critical infrastructure in autonomous ("island") mode, and the creation of technical conditions for the development of a local energy market (P2P trading). It is determined that DC microgrids are the optimal solution for ensuring the sustainability and energy independence of small communities.

*Keywords:* DC microgrids, low-voltage direct current (LVDC) networks, alternative energy sources, energy efficiency, rural settlements, socio-economic effect, LCOE, energy security, prosumer.

**Постановка проблеми.** Сучасний стан енергетичної системи України характеризується безпрецедентними викликами, зумовленими як глобальними тенденціями, так і внутрішніми кризовими факторами. З одного боку, курс на євроінтеграцію та «Green Deal» вимагає декарбонізації та децентралізації генерації. З іншого боку, в умовах воєнних дій та цілеспрямованого руйнування централізованої енергетичної інфраструктури, забезпечення життєдіяльності малих населених пунктів стає питанням національної безпеки. Сільські громади є найбільш вразливою категорією споживачів: значна протяжність ліній електропередач, їх фізична зношеність та високий опір призводять до падіння напруги, частих аварійних відключень та значних