

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ

Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій

Кафедра «Електронні системи»

Кваліфікаційна робота / проект

Магістр

(рівень вищої освіти)

на тему

Синтез візуально-блокової моделі  
однаразного інвертора напруги

Виконав: студент II курсу, групи ЕЛ-18-1мд  
напряму підготовки (спеціальності)

171 Електроніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Коротий Г.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник доц.кадр.в.с., доц., к.т.н. Алексієвський Д.Г.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Кончуковський Д.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя – 2020 року

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет ЕЕІТ  
Кафедра ЕС  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Напрямок підготовки 171 Електроніка  
(шифр, назва)  
Спеціальність 171 Електроніка  
(шифр, назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕС  
Проф. Крижанівський І.А.  
«   »     20    року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Коротий Григорій Іванович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Синтез структурно-блокової моделі  
одноразового інвертора напруги  
керівник проекту (роботи) доц. к.т.н. Алексівський Д.І.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «   »     20    року №   

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 08.01.2020

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Напруга живлення інвер-  
тора - 515 В, на базі мікросхем SMTX302GB 126HPs, Падаю-  
ча напруга на переході колектор-емітер  $V_{CE} = 2,15 В$ ,  
навантажувальна: активна  $R_n = 3,3 Ом$ ; або активно-індук-  
тивна (залиши).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, Стан теорії автономного інвертора  
та засвоєного навантаження, Синтез структурно-блокової моделі інвертора  
напруги, Перегляді моделювання моделі, Моделювання  
індуктивного навантаження, Висновки з огляду на результати та ана-  
ліз і економіка в лабораторії-дослідній лабораторії.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Об'єкт та предмет дослідження, Структурна логічна  
інвертора напруги, Модель одноразового інвертора  
напруги, Результати моделювання інвертора, ВБМ калібри  
індуктивного навантаження, Результати моделювання калібри інв. нап. (АВ)  
Зазначальний пристрій (АІ), Організація і економіка (АІ)

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет ЕЕІТ  
Кафедра ЕС  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Напрямок підготовки 171 Електроніка  
(шифр, назва)  
Спеціальність 171 Електроніка  
(шифр, назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕС  
Проф. Крижанівський І.А.  
«   »     20    року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Коротий Григорій Іванович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Синтез структурно-блокової моделі  
однорядного інвертора напруги  
керівник проекту (роботи) доц. к.т.н. Алексівський Д.І.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «   »     20    року №   

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 08.01.2020

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Напруга живлення інвер-  
тора - 515 В, на базі мікросхем SMTA302GB 126HPs, Падаю-  
ча напруга на переході колектор-емітер  $V_{CE} = 2,15 В$ ,  
навантажувальна: активна  $R_n = 3,3 Ом$ ; або активно-індук-  
тивна (залиши).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, Стан теорії автономного інвертора  
та засвоєного навантаження, Синтез структурно-блокової моделі інвертора  
напруги, Перегляді моделювання моделі, Моделювання  
індуктивного навантаження, Висновки з огляду на результати та аналі-  
зи і економіка в навчально-дослідній лабораторії.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Об'єкт та предмет дослідження, Структурна логічна  
інвертора напруги, Модель однорядного інвертора  
напруги, Результати моделювання інвертора, ВБМ квантиса-  
ційного навантаження, Результати моделювання квантиса-  
ційного навантаження (А1), Організація і економіка (А1)

## АНОТАЦІЯ

Коротич Г.І. Синтез візуально-блочної моделі однофазного інвертора напруги.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 171-Електроніка, науковий керівник Д.Г. Алексієвський. Інженерний інститут Запорізького національного університету. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій, кафедра електронних систем, 2020.

Розглянуто особливості та стан моделювання напівпровідникових пристроїв в складі електротехнічних комплексів, створено візуально-блочну модель інвертора напруги, застосовано цю модель в електротехнічному комплексі індукційного нагріву.

Ключові слова: ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНА МОДЕЛЬ, МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, ІНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВ, ІНДУКТОР

## ABSTRACT

Korotych H.I. Synthesis of a visual-block model of a single-phase voltage inverter.

Qualifying final work for obtaining a master's degree in higher education by specialty 171 - Electronics, scientific supervisor D.G. Alexievsky. Engineering Institute of Zaporizhzhya National University. Faculty of Energy, Electronics and Information Technologies, Department of Electronic Systems, 2020.

Features and state of modeling of semiconductor devices in electrotechnical complexes are considered, visual-block model of voltage inverter is created, this model is applied in electrotechnical complex of induction heating.

Keywords: VISUALLY BLOCK MODEL, MODELING, AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER, WIDTH-PULSE MODULATION, INDUCTION HEATING, INDUCTOR

## АННОТАЦИЯ

Коротыч Г.И. Синтез визуально-блочной модели однофазного инвертора напряжения.

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 171-Электроника, научный руководитель Д.Г. Алексеевский. Инженерный институт Запорожского национального университета. Факультет энергетики, электроники и информационных технологий, кафедра электронных систем, 2020.

Рассмотрены особенности и состояние моделирования полупроводниковых устройств в составе электротехнических комплексов, создана визуально-блочная модель инвертора напряжения, применена эта модель в электротехническом комплексе индукционного нагрева.

Ключевые слова: ВИЗУАЛЬНО БЛОЧНАЯ МОДЕЛЬ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ, ШИМ, ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ, ИНДУКТОР.

## РЕФЕРАТ

Дипломний проект: стор. – 130, рис. – 81, табл. – 7, посилань – 35

При проектуванні важливою складовою є моделювання роботи електротехнічного комплексу для аналізу і налагодження енергетичних та електротехнічних показників, перевірки ефективності і працездатності технічних рішень по силовому обладнанні, є основою для подальшого створення систем керування. Зазвичай достатньо провести моделювання за середніми значеннями, що пришвидшить процес моделювання, дозволить швидко проводити зміну режимів управління системою та редагувати її блоки.

ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНА МОДЕЛЬ, МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ, ЧАСТОТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, ШИРОТНО ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, СИЛОВІ БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ, МДН-ТРАНЗИСТОРИ, БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ З ІЗОЛЬОВАНИМ ЗАТВОРОМ, ОДНООПЕРАЦІЙНІ ТИРИСТОРИ, ЗАПІРНІ ТИРИСТОРИ, ЗАПІРНІ ТИРИСТОРИ, ІНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВ, ІНДУКТОР

## ЗМІСТ

	Стор.
Вступ .....	8
1 Стан теорії автономного інвертора та засобів його моделювання.....	9
1.1 Стан теорії автономного інвертора.....	9
1.1.1 Особливості автономних інверторів напруги.....	9
1.1.2 Транзисторні інвертори напруги .....	10
1.1.3 Принцип роботи мостового автономного інвертора напруги.....	14
1.2 Силові напівпровідникові ключі.....	17
1.2.1 Силові біполярні транзистори .....	19
1.2.2 Потужні МДН-транзистори .....	22
1.2.3 Біполярні транзистори з ізольованим затвором.....	26
1.2.4 Одноопераційні тиристори .....	29
1.2.5 Запірні тиристори.....	34
1.2.6 Індукційні тиристори.....	36
1.3 Формувачі імпульсів керування .....	39
1.4 Засоби моделювання АІН та комплексів в які вони входять.....	42
1.4.1 Загальний опис і використання моделювання .....	42
1.4.2 Перевірка достовірності моделювання.....	44
1.4.3. Комп'ютерне моделювання.....	45
1.4.4 Програмні комплекси для комп'ютерного моделювання .....	47
1.4.5 Візуально-блочне моделювання .....	49
1.5 Постановка завдання дослідження.....	52
2 Синтез візуально блочної моделі однофазного мостового інвертора напруги.....	54
2.1 Опис візуально-блочної моделі мостового інвертора напруги .....	54
2.2 Опис блоку розрахунку втрат на ключах транзисторів .....	59
2.2.1 Опис блоку розрахунку динамічних втрат .....	61
3 Перевірка адекватності моделі .....	64

3.1	Опис еталонної моделі однофазного мостового автономного інвертора напруги .....	64
3.2	Опис еталонної моделі мостового інвертора з ШІМ .....	66
3.3	Моделювання візуально-блочної моделі АІН сумісно з еталонною моделлю .....	71
3.4	Аналіз отриманих результатів .....	73
4	Застосування візуально-блочної моделі АІН в електротехнічному комплексі індукційного нагріву .....	77
4.1	Енергетичний тракт комплексу індукційного нагріву .....	77
4.2	Візуально блочна модель джерела живлення .....	79
4.3	Візуально блочна модель конденсатору .....	81
4.4	Візуально блочна модель трансформатора .....	82
4.5	Візуально блочна модель блоку обрахування коефіцієнту навантаження .....	83
4.6	Візуально блочна модель блоку опису термодинамічних процесів ....	84
4.7	Візуально блочна модель блоку опису індуктора .....	86
4.8	Візуально блочна модель блоку ПІД регулятора.....	88
4.9	Параметри моделі комплексу індукційного нагріву .....	89
4.10	Результати моделювання комплексу індукційного нагріву .....	91
4.11	Аналіз результатів моделювання комплексу індукційного нагріву...	98
5	Економіка та організація роботи науково-дослідної лабораторії.....	101
5.1	Формуляр проекту .....	101
5.2	Характеристика робіт за проектом .....	102
5.3	Робоча структура проекту - WBS.....	103
5.3	Організаційна структура проекту - OBS .....	103
5.4	Структура затрат проекту - CBS .....	104
5.6	Матриця відповідальності .....	104
5.7	Система кодування проекту.....	105
5.8	CTR - каталог .....	107
5.9	Стрілчастий графік.....	108

5.10 Розрахунок тривалості проекту з урахуванням запасів часу .....	109
6 Вимоги з охорони праці та техніки безпеки у науково-дослідній лабораторії .....	113
6.1 Охорона праці для неелектротехнічних працівників.....	113
6.1.1. Загальні положення.....	113
6.1.2. Вимоги безпеки перед початком роботи.....	116
6.1.3. Вимоги безпеки під час роботи .....	117
6.1.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи.....	120
6.1.5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	120
6.2 Заземлення і занулення .....	122
6.3 Розрахунок заземлення .....	122
6.4 Рекомендації з монтажу заземлення .....	125
Висновки.....	126
Перелік посилань .....	128



## ВСТУП

Для перетворення постійного струму в змінний застосовують спеціальні електронні силові пристрої, які називаються інверторами. Найчастіше інвертор перетворює постійну напругу однієї величини в змінну напругу іншої величини. Таким чином, інвертор - це генератор періодично змінної напруги, при цьому форма напруги може бути синусоїдальною, наближеною до синусоїдальної або імпульсною. Інвертори напруги можуть застосовуватися у вигляді окремого пристрою або входити до складу джерел і систем безперебійного живлення апаратури електричною енергією змінного струму. Якщо інвертор передає енергію з мережі постійного струму в мережу змінного, частота і напруга в якій вже задані роботою інших генераторів, то його названо залежним (веденим).

Автономний інвертор напруги (АІН) формує в навантаженні напругу, а форма струму визначається параметрами навантаження. В схемі АІН використовуються повністю керовані ключі: транзистори або тиристори, що вимикаються за колом керування. Тиристори, що не вимикаються за колом керування, використовуються в комбінації з вузлами примусової комутації з попередньо зарядженим конденсатором.

При проектуванні потужних інверторів напруги, для роботи в електротехнічних комплексах, синтез математичної моделі інвертора сумісно з електротехнічним комплексом є одним з важливих етапів створення комплексу. Він використовується не тільки як інструмент перевірки ефективності і працездатності технічних рішень по силовому обладнанні, але також є основою для процедури синтезу системи управління, де силове електрообладнання виступає в якості об'єкта управління. При цьому, в більшості випадків, достатньо провести моделювання за середніми значеннями, що дозволить пришвидшити процес моделювання для великих проміжків часу, швидко проводити зміну режимів управління системою та коригувати її блоки.

# 1 СТАН ТЕОРІЇ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА ТА ЗАСОБІВ ЙОГО МОДЕЛЮВАННЯ

## 1.1 Стан теорії автономного інвертора

Автономний інвертор напруги (АІН) формуює в навантаженні напругу, а форма струму визначається параметрами навантаження. В схемі (рис. 1.1) АІН використовуються повністю керовані ключі: транзистори або тиристори, що вимикаються за колом керування. [1] Тиристори, що не вимикаються за колом керування, використовуються в комбінації з вузлами примусової комутації з попередньо зарядженим конденсатором.

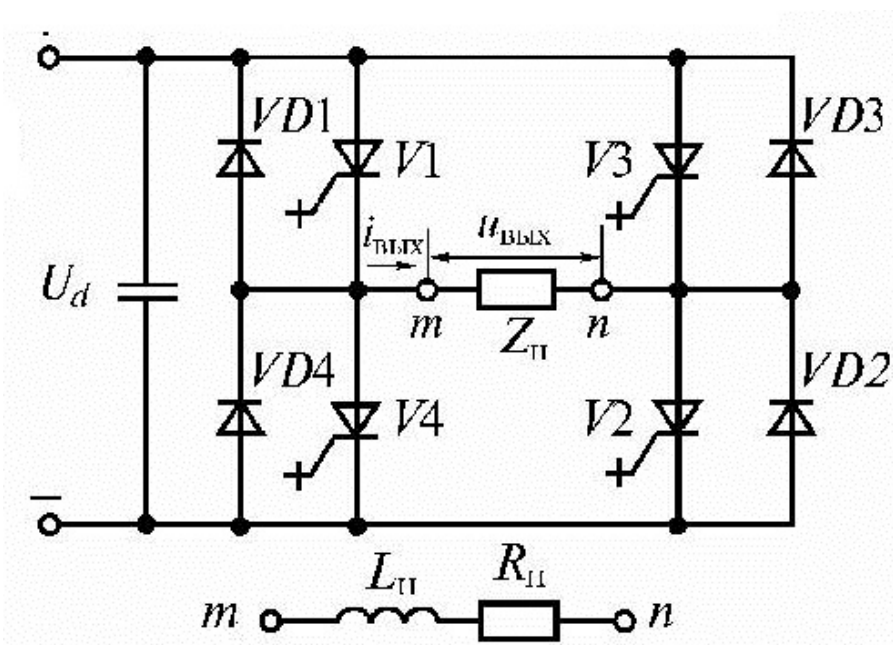


Рисунок 1.1 - Автономний інвертор напруги

### 1.1.1 Особливості автономних інверторів напруги

1. Джерело постійного струму працює в режимі джерела ЕРС. Для цього паралельно до входу АІН вмикається конденсатор достатньо великої ємності, що надає джерелу властивості генератора напруги (напруга на вході АІН

незмінна). Ключі схеми комутують джерело, чим забезпечується зміна напрямку напруги на навантаженні. При цьому вхідний струм змінюється стрибком, що не припускає наявності індуктивності на вході АІН. Для запобігання впливу індуктивності вхідних кіл конденсатор фільтру встановлюється біля ключів АІН [2][3].

2. Схема вентиляного комутатора повинна мати двобічну провідність, що і забезпечує обмін енергією між активно-індуктивним навантаженням і джерелом (конденсатором на вході, якщо використовується випрямляч з однобічною провідністю). Примітка: для передавання реактивної енергії (і активної) в мережу можна використовувати ведений мережею інвертор або активний випрямляч [2][3].

### 1.1.2 Транзисторні інвертори напруги

#### - Мостова схема транзисторного інвертора напруги

Мостова схема інвертора напруги (рис. 1.2) застосовується на великих потужностях при підвищеному рівні напруги джерела живлення.[3] Сигнали управління  $X_1 \dots X_4$  надходять таким чином, що в кожному напівперіоді два транзистора увімкнені, а два інших вимкнені.

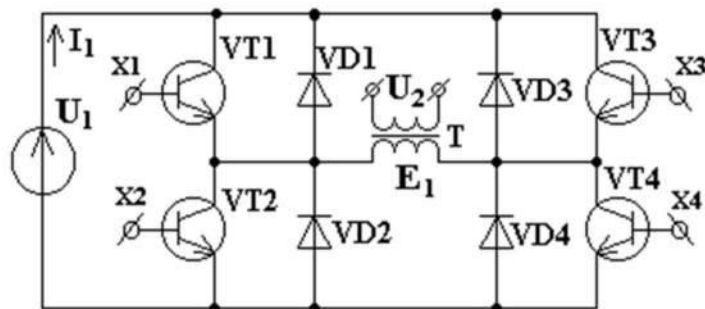


Рисунок 1.2 - Мостова схема транзисторного інвертора напруги

Існує два алгоритму управління ключовими елементами інвертора напруги: симетричний і несиметричний. На рисунку 1.3 наведено часові

залежності струмів і напруг для цих двох алгоритмів.[4] Розглянемо принцип дії інвертора при симетричному управлінні.

При подачі керуючих імпульсів  $X_1, X_4$  на транзистори  $VT1, VT1$  на інтервалі часу  $t_3 \dots t_4$  струм протікає по контуру: «+» $U_1$ ; колектор емітер  $VT1$ ; обмотка трансформатора  $T$  в первинному колі; колектор-емітер  $VT4$ ; «-»  $U_1$ . На цьому ж інтервалі накопичується реактивна енергія в ланцюзі намагнічування трансформатора  $T$ , відбувається плавне наростання струму в первинній ланцюга за експоненціальним законом.

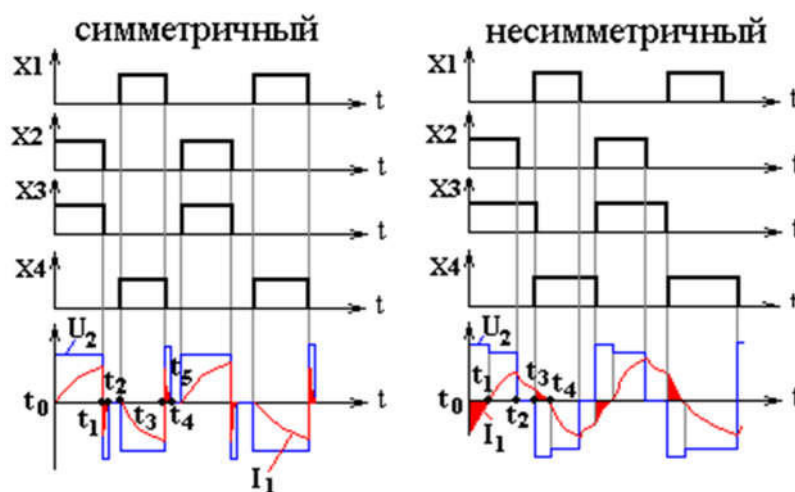


Рисунок 1.3 - Діаграми управління ключовими елементами інвертора напруги

На інтервалі  $t_4 \dots t_5$  здійснюється рекуперація енергії в джерело  $U_1$  через зворотні діоди по контуру: «+» $U_1$ ;  $VD3$ ; протилежний зміст по відношенню до  $U_1$ ;  $VD2$ ; «-» $U_1$  струму джерела спадає до нуля.

У плечі моста інвертора напруги досить управляти одним ключем для здійснення стабілізації напруги на виході інвертора  $U_2$ , інший ключ можна утримувати в відкритому стані, що виключає вплив інвертора на вхідне джерело. Розглянемо принцип дії інвертора при несиметричному алгоритмі управління.

На інтервалі часу  $t_0 t_2$  за період роботи другого і третього ключів в ланцюзі намагнічування трансформатора  $T$  накопичилася реактивна енергія. На інтервалі  $t_2 \dots t_3$  відбувається рекуперація енергії в навантаження по

контур: «+» $U_1$ ; VD1; колектор-емітер VT3; «-»  $U_1$ . Якщо на даному інтервалі струм  $I_1$  не знизився до нуля (тобто струм не поміняв свій знак), то на інтервалі  $t_3 \dots t_4$  енергія передається в джерело по контуру: «+» EPC  $U_1$ ; VD1; протилежний зміст по відношенню до  $U_1$ ; VD4; «-»  $U_1$ , при цьому утворюється «поличка» в формі напруги  $U_2$ .

- Напівмостовий транзисторний інвертор напруги

Принцип роботи схеми (рис 1.4) [4][6] полягає в почерговому підключенні транзисторами VT1, VT2 первинної обмотки трансформатора до конденсаторів C1 і C2. На інтервалі часу  $t_2 \dots t_3$  відбувається заряд конденсатора C1 по ланцюгу: «+»;  $U_1$ ; обмотка трансформатора первинної ланцюга  $W_q$ ; колектор-емітер VT2; «-»  $U_1$ . На цьому ж інтервалі відбувається розряд конденсатора C2 по колу: «+» C2; обмотка трансформатора первинної ланцюга W1; колектор-емітер VT2; «-»  $U_1$ .

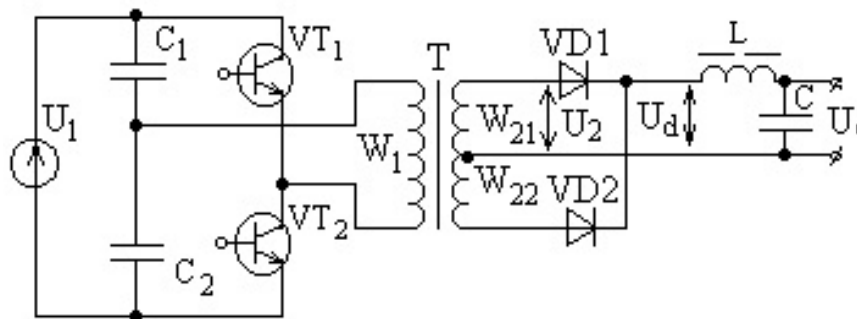


Рисунок 1.4 - Напівмостовий транзисторний інвертор напруги

До переваг схеми інвертора можна віднести: малі втрати в силовому ланцюзі за рахунок комутації одного ключа на кожному такті роботи схеми. За рахунок конденсатору підтримується баланс струмів в схемі за період роботи, що виключає виникнення асиметричного режиму намагнічування трансформатора. Крім того, в цій схемі малий рівень зворотної напруги на ключах, тому схема може використовуватися при високих вхідних напругах[4].

- Транзисторний інвертор напруги з середньою точкою

Ця схема (рис. 1.5) інвертора найбільш розповсюджена в низьковольтних перетворювачах-інверторах. [4][5][6] Особливістю даної схеми є те, що первинна обмотка вихідного трансформатора має вивід від середини. За кожен напівперіод напруги по черзі працює один транзистор і одна напівобмотка трансформатора. Дана схема відрізняється найбільшим ККД, низьким рівнем пульсацій. Досягається це за рахунок зменшення струму в первинній обмотці і зменшення потужності, що розсіюється в ключових транзисторах.

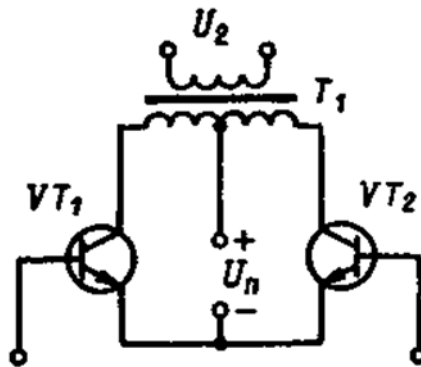


Рисунок 1.5 - Транзисторний інвертор напруги з середньою точкою

Незважаючи на те, що в цьому інверторі використовується трансформатор з виводом від середньої точки первинної обмотки і до транзисторів прикладається подвійна напруга, він має певні переваги перед мостовим і полумостовим інверторами. У порівнянні з ним в мостовому інверторі використовується в два рази більшу кількість ключів, а в напівмостового ключі навантажені подвоєним струмом навантаження. Обов'язковим елементом інвертора є трансформатор, що має відвід від середньої точки первинної обмотки. При виготовленні такого трансформатора гостро встає проблема забезпечення гарної магнітної зв'язку між половинками первинної обмотки (низької індуктивності розсіювання). Зазвичай, в малопотужних перетворювачах, цей трансформатор має тороїдальную

конструкцію і обидві половинки первинної обмотки мотаються разом (в два дроти). Якщо ж обмотку неможливо мотати в два дроти (наприклад в потужних трансформаторах), то її секціонуємо і окремі секції половинок первинній обмотки мотають упереміш. Зазвичай, в намотаних такими способами трансформаторах вдається знизити індуктивність розсіювання між половинками первинної обмотки до деяких допустимих меж. Але навіть в цьому випадку, якщо не вживати особливих заходів, на що замикаються транзисторах з'являються небезпечні викиди напруги, здатні пошкодити транзистор.

Амплітуда напруги імпульсів в половині первинної обмотки зростає до значення  $U_{живл}$ , а напруга  $U_{ск}$  на кожному транзисторі досягає значення  $2U_{живл}$  (ЕРС самоіндукції +  $U_{живл}$ ). Середній струм через кожен транзистор дорівнює половині струму живлення від мережі живлення.

### 1.1.3 Принцип роботи мостового автономного інвертора напруги

На вході АІН діє джерело ЕРС, напруга на виході вентиляльної групи прямокутна, а форма струму визначається характером навантаження. Напруга на навантаженні перемикається миттєво, тому навантаження може бути активним або активно-індуктивним. (рис. 1.6) [1]. При роботі схеми з активно-індуктивним навантаженням у момент  $t_1$  починають проводити тиристорі  $V_1$   $V_2$ . Під дією прикладеної напруги струм наростає по експоненті. У момент  $t_2$  тиристори  $V_1$   $V_2$  вимикаються, але струм через навантаження йде в тому ж напрямку через діоди  $VD_3$ ,  $VD_4$  за рахунок енергії, запасеної в індуктивності, при цьому напруга на навантаженні вже змінила знак, а струм поступово спадає. У момент  $t_3$  струм дорівнює нулю і вмикаються тиристори  $V_3$  і  $V_4$ , полярність напруги при цьому не змінюється, а струм змінює напрямок. Діоди призначені для повернення реактивної енергії в джерело живлення. Конденсатор  $C_d$  її приймає.

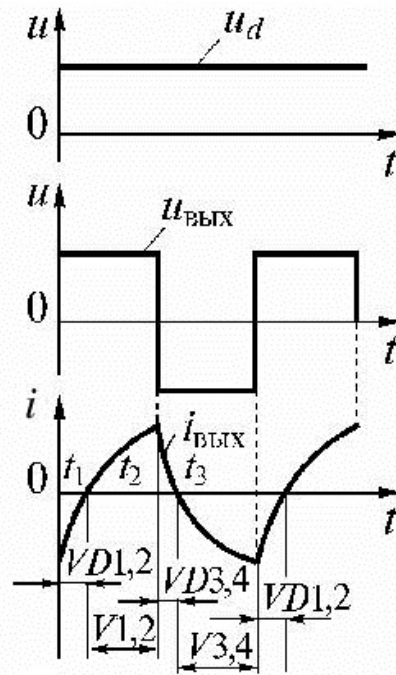


Рисунок 1.6 - Діаграми напруги та струму при роботі АІН

Структура автономного інвертора (рис. 1.1) у загальному випадку структура інвертора складається з таких елементів [3]:

- вхідний фільтр ( $\Phi 1$ ), що забезпечує необхідну якість вхідного струму (напруги), надання джерелу енергії властивостей, що забезпечують нормальне функціонування схеми вентиляного комутатора, а також зменшує негативний вплив на джерело та інших споживачів енергії;

- вентиляний комутатор (ВК) у подальшому безпосередньо інвертор, що поряд із перетворенням, забезпечує регулювання параметрів змінного струму — частоти і амплітуди. Вихідний сигнал, звичайно, має характер імпульсів, фронти яких мають значну крутизну і, як наслідок, складний гармонійний спектр. Це негативно впливає на роботу споживача енергії, а також призводить до значних додаткових витрат під час передавання енергії на відстань;

- вихідний трансформатор (ТВ) для узгодження вихідної напруги з напругою споживача, що може бути поєднаним безпосередньо зі схемою комутатора. у ряді випадків використовується для отримання багаторівневої кривої вихідної напруги;



– вихідний фільтр (Ф2), що забезпечує якість вихідної напруги на потрібному рівні для передавання і споживання. Ємність у інверторів струму є необхідною для нормального функціонування схеми. Відзначимо, що не всі ці елементи є обов'язковими у конкретній схемі інвертора. Так, у інверторі напруги обов'язковими звичайно є Ф1 і ВК, у інверторі струму до них додається Ф2.

## 1.2 Силлові напівпровідникові ключі

Ціль даного розділу розглянути основні типи застосовуваних на практиці потужних ключових приборів (рис. 1.7) з позиції їх структури та характеристик. Це дозволяє наглядно розглянути принцип дії силових напівпровідникових ключів, а сумісно з їх еквівалентною схемою дозволяє сформулювати основні принципи управління даними приборами та способи їх захисту.

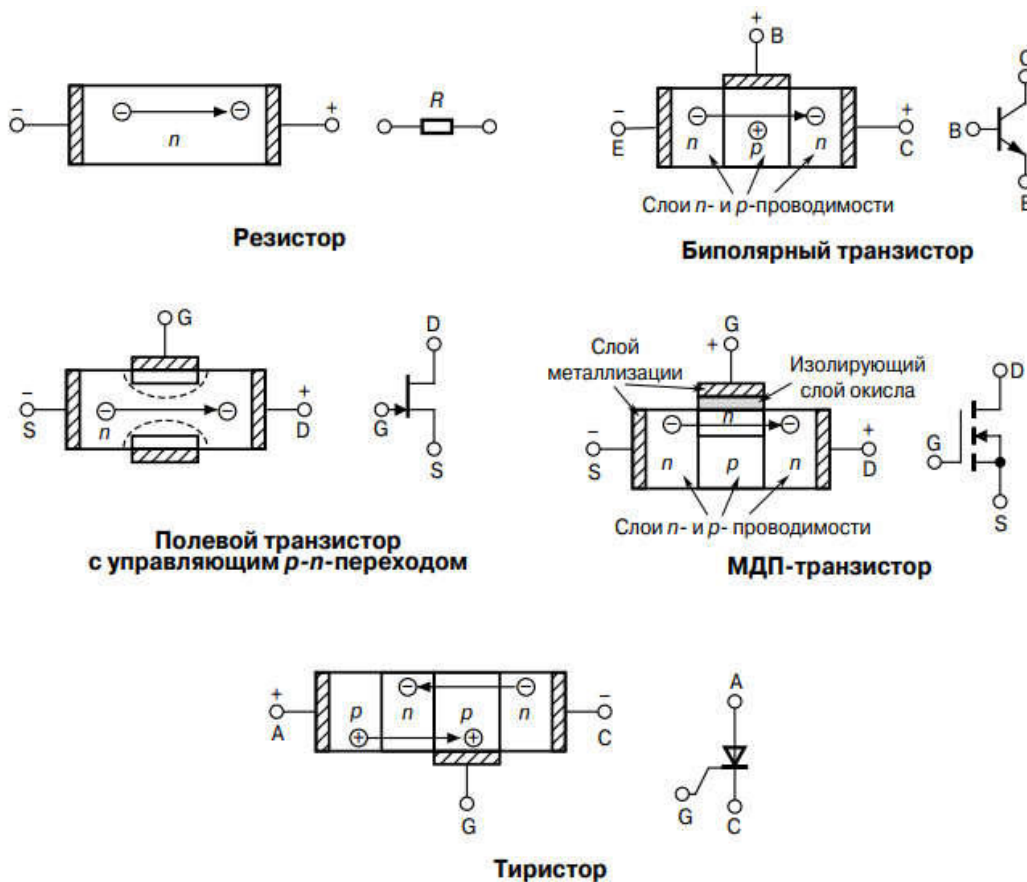


Рисунок 1.7 - Типові структури напівпровідникових приборів

Перехід ключового пристрою із закритого стану в відкрите і навпаки супроводжується змінами провідних властивостей його структури. Відкритий стан ключа визначається наявністю в структурі комірки провідного каналу з високою концентрацією носіїв, а відповідно низьким опором протікаючому струму. Щоб закрити ключ необхідно забезпечити умови переривання руху

носіїв в провідному каналі. Це досягається за рахунок створення області, яка збіднена носіями, так називаємої області просторового заряду (ОПЗ), в якій практично відсутні електрони та дірки. Такий механізм перемикавання властивий всім типам ключових напівпровідникових приборів, а управління їх провідністю здійснюється від зовнішнього виводу, який називається базою, затвором або управляючим електродам. Відрізняються лише фізичні ефекти, які лежать в основі принципів перемикавання. Для біполярних структур це явище інжекції, переносу та екстракції носіїв, для уніполярних - інверсія типу провідності каналу і ефекти типу змикання областей просторового заряду. Типові поєднання напівпровідникових шарів різної провідності для найбільш відомих ключових приборів показані на рисунку 1.7 [7].

Тиристор — напівпровідниковий прилад вентиляного типу, який відкривається для пропускання електричного струму при досягненні порогового значення напруги між анодом і катодом або за умови подачі невеликої напруги на керуючий електрод. Також цей електронний компонент часто називають напівпровідниковим керованим вентиляем (англ. Silicon/Semiconductor Controlled Rectifier, SCR) [7].

За кількістю зовнішніх виводів розрізняють: діодні тиристори (диністори, мають два зовнішні виводи), тріодні тиристори (триністори, мають три зовнішні виводи) та тетродні тиристори (мають чотири зовнішні виводи).

Прилад, який не містить керуючих електродів, називається діодним тиристором або диністором. Такі прилади керуються напругою, прикладеною між основними електродами.

Прилад, що містить один керуючий електрод, називають тріодним тиристором або триністором (іноді просто тиристором, хоча це не зовсім правильно). В залежності від того, до якого прошарку напівпровідника підключений керуючий електрод, триністори бувають з керуванням за анодом і з керуванням за катодом. Останні є більш поширеними.

За напрямком протікання струму у відкритому стані тиристори поділяються на симетричні (пропускають струм в одному напрямку — від

анода до катода) і несиметричні (пропускають струм в обидвох напрямках). Симетричні тиристори виготовляються з п'яти шарів напівпровідників.

### 1.2.1 Силіві біполярні транзистори

Біполярний транзистор — напівпровідниковий прилад, елемент електронних схем. Має три електроди — емітер, базу і колектор, — один з яких служить для керування струмом між двома іншими. Термін «біполярний» підкреслює той факт, що принцип роботи приладу полягає у взаємодії з електричним полем носіїв заряду, що мають як позитивний, так і негативний електричний заряд. В залежності від типу носіїв заряду, які використовуються в транзисторі, біполярні транзистори поділяються на транзистори типів NPN та PNP. В транзисторі типу NPN емітер і колектор легуються донорами, а база — акцепторами. В транзисторі типу PNP — навпаки [7].

Сучасні біполярні транзистори виготовляються на основі монокристалічного кремнію по дифузійній технології з використанням планарного процесу. Базова комірка транзистора n-p-n типу представлена на рисунку 1.8. Таку структуру має більшість сучасних типів силових біполярних транзисторів. Для p-n-p транзисторів будуть справедливі практично всі висновки, отримані при аналізі процесів в вище згаданій базовій комірці n-p-n типу. Для створення структури комірки в якості вихідного матеріалу або підкладки використовується низькоомний  $n^+$  (шар, на зворотному боці якого створюється омичний контакт колектора. На підкладці епітаксіально вирощується високоомний колекторний  $n^-$  (шар, в якому методом дифузії формується шар p-бази. Таким чином, в структурі створюється асиметричний колекторний p-n-перехід. Далі на поверхні бази проводять планарний процес. Він полягає в створенні плівки діоксиду кремнію і проведенні через спеціально витравлені вікна імплантації донорної домішки для формування емітерних  $n^+$  областей. Після цього на верхній поверхні кристала створюють металізовані шари для виводів бази і емітера, розділених ізолюючими ділянками діоксиду

кремнію. Таким чином створюється вертикальна структура силового біполярного транзистора.

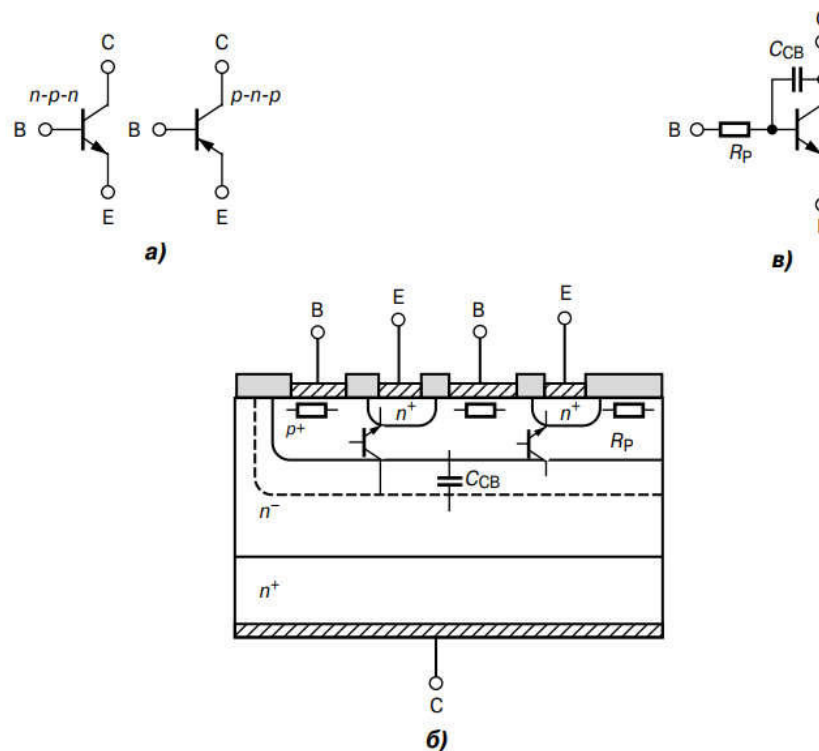


Рисунок 1.8 - Умовне позначення біполярного транзистора (а), поперечний переріз його базової комірки (б), еквівалентна схема структури комірки (в)

Розглядаючи основні закономірності фізичних процесів, які протікають в даній комірці. Структура біполярного транзистора є системою взаємодії двох р-n переходів. У нашому випадку це емітерний n<sup>+</sup>p<sup>-</sup> і колекторний р-n<sup>+</sup> переходи. Залежно від полярності напруг на даних переходах розрізняють чотири режими роботи транзистору: насичення, відсічка, активний нормальний і активний інверсний [3].

Режим насичення відповідає відкритому станом ключа, при цьому обидва переходу транзистора зміщені в прямому напрямку.

У режимі відсічки переходи зміщені у зворотному напрямку, а через транзистор проходять порівняно невеликі струми витоку.

Активний режим роботи транзистора в ключовому застосуванні має місце на фронтах перехідного процесу перемикавання і характеризується

прямим зміщенням одного з переходів. При прямому зміщенні Емітерного переходу активний режим називається нормальним. Тобто в цьому режимі емітер і колектор транзистора виконують властиві їм функції інжекції і збирання носіїв струму. Несиметрія реальної структури не має властивості до оборотності функцій переходів, і, як правило, схемне інверсне включення транзистора на практиці при (застосовується вкрай рідко). Однак можлива фізична інверсія функцій переходів, наприклад, в процесі замикання біполярного транзистора дуже великим негативним струмом бази, коли першим відновлює запираючі властивості емітерний перехід при прямому зміщенні на колекторному переході.

Допустимі робочі напруги транзистора (які не приводять до пробую) визначаються розмірами  $n$ - шару колектора і його легуванням. Проте слід зауважити, що пробивна напруга колекторного переходу може істотно знизитися із за явища поверхневого пробую, який відбувається в області виходу переходу на поверхню кристала. Зменшення радіуса заокруглення країв  $p$ - $n$  переходу приводить до зростання напруженості електричного поля і зменшення допустимої напруги транзистора [7].

Тепер розглянемо процеси, що відбуваються при протіканні прямого струму через транзистор. Перш за все цікавий так званий режим великих струмів, коли концентрація інжектуємих емітером електронів стає врівноваженою з концентрацією дірок в базовій області. При цьому використовується термін - високий рівень інжекції, завжди характерний для силових структур. Особливістю даного режиму є виникнення електричного поля в області базового шару. З одного боку, це призводить до зменшення опору базового шару і, отже, до зменшення коефіцієнта інжекції, з іншого - підвищується швидкість переміщення носіїв через базу, що збільшує коефіцієнт перенесення. Так як коефіцієнт передачі струму транзистора від емітера до колектора  $\alpha$  є твором двох згаданих величин, їх протилежний вплив призводить до появи точки максимуму  $\alpha$  при збільшенні робочого струму транзистора з тенденцією помітного зменшення в області великих струмів.

Аналогічно поводить себе коефіцієнт передачі струму бази  $\beta$ , який має однозначний зв'язок з коефіцієнтом  $\alpha$  (рис. 1.9). Таким чином, спад коефіцієнтів передачі струмів визначає гранично допустимий струм біполярного транзистора. Значення  $\beta$  в режимі великих струмів становить для силових транзисторів всього кілька одиниць, що потребує значних витрат потужності керуючого сигналу для підтримання відкритого стану ключа.

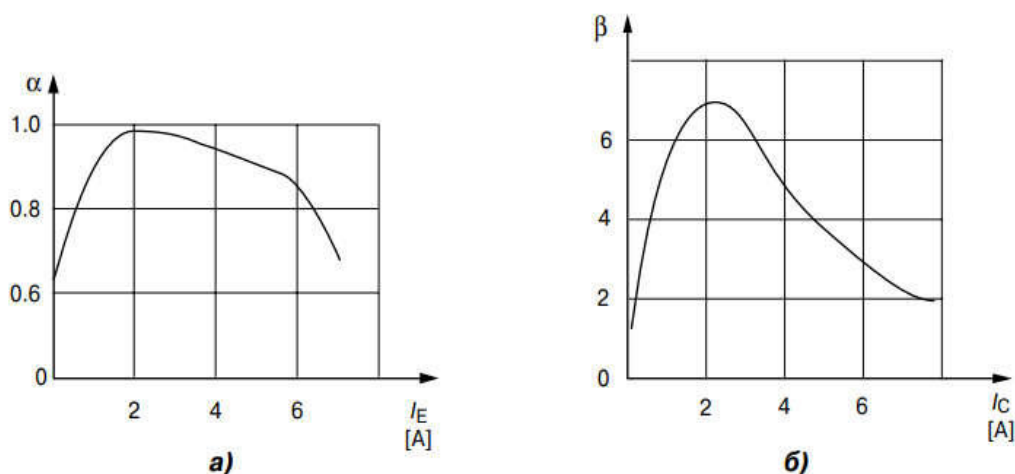


Рисунок 1.9 - Залежність коефіцієнтів передачі струму біполярного транзистора  $\alpha$  (а) і  $\beta$  (б) від струму колектора

### 1.2.2 Потужні МДН-транзистори

На відміну від польових транзисторів з р-n-переходом, в яких затвор має безпосередній електричний контакт з прилеглої областю струмопровідного каналу, в МДП-транзисторах затвор ізольований від зазначеної області шаром діелектрика. З цієї причини МДП-транзистори відносять до класу польових транзисторів з ізольованим затвором [7].

Подальше вдосконалення дифузійно-планарної технології і використання методів подвійної дифузії дозволили отримати багатоканальні структури потужних МДН транзисторів (Рис. 1.10). Активна область каналу даних приладів формується аналогічно базі біполярного транзистора. Завдяки хорошій керованості дифузійного процесу виявилось можливим виготовлення

робочих каналів довжиною менше 1 мкм з хорошою відтворюваністю. Для транзисторів з відносно високими пробивними напругами (більше 100 ... 300 В) використовують DMДН і VMДН структури.

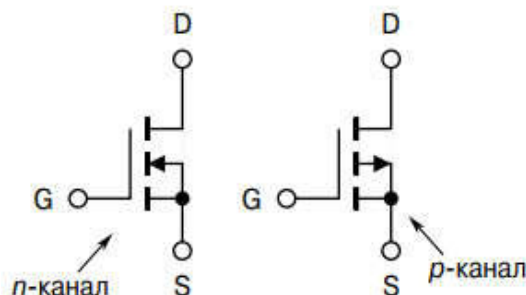


Рисунок 1.10 Умовне позначення потужних МДН транзисторів

Структура базової комірки VMДН транзистора представлена на рисунку 1.11. У подібний МДН транзистор може бути виготовлений тільки у вигляді вертикальної структури. Уважний розгляд цієї комірки дозволяє виявити велику схожість з розглянутою раніше структурою біполярного транзистора (Рис. 1.8). Вихідним матеріалом є  $n^+$  напівпровідникова пластина, на якій вирощено епітаксіальний  $n^-$  шар. Потім в цьому шарі проводять послідовну дифузю відповідної домішки і формують глибоку  $p$  (область і високо легований  $n^+$  шар витоку). На даному етапі технологічних операцій отримана структура ідентична комірці біполярного транзистора. Однак за тим, використовуючи селективне хімічне травлення, в структурі формують V-подібні канавки, а також вирощують шар захисного оксиду і створюють металізацію під вивід затвору і витоку [7].



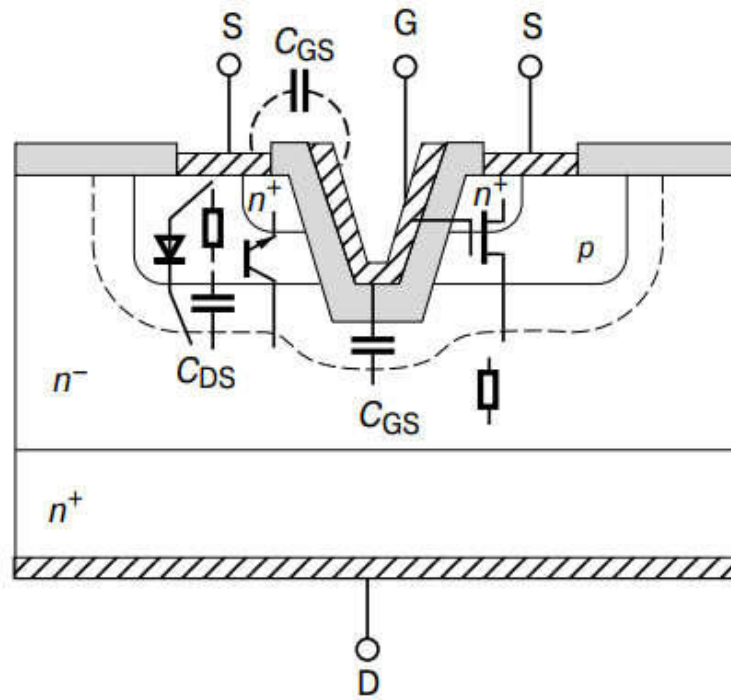


Рисунок 1.11 - Поперечний переріз базової комірки VMДН транзистора

DMДН потужні транзистори з коротким каналом мають як вертикальну, так і горизонтальні структури базової комірки (Рис. 1.12). У першому випадку витік і затвор розташовуються на верхній стороні кристала, а стік - на нижній. Для горизонтальної осередку характерний планарний варіант розташування всіх основних виводів - зверху кремнієвої пластини. У даний час всі високовольтні DMДН транзистори виготовляються тільки з вертикальною структурою. Вихідним матеріалом знову ж є високолегована підкладка n<sup>+</sup> типу для n-каналних транзисторів. Для вертикального варіанта зворотна сторона підкладки служить контактом до області стоку. На підкладці вирощується високоомний епітаксіальний n<sup>-</sup> шар, після чого за допомогою операцій окислення, маскування і травлення переходять до дифузійних процесів по збудівлі р області каналу і високолегованого n<sup>+</sup> витоку. У горизонтальних структурах проводиться також дифузія області n<sup>+</sup> (стоку). Потім настає заключна операція металізації відповідних виводів. При порівняно однаковій технології виготовлення DMДН і VMДН транзисторів вертикального типу перші, як правило, мають більш високу пробивну напругу, а другі більш

низький опір каналу у відкритому стані. Це пов'язано з тим, що інверсійний шар в р області ДМДП транзистора розташований в горизонтальній площині, тоді як у V транзистора - під деяким кутом, що зменшує товщину епітаксійного шару, який визначає параметри пробивної напруги і опору відкритого ключа.

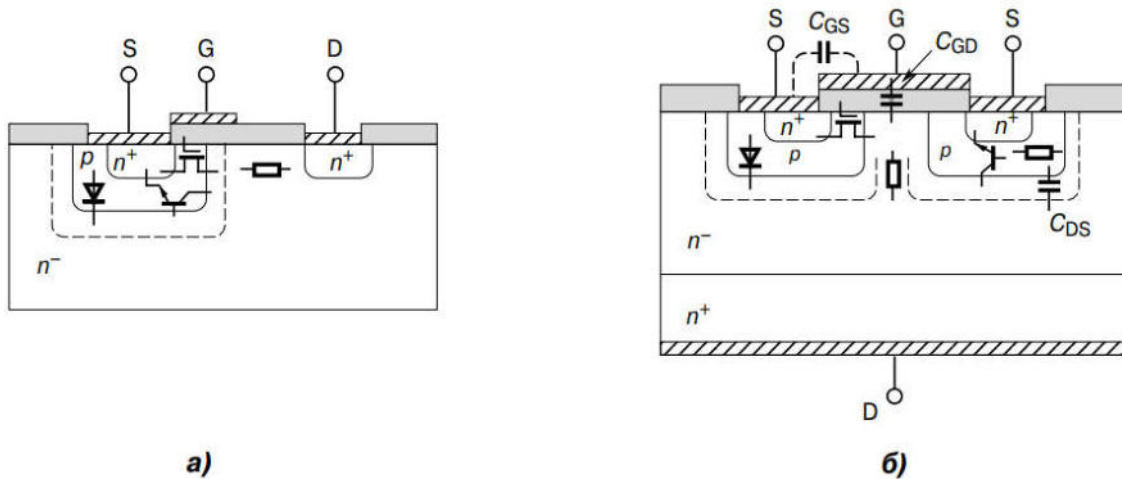


Рисунок 1.12 - Поперечний переріз базової комірки ДМДН транзистора: горизонтальна структура (а) і вертикальна структура (б)

Динамічні властивості розглянутих осередків визначаються внутрішніми ємностями, серед яких розрізняють ємності затвор витік  $C_{GS}$ , затвор стік  $C_{GD}$  і стік витік  $C_{DS}$  (Рис. 1.13). Ємність затвор витік складається з двох складових: польової ємності між металізованими доріжками витіку і затвора і додаткової ємності, що створюється перекриттям стокової  $n^+$  області металізованої частини затвора. Ємність затвор стік це ємність між металізованою частиною затвора і епітаксiальною  $n^-$  областю. Ємність стік витік визначається бар'єрною ємністю стокового р n- переходу. Оскільки ємності  $C_{GD}$  і  $C_{DS}$  пов'язані з збідненою областю  $n^-$  шару, вони стають залежними від зміни напруги стік витік, зменшуючись з його зростанням (приблизно в залежності  $\sim (V_{DS})^{-0.5}$ ) (Рис. 1.13) [7].

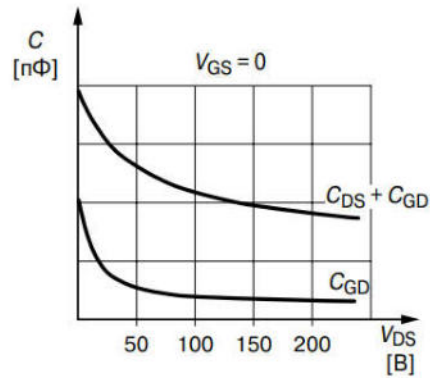


Рисунок 1.13 - Вплив напруги стік витік МДН транзистора на ємність  $C_{GD}$  і вихідну ємність  $C_{22} = C_{DS} + C_{GD}$

### 1.2.3 Біполярні транзистори з ізольованим затвором

Компромісним технічним рішенням, яке дозволило об'єднати позитивні якості як біполярних, так і МДП транзисторів стало створення монолітних структур, названих IGBT, тобто біполярних транзисторів з ізольованим затвором (рис. 1.14).

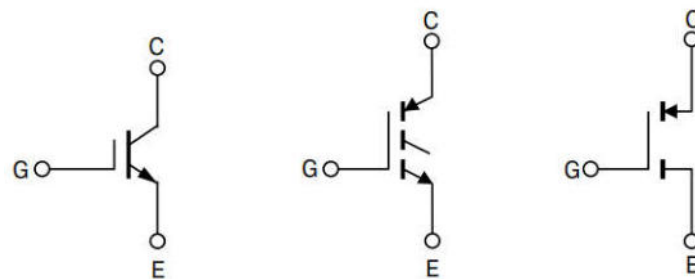


Рисунок 1.14 - Умовне позначення IGBT

Базові осередки подібних приборів представлені на Рис. 1.15. Вивчення розташування основних шарів IGBT дозволяє зробити висновок про спільність технологічних операцій, що лежать в основі як даних осередків, так і вже розглянутих вертикальних структур потужних МДП транзисторів. Відмінність полягає в матеріалі вихідної підкладки, в якості якої використовується напівпровідникова пластина з дірковою  $p^+$  провідністю. Аналогічно МДН

транзистору при закритому стані структури зовнішню напругу прикладено до збідненої області епітаксіального  $n^-$  - шару, характеристики якого визначають граничні значення робочих напруг IGBT.

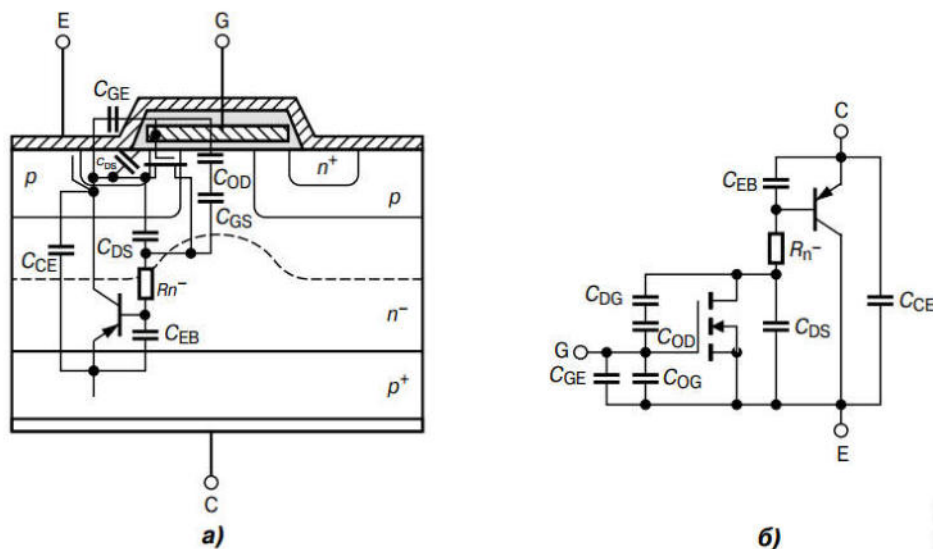


Рисунок 1.15 - Структура IGBT з ємнісними складовими (а) і її еквівалентна схема (б)

При подачі на ізольований затвор позитивного зміщення виникає провідний канал в р області комірки і між зовнішніми виводами транзистора - колектором і емітером починає протікати струм. Оскільки високо легований  $p^+$  шар колектора знаходиться під впливом зовнішньо прикладеної напруги, в глиб низькоомної епітаксіальної  $n^-$  області починається інжекція неосновних носіїв, здійснюваних модуляцію провідного каналу. Дана властивість визначило назву IGBT як структури з моделюємою провідністю. При цьому виявляється можливим значне зниження опору в відкритому стані, властиве МДН транзисторам. Схемотехнічно структуру комірки IGBT можна уявити комбінацією двох головних складових керуючого МДН транзистора і біполярного р-n-p транзистора (Рис. 1.16). При цьому пряме падіння напруги на відкритому ключі складається з двох компонентів: напруги на прямохміщеному емітерному переході р-n-p транзистора - так звана діодна складова і падіння на опорі провідного каналу і моделюємою n областю (так

звана омичним складова). Таким чином, на відміну від МДН ключа пряме падіння напруги в розглянутій структурі, з одного боку, не може бути менше, ніж порогове значення діодної складової, а з іншого боку, воно пропорційно вихідному току, помноженому на значно менший промодельюємий омичний опір.

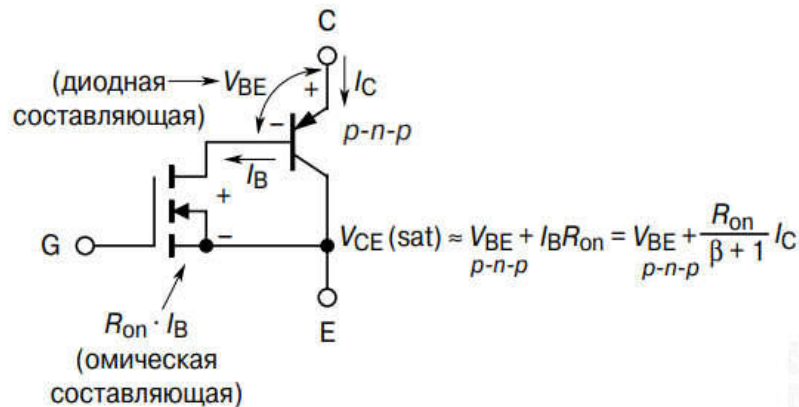


Рисунок 1.16 - Біполярний р n p транзистор і n каналний МДН транзистор в структурі IGBT

Оскільки омична складова розташована в базовому ланцюгу р-n-p транзистора, величину модуляції можна розглядати як зменшене в  $V_N + 1$  раз опір епітаксіального n шару, де  $V_N$  - коефіцієнт передачі базового струму біполярного транзистора. Зазначене подання прямої напруги визначає його температурну залежність, яка складається з двох протилежних складових: негативного температурного коефіцієнта у діодній компоненти і позитивної у омичної. Як правило, в області робочих струмів, на які проектується структура IGBT, результуючий температурний коефіцієнт є позитивним, зберігаючи переваги польового транзистора.

Перемикаючі властивості структури визначаються внутрішніми паразитними ємностями, що складаються з міжелектродних ємностей МДН транзистора, аналогічних розглянутим в попередньому розділі, і додаткових ємностей р-n-p транзистора: бар'єрної ємності колектор емітер і дифузійної ємності прямозмщеного емітерного переходу (Рис. 3.11). Головною відмінною

рисуою IGBT структури попорівняно з МДН (транзистором є наявність неосновних носіїв накопичених в базових областях комірки. Швидке польове вимикання МДН складової структури призводить до відсічення базової  $n$ -області та подальшого зменшення накопиченого заряду тільки на основі рекомбінаційних ефектів [7]. Це, в свою чергу, визначає наявність додаткової фази в вимикати струмі транзистора, так-званою хвостовою частиною колекторного струму (tail current), погіршує частотні властивості структури (рис. 1.17).

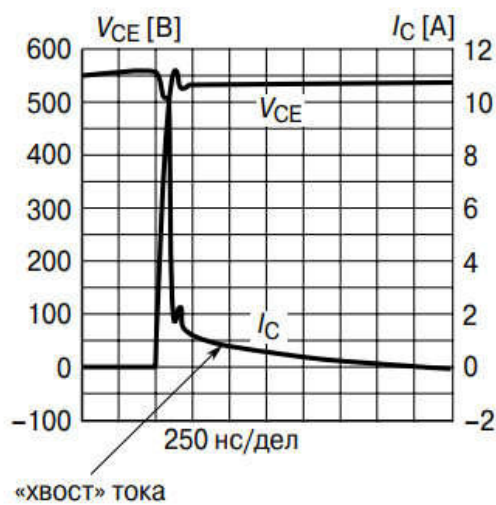


Рисунок 1.17 - Залишковий колекторний струм («хвіст» струму) при виключенні IGBT

#### 1.2.4 Одноопераційні тиристори

На рисунку 1.18 представлена структура потужного тиристорного ключа, керованого світлом (Ultra High Power Light Trigger Thyristor). Дана структура є не тільки багатокомірковою як це зазвичай в силових ключах, а й дворівневою, тобто містить основну та допоміжну частини. Згаданий в транзисторних ключах ефект поздовжнього опору бази, що викликає нерівномірний розподіл струму всередині базового шару, в тиристорних структурах виражений ще більш сильно (в силу великих геометричних розмірів). Це призводить до

затримки вимикання тиристорних структур по всій площі, що не тільки погіршує динамічні характеристики ключа, а й є однією з головних причин локального теплового перевантаження. Дворівнева структура, яка містить додатковий внутрішній тиристор, призначена для більш ефективного включення основної структури, менш схильна до явищ локальних перевантажень.

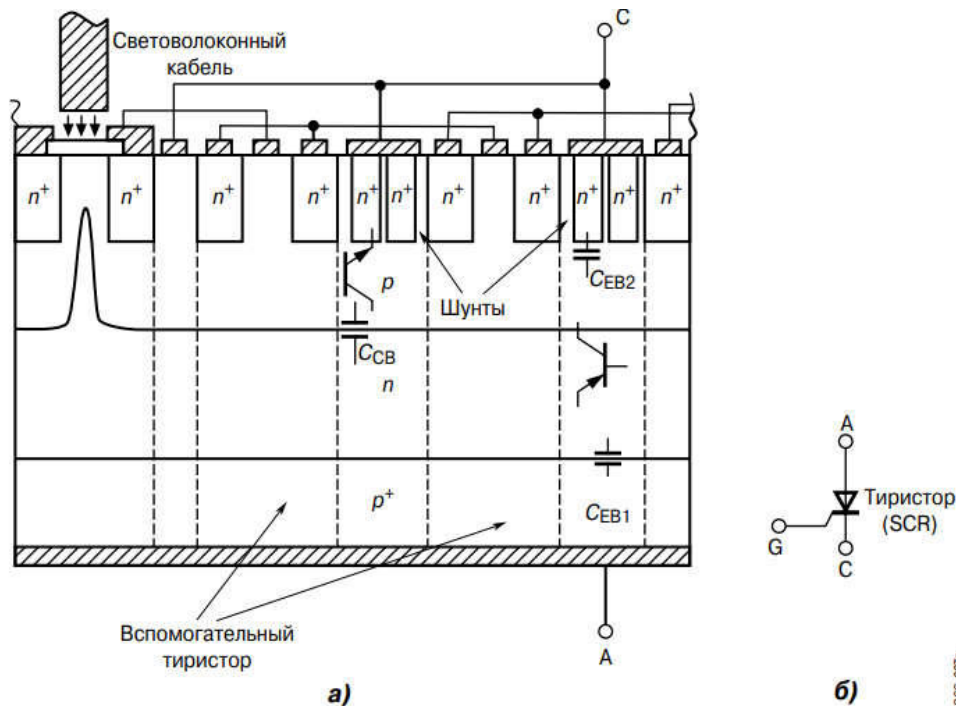


Рисунок 1.18 - Поперечний переріз структури високовольтного тиристора, керованого квантами світла (а), умовне позначення одноопераційних тиристора (б)

Схемотехнічно побудова тиристорної структури може бути представлено як це показано на Рис. 1.19. Фізично це є багатоканальною структурою, в якій чередуються  $p^+$ - $n$ - $p$ - $n^+$  шари основної і допоміжної областей. Дана структура виготовляється методом двосторонньої дифузії, коли в високоомну пластину  $n$  типу вводиться акцепторная домішка, в результаті якої створюється анодна  $p^+$  область і області тонкої ( $p$  тип провідності) і широка ( $n$  тип) бази. Потім методом локальної дифузії створюють катодні  $n^+$  шари і формується відповідна геометрія  $p$  бази. Вже згадана структура містить розподілене шунтування

катодного р-n переходу в основній структурі тиристора. Зазвичай шунти є локальними ділянками р бази циліндричної форми, що примикають до контакту катода і рівномірно розподілені по всій площі структури. Основне призначення шунтування - поліпшення температурної стабільності структури і підвищення її завадостійкості (Перш за все від стрибків напруги в анодному ланцюзі тиристора) [7].

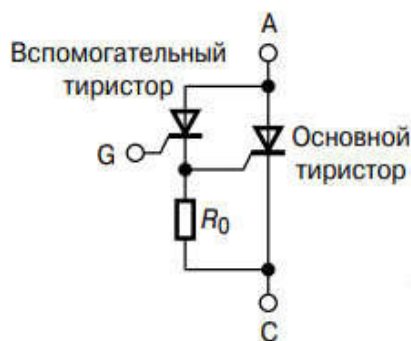


Рисунок 1.19 - Еквівалентна схема р-n-p-n структури з допоміжним тиристором

У закритому стані структури основне поле від дії зовнішнього напруги, прикладеного до анода тиристора, зосереджено в області просторового заряду зворотньоозміщеного переходу. При прямій блокувальній здатності (плюс на аноді) в закритому стані знаходиться центральний р-n перехід, розташований між базами тиристора. При зворотній напрузі (мінус на аноді) зовнішнє поле розташовується в закритому анодному переході структури (між анодною р<sup>+</sup> областю і n базовою). Зашунтований катодний перехід, хоча і знаходиться під зворотнім зміщенням, не відіграє суттєвої ролі в блокуванні зворотньої напруги, так як має максимальне напруження не більше декількох вольт.

Основними типами пробою, який може відбуватися в зворотньоозміщеному переході тиристора, є ефект змикання об'ємного заряду, лавинний і поверхневий пробій. Змикання об'ємного заряду настає, коли межа шару об'ємного заряду через базову область доходить до протилежного переходу. При цьому, як правило, не виникає жодних пошкоджень, якщо



анодний струм підтримується в розумних межах. Лавинний пробій в кремнієвої структурі настає при умові, якщо електричне поле досягає критичного значення. При цьому вільні носії в шарі об'ємного заряду розганяються до такої швидкості, що при їх зіткненні з ґратами кристала утворюються електронно-діркові пари. Нові носії також прискорюються, стикаються і утворюють нові пари і т.д. Процес приймає лавиноподібний характер і здатний пошкодити структуру. Пробій по поверхні також зумовлений ефектом лавиноутворення, однак для цього процесу необхідне менше електричне поле. Через недосконалість кристалічної решітки біля поверхні комірки, різного роду дефектів і забруднень пробій по поверхні носить локальний характер і може наступити вже при невеликій потужності, що виділяється в зворотньоозміщеному переході.

В залежності від характеру навантаження і рівня перемикання струму в структурі тиристора реалізуються два основні режими. Один з них відповідає високому рівню інжекції у вузькій рбазі, а інший відповідно низькому. Широка n база тиристора виконується, як правило, найбільш високоомною, і в ній практично завжди реалізується високий рівень інжекції, характерний для силових перемикачів. Найбільш просто механізм дії позитивного зворотного зв'язку може бути продемонстровано на основі двухтранзисторного аналога розглянутої структури, показаної на рис. 1.20. У такій моделі колекторний струм кожного з транзисторів одночасно є базовим струмом другого. Перемикання структури тиристора в провідний стан відбувається при виконанні умови, при якому сума коефіцієнтів передачі струмів транзисторів від емітера до колектора стає рівною одиниці. У відкритому стані всі переходи тиристора зміщені в прямому напрямку. Сума напруг на цих переходах визначає пряму напруга відкритого ключа. Зрозуміло, певний внесок вносить також падіння напруги на контактах, струмовідводу і на омічних складових шарів структури. При підвищеній щільності анодного струму омічними падіннями напруги в р і n областях можна знехтувати в силу модуляції їх провідності інжекттованими носіями. Для зменшення прямого падіння напруги

вигідно збільшувати час життя неосновних носіїв, однак при цьому погіршуються динамічні характеристики структури. Для кремнієвої структури тиристора пряме падіння напруги має негативний температурний коефіцієнт ( $\sim 2 \text{ мВ} / ^\circ \text{C}$ ), що слід враховувати при оцінці можливості самонагріву структури при підвищених щільностях анодного струму [7].

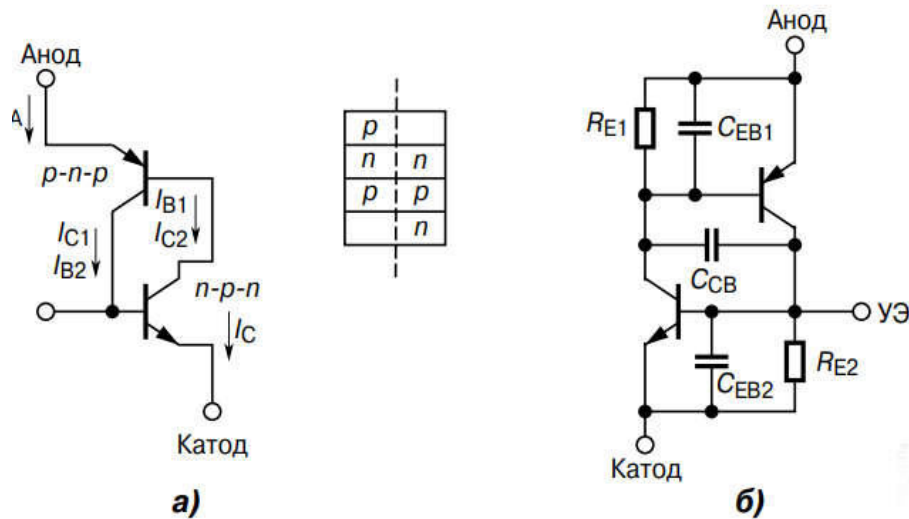


Рисунок 1.20 - Двохтранзисторний аналог р-п-р-п структури (а) і її еквівалентна схема (б)

Сформульований вище критерій перемикання структури в пропровідний стан може бути реалізований не тільки за допомогою управляючого струму або світлового випромінювання. Іншими механізмами перемикання можуть бути тепловий нагрів структури, перевищення допустимого рівня напруги в анодному ланцюзі тиристора, підвищення швидкості зміни даної напруги, іонізуюче випромінювання. Усі ці чинники слід враховувати при забезпеченні надійної роботи тиристорних ключів.

Перехідний процес виключення одноопераційних тиристора фактично визначає його граничний швидкодію. Вивчення механізмів відновлення замикаючих властивостей структури має важливе значення з точки зору оцінки комутаційних втрат і надійності роботи ключа.

### 1.2.5 Запірні тиристори

Для ліквідації ефектів локалізації і шнуровання анодного струму і зменшення впливу поздовжнього опору базового р шару в замикаються по електроду управління тиристорах (Рис. 1.21) використовують багатоканальну структуру з практично однорідними властивостями складових осередків.

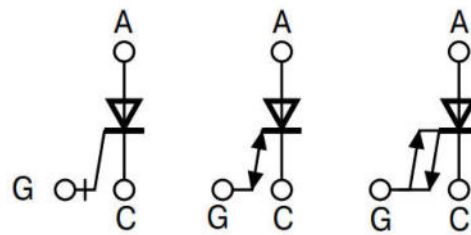


Рисунок 1.21 - Умовні позначення запиірних двухопераційних тиристорів

Залежно від зворотного блокує здатності тиристора використовують два основних типи базових осередків, представлених на Рис. 1.22. Дані осередки мають вертикальну структуру з планарним розташуванням катодного і керуючого електродів. У вихідній високоомній кремнієвій пластині  $n^-$  за допомогою двосторонньої дифузії акцепторної домішки формують  $p^+$  область анода і  $p$  область базового шару тиристора. Потім, застосовуючи локальну донорну дифузію, створюють  $n^+$  області катода і поверхневі ділянки керуючого електрода до вузької  $p$  бази. Важливим моментом є точність відтворення геометричних розмірів кожної області, що забезпечує ідентичність характеристик окремих осередків. Структура на рис. 1.22, А використовується в приладах з високою зворотною напругою близьким по величині до прямої блокувальної напрузі. Областю застосування таких тиристорів є перетворювачі без зворотних шунтуючих діодів, наприклад керовані випрямлячі. Оскільки зворотна напруга тиристора падає на анодному  $p^+ - n^-$  переході,  $p^+$  область анода виконується однорідною по всій площі осередку. Однак це підвищує падіння прямих напруг на відкритій структурі ( $> 2.5$  В) і збільшує струми витоку [7].

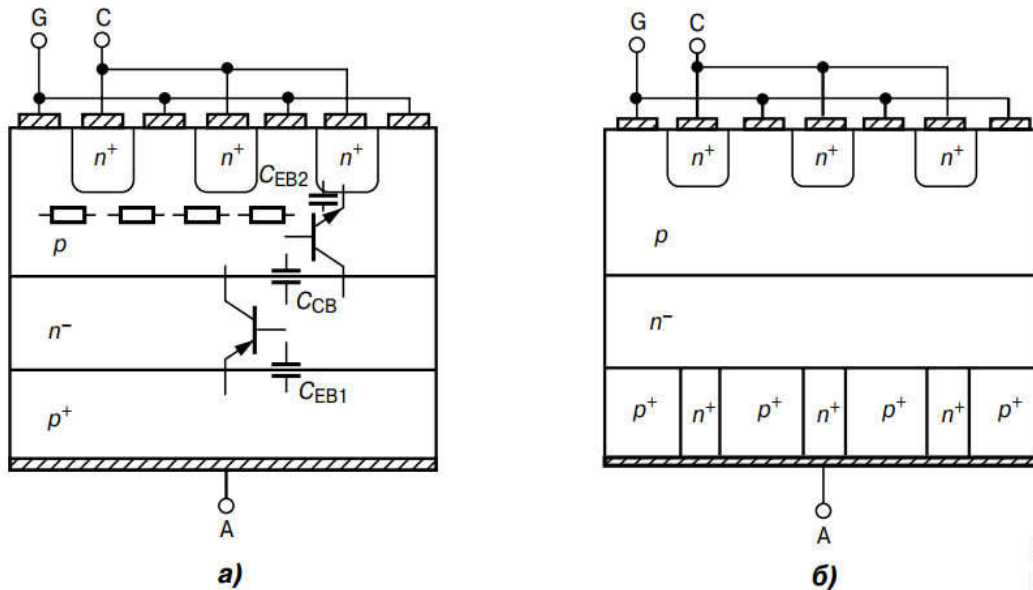


Рисунок 1.22 Основні структури, запірного (двухопераційного) тиристора ГТО: зі зворотною блокуючою здатністю (а) і з шунтуванням анодного переходу (б)

Зазначених недоліків позбавлений другий різновид запірних тиристорів - з шунтуванням анодного переходу (рис. 1.22, б). У структурі даних тиристорів через високолеговані  $n^+$  ділянки, сформовані в анодному шарі, здійснюють розподілене шунтування відповідного переходу. Такі прилади не здатні блокувати високі зворотні напруги. Однак цього і не потрібно в багатьох практичних схемах застосування (наприклад, в автономних інверторах напруги).

Фізичні процеси, що протікають в структурах замикаються тиристорів, багато в чому аналогічні вже розглянутим для одноопераційних приладу. Виняток становить процес переривання анодного струму негативним струмом управління. Вважаємо, що до початку процесу виключення обидва біполярних транзистора р-п-р-п структури знаходяться в стані насичення (центральний перехід має позитивний зсув). При достатній амплітуді і тривалості замикаючого струму, а також рівномірності його розподілу за однорідними осередкам надмірна концентрація неосновних носіїв спочатку знижується до

нуля поблизу центрального переходу структури. При цьому колекторні переходи обох транзисторів одночасно зміщуються в зворотному напрямку, сприймаючи частину зовнішньої анодної напруги. Так як обидва транзистора починають працювати в активному режимі, в структурі виникає позитивний зворотний зв'язок при негативному базовому струмі в n-p-n транзисторі. Внаслідок лавиноподібного зменшення зарядів в базових областях анодний струм тиристора починає регенеративно знижуватися. В результаті n-p-n транзистор першим потрапляє в область відсічення. Дія позитивного зворотного зв'язку припиняється, і подальший спад анодного струму визначається рекомбінацією залишкового заряду в n базі тиристора.

### 1.2.6 Індукційні тиристори

Розглянемо особливості структури індукційного тиристора на прикладі базової комірки з поверхневим затвором (Рис. 1.23). Основною відмінністю від транзисторного варіанта структури є використання діркового напівпровідникового матеріалу підкладки, позначеного як  $p^+$  шар. Зворотний бік підкладки покритий шаром металізації і являє собою анод тиристора. Частина структури, розташована над анодним шаром, практично повторює транзисторний варіант і складається з високоомної епітаксiальної  $n^-$  області і поверхневих  $p^+$  областей затвора (керуючого електрода) і катода ( $n^+$  шар). По всій видимості, наявність чотирьох шарів різної провідності визначили застосування слова тиристор в позначенні подібної структури. Однак важливою особливістю індукційного тиристора в порівнянні з іншими керованими вентиляними приладами (перш за все SCR і GTO) є відсутність внутрішньої позитивного зворотного зв'язку. Нерегенеративний механізм включення цієї структури дозволяє виділити такі важливі переваги, як стійкість до зовнішніх впливів, підвищений діапазон робочих температур (понад  $200^\circ\text{C}$ ), можливість перемикання анодного струму підвищеної щільності. Індукційний тиристор поєднує високу перевантажувальну здатність

по струму з швидким протіканням процесів перемикавання. Провідний стан даної структури забезпечується простим зняттям негативної напруги управління на затворі[7].

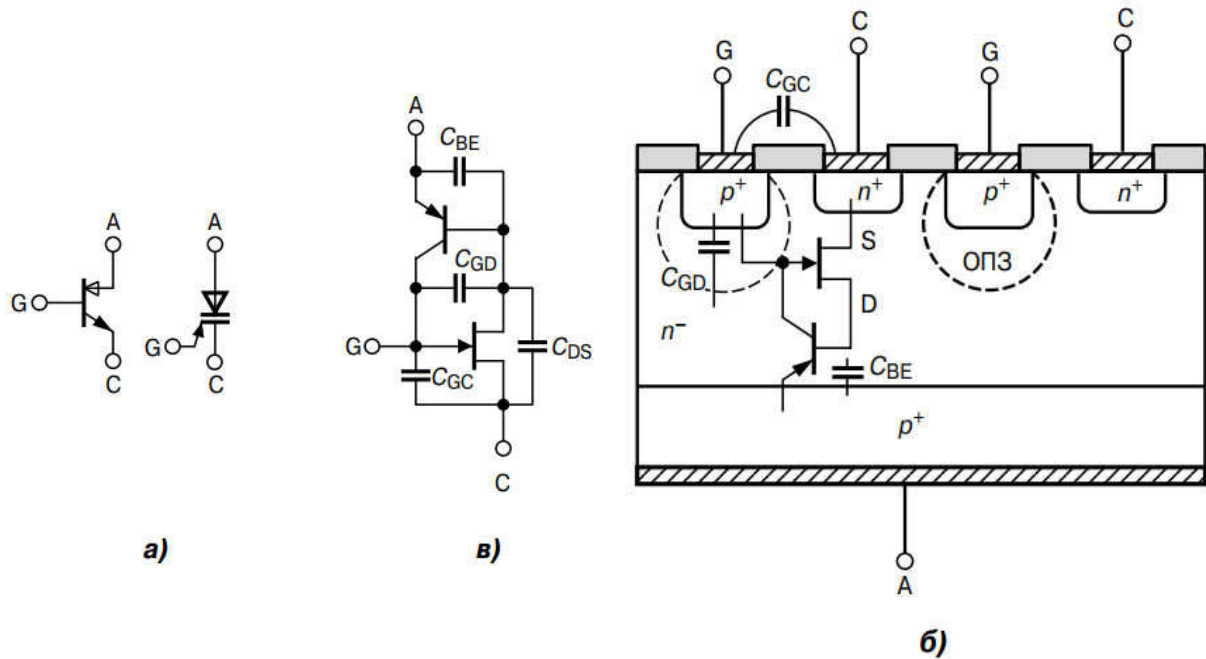


Рисунок 1.23 - Умовне позначення індукційного тиристора (а), поперечний переріз його базової комірки (б), еквівалентна схема структури комірки (в)

При цьому з боку анодного  $p^+$  шару здійснюється інжекція дірок, яка веде до модуляції високоомного епітаксiального  $n^-$  шару. Так як на шляху протікання анодного струму знаходиться всього один  $p^+-n^-$  перехід, пряме падіння на відкритому SITH значно менше, ніж у тиристорів зі звичайною  $p-n-p-n$  структурою. Температурна залежність даної напруги визначається позитивним температурним коефіцієнтом опору найбільш високоомного епітаксiального  $n^-$  шару і негативним для  $p^+-n^-$  переходу. Результуючий вплив при високій щільності анодного струму завжди позитивний, тому в структурі спостерігається природне вирівнювання струмів між окремими осередками. Як результат - здатність до великих імпульсним перевантажень по струму і підвищена теплостійкість через відсутність ефектів шнуровання. інжекція з

анодної області робить необов'язковою подачу позитивного керуючого струму через затвор тиристора для модуляції внутрішнього опору відкритої структури (що необхідно у випадку з індукційним транзистором). Хоча невеликий позитивний струм управління (близько 2 ... 3 А) іноді формується з метою прискорення фронту включення. Сказане, звичайно, відноситься до нормально відкритої структури SITH. Існують також нормально закриті структури індукційних тиристорів, що не проводять струм при нульовому зміщенні на керуючій сітці. Це досягається більш щільним розміщенням осередків затвора, що перекривають канал навіть власної областю просторового заряду. У цьому випадку позитивний відмикаючий струм затвора завжди присутній [7].

Модуляція опору  $n^-$  області тиристора інжектуючою носіями як з боку затвора (для нормально закритих структур), так і з боку анодного  $p^+n^-$  переходу призводить до появи в даному шарі обох типів носіїв. В цьому випадку процес виключення структури буде супроводжуватися ефектом колектирування дірок з  $n^-$  шару зворотнорозміщеним переходом управляючої сітки. Дійсно, в структурі SITH при прямому зміщенні анодного і зворотному - керуючого переходів можна виділити біполярний  $p-n-p$  транзистор, з'єднаний з  $n$  каналним польовим транзистором. При подачі негативної напруги в ланцюг затвора польовий  $n$  каналний транзистор миттєво вимикається, відсікаючи базовий вивід  $p-n-p$  біполярного приладу. Тоді вимикання даної осередки індукційного тиристора можна уявити як виключення біполярного транзистора з обірваною базою (Рис. 1.24).

Динамічні характеристики виключення при цьому визначаються часом життя дірок в епітаксимальному  $n^-$  шарі. Однак надмірне зменшення часу життя призводить до збільшення залишкових напружень на відкритій структурі. Тому оптимальне поєднання комутаційних і статичних втрат є актуальним для індукційного тиристора. Ефект колектирування дірок і розсмоктування накопиченого заряду завжди супроводжується протіканням щодо великої амплітуди негативного струму по ланцюгу затвора тиристора.

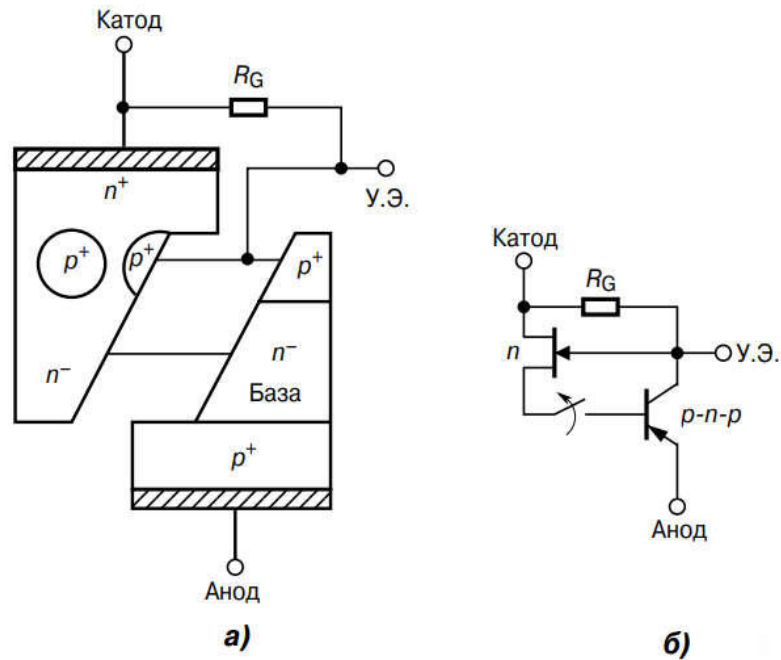


Рисунок 1.24 - Конструкція індукційного тиристора як об'єднання п каналного польового транзистора і біполярного р-п-р транзистора (а) і еквівалентна схема процесу вимикання (б)

### 1.3 Формувачі імпульсів керування

Силовая частина, виконана на керованих ключах, забезпечує передачу і перетворення енергії від джерела живлення до навантаження. Завдання управляючої частини - управління потоком енергії, а також збір і обробка інформації про стан і функціонування всієї системи перетворювача і діагностика її несправностей. Система управління призначена для вироблення імпульсів управління силовими ключами. Функціонально вона являє собою окремий, самостійний блок. У схемотехнічному і конструктивному виконанні система управління є частиною загальної інформаційної системи. Необхідні характеристики системи управління визначаються схемою і режимом роботи перетворювача.

Система управління імпульсними перетворювачами постійної напруги будується на основі імпульсних методів регулювання вихідних напруг. Тут також застосовується широтно-імпульсний метод регулювання, який змінює



тривалість керуючих імпульсів при незмінній частоті їх проходження, а також частотно-імпульсний метод, який відповідно змінює частоту проходження імпульсів при їх постійній тривалості. Найбільшого поширення набули системи управління першої групи, що містять спеціальний широтно-імпульсний модулятор, керуючий роботою регулює ключа (Рис. 1.25).

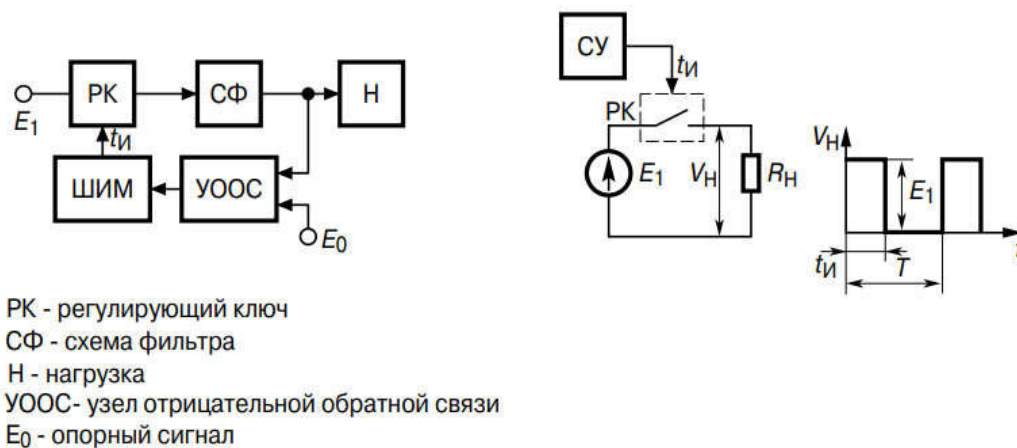


Рисунок 1.25 - Широтно-імпульсна система управління імпульсним перетворювачем постійної напруги

Для стабілізації вихідної напруги в системах управління імпульсними перетворювачами створюють замкнутий контур регулювання по відхиленню вихідної напруги від заданого опорного рівня. Істотною відмінністю систем управління автономними інверторами є заміна блоку синхронізації генератором тактових імпульсів, який визначає частоту вихідної напруги або струму [7].

Сучасна тенденція розвитку систем управління перетворювачами характеризується підвищенням ступеня інтеграції елементів. Схемотехнічні рішення на базі дискретних компонентів поступаються місцем інтегральних мікросхем і мікроконтролерів, що забезпечує перехід від жорстких алгоритмів управління до більш гнучких, максимально враховуючи специфіку роботи ключа і схеми.

Найбільш універсальним засобом для створення керуючої частини перетворювача є мікроконтролер, який, по-перше, управляє логікою

перемикання вентилів силової частини, отримуючи сигнали зворотних зв'язків по струмів і напруг, і, по-друге, забезпечує інтерфейсні функції для зв'язку з оператором і іншими технологічними об'єктами. Наприклад, до складу мікроконтролерів для застосування в системах управління електродвигунами включається необхідне число програмованих ШІМ генераторів, які, отримуючи від процесора інформацію про необхідну частоту і скважність, самостійно здійснюють узгоджене управління силовими ключами інвертора.

Окрім цього, модуль ШІМ виконує додаткові функції узгодження ШІМ сигналів і управління їх полярністю, вставку програмованого так званого «мертвого часу» для управління верхнім і нижнім ключами мостової схеми, а також компенсацію впливу даного часу на спотворення вихідної напруги навантаження (Рис. 1.26).

Як правило, потужності вихідних сигналів цифрових схем управління недостатньо для надійної роботи силових ключів. З цієї причини в системах управління використовують вихідні підсилювачі, звані також кінцевими каскадами. Дані схеми повинні забезпечувати такі рівні сигналів управління, щоб втрати потужності в вимкненому або відкритому стані ключа, а також в динамічних режимах перемикання були мінімально можливими і не перевищували допустимих меж. Найважливішою додатковою функцією вихідних підсилювачів є захист силового ключа. Це здійснюється шляхом контролю за певними електричними параметрами ключа і забезпеченням його виключення подачею додаткового замикаючого сигналу через крайовий підсилювач. У більшості випадків вихідний підсилювач забезпечує також потенційну розв'язку між силовою і інформаційною частиною перетворювача. Для ланцюгів управління потужними напівпровідниковими ключами розробляються спеціальні інтегральні схеми вихідних підсилювачів, звані драйверами (driver) [7].

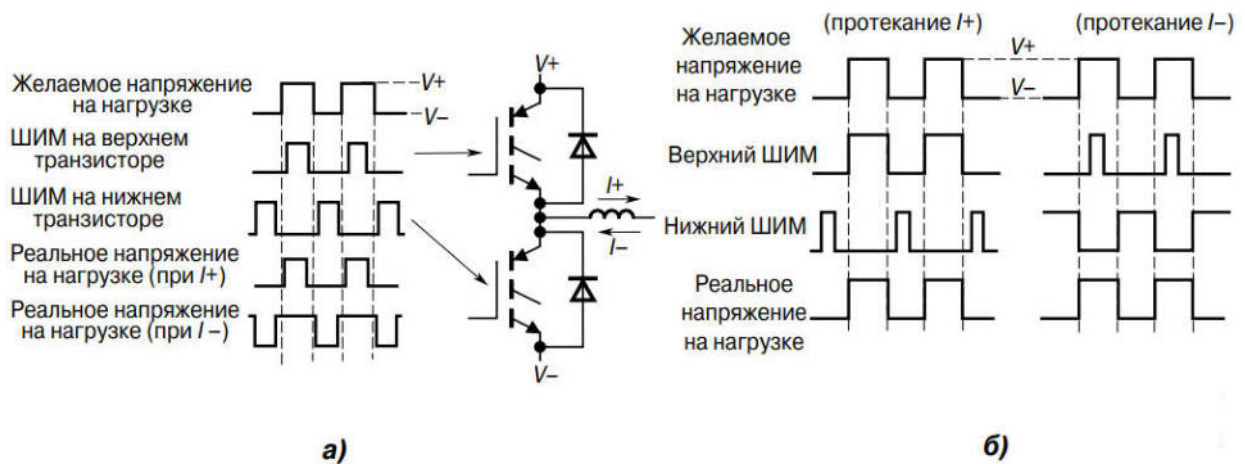


Рисунок 1.26 - Вплив «мертвого часу» на вихідну напругу (а) і компенсація його впливу модулем ШІМ (б)

#### 1.4 Засоби моделювання АІН та комплексів в які вони входять

Моделювання (англ. scientific modelling, simulation, нім. Modellieren n, Modellierung f, Simulation f) — це метод дослідження об'єктів пізнання (явищ, пристроїв, процесів), що ґрунтується на заміні конкретного об'єкта досліджень (оригіналу) іншим, подібним до нього (моделлю).

##### 1.4.1 Загальний опис і використання моделювання

Моделювання в широкому сенсі — це особливий пізнавальний процес, метод теоретичного та практичного опосередкованого пізнання, коли суб'єкт замість безпосереднього об'єкта пізнання вибирає чи створює схожий із ним допоміжний об'єкт-замісник (модель), досліджує його, а здобуту інформацію переносить на реальний предмет вивчення.

Моделювання — це процес створення та дослідження моделі, а модель — засіб, форма наукового пізнання.

Моделювання – складна, трудомістка і відповідальна наукова задача. Іноді дослідження за допомогою моделей є єдино можливим способом експериментального вивчення технологічних процесів. Так, процеси, які

тривають багато років, можна вивчати на моделях протягом короткого проміжку часу. І навпаки, швидкоплинні процеси вивчаються на моделях протягом більш довгого часу.

Моделювання різних фізичних процесів виходить з подібності явищ, що розглядаються. Два явища називаються подібними, якщо за характеристиками одного можна одержати характеристики іншого шляхом простого перерахунку. Умовами або критеріями подібності двох явищ є рівності деяких безрозмірних параметрів, які називаються числами або критеріями подібності. Визначення критеріїв подібності при моделюванні процесів, що вивчаються, потребує глибокого знання механізму цих процесів і є досить важкою задачею. При рішенні цієї задачі усі досліджувані процеси слід розділяти на дві суттєво різні групи. До першої групи потрібно віднести процеси і явища, які можна описати рівняннями, до другої, яка становить найбільший інтерес, – процеси і явища, які ще не мають математичного опису. У випадках, коли рівняння досліджуваних процесів невідомі, числа подібності можна знайти за теорією розмірностей. При наявності диференціальних рівнянь досліджуваних процесів числа подібності легко визначаються, як коефіцієнти рівнянь, які представлені в безрозмірному вигляді. Природно, що одержання критеріїв подібності при наявності рівнянь значно простіше, ніж при їх відсутності. Тому теорію розмірностей слід застосовувати для отримання критеріїв подібності тільки при дослідженні процесів, які не мають математичного опису.

Під моделлю розуміється об'єкт будь-якої природи (мислено уявлена або матеріально реалізована система), котрий, відображаючи чи відтворюючи в певному сенсі об'єкт дослідження, здатний заміщати його так, що вивчення моделі дає нову інформацію про об'єкт.

Моделювання широко використовується в дослідженні систем різної природи, але особливого значення воно набуває в соціальному управлінні, в рамках методології системного підходу.

Моделювання — одна з основних категорій теорії пізнання. На ідеї моделювання, по суті, базується будь-який метод наукового дослідження. Основні види моделювання — фізичне і математичне.

Характерною рисою розглядуваного методу є можливість відтворення моделлю відповідно до завдань дослідження тих чи інших істотних властивостей, структур досліджуваного об'єкта, взаємозв'язків і відносин між його елементами. В процесі пізнання модель іде слідом за об'єктом, будучи певною його копією, а у відтворенні, конструюванні, навпаки, об'єкт йде слідом за моделлю, копіюючи її.

Модель фіксує існуючий рівень пізнання про досліджуваний об'єкт. Неможливо створити універсальну модель, котра могла б відповісти на всі запитання, що викликають інтерес; кожна з них дає лише наближений опис явища, причому в різних моделях знаходять відображення різні його властивості. До моделювання звертаються тоді, коли досліджувати реальний об'єкт з усією сукупністю його властивостей недоцільно, незручно або неможливо.

Моделювання — це метод, а модель — форма, засіб наукового пізнання. Метод моделювання володіє загальністю, оскільки змоделювати можна будь-який об'єкт: така можливість рівнозначна визнанню принципової їх пізнаваності.

#### 1.4.2 Перевірка достовірності моделювання

Перевірка достовірності моделювання - процес визначення того, що модель або виконувана імітації точно представляє детальний концептуальний опис, прийнятий розроблювачем. Перевірка достовірності також оцінює ступінь відповідності моделі або імітації змісту і проводиться з використанням прийнятих методів технології програмування.

Перевірка правильності - визначення, чи здається модель або імітація розумною людям, що добре інформовані щодо системи при її вивченні,

заснованому на експлуатаційних показниках моделі. Цей процес не розглядає програмний код або логіку, а скоріше розглядає входи і виходи для гарантії їх уявної реалістичності або показності. Процес визначення ступеня точності, з яким модель або імітація відображає реальний чи створюваний світ.

### 1.4.3. Комп'ютерне моделювання

Традиційно під моделюванням на ЕОМ розумілося лише імітаційне моделювання. Але останніми роками завдяки розвитку графічного інтерфейсу та графічних пакетів значного поширення набуло комп'ютерне структурно-функціональне моделювання, а також розпочалося використання комп'ютера з метою концептуального моделювання, наприклад для побудови систем штучного інтелекту. Отже, поняття «комп'ютерне моделювання» значно ширше за традиційне поняття «моделювання на ЕОМ» [9].

Під комп'ютерною моделлю найчастіше розуміють:

- умовний образ об'єкта чи деякої системи об'єктів (або процесів), описаних за допомогою взаємозалежних комп'ютерних таблиць, схем, діаграм, графіків, малюнків, анімаційних фрагментів, гіпертекстів і т. ін., що відбивають структуру та взаємозв'язки між елементами об'єкта чи системи. Комп'ютерні моделі такого типу називають структурно-функціональними;

- окрему програму, сукупність програм чи програмний комплекс, що дає змогу виконанням послідовності обчислень з подальшим графічним відображенням їх результатів відтворювати (імітувати) процеси функціонування об'єкта (системи об'єктів), що функціонує під впливом різних, як правило випадкових, факторів. Такі моделі називають імітаційними моделями.

Комп'ютерне моделювання — метод розв'язування задачі аналізу або синтезу складної системи, що ґрунтується на використанні її комп'ютерної моделі. Сутність комп'ютерного моделювання полягає у відшуканні кількісних і якісних результатів із залученням наявної моделі. Якісні висновки, зроблені

на підставі такого дослідження, дають змогу розкривати невідомі досі властивості складної системи: її структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність тощо. Кількісні висновки мають переважно характер прогнозу майбутніх чи пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему.

Предметом комп'ютерного моделювання може бути економічна діяльність фірми, банку, промислового підприємства; інформаційно-обчислювальна мережа; технологічний процес; будь-який реальний об'єкт чи процес, наприклад процес інфляції, і взагалі — будь-яка складна система. І хоча цілі комп'ютерного моделювання можуть бути різними, найчастіше воно, як уже зазначалося, становить центральну процедуру системного аналізу — сукупності методологічних засобів, що використовуються для підготовки та прийняття рішень економічного, організаційного, соціального чи технічного характеру.

Комп'ютерна модель складної системи має якомога повніше відбивати всі основні фактори й взаємозв'язки, що характеризують реальні ситуації, критерії та обмеження. До того ж модель має бути настільки універсальною (щоб охоплювати якнайширше коло близьких за призначенням об'єктів) настільки й простою (щоб сприяти виконанню необхідних досліджень із мінімальними витратами).

#### 1.4.4 Програмні комплекси для комп'ютерного моделювання

##### - Micro-Cap

Micro-Cap — SPICE-подібна програма для аналогового і цифрового моделювання електричних та електронних схем з інтегрованим візуальним редактором. Розробляється компанією Spectrum Software. Адаптована до Microsoft Windows-32/64.

##### - Proteus Design

Proteus Design — пакет програм для автоматизованого проектування (САПР) електронних схем. Розробляється компанією Labcenter Electronics (Велика Британія) [10].

Пакет являє собою систему схемотехнічного моделювання, що базується на основі моделей електронних компонентів, прийнятих в PSpice. Відмінною рисою пакету Proteus Design є можливість моделювання роботи програмованих пристроїв: мікроконтролерів, мікропроцесорних систем, DSP і ін. Proteus Design включає в себе більше 6000 електронних компонентів з усіма довідковими даними, а також демонстраційні ознайомчі проекти. Додатково в пакет PROTEUS VSM входить система проектування друкованих плат. Пакет Proteus складається з двох підпрограм: ISIS - програма синтезу та моделювання безпосередньо електронних схем і ARES - програма розробки друкованих плат. Разом з програмою встановлюється набір демонстраційних проектів для ознайомлення. Також програма включає в себе інструменти USBCONN і COMPIM, які дозволяють підключити віртуальний пристрій до USB- і COM-портів комп'ютера.

##### - NI Multisim

Популярний програмний пакет, що дозволяє моделювати електронні схеми і розводити друковані плати.



Головна особливість NI Multisim - простий наочний інтерфейс, потужні засоби графічного аналізу результатів моделювання, наявність віртуальних вимірювальних приладів, які копіюють реальні аналоги. Бібліотека елементів містить понад 2000 SPICE-моделей компонентів National Semiconductor, Analog Devices, Phillips, NXP і інших виробників. Присутні електромеханічні моделі, імпульсні джерела живлення, перетворювачі потужності. Інструмент Convergence Assistant автоматично виправляє параметри SPICE, коригуючи помилки моделювання.

#### - Matlab Simulink

MATLAB — пакет прикладних програм для числового аналізу, а також мова програмування, що використовується в даному пакеті. Система створена компанією The MathWorks і є зручним засобом для роботи з математичними матрицями, малювання функцій, роботи з алгоритмами, створення робочих оболонок (user interfaces) з програмами в інших мовах програмування. Хоча цей продукт спеціалізується на чисельному обчисленні, спеціальні інструментальні засоби працюють з програмним забезпеченням Maple, що робить його повноцінною системою для роботи з алгеброю [11].

MATLAB має більше, ніж мільйон користувачів на виробництвах і науковців. Ціна базової комерційної версії без інструментів близько 2000 дол. США і лише 100 дол. США для навчальних закладів з мінімальним набором інструментів.

Simulink - це графічне середовище імітаційного моделювання, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів, будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні і гібридні, нелінійні і розривні системи [11].

Інтерактивне середовище Simulink, дозволяє використовувати вже готові бібліотеки блоків для моделювання електросилових, механічних і гідравлічних систем, а також застосовувати розвинений модельно-орієнтований підхід при

розробці систем управління, засобів цифрового зв'язку і пристроїв реального часу.

Додаткові пакети розширення Simulink дозволяють вирішувати весь спектр завдань від розробки концепції моделі до тестування, перевірки, генерації коду і апаратної реалізації. Simulink інтегрований в середу MATLAB, що дозволять використовувати вбудовані математичні алгоритми, потужні засоби обробки даних і наукову графіку.

#### 1.4.5 Візуально-блочне моделювання

Синтез математичної моделі електротехнічного комплексу є одним з важливих етапів його створення. Він використовується не тільки як інструмент перевірки ефективності і працездатності технічних рішень по силового обладнання, але також є основою для процедури синтезу системи управління, де силове електрообладнання виступає в якості об'єкта управління. Відносно останнього випадку потрібно відзначити, що процедура синтезу математичних моделей, на думку фахівців, займає близько 80-90% трудомісткості проектування системи управління [12].

На кафедрі електронних систем Інженерного інституту Запорізького національного університету розвивається моделювання електротехнічних комплексів шляхом введення візуально блочного моделювання. При створенні візуально-блочної моделі розглядається підхід до декомпозиції, в якому електротехнічний комплекс видається, не як взаємопов'язана сукупність агрегатів (пристроїв), а як енергетичний тракт [35].

У загальному випадку структура енергетичного тракту може бути розгалуженою. Елементами цієї структури виступають функціональні вузли, щодо енергії, яка передається через комплекс. В даному випадку використовується енергетичний підхід у поданні електротехнічного комплексу.

Даний принцип декомпозиції передбачає виділення замкнутої сукупності з шести елементів [12], що мають певні зображення (рис. 1.27) на схемі енергетичного тракту (СЕТ).

Для зручності всередину структурного елемента поміщається мнемонічний символ, який вказує на фізичну природу цього елемента [35].

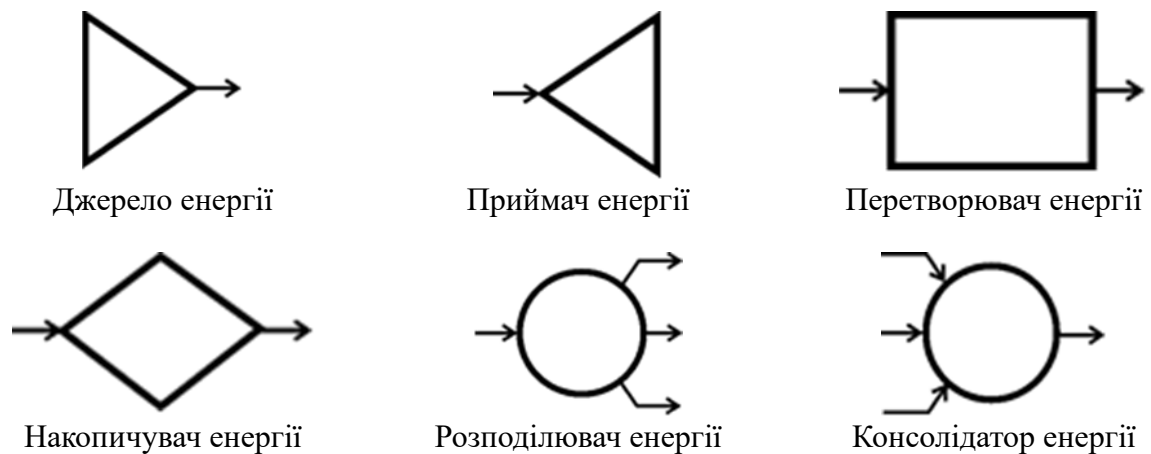


Рисунок 1.27 – Елементи схеми енергетичного тракту [12]

Електротехнічний комплекс представляється, як енергетичний об'єкт, через який проходить потік енергії. Тому обов'язковими елементами цієї структури завжди є джерело і приймач енергії. Джерело енергії - цей елемент енергетичного тракту, який перетворює потік енергії, що приходить з несистеми (зовнішнього середовища) в потік енергії всередині системи [12]. Аналогічно, приймач енергії перетворює потоки енергії всередині електротехнічного комплексу в потоки енергії, що належать несистемі [12]. Обидва ці елементи виступають в ролі посередника, між електротехнічним комплексом і зовнішнім середовищем. Інші елементи можуть, як входити в систему, так і бути відсутнім.

Елемент перетворення відображає функцію зміни форми енергетичного потоку, в якому, при цьому, не відбувається розгалуження потоку енергії [12].

Накопичувальний елемент відображає функцію накопичення енергії. Для електротехнічного комплексу цей елемент може бути пов'язаний: з інерційною обертається масою, пружною зв'язком на скручування для

обертального руху; інерційної масою, пружною зв'язком при поступальному русі; електричної ємністю і індуктивним накопичувачем для електромагнітних процесів; теплоємністю для термодинамічних процесів, і т.д.

Потрібно відзначити, що функція елемента встановлюється відповідно до призначення елемента заданого розробником. При цьому в ньому може бути присутнім процеси, що не відносяться до даної функції. Наприклад, в індуктивному накопичувачі можуть відбуватися омічні втрати, пов'язані з функцією перетворення, так як відбуваються зміни форми енергії з електричної в теплову. Також в елементі може бути присутнім функція розгалуження, так як відбувається поділ потоків енергії на потік, який рухається далі по енергетичному тракту і відсікати потік, у вигляді втрат з наступним виходом в "несістему". За необхідності дане розгалуження може бути відображено в структурі тракту, однак, з точки зору обраної концепції, це недоцільно. Доцільним є відображення в структурі тільки енергетичних функцій, що стосуються основного призначення елементів електротехнічного комплексу [12]. Другорядні ж функції (втрати, паразитні ємності і індуктивності, і т.д.), в цьому випадку потрібно включати всередину елемента структури.

Розподільник і консолідатор дозволяють описувати багатоканальні структури в формі енергетичного тракту. При цьому слід звернути увагу на особливість структури причинно-наслідкових зв'язків даних елементів. В результаті проведеного аналізу різних схем електротехнічних комплексів була виявлена принципова закономірність, котра може бути виражена у вигляді наступних дуальних правил [12]:

1) У розподільному вузлі, як елементі структури причинно-наслідкових зв'язків, прямий причинно-наслідковий зв'язок транслюється на виходи вузла, а зворотний зв'язок проходить через операцію підсумовування.

2) В консолідуючому вузлі, як елементі структури причинно-наслідкових зв'язків, навпаки, прямий причинно-наслідковий зв'язок, проходить через операцію підсумовування, а зворотний зв'язок транслюється на входи вузла.

На наступному етапі елементи схеми енергетичного тракту замінюються відповідними елементами з бібліотеки елементів візуально-блокової моделі (ВБМ). Елементи ВБМ розміщуються в тих же позиціях, що і елементи СЕТ. Після розміщення елементів ВБМ проводиться їх з'єднання у вигляді спрямованих відрізків. Спочатку вводяться прямі причинно-наслідкові зв'язки, а потім замикаються зворотні зв'язки. Завершеність моделі формально визначається відсутністю "незакритих" входів всіх елементів ВБМ. Крім того, зазвичай в структурі ВБМ присутні вхідні величини, наприклад коефіцієнт заповнення для імпульсного перетворювача, завдання частоти для автономного інвертора і т.д..

### 1.5 Постановка завдання дослідження

Основною задачею, яку необхідно вирішити, є не моделювання тільки однофазного мостового автономного інвертора напруги (АІН), а моделювання електротехнічного комплексу (індукційного нагріву) складовою частиною якого є АІН. При цьому виникає ряд проблем. Перша проблема є технологічною. Для початку необхідно синтезувати модель електротехнічного комплексу, і потім провести її налагодження. При цьому на кожному з цих кроків висока ймовірність появи різноманітних помилок або ж простої необхідності змінити вхідні дані. Що плавно перетікає в наступну проблему - час моделювання – він може розростися до декількох діб і при кожній корекції вхідних даних виникатиме необхідність розпочинати моделювання з початку.

Одним з варіантом вирішення цих проблем є моделювання за середніми значеннями. Це в декілька разів пришвидшує створення моделі та швидкість моделювання. При цьому, в більшості випадків, достатньо провести моделювання за середніми значеннями, що дозволить пришвидшити процес моделювання для великих проміжків часу, швидко проводити зміну режимів управління системою та коригувати включені блоки.

Задачею на дипломний проект є розробка візуально-блочної моделі автономного мостового інвертора напруги в середовищі Matlab Simulink для моделювання за середніми значеннями, її математичне обґрунтування та проведення перевірки достовірності моделі (верифікація). Цей елемент ввійде в бібліотеку ВБМ, підрозділ напівпровідникових перетворювачів [12]. Після цього, як приклад, необхідно провести моделювання складного комплексу, однією з основних складових є мостовий інвертор напруги (як приклад, комплекс індукційного нагріву). В результаті необхідно вибрати необхідні режими управління мостовим інвертором для забезпечення найкращого алгоритму управління інвертором, та представити результуючі дані отримані під час проведення моделювання.

## 2 СИНТЕЗ ВІЗУАЛЬНО БЛОЧНОЇ МОДЕЛІ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ

### 2.1 Опис візуально-блочної моделі мостового інвертора напруги

Виходячи з того, що автономний мостовий інвертор напруги є перетворювачем, який перетворює вхідну постійну напругу певної величини в вихідну змінну напругу [1]. Тому, для блоку однофазного мостового інвертора напруги, обов'язковими параметрами є наступні вхідні параметри:

- вхідна напруга ( $U_d$  – значення цього параметру приходить від джерела живлення);
- вихідний струм ( $I_2(1)$  – цей параметр задає навантаження – він надходить як зворотній зв'язок);
- частота імпульсів керування ( $f_u$ );

і наступні вихідні параметри:

- вихідна напруга ( $U_2(1)$  – значення цього параметру формує цей блок);
- вхідний струм ( $I_d$  – цей параметр формує цей блок і він прямо пропорційний струму  $I_2(1)$ );
- частота вихідної напруги ( $f$ ).

Робота однофазної мостової схеми інвертора може бути описана системою рівнянь, що містять комутаційну функцію [14] (рисунок 2.1, А):

$$\begin{cases} u_H = E_d \cdot F_k \\ i_{BX} = i_H \cdot F_k \end{cases} \quad (2.1)$$

де

$$F_k = \begin{cases} +1 & \text{при } 0 < \vartheta < \pi \\ -1 & \text{при } \pi < \vartheta < 2\pi \end{cases} \quad (2.2)$$

Як відомо [1], функція може бути представлена рядом Фур'є:

$$F_k = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{k=1,3,5\dots}^{k=\infty} \frac{1}{k} \cdot \sin k\vartheta \quad (2.3)$$

Якщо прийняти  $k=1$ , тоді використовуючи (2.1) буде можливим визначити амплітуду першої гармоніки вихідної напруги інвертора:

$$U_{2(1)m} = \frac{4}{\pi} U_d = 1,27U_d \quad (2.4)$$

і, відповідно, діюче значення напруги:

$$U_{2(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{2(1)m} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} U_d = 0,9U_d \quad (2.5)$$

Струм, який віддає автономний мостовий інвертор напруги (АІН), залежить від параметрів навантаження, тому для блоку АІН цей параметр є вхідним. А струм, що споживається, АІН сумісно з навантаженням є вихідним параметром, і має аналогічне співвідношення діючому значенню напруги:

$$I_d = 0,9I_{2(1)} \quad (2.6)$$

Але ця формула є справедливою тільки при активному навантаженні, за умови що  $\cos(\varphi)=1$ . Тому враховуючи коефіцієнт потужності отримуємо [16]:

$$I_d = 0,9 \cdot \cos(\varphi) \cdot I_{2(1)} \quad (2.7)$$

Формула (2.5) описує діюче значення напруги для ідеального АІН, тому для визначення комутаційних втрат на ключах інвертора було створено



додатковий блок Pvt(назва ключа). Вихідною величиною даного блоку є напруга, яка втрачається на ключах ( $U_{vt}$ ). Відповідно вихідна діюча напруга АІН:

$$U_{2(1)} = 0,9(U_d - U_{vt}) \quad (2.8)$$

При необхідності зменшити напругу на виході однофазного мостового АІН, можна змінити комутаційну функцію наступним чином (рис. 2.1, Б):

$$F_k = \begin{cases} +1 & \text{при } 0 + \alpha < \vartheta < \pi - \alpha \\ -1 & \text{при } \pi + \alpha < \vartheta < 2\pi - \alpha \\ 0 & \text{при } \vartheta < 0 + \alpha; \pi - \alpha < \vartheta < \pi + \alpha; 2\pi - \alpha < \vartheta \end{cases} \quad (2.9)$$

де  $\alpha$  кут керування, який визначає зсув подачі імпульсу керування на затвори ключів (рис. 2.1). Це дає можливість представити цей параметр через коефіцієнт заповнення( $k_z$ ):

$$k_z = \frac{2\alpha}{\pi}, \text{ за умови } 0 < k_z < 1 \quad (2.10)$$

Частота імпульсів керування ( $f_y$ ) прямо впливає на частоту вихідної напруги:  $f = 0,5f_y$ , тобто частота вихідної напруги є в два рази меншою. Це пояснюється тим що імпульси керування через розподільник імпульсів надходять через один для кожного ключа.

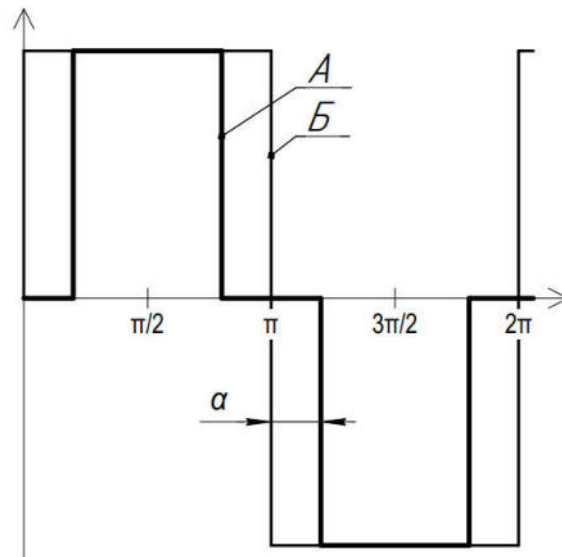
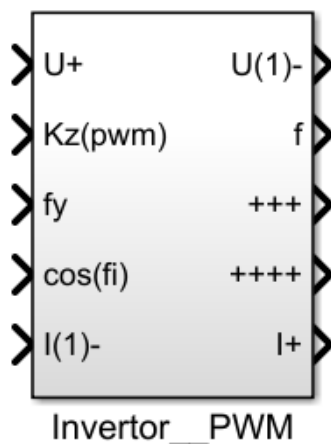


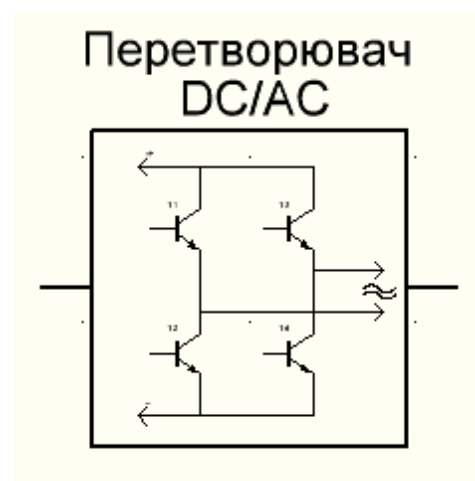
Рисунок 2.1 – Вихідна напруга інвертора:

А – за комутаційною функцією (2.9); Б – за комутаційною функцією (2.1)

Для реалізації вище приведених залежностей було створено візуально блочну модель, зовнішній вигляд якої представлено на рисунку 2.2 А,



А)



Б)

Рисунок 2.2 – Представлення візуально блочної моделі однофазного АІН в середовищі MATLAB Simulink (А); Представлення блоку АІН при створенні енергетичному тракту (Б)

відповідно було додано два входу: коефіцієнт заповнення( $k_z$ ) і коефіцієнт потужності  $\cos(\varphi)$ . Внутрішня реалізація цього блоку можливостями середовища MATLAB Simulink представлено на рисунку 2.3.

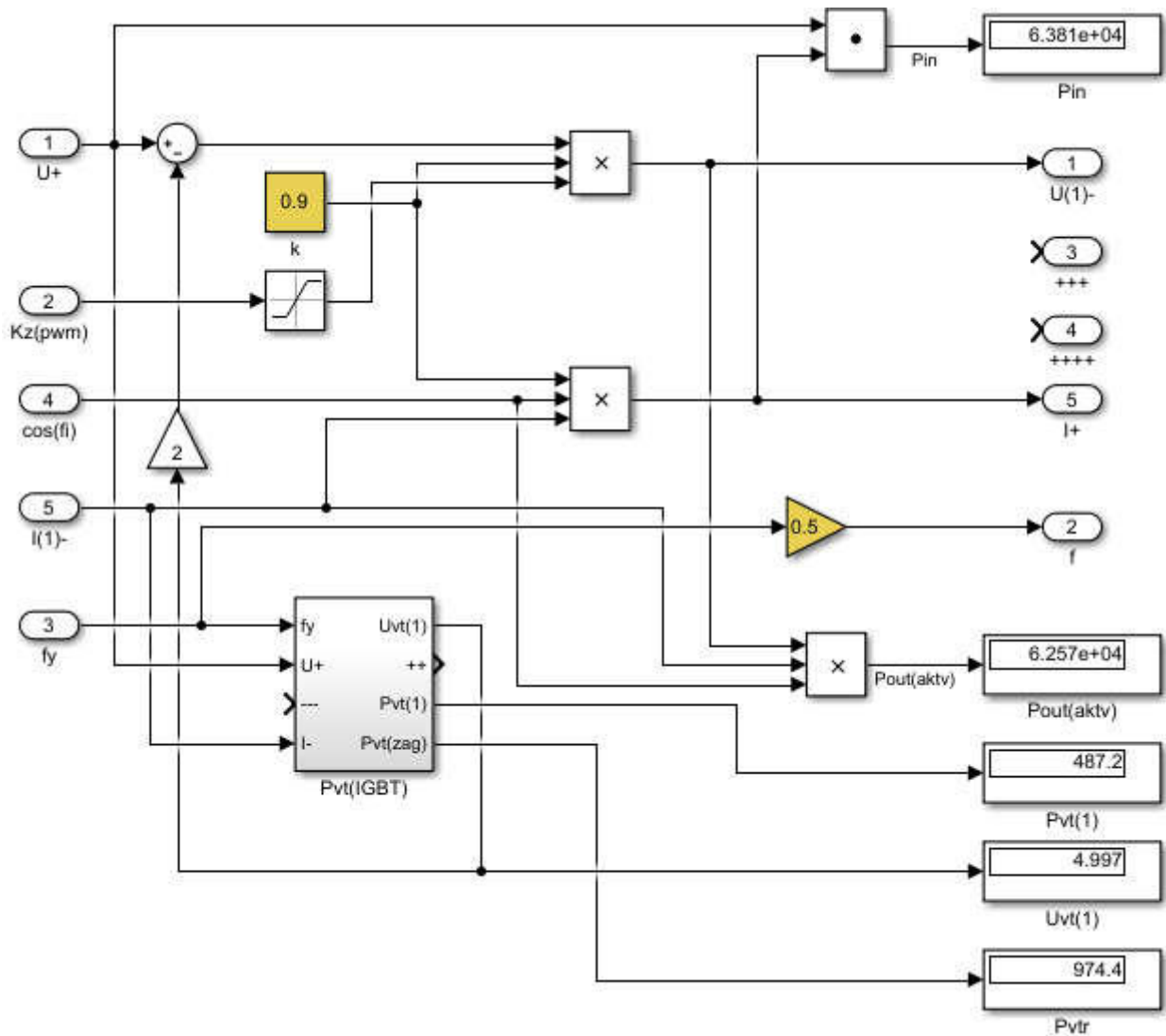


Рисунок 2.3 – Реалізація візуально блочної моделі однофазного АІН в середовищі MATLAB Simulink

При створенні енергетичного тракту (візуалізованого представлення генерації/розподілення/перетворення/споживання енергії [12]) однофазний автономний інвертор напруги відноситься до категорії перетворювачів енергії та представляється відповідно до рис. 2.2 Б.

## 2.2 Опис блоку розрахунку втрат на ключах транзисторів

В більшості випадків при створенні математичних моделей перетворювачів реальні напівпровідникові елементи представляються ідеальними ключами. Це спрощує розрахунки тому що в таких приладах втрати енергії відсутні. Але в реальних напівпровідникових приладах втрати енергії існують і вони звичайно поділяються на статичні і динамічні втрати. Статичні втрати визначаються в основному струмом і падінням напруги від цього струму у відкритому стані транзистора і діода. Динамічні втрати виникають при перемиканнях транзистора, а також при вимиканні зворотного діода.

Для визначення вказаних втрат в модель автономного інвертора було додано відповідний блок. Цей блок є унікальним для кожного типу ключа, при бажанні його можна запараметрувати під певний прилад і зберегти для подальшого використання. Для прикладу було спроектовано спрощений блок, який визначає втрати в приладах типу IGBT. Зовнішній вигляд цього блоку представлено на рисунку 2.4.

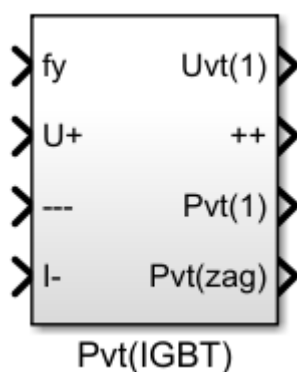


Рисунок 2.4 – Представлення блоку розрахунку втрат на приладах АІН в середовищі MATLAB Simulink

Блок розрахунку втрат на приладах мостового однофазного АІН має наступні вхідні параметри:

- 1) Частота імпульсів керування ( $f_y$ );
- 2) Напруга живлення автономного інвертора ( $U_+$ );
- 3) Зарезервовано;
- 4) Струм, який споживає навантаження ( $I_-$ ).

Вихідними параметрами блоку є:

- 1) Напруга, що втрачається на одному ключу ( $U_{vt(1)}$ );
- 2) Зарезервовано;
- 3) Потужність, яка розсіюється на одному ключу ( $P_{vt(1)}$ );
- 4) Потужність, яка розсіюється на мостовому АІН ( $P_{vt\_zag}$ )/

Напруга, що втрачається на одному приладі оцінюється як складова з втрат переходу колектор-емітер ( $U_{CE}$ ) при середньому чи ж максимально очікуваному струмові та динамічних втрат на транзисторі ( $U_{dyn}$ ):

$$U_{vt(1)} = U_{CE} + U_{dyn} \quad (2.11)$$

Потужність, яка втрачається на одному приладі визначається наступним чином:

$$P_{vt(1)} = (U_{CE} + U_{dyn}) \cdot I_{2(1)} \quad (2.12)$$

Загальні втрати на інверторі є в два рази більшими, ніж втрати на одному приладі. Це пов'язано з тим що в електричне коло ввімкнено максимум два транзистори. Ця залежність реалізована в моделі.

Розрахунок динамічних втрат в транзисторі проводиться в окремому блоці. Всі ці залежності реалізовані в середовищі MATLAB Simulink, що представлено на рис. 2.5.

### 2.2.1 Опис блоку розрахунку динамічних втрат

При оцінці динамічних втрат транзисторів IGBT одним з методів, що використовується, є метод заснований на енергетичних втратах при перемиканні [1]. Для розрахунку втрат за допомогою цього методу з технічної документації ключа необхідно взяти наступні параметри: енергію втрат при вмиканні  $E_{on}$  (turn-on switching losses) та енергію втрат при вимиканні  $E_{off}$  (turn-off switching losses).

Для оцінки динамічних втрат першим кроком буде знаходження сумарної енергії втрат  $E_{ts}$  (total switching losses). Вона знаходиться за простою формулою:

$$E_{ts} = E_{on} + E_{off} \quad (2.13)$$

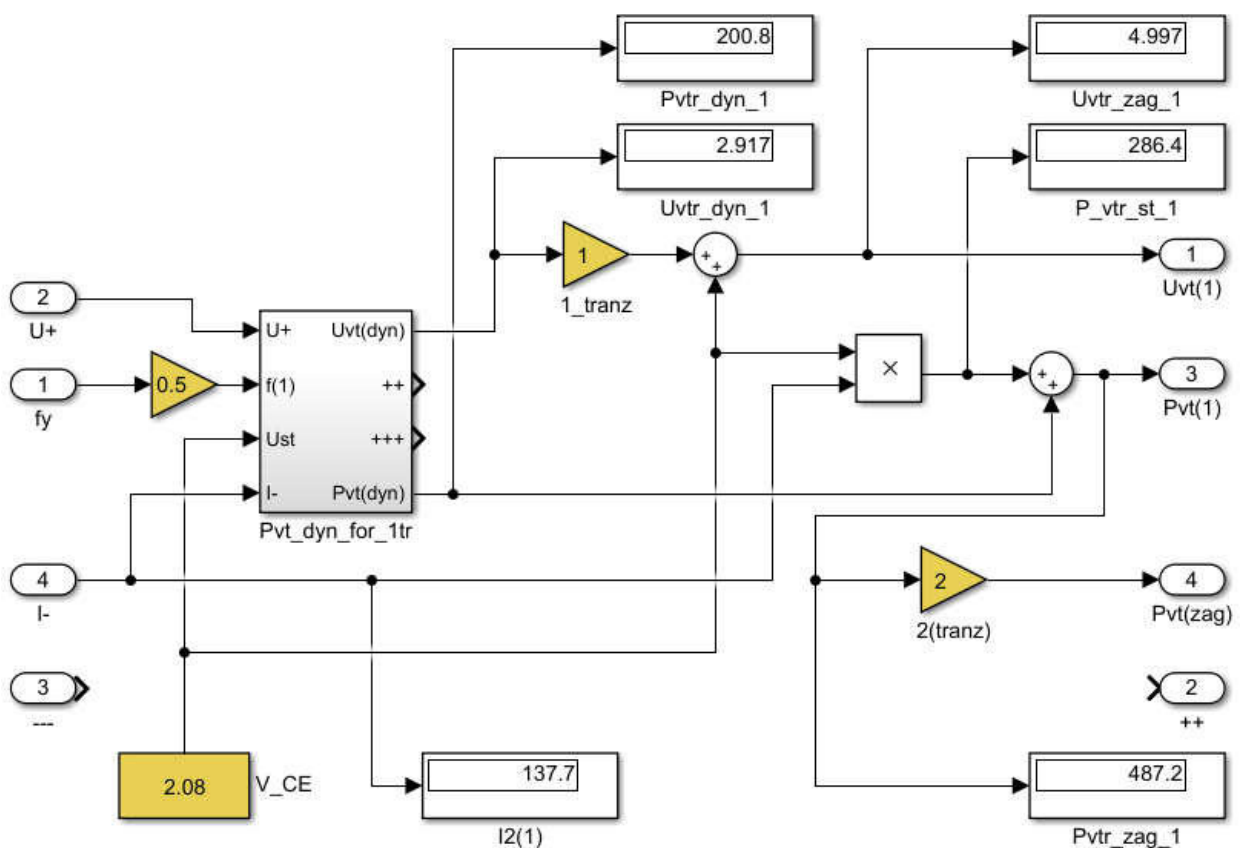


Рисунок 2.5 – Реалізація блоку розрахунку втрат на приладах АІН в середовищі MATLAB Simulink

При цьому втрати при перемиканні можуть бути знайдені наступним чином:

$$P_{vt(1)} = f_{y(1)} \cdot E_{ls} \quad (2.14)$$

де  $f_{y(1)}$  – частота комутації певного ключа.

Знаючи  $P_{vt(1)}$ , можна перевести втрати в середню напругу, яка втрачається при перемиканні:

$$U_{dyn} = \frac{P_{vt(1)}}{I_{2(1)}} \quad (2.14)$$

Ці математичні висновки реалізовані в середовищі MATLAB Simulink в блокові опису динамічних втрат (рис. 2.6). Цей блок має наступні вхідні параметри:

- 1) Напруга живлення автономного інвертора ( $U^+$  - зарезервовано);
- 2) Частота імпульсів керування ( $f_1$ );
- 3) Напруга переходу колектор-емітер ( $U_{ce}$  - зарезервовано);
- 4) Струм, який споживає навантаження ( $I$ ).

Вихідними параметрами блоку є:

- 1) Напруга, що втрачається на одному ключу ( $U_{vt(dyn)}$ );
- 2) Зарезервовано;
- 3) Зарезервовано;
- 4) Потужність, яка втрачається на одному ключу ( $P_{vt(dyn)}$ );

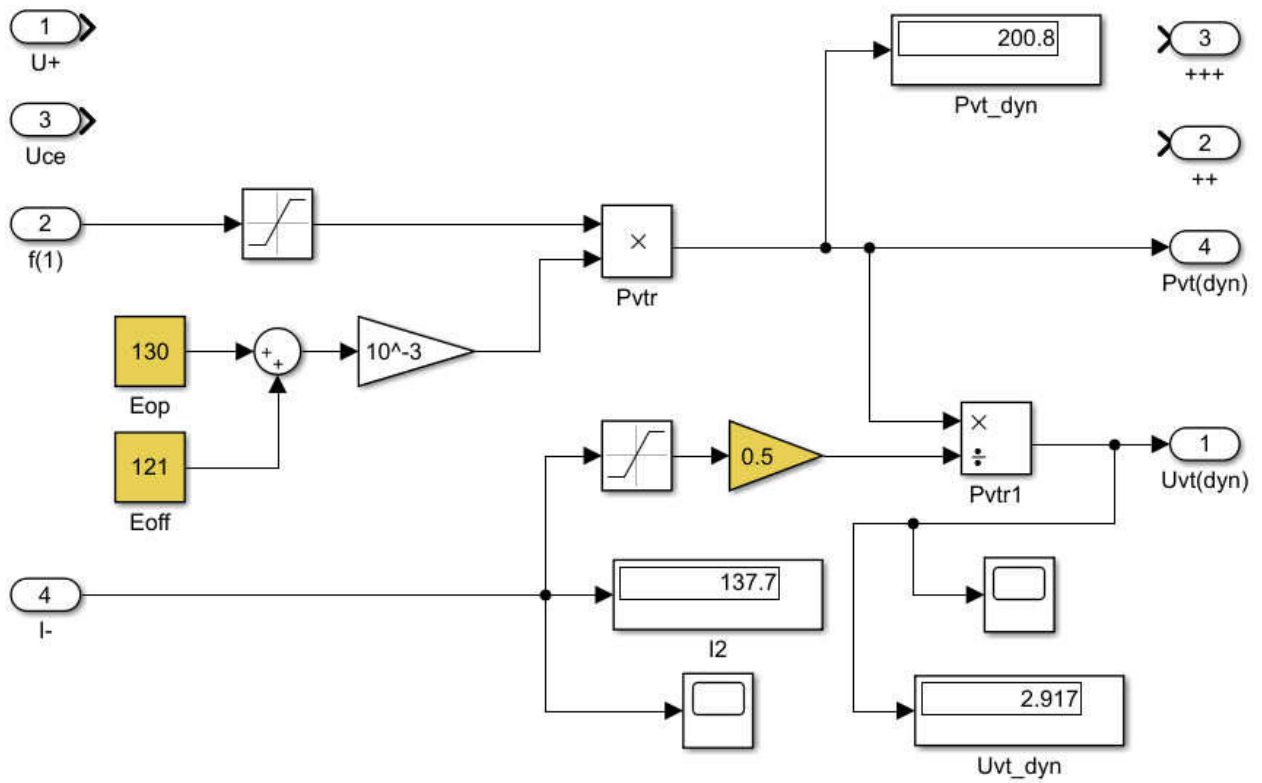


Рисунок 2.6 – Реалізація блоку розрахунку динамічних втрат на приладах АІН в середовищі MATLAB Simulink



### 3 ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛІ

#### 3.1 Опис еталонної моделі однофазного мостового автономного інвертора напруги

Для перевірки на адекватність візуально блочної моделі, в середовищі MATLAB Simulink використовуючи бібліотеку Simscape, було побудовано класичний автономний інвертор напруги (рис. 3.3). В якості комутуючих елементів було використано ключі IGBT з параметрами, які аналогічні технічним характеристикам модуля SEMIKRON SEMiX302GB126HDs [26]. Дані IGBT транзисторів представлені на рис. 3.1, а зворотних діодів на рис. 3.2.

I-V characteristics defined by:	Fundamental nonlinear equations	
Zero gate voltage collector current, $I_{ces}$ :	2.2	mA
Voltage at which $I_{ces}$ is defined:	1200	V
Gate-emitter threshold voltage, $V_{ge(th)}$ :	6.1	V
Collector-emitter saturation voltage, $V_{ce(sat)}$ :	2.15	V
Collector current at which $V_{ce(sat)}$ is defined:	200	A
Gate-emitter voltage at which $V_{ce(sat)}$ is defined:	15	V
Measurement temperature:	25	degC

Рисунок 3.1 – Характеристики IGBT транзисторів в середовищі MATLAB Simulink

Forward voltage:	1.7	V
On resistance:	0.0035	Ohm
Off conductance:	1e-8	1/Ohm

Рисунок 3.2 – Характеристики зворотних діодів в середовищі MATLAB Simulink

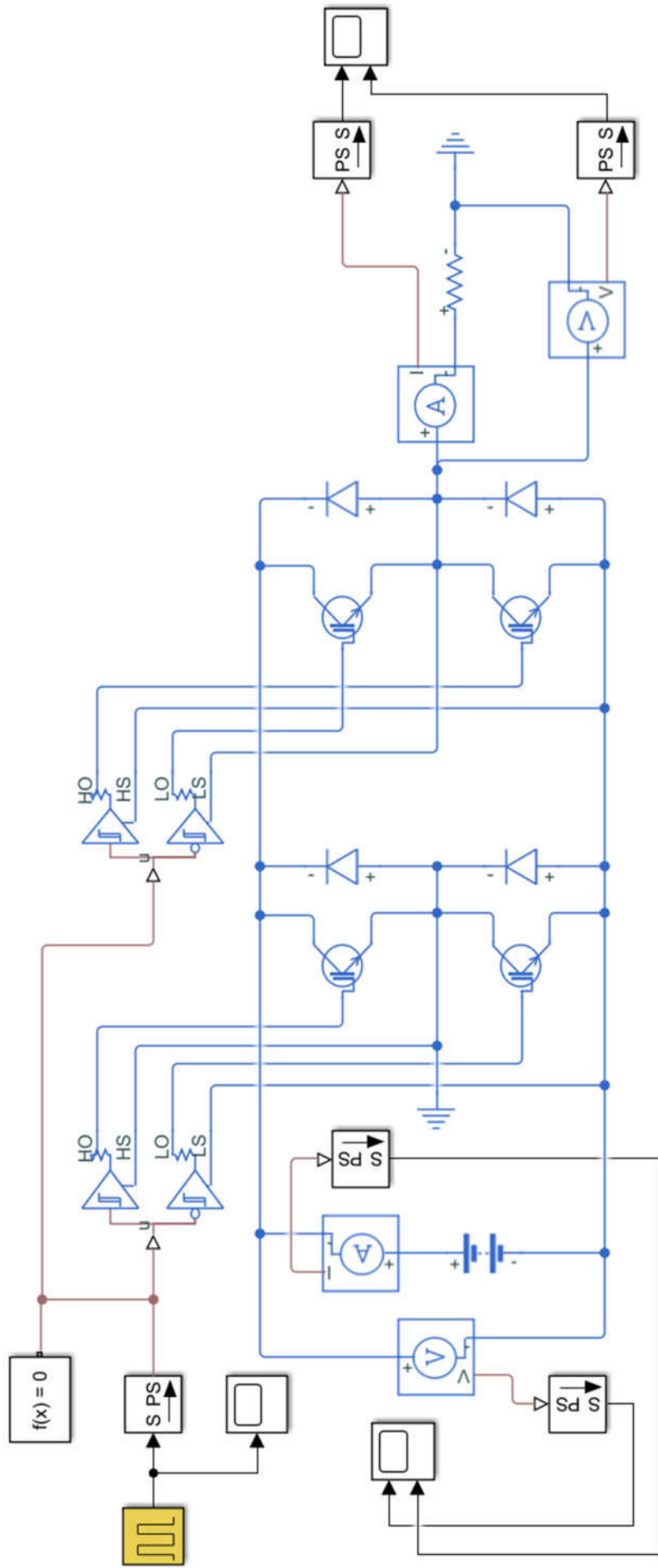


Рисунок 3.3 – Автономний інвертор напруги зібраний в середовищі MATLAB Simulink з використанням бібліотеки Simscape

Управління IGBT транзисторами здійснюється через Half-Bridge Driver, рівень напруги керування якого становить 20 В. Даний блок має фізичний вхід з наступною характеристикою: при 0 відкривається нижній ключ, а при 1 верхній.

Фізичний вхід елементу Half-Bridge Driver через Simulink-PS конвертер підключено до генератору прямокутних імпульсів з коефіцієнтом заповнення 50%.

Живлення інвертору відбувається від батареї напругою 515 В з внутрішнім опором 0,001 Ом. Для спрощення перевірки адекватності конденсатор не встановлено. В якості навантаження встановлено резистор опором 3,3 Ом.

### 3.2 Опис еталонної моделі мостового інвертора з ШІМ

У випадку коли інвертори побудовані на повністю керованих пристроях є можливість промодулювати вихідну напругу інвертора більш високою частотою і зробити його більш наближеними за формою до синусоїдального сигналу, особливо при роботі на активно-індуктивне навантаження. Із недоліків такої модуляції можна виділити отримання меншого коефіцієнту перетворення в порівнянні з класичним інвертором, а також збільшення вищих гармонік у вихідній напрузі. Для зниження вищих гармонік в спектральному складі струму, обумовлених модуляцією, часто використовуються «легкі» вихідні LC-фільтри з підключенням конденсаторів на стороні змінного струму інверторного моста [17].

Дані приладів, живлення та навантаження відповідають приведеним в параграфі 3.1. Основні зміни зазнала система керування (рис. 3.3). По перше для управління ключами інвертора використовується модулі «Gate Driver» – один драйвер до одного транзистора. Вони також управляються фізичними сигналами, але подача «0» сигналізує про необхідність закрити транзистор, а все що «1» або ж вище – відкрити транзистор.

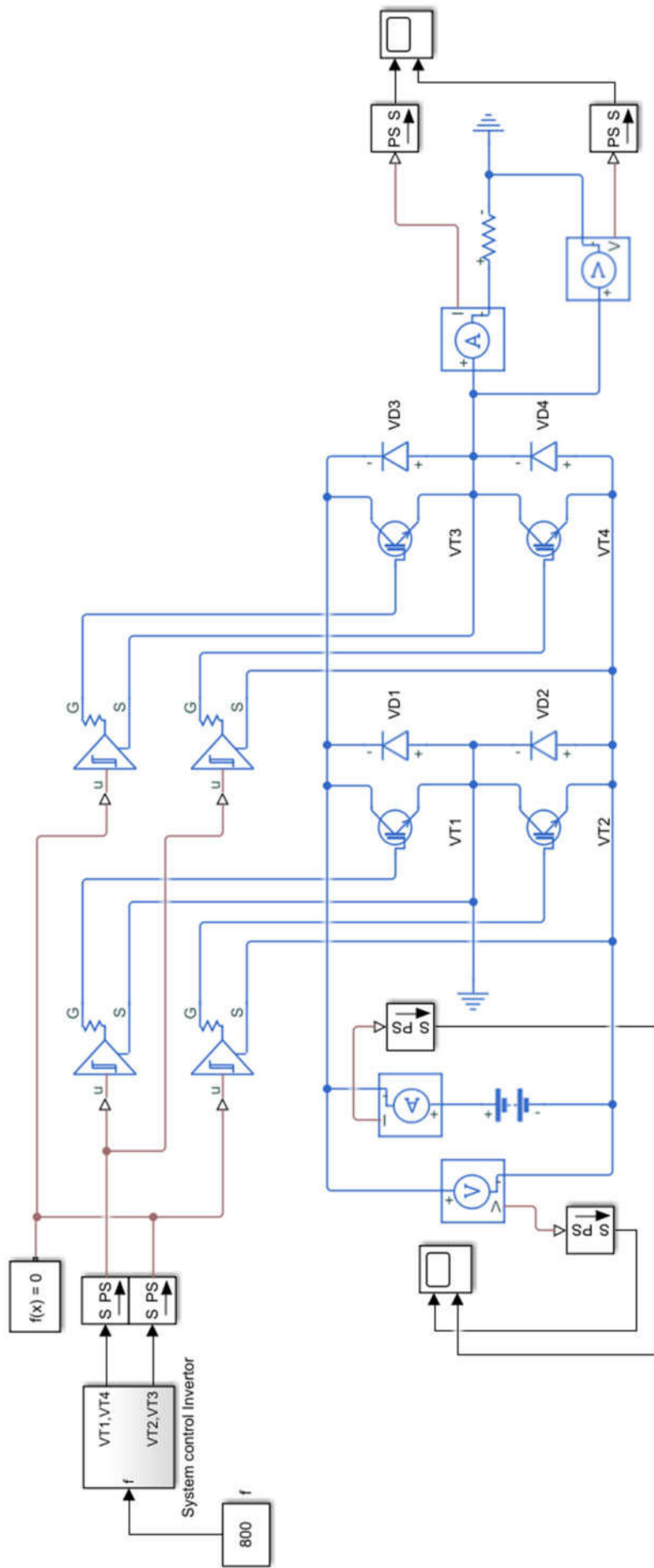


Рисунок 3.4 – Автономний інвертор напруги з ШІМ зібраний в середовищі MATLAB Simulink з використанням бібліотеки Simscape

Основну увагу необхідно приділити підсистемі яка генерує імпульси керування. Вона по суті є мікропроцесорним блоком та може бути реалізована на мікроконтролері. Ця підсистема має один вхід, через який задається частота вихідної напруги, та два виходи - один для управління приладами VT1 та VT4, а інший для транзисторів VT2 та VT3.

Система управління АІН з ШІМ складається з шести умовних основних блоків (рис. 3.6). Перший блок генерує цифровий трикутний симетричний сигнал – по суті він є таймером який рахує спочатку до певного значення (26) а потім до нуля. Тактування, яке надходить на цей таймер напряму залежать від заданої частоти вихідного сигналу – на 1 Гц вихідної напруги необхідно 1040 тактових імпульсів, що при максимальному значенні, до якого рахує таймер, в 26 одиниць дозволяє сформувати 20 ітерацій на повний період синусоїдального сигналу.

Другий блок є тактовим генератором системи управління. Третій блок розраховує значення опорної синусоїди амплітудою в 27 одиниць.

Четвертий блок є цифровим компаратором, і він порівнює значення таймеру, отримані від першого блоку та пропущені через модуль значення опорної синусоїди. Вхідні величини зображені на рис. 3.5., а вихідні на рис. 3.7.

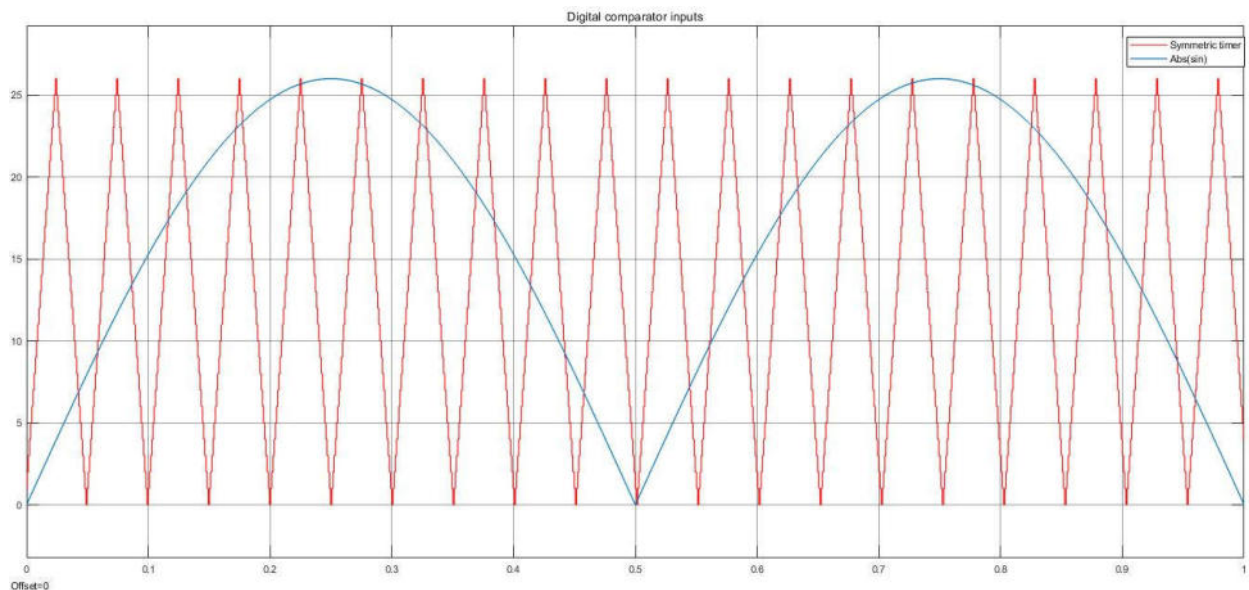


Рисунок 3.5 – Вхідні величини цифрового компаратору

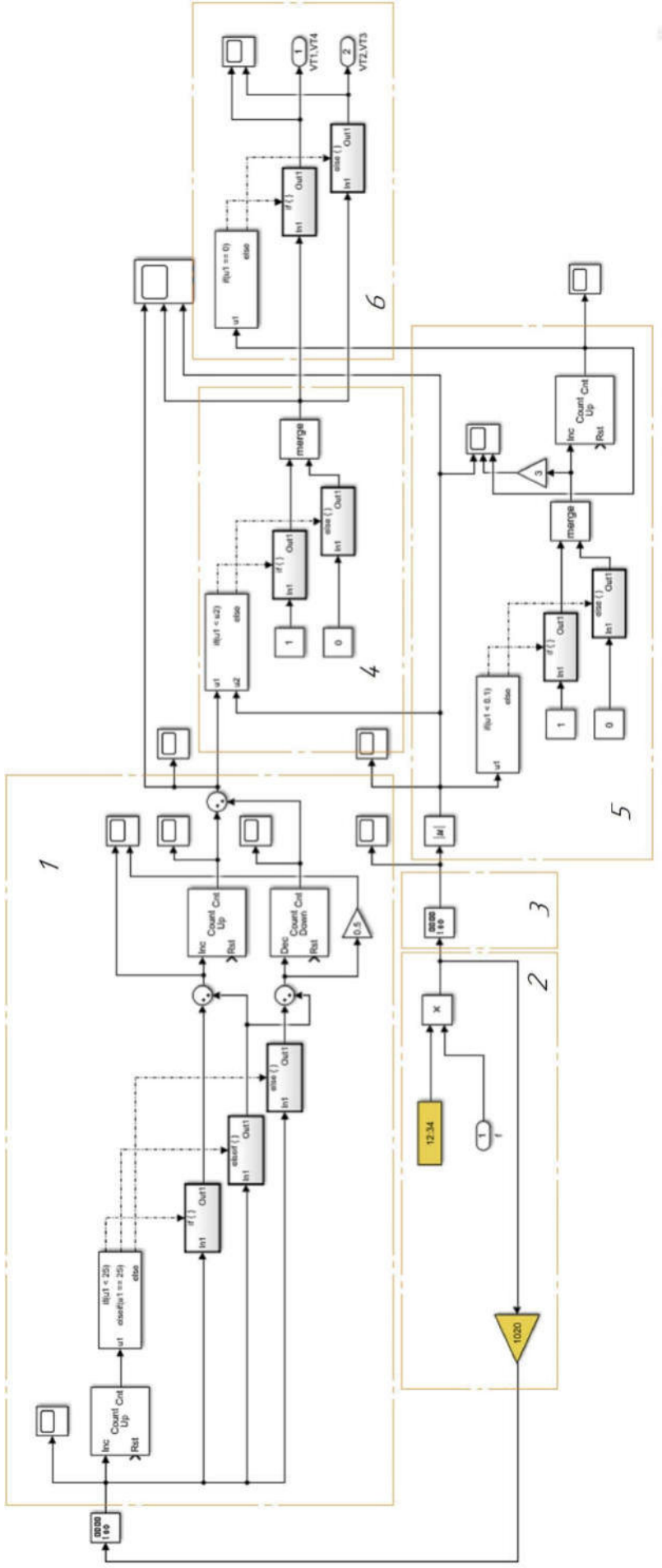


Рисунок 3.6 – Система управління автономним інвертором напруги з ШІМ зібраного в середовищі MATLAB Simulink:

1 – блок генерації цифрового трикутного симетричного сигналу; 2 – внутрішній тактовий генератор та система розподілення тактування; 3 – генератор опорної синусоїди; 4 – цифровий компаратор; 5, 6 – розподільник імпульсів

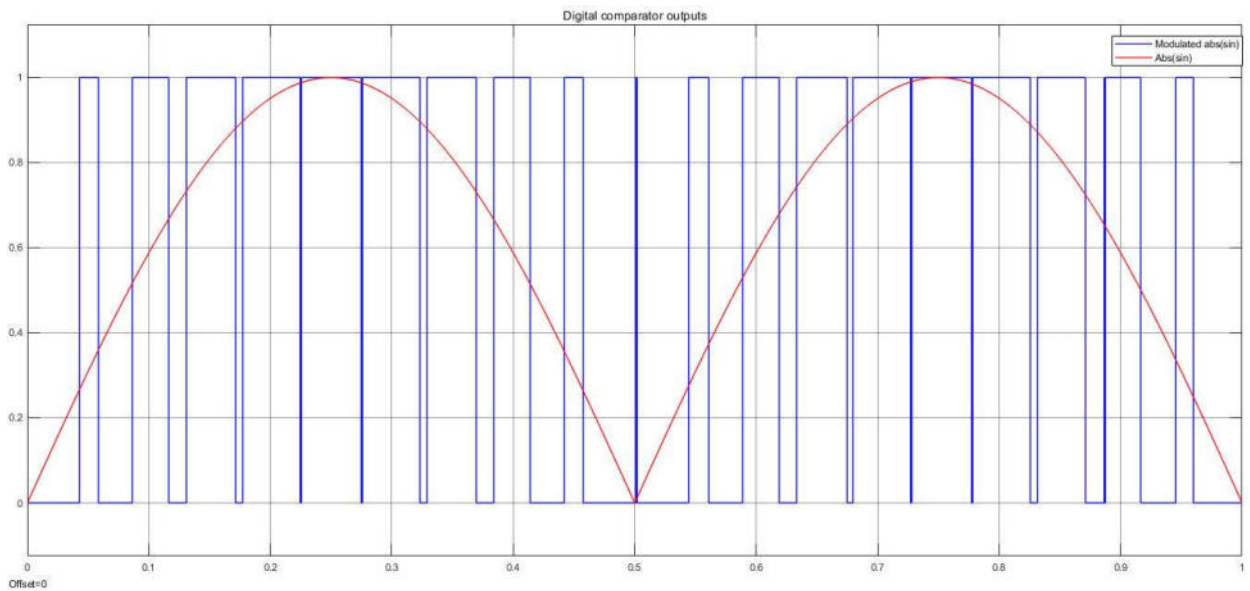


Рисунок 3.7 – Вихідні величини цифрового компаратору

Умовні блоки номер п'ять та шість розподіляють імпульси керування для транзисторної групи VT1, VT4 (рис. 3.8) та VT2, VT3 (рис. 3.9).

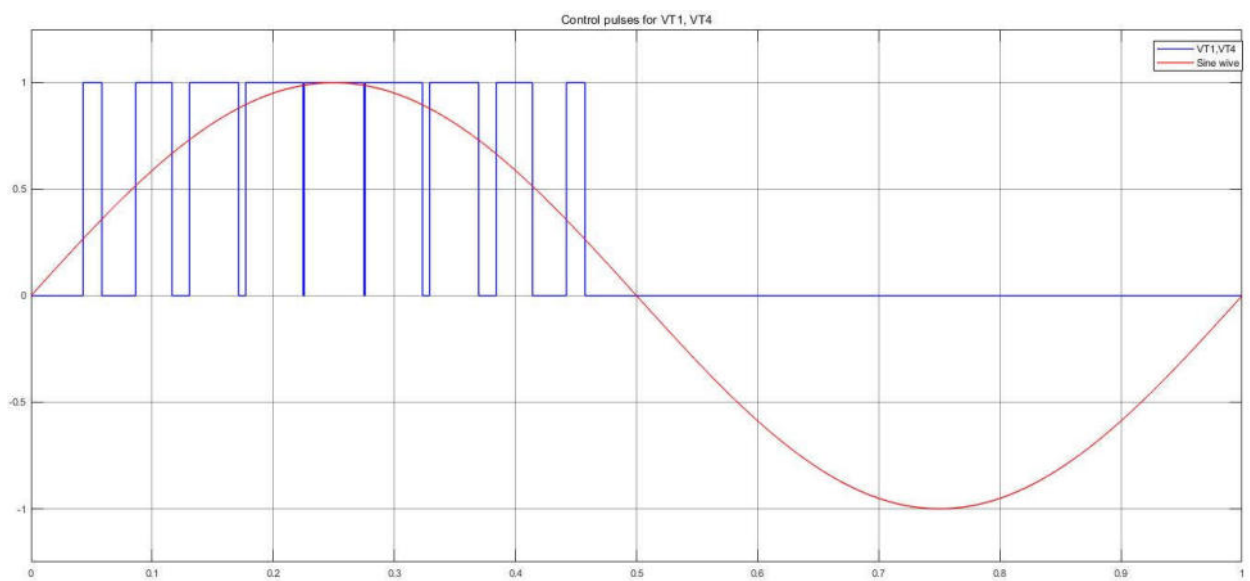


Рисунок 3.8 – Імпульси керування для транзисторів VT1, VT4

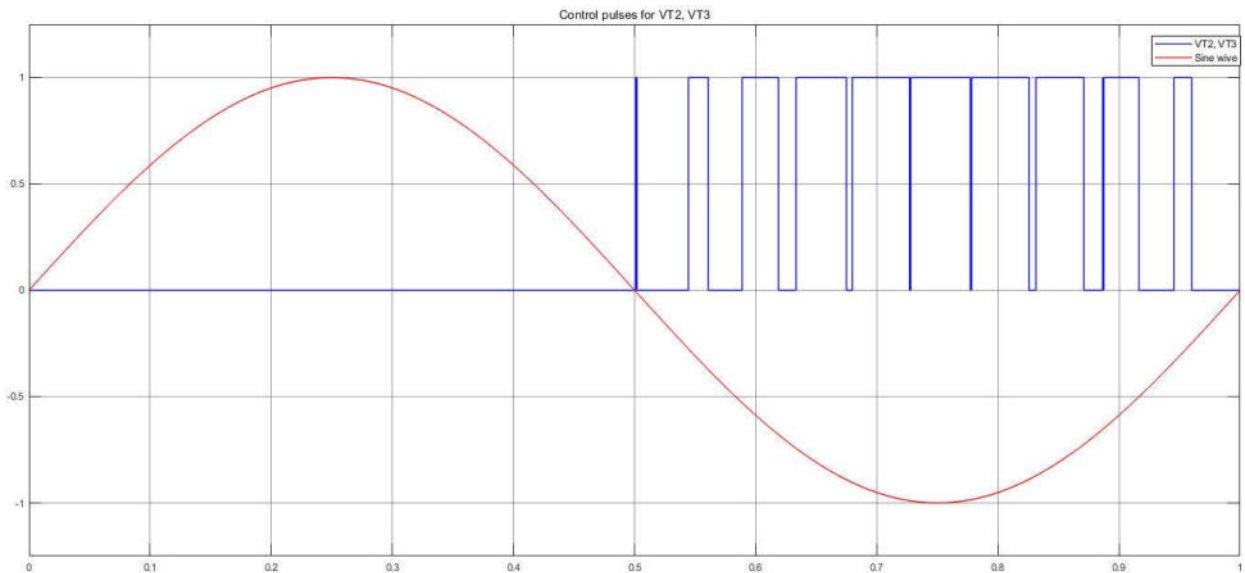


Рисунок 3.9 – Імпульси керування для транзисторів VT2, VT3

### 3.3 Моделювання візуально-блочної моделі АІН сумісно з еталонною моделлю

Для перевірки адекватності візуально блочної моделі однофазного мостового АІН необхідна візуально блочна модель джерела напруги та візуально блочна модель навантаження. Візуально блочна модель джерела напруги (рис. 3.10) описується наступним чином:

$$U = E - I \cdot r_{vn} \quad (3.1)$$

де  $r_{vn}$  – внутрішній опір джерела напруги,  $E$  – його електрорушійна сила,  $I$  – струм, що споживає навантаження.



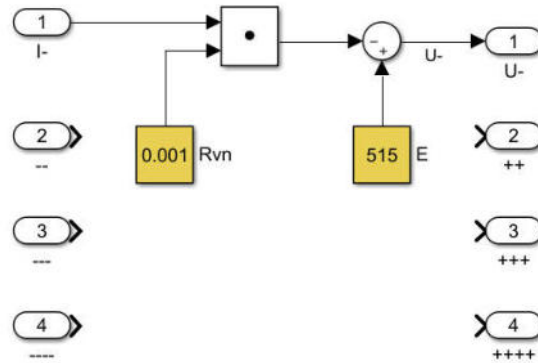


Рисунок 3.10 – Візуально-блочна модель елемента джерела живлення

Так як навантаження активне, то математичний опис візуально-блочної моделі навантаження (рис. 3.11) представляє собою закон Ома,  $\cos(\varphi)=1$ .

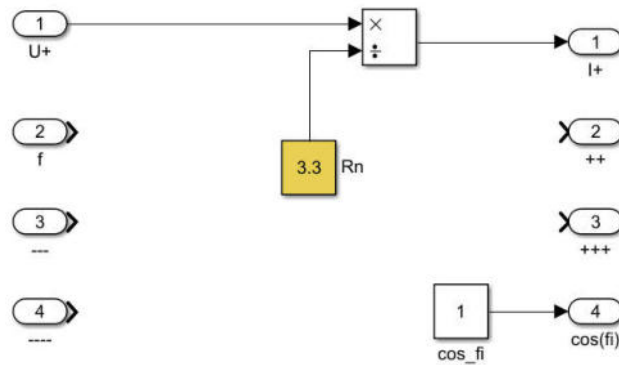


Рисунок 3.11 – Візуально-блочна модель елемента активного навантаження

В результаті отримуємо модель, яка отримано поєднанням трьох візуально-блочних елементів – джерела напруги, АІН та активного навантаження. Ця модель зображена на рис. 3.12. Для наочності представлення результатів час моделювання обмежимо час моделювання 10 мс, що при заданій вихідній частоті в 800 Гц, дозволить проаналізувати 8 повних періодів вихідної напруги.

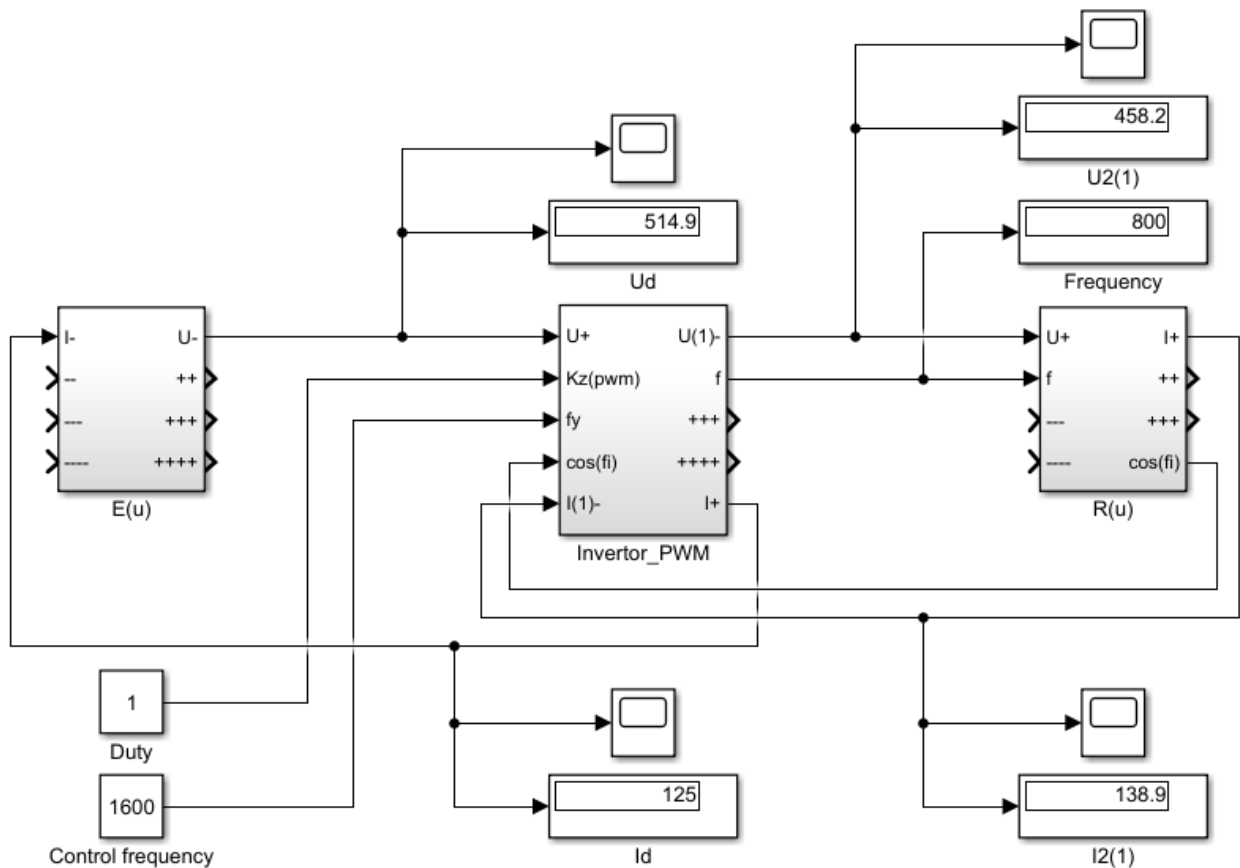


Рисунок 3.12 – Модель комплексу АІН в середовищі MATLAB Simulink:

### 3.4 Аналіз отриманих результатів

В результаті сумісного моделювання було отримано графіки вхідної напруги (рис. 3.13), вихідної напруги (рис. 3.14), вихідного струму (рис. 3.15) та вхідного струму (рис. 3.16). Середнє значення вхідної напруги (рис. 3.17) становить 514,8 В, при чому різниця між моделями становить близько 20мВ, що знаходиться в межах похибки.

Якщо звернути увагу на осцилограми вхідної напруги (рис. 3.13 ( $U_d$ )) то можна побачити «провали» в вихідній напрузі. Це пов'язано з розривним характером кривої вихідного струму (рис. 3.16 ( $I_d$ )). Вони є доволі незначними (близько 30 мВ) при вказаному внутрішньому опорі в 1 мОм, але реальні джерела живлення зазвичай мають набагато більший опір. Тому в реальних схемах перед АІН встановлюють ємнісний фільтр, особливо за умови що інвертор працює в області високих частот [1].

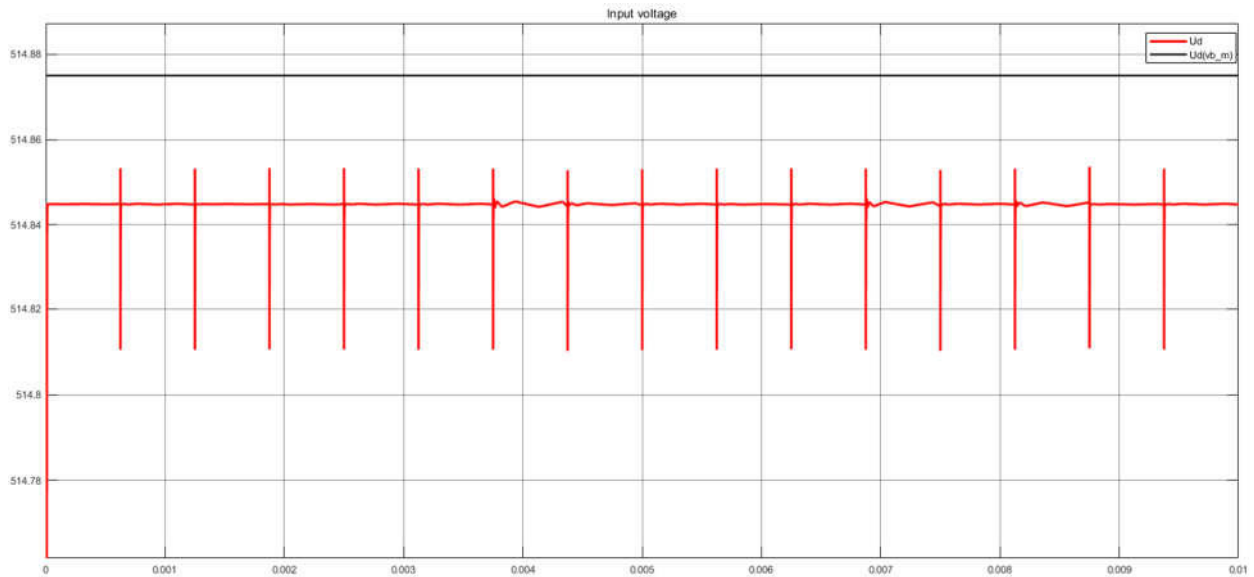


Рисунок 3.13 – Вхідна напруга АІН:

$U_d$  – еталонна модель;  $U_d(vb\_m)$  – візуально блочна модель

Осцилограма вихідної напруги інвертора зображена на рисунку 3.14 ( $U_2$ ), діюче значення вихідної напруги за першою гармонікою становить 458,2 В, різниця між еталонною та візуально блочною моделлю знаходиться в межах допустимої похибки.

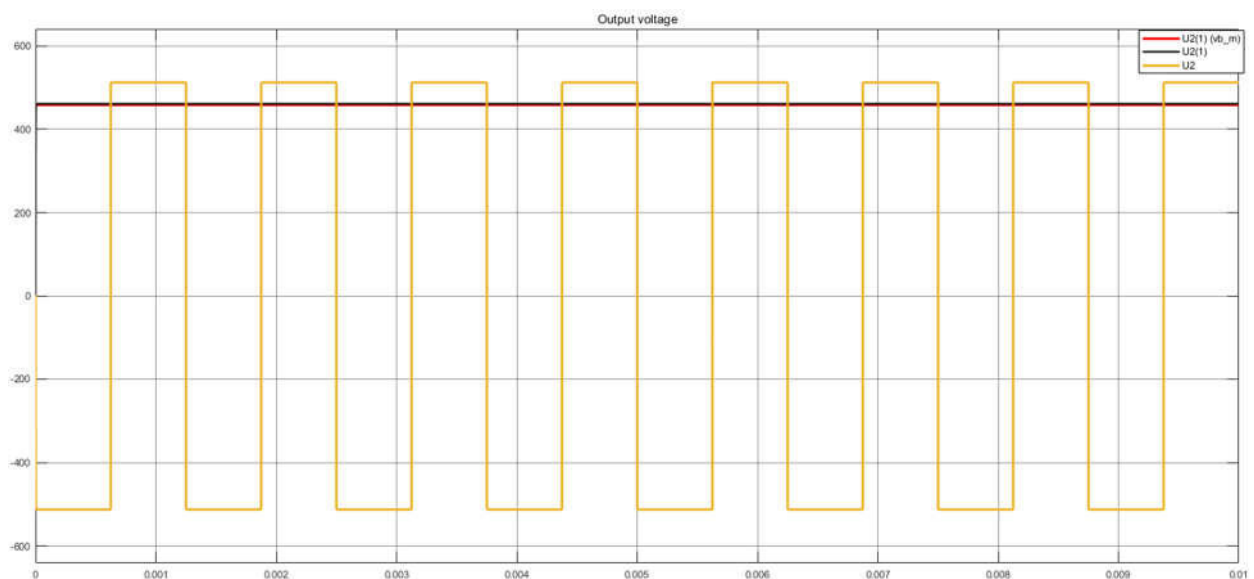


Рисунок 3.14 – Осцилограма вихідної напруги інвертора ( $U_2$ ),

діюче значення вихідної напруги за першою гармонікою:

$U_2(1)$  – еталонна модель;  $U_2(1) (vb\_m)$  – візуально блочна модель

Осцилограма вихідного струму інвертора зображена на рисунку 3.15 (I2), діюче значення вихідного струму за першою гармонікою становить 138,9 А, різниця між еталонною та візуально блочною моделлю практично відсутня та знаходиться в межах допустимої похибки.

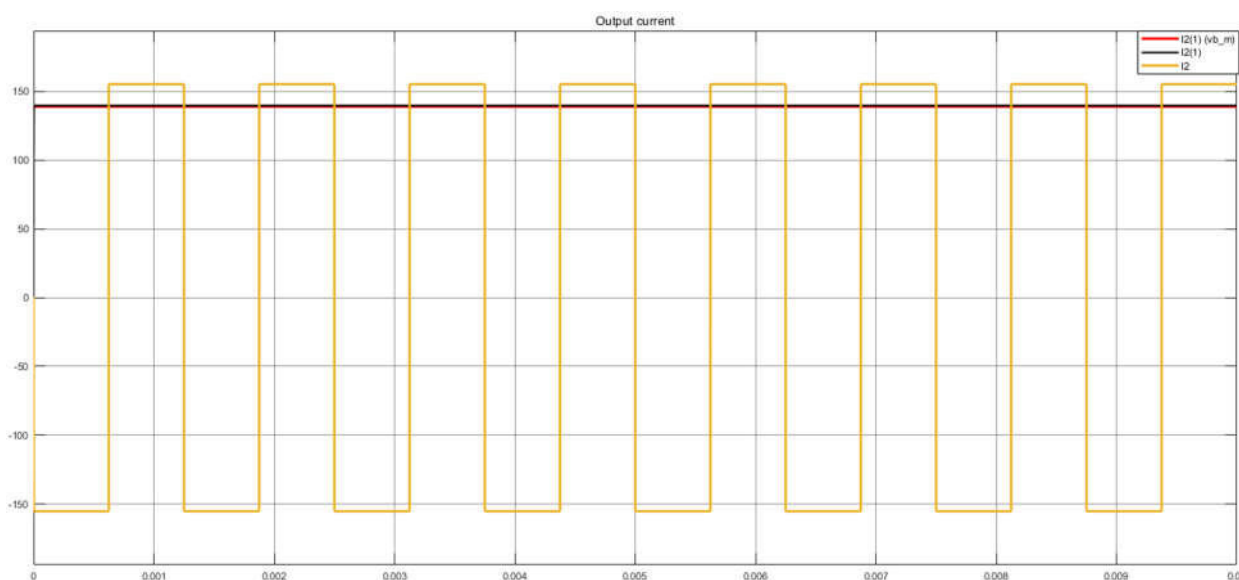


Рисунок 3.14 – Осцилограма вихідного струму інвертора (I2), діюче значення вихідного струму за першою гармонікою:

I2(1) – еталонна модель; I2(1) (vb\_m) – візуально блочна модель

Осцилограма вхідного струму інвертора зображена на рис. 3.16 (Id), середнє значення становить близько 155 А. Середнє значення вхідного струму розрахованого в візуально-блочній моделі рис. 3.16 (Id (vb\_m)) становить 125 А. Різниця в 30А пояснюється наявністю в вихідній напрузі, окрім першої гармоніки, ряду інших гармонік. Хоч їхня складова є відносно незначною, але при більш високих потужностях це виливається в доволі значну розбіжність. Можна ввести корективи в візуально блочну модель інвертора двома способами. Перший це змінити коефіцієнт з 0,9 на 1 (що відповідає коефіцієнту форми для меандру). Але це протирічить теорії АІН. Інший варіант відповідає вводу коефіцієнту зі значенням в  $\pi^2/8$  для вхідного струму. Але це необхідно робити тільки при точному налаштуванні попередніх каскадів (наприклад джерела живлення).

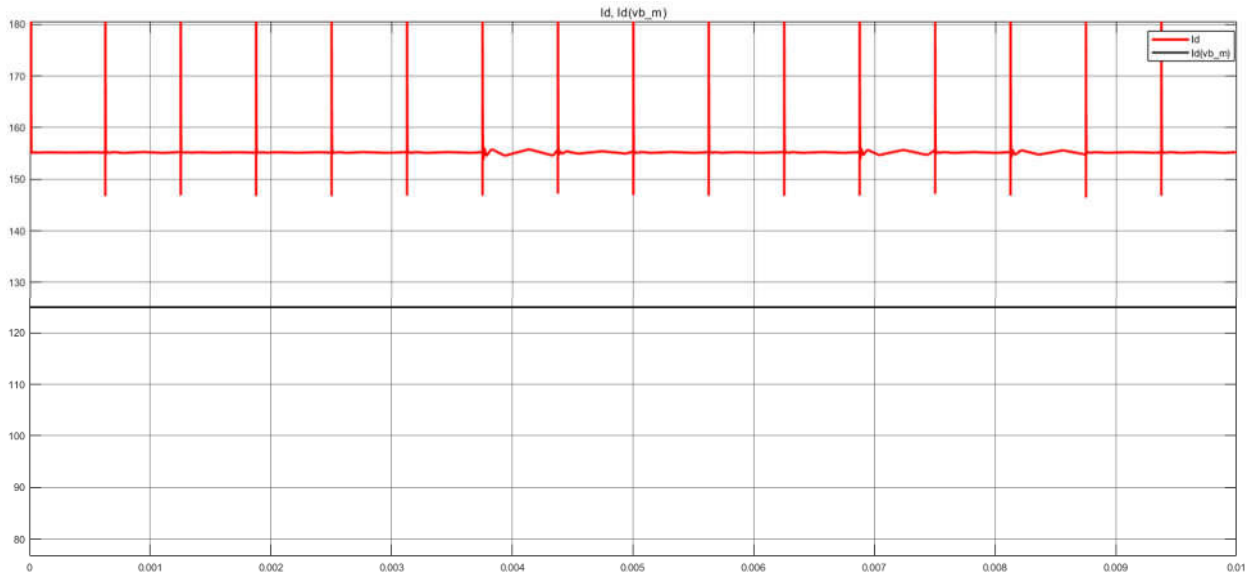


Рисунок 3.16 – Осцилограма вхідного струму еталонної моделі ( $I_d$ ), середнє значення вхідного струму візуально-блочної моделі ( $U_d(vb\_m)$ )

Для позбавлення від більшості вищих гармонік рекомендується застосовувати однофазний мостовий інвертор з ШІМ (рис. 3.17). Із недоліків цього методу можна виділити підвищені динамічні втрати на ключах та зменшену вихідну діючу напругу – зазвичай менше ніж  $0,7U_d$ . Це пов'язано з тим що напруга  $U_d$  є по факту амплітудним значенням.

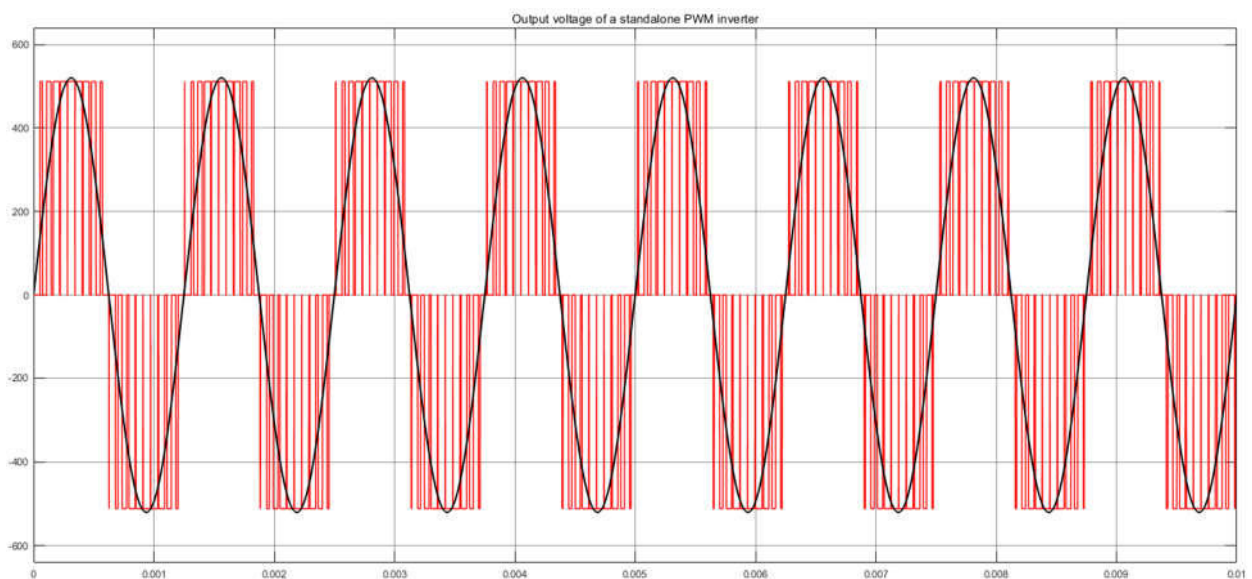


Рисунок 3.17 – Осцилограма вихідної напруги АІН з ШІМ

## 4 ЗАСТОСУВАННЯ ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНОЇ МОДЕЛІ АІН В КОМПЛЕКСІ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

### 4.1 Енергетичний тракт комплексу індукційного нагріву

Індукційне нагрівання (англ. induction heating) — метод безконтактного електронагрівання електропровідного завантаження в електромагнітному полі, яке відбувається внаслідок явища електромагнітної індукції [18], тобто це нагрівання матеріалів електричними струмами, які індукуються змінним магнітним полем. Отже, це нагрівання виробів з провідних матеріалів (провідників) магнітним полем індукторів (джерел змінного магнітного поля).

Індукційне нагрівання виконується наступним чином. Електропровідна (металева, графітова) заготовка поміщається у так званий індуктор, що являє собою один або кілька витків дроту (найчастіше мідного). У індукторі за допомогою спеціального генератора наводяться потужні струми різної частоти (від десятка Гц до декількох МГц), в результаті чого навколо індуктора виникає електромагнітне поле. Електромагнітне поле наводить у заготовці вихрові струми. Вихрові струми розігрівають заготовку під дією джоулевого тепла.

Система «індуктор-заготовка» являє собою трансформатор без осердя, в якому індуктор є первинною обмоткою. Заготівля є ніби вторинною обмоткою, що замкнена накоротко. Магнітний потік між обмотками замикається по повітрю.

На високій частоті вихрові струми витісняються утвореним ними ж магнітним полем в тонкі поверхневі шари заготовки  $\Delta$  (Скін-ефект), в результаті чого їх щільність різко зростає, і заготовка розігрівається. Нижчезрештовані шари металу прогриваються за рахунок теплопровідності. Важливий не струм, а велика його щільність. У скін-шарі  $\Delta$  щільність струму збільшується в  $e$  разів відносно густини струму у заготовці, при цьому в скін-шарі виділяється 86,4% тепла від загального тепловиділення. Глибина скін-шару залежить від частоти випромінювання: чим вище частота, тим тонше

скін-шар. Також вона залежить від відносної магнітної проникності  $\mu$  матеріалу заготовки [19].

За енергетичними показниками модель електротехнічного комплексу індукційного нагріву можна розділити на наступні частини (рис. 4.1):

- джерело живлення – в даному випадку для спрощення моделювання, як джерело живлення було взято джерело напруги з напругою в 515 В та з внутрішнім опором 1 МОм;

- ємність є накопичувачем, який частково нівелює розривний характер струму навантаження;

- мостовий однофазний автономний інвертор напруги (АІН) – перетворює напругу постійного струму в синусоподібну напругу змінного струму;

- трансформатор підвищує напругу згідно вимог навантаження (індуктора);

- індуктор є активно-індуктивним навантаженням, при чому його загальний опір різко змінюється при нагріві сердечника (заготовки) до точки Кюрі, що накладає відповідні вимоги до системи керування інвертора зі зміни вихідної частоти чи напруги. З погляду енергетичних показників індуктор складається з перетворювача електричної енергії в теплову, накопичувача теплової енергії та розсіювача теплової енергії в навколишнє середовище.

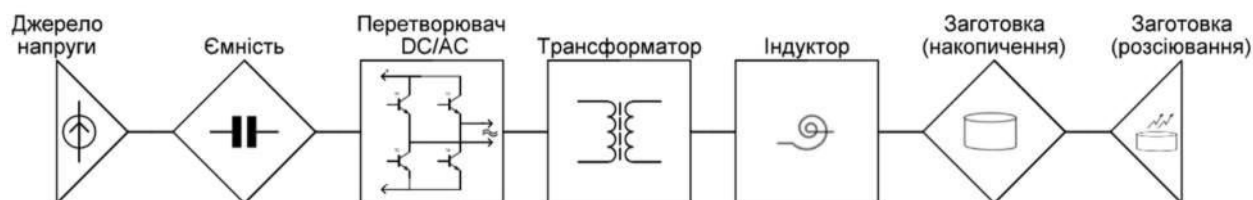


Рисунок 4.1 – Енергетичний тракт системи індукційного нагріву

Відповідно до енергетичного тракту створюємо наступні елементи візуально-блочного моделювання:

- джерело живлення;

- конденсатор (електрична ємність);
- однофазний мостовий інвертор напруги;
- трансформатор;
- блок обрахування коефіцієнту навантаження  $\cos(\varphi)$ ;
- блок опису термодинамічних процесів;
- блок опису індуктора (опису зміни активного та індуктивного опорів які відбуваються в індукторі в залежності від температури заготовки).

Візуальний блок що описує однофазний мостовий АІН напруги докладно описаний в другому та третьому розділі цієї роботи. Опис інших блоків буде наведено нижче. Весь комплекс індукційного нагріву зображено на рисунку 4.3

#### 4.2 Візуально блочна модель джерела живлення

Візуально блочну модель джерела живлення, який в даному випадку представлений як джерело струму в зв'язку з тим, що навантаження ємність, (рис. 4.2) визначено через формулу [2]:

$$I = \frac{E - U}{r_{vn}} \quad (4.1)$$

де  $r_{vn}$  – внутрішній опір джерела напруги,  $E$  – його електрорушійна сила,  $I$  – струм, що споживає навантаження.

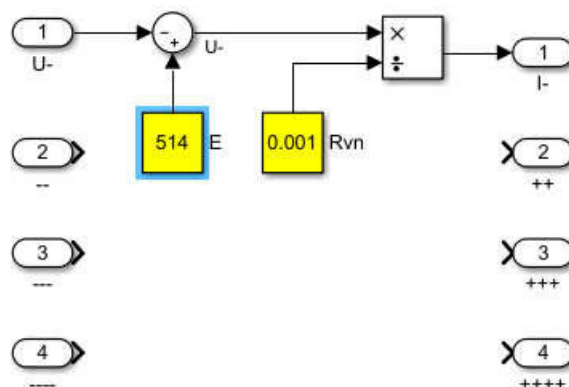


Рисунок 4.2 – Візуально-блочна модель елемента джерела живлення



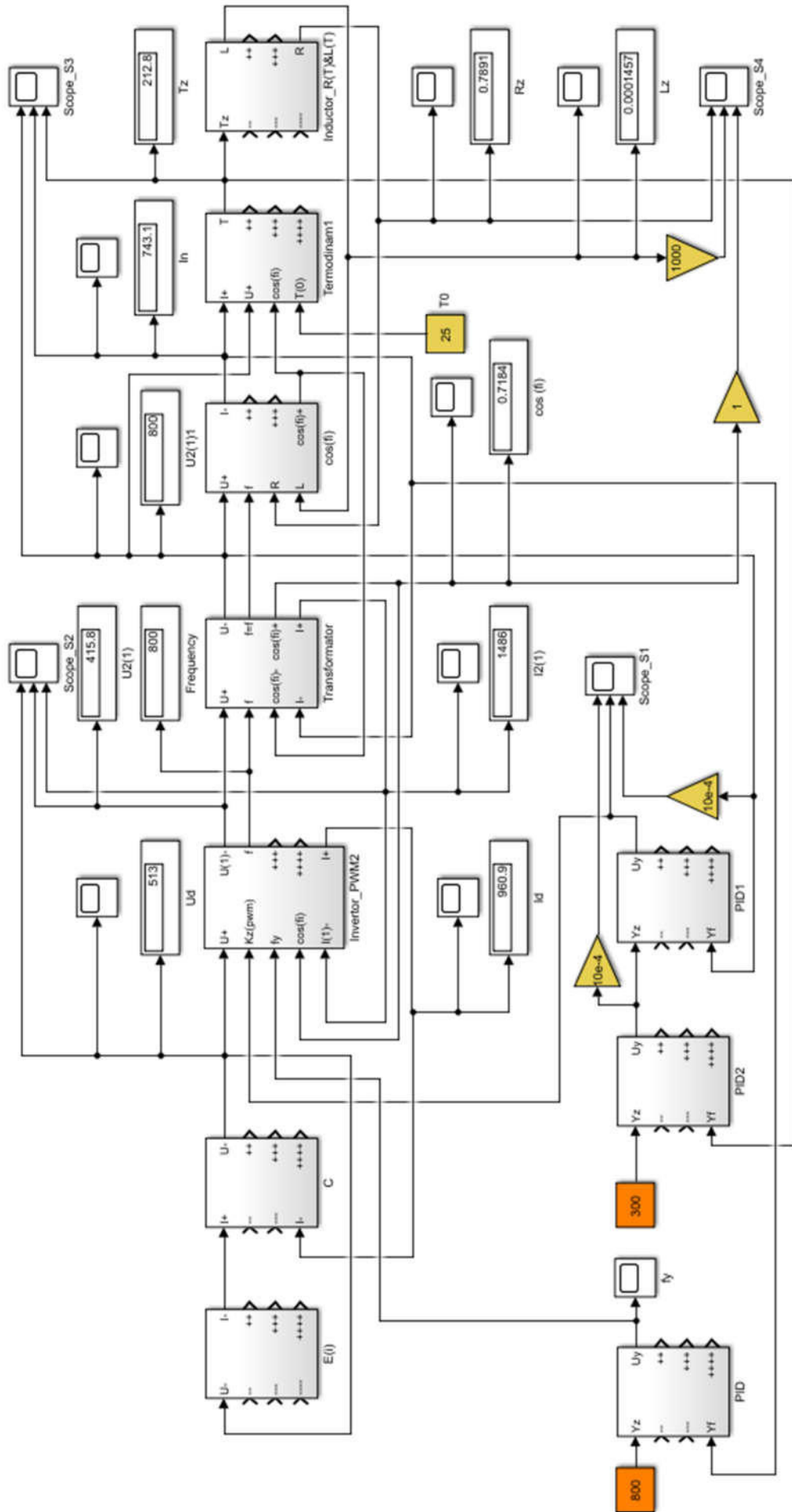


Рисунок 4.3 – Комплекс індукційного нагріву побудований на базі автономний інвертор напруги зібраний в середовищі MATLAB Simulink

### 4.3 Візуально блочна модель конденсатору

Ємність — здатність тіла накопичувати електричний заряд. Конденсатор— система з двох чи більше електродів (обкладок), які розділені діелектриком, товщина якого менша у порівнянні з розміром обкладок [2]. Така система має взаємну електричну ємність і здатна зберігати електричний заряд. З огляду енергетичних показників ємність є накопичувачем, відповідно вона описується через процес інтегрування:

$$U = U_0 + \frac{1}{C} \int \Delta I dt \quad (4.2)$$

де  $U_0$  – напруга до якої заряджено конденсатор на початок моделювання,  $C$  – ємність конденсатора,  $\Delta I$  - різниця між вхідним та вихідним струмом.

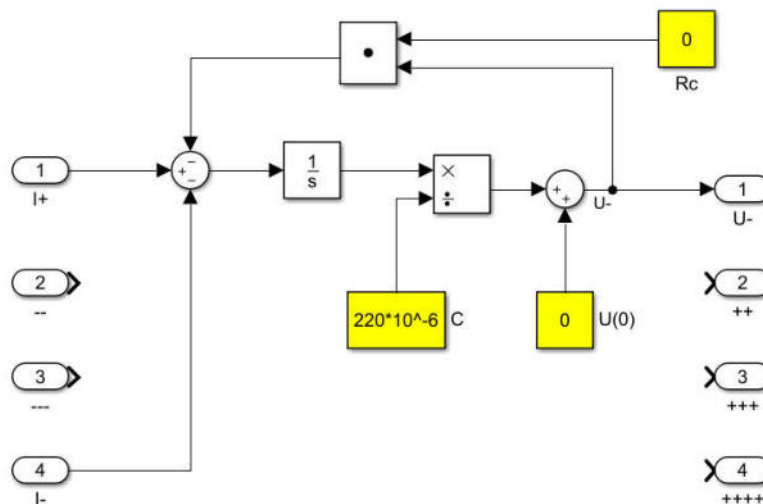


Рисунок 4.3 – Візуально-блочна модель елемента ємності

#### 4.4 Візуально блочна модель трансформатору

Трансформатор — статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язані обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем (напруг) змінного струму в одну або декілька інших систем (напруг) змінного струму без зміни частоти системи (напруги) змінного струму [21].

Взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами запрограмовано через коефіцієнт трансформації:

$$\begin{cases} U_{\text{вих}} = k_T \cdot U_{\text{вх}} \\ I_{\text{вх}} = k_T \cdot I_{\text{вих}} \end{cases} \quad (4.3)$$

Але трансформатор в реальності не є ідеальним елементом, він має внутрішній опір та певний  $\cos(\varphi)$ . В спрощеному вигляді це представлено наступним чином:

$$U_{\text{вих}} = k_T \cdot (U_{\text{вх}} - R_1 \cdot I_{\text{вх}}) - \frac{R_1}{k_T^2} I_{\text{вих}} \quad (4.4)$$

де  $R_1$  — опір первинної обмотки,  $R_1/k_T^2$  — опір вторинної обмотки,  $k_T$  — коефіцієнт трансформації.

Коефіцієнт навантаження враховано за наступною формулою:

$$\cos(\varphi) = \cos_{tr}(\varphi) \cdot \cos_n(\varphi) \quad (4.5)$$

де  $\cos_{tr}(\varphi)$  — коефіцієнт навантаження трансформатору,  $\cos_n(\varphi)$  — коефіцієнт навантаження підключеного навантаження.

Візуально блочну модель трансформатора представлено на рисунку 4.4.

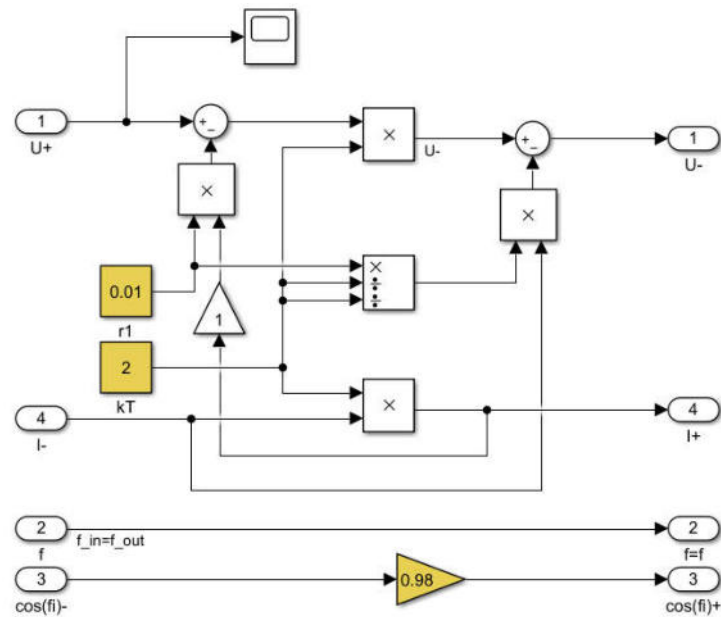


Рисунок 4.4 – Візуально-блочна модель елемента трансформатора

#### 4.5 Візуально блочна модель блоку обрахування коефіцієнту навантаження

Блок обрахування коефіцієнту навантаження проводить обрахунок, при відомому  $R$  та індуктивному  $L$  опору навантаження, декількох важливих параметрів:

- повного опору  $Z$ ;
- коефіцієнту навантаження  $\cos(\varphi)$ ;
- струму, що споживає активно індуктивне навантаження.

Повний опір розраховується відповідно до формули [2]:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi f)^2} \quad (4.6)$$

Струм, який споживає навантаження, визначається за допомогою формули [2]:

$$I = \frac{U}{Z} \quad (4.7)$$

Коефіцієнт навантаження визначається через формулу [2]:

$$\cos(\varphi) = \cos \left[ \arctg \left( \frac{2\pi f}{R} \right) \right] \quad (4.8)$$

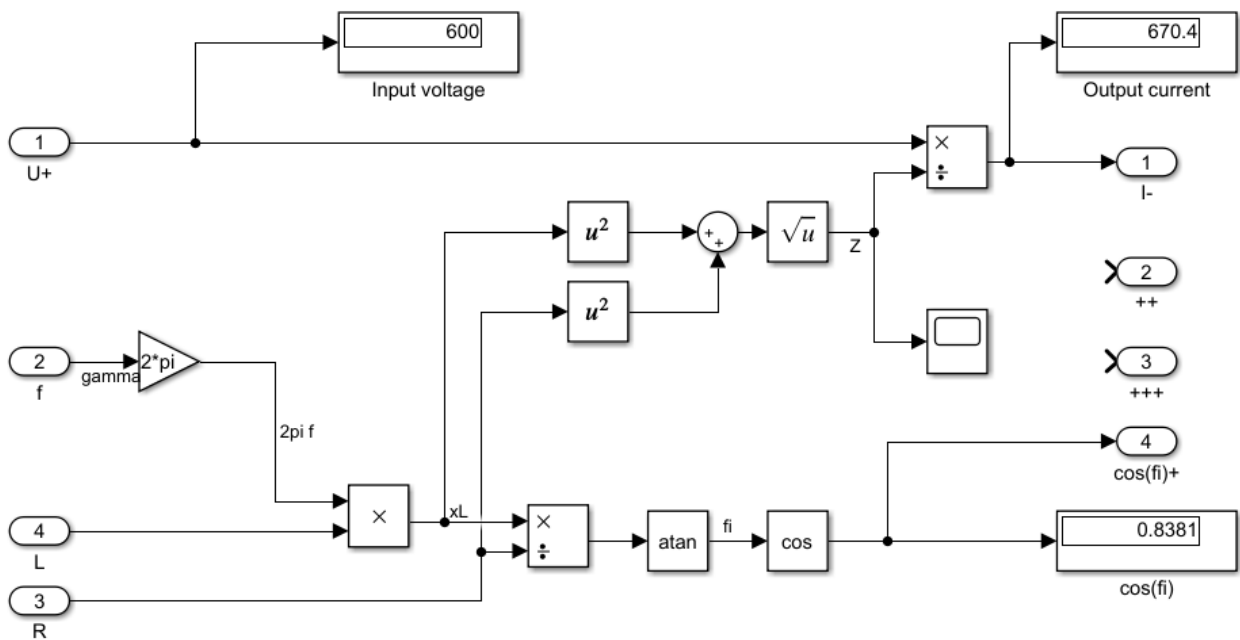


Рисунок 4.5 – Візуально-блочна модель блоку обрахування коефіцієнту навантаження

#### 4.6 Візуально блочна модель блоку опису термодинамічних процесів

Термодинамічний процес — це сукупність послідовних станів, через які проходить термодинамічна система при взаємодії її з навколишнім середовищем. При цьому усі або частина параметрів зазнають змін. Ці зміни параметрів відбуваються таким чином, щоб система прямувала до стану рівноваги [22].

В цій моделі основним параметром який змінюється є температура. В спрощеному вигляді нагрів можна описати наступним чином:

$$T = T_0 + \frac{1}{mc} \int P dt \quad (4.9)$$

де  $T$  – температура до якої нагрілося тіло,  $T_0$  – початкова температура заготовки (навколишнього середовища),  $m$  – маса тіла,  $c$  — питома теплоємність,  $P$  –потужність, яка нагріває заготовку. Вона складається з потужності яка виділяється інвертором та потужності втрат. Потужність яка виділяється інвертором обчислюється відповідно до формули [16]:

$$P_{ak} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (4.10)$$

Але тіло не тільки нагрівається а й охолоджується, це описується додаванням зворотного зв'язку для охолодження:

$$P = P_{ak} - [k_O (T - T_0)] \quad (4.11)$$

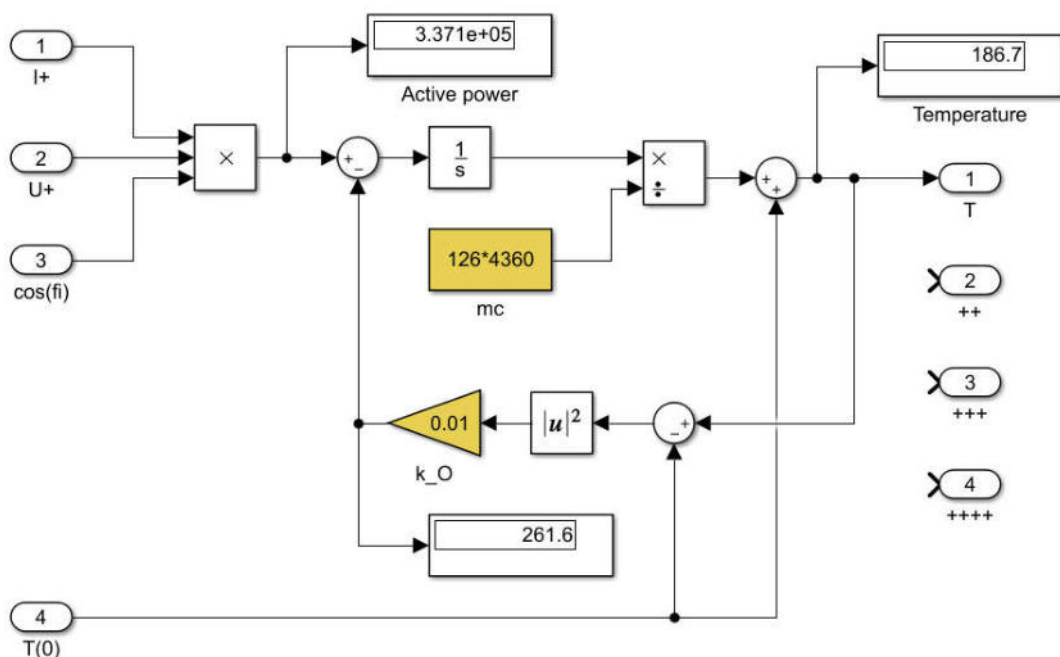


Рисунок 4.6 – Візуально-блочна модель опису термодинамічних процесів

#### 4.7 Візуально блочна модель блоку опису індуктора

Нагрівальний індуктор - робочий орган установок індукційного нагріву. Індуктор являє собою один або кілька витків провідника, в якому за допомогою потужного генератора змінного струму створюються електричні коливання високої частоти (від декількох кГц до 5 МГц). Всередину витків поміщають заготовку з електропровідного матеріалу.

На високій частоті вихрові струми витісняються утвореним ними ж магнітним полем в тонкі поверхневі шари заготовки  $\Delta$  (Скін-ефект), в результаті чого їх щільність різко зростає, і заготовка розігрівається. Нижче розташовані шари металу прогріваються за рахунок теплопровідності. Важливий не струм, а велика його щільність. У скін-шарі  $\Delta$  щільність струму збільшується в  $e$  разів відносно густини струму у заготовці, при цьому в скін-шарі виділяється 86,4% тепла від загального тепловиділення. Глибина скін-шару залежить від частоти випромінювання: чим вище частота, тим тонше скін-шар. Також вона залежить від відносної магнітної проникності  $\mu$  матеріалу заготовки [19].

Так як температура заготовки обчислюється блоком опису термодинамічних процесів на основі активного та індуктивного опору заготовки, відповідно блок опису індуктора повинен розраховувати активний та індуктивний опір в залежності від температури заготовки.

Для обчислення індуктивного опору можна представити індуктор як соленоїд з осердям, відповідно його індуктивність розраховується за формулою [18][24]:

$$L = \frac{\mu \mu_0 n^2 S}{l} \quad (4.12)$$

де  $\mu$  – відносна магнітна проникність заготовки,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала,  $n$  – кількість витків котушки індуктора,  $S$  – площа перетину

сердечника, що нагрівається, з врахуванням скін-ефекту,  $l$  – довжина середньої лінії осердя.

Важливою складовою при моделюванні індуктора є врахування температури Кюрі. Температура Кюрі — температура фазового переходу другого роду, при якій відбувається стрибкоподібна зміна властивостей речовини. При температурі Кюрі відбувається фазовий перехід від феромагнетика до парамагнетика або між полярною й неполярною фазами сегнетоелектрика. Наприклад сталь при температурі Кюрі близько  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  стрибкоподібно змінює відносну магнітну проникність від 102 до одного.

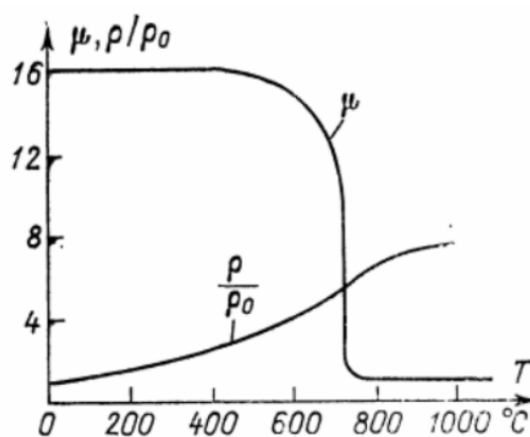


Рисунок 4.7 – Залежність відносної магнітної проникності і питомого опору від температури для сталі [19]

Активний частину навантаження індуктора, як один з варіантів, можна обчислити через формулу [23]:

$$R = R_0[1 + \alpha \cdot (T_z + T_0)] \quad (4.13)$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору,  $T_z$  – температура заготовки,  $T_0$  – температура навколишнього середовища при якій виміряно (розраховано)  $R_0$ ,  $R_0$  – опір при  $T_0$ .





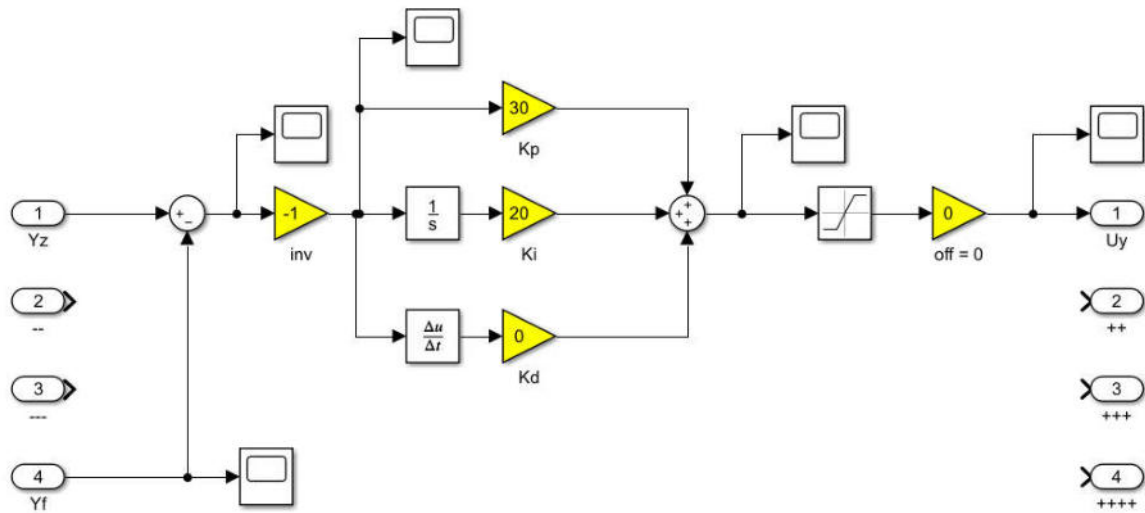


Рисунок 4.9 – Візуально-блочна модель ПІД-регулятора

## 4.9 Параметри моделі комплексу індукційного нагріву

Таблиця 4.1 – Параметри моделі комплексу індукційного нагріву

Назва параметру	Значення параметру
Джерело живлення	
Напруга, $U_d$	515 В
Внутрішній опір, $r_{vn}$	1 мОм
Конденсатор (ємність)	
Ємність конденсатора, С	220 мкФ
Тангенс кута діелектричних втрат	0
Однофазний мостовий АІН	
Тип застосовуваного приладу	IGBT
Модель застосовуваного приладу, на базі [26]	SEMiX302GB126HDs
Напруга колектор-емітер, $U_{CE}$	2,15 В
Енергія втрат при вмиканні, $E_{on}$	30 мДж
Енергія втрат при вимиканні, $E_{off}$	26 мДж
Трансформатор	
Коефіцієнт трансформації, $k_T$	2
Активний опір первинної обмотки, $R_1$	10 мОм
Параметри заготовки та індуктора	
Матеріал заготовки	сталь
Маса заготовки, m	126 кг
Питома теплоємність, с	4360 Дж/кг·°С

Продовження таблиці 4.1.

Початкова температура заготовки, $T_0$	25 °С
Температура точки Кюрі, $T_k$ [19]	710 °С
Відносна магнітна проникність при $T_z < T_k, \mu$	102
Відносна магнітна проникність при $T_z \geq T_k, \mu$	1
Активна складова опору індуктора з заготовкою при $T=20$ °С, $R_3$	0,5 Ом
Параметри системи керування PID0	
Статус	Вимкнено
Регулювання за	Струмом, $I_i$
Завдання	-
Коефіцієнт посилення пропорційної складової, $K_p$	-
Коефіцієнт посилення інтегруючої складової, $K_i$	-
Коеф. посилення диференціюючої складової, $K_d$	-
Мінімальне значення виходу, $f_y$	2400 Гц
Максимальне значення виходу, $f_y$	2400 Гц
Параметри системи керування PID1	
Статус	Ввімкнена
Регулювання за	Температурою, $T_z$
Завдання	0 - 1500 °С
Коефіцієнт посилення пропорційної складової, $K_p$	100
Коефіцієнт посилення інтегруючої складової, $K_i$	0,005
Коеф. посилення диференціюючої складової, $K_d$	0
Мінімальне значення виходу, $U_{2(1)}$	0 В
Максимальне значення виходу, $U_{2(1)}$	800 В
Параметри системи керування PID2	
Статус	Ввімкнена
Регулювання за	Напруга, $U_z$
Завдання	0 – 800 В
Коефіцієнт посилення пропорційної складової, $K_p$	10
Коефіцієнт посилення інтегруючої складової, $K_i$	1
Коеф. посилення диференціюючої складової, $K_d$	0
Мінімальне значення виходу, $k_z$	0
Максимальне значення виходу, $k_z$	1

#### 4.10 Результати моделювання комплексу індукційного нагріву

Зняття вихідних залежностей моделювання комплексу індукційного нагріву в середовищі MATLAB Simulink буде проведено в трьох режимах:

- 1) Зняття вихідних залежностей при нагріві заготовки до точки Кюрі;
- 2) Зняття вихідних залежностей при нагріві заготовки з пересіканням точки Кюрі;
- 3) Зняття вихідних залежностей при нагріві заготовки до певної температури.

Знімання вихідних залежностей буде проводитися три входним елементом «Scope». Параметри, які надходять на дані елементи наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри, що зчитуються елементами «Scope»

Найменування параметру	Позначення параметру	Множник
Scope S1		
Напруга завдання, В	$U_{zad}$	1
Напруга на індукторі, В	$U_I$	1
Коефіцієнт заповнення	$k_z$	1
Scope S2		
Напруга живлення інвертору, В	$U_d$	$10^{-3}$
Вихідна напруга інвертору, В	$U_{2(1)}$	$10^{-3}$
Вихідний струм інвертору, А	$I_{2(1)}$	1
Scope S3		
Напруга на індукторі, В	$U_I$	1
Струм, який проходить через індуктор, А	$I_I$	1
Температура заготовки, В	$T_z$	1
Scope S4		
Активна складова опору індуктора, Ом	$R_z$	1
Індуктивність індуктора, Гн	$L_z$	$10^2$
Коефіцієнт навантаження	$\cos(\varphi)$	1

Результати моделювання при нагріві заготовки до точки Кюрі представлено на рисунках 4.10 (Score S1), 4.11 (Score S2), 4.12 (Score S3), 4.13 (Score S4). Температура завдання 300°C, час моделювання 240 с.

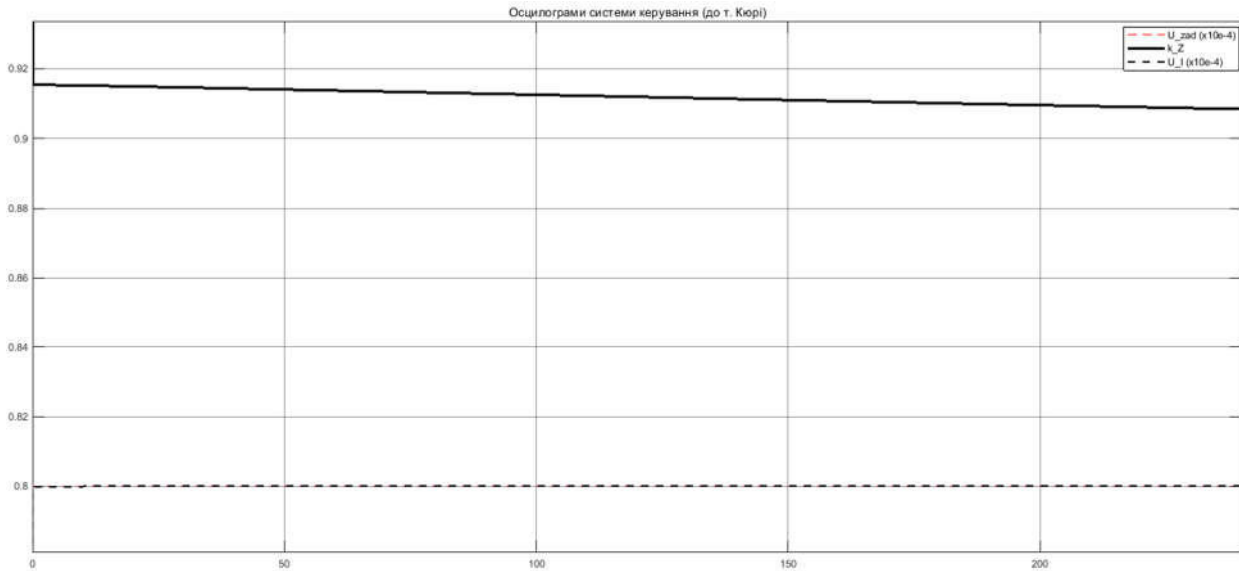


Рисунок 4.10 – Осцилограми системи керування (до т. Кюрі): а) - напруга завдання,  $U_{zad}$ ; б) - коефіцієнт заповнення,  $k_z$ ; с) - напруга на індукторі,  $U_I$ ;

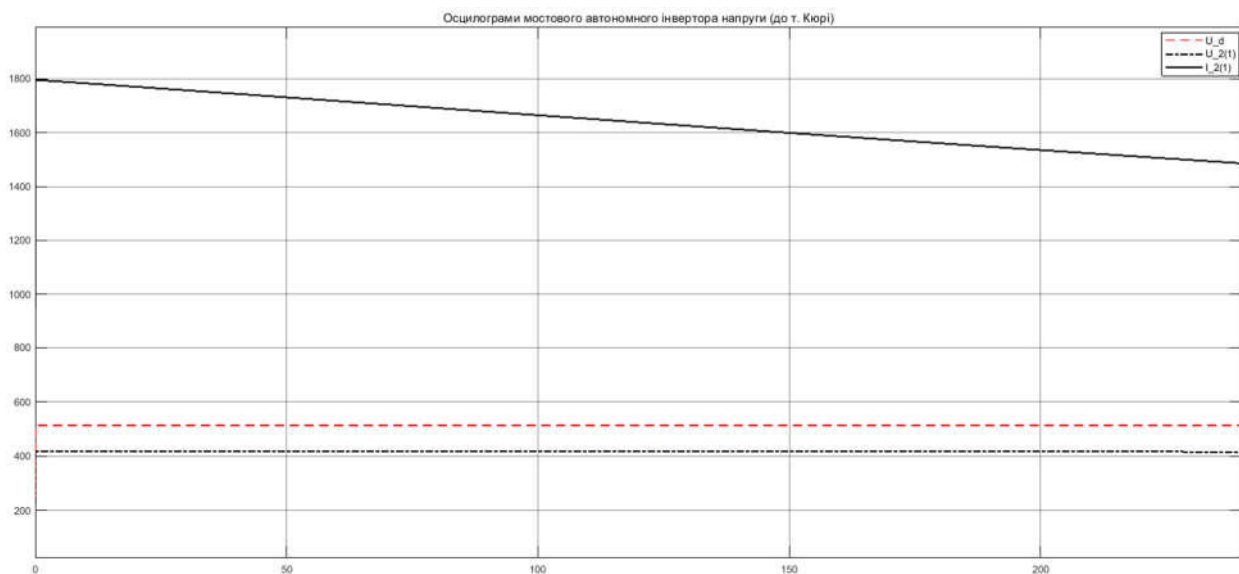


Рисунок 4.11 – Осцилограми однофазного мостового автономного інвертора напруги (до т. Кюрі): а) - напруга живлення інвертору,  $U_d$ ; б) - вихідна напруга інвертору,  $U_{2(1)}$ ; с) - вихідний струм інвертору,  $I_{2(1)}$

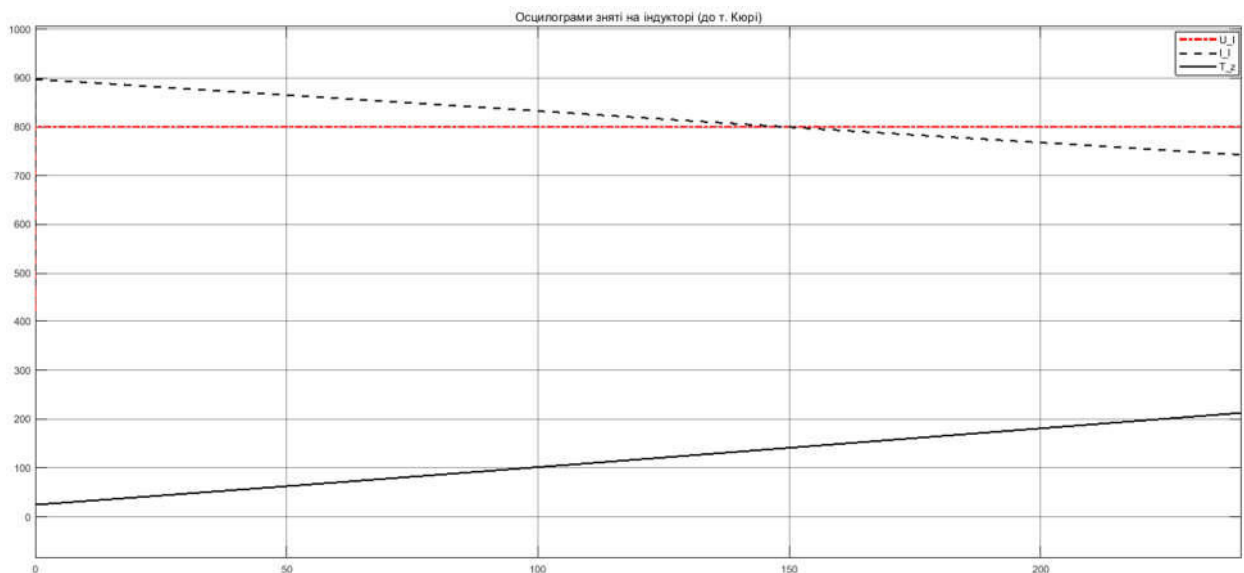


Рисунок 4.12 – Осцилограми зняті на індукторі (до т. Кюрі): а) - напруга на індукторі,  $U_L$ ; б) - струм, що проходить через індуктор,  $I_L$ ; в) - температура заготовки,  $T_Z$

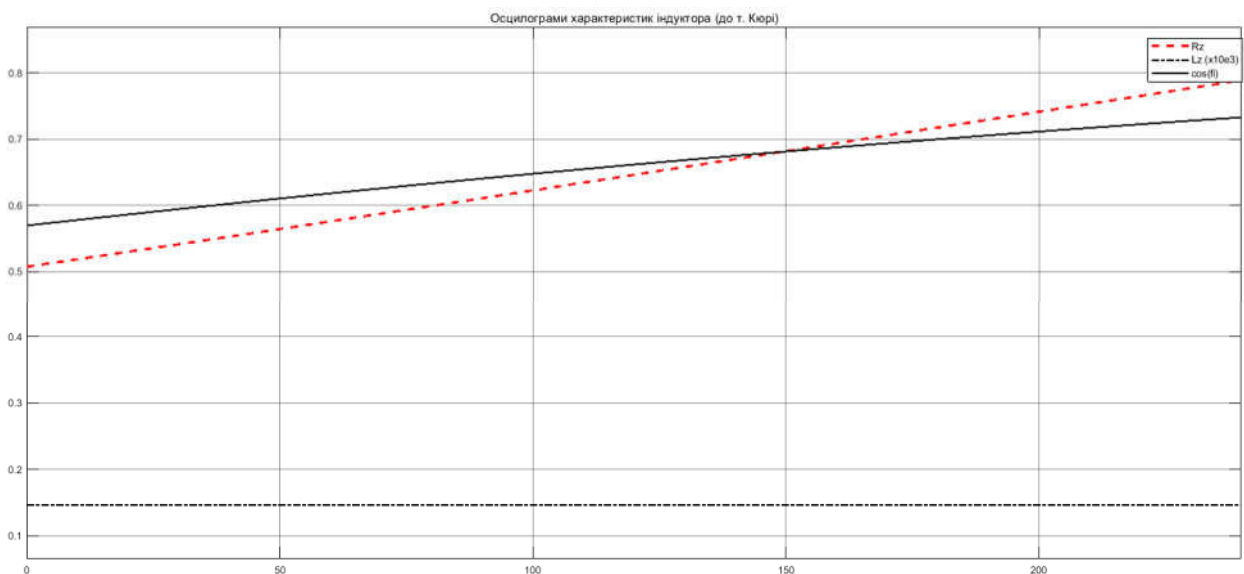


Рисунок 4.13 – Осцилограми характеристик індуктора (до т. Кюрі): а) - активна складова опору індуктора,  $R_z$ ; б) - індуктивність індуктора,  $L_z$ , в) - коефіцієнт навантаження,  $\cos(\phi)$

Результати моделювання при нагріві заготовки до температури 300 °С представлено на рисунках 4.14 (Score S1), 4.15 (Score S2), 4.16 (Score S3), 4.17 (Score S4). Температура завдання 300°C, час моделювання 450 с.

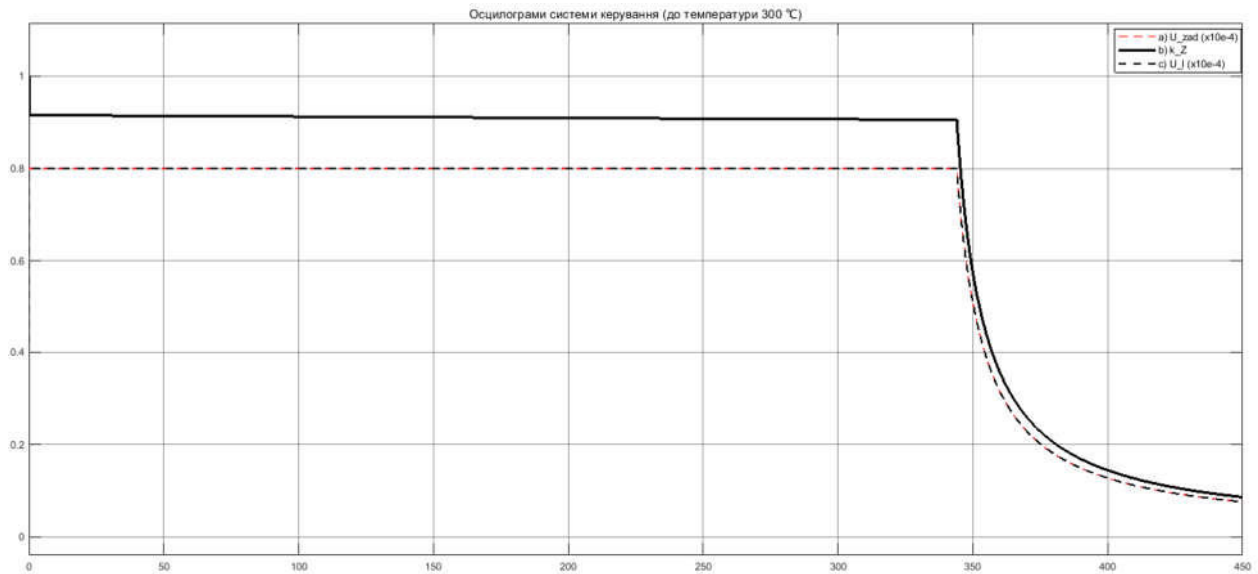


Рисунок 4.14 – Осцилограми системи керування (до температури 300 °C): а) - напруга завдання,  $U_{zad}$ ; б) - коефіцієнт заповнення,  $k_z$ ; с) - напруга на індукторі,  $U_l$ ;

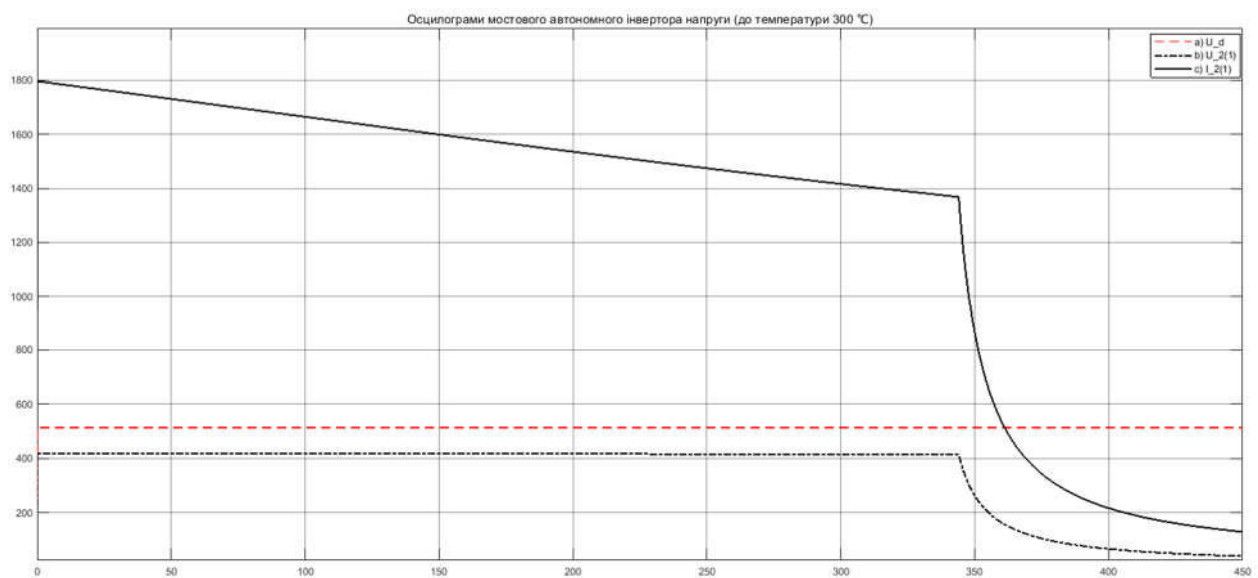


Рисунок 4.15 – Осцилограми однофазного мостового автономного інвертора напруги (до температури 300 °C): а) - напруга живлення інвертору,  $U_d$ ; б) - вихідна напруга інвертору,  $U_{2(1)}$ ; с) - вихідний струм інвертору,  $I_{2(1)}$

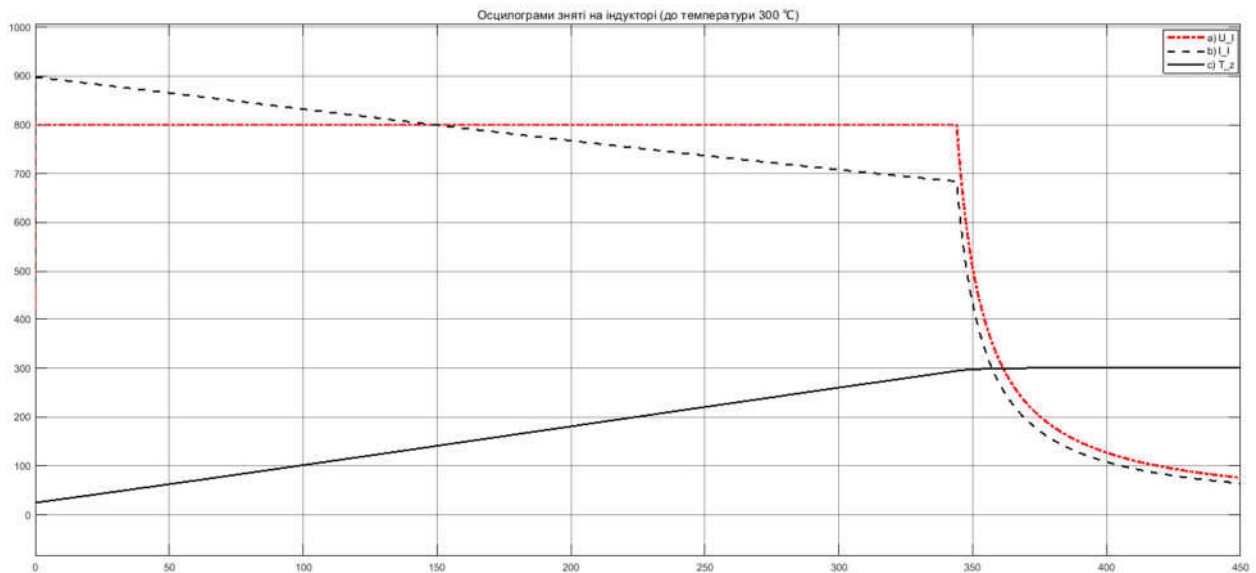


Рисунок 4.16 – Осцилограми зняті на індукторі (до температури 300 °C): а) - напруга на індукторі,  $U_I$ ; б) - струм, що проходить через індуктор,  $I_I$ ; в) - температура заготовки,  $T_Z$

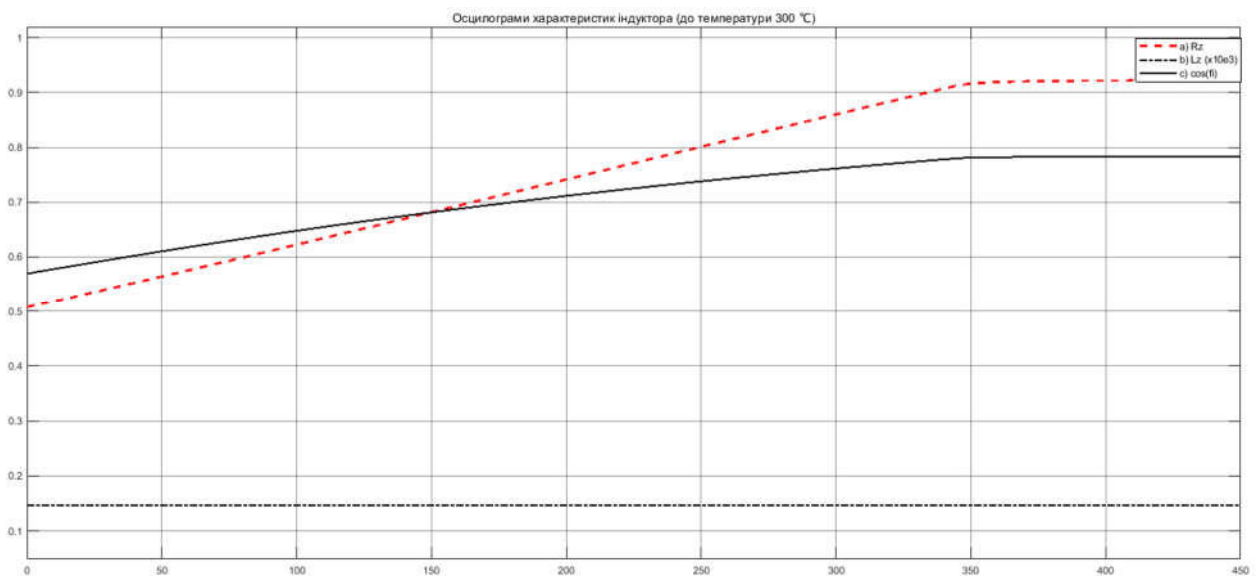


Рисунок 4.17 – Осцилограми характеристики індуктора (до температури 300 °C): а) - активна складова опору індуктора,  $R_Z$ ; б) - індуктивність індуктора,  $L_Z$ , в) - коефіцієнт навантаження,  $\cos(\varphi)$

Результати моделювання при нагріві заготовки з переходом через точку Кюрі представлено на рисунках 4.18 (Score S1), 4.19 (Score S2), 4.20 (Score S3), 4.21 (Score S4). Температура завдання 1000°C, час моделювання 1200 с.



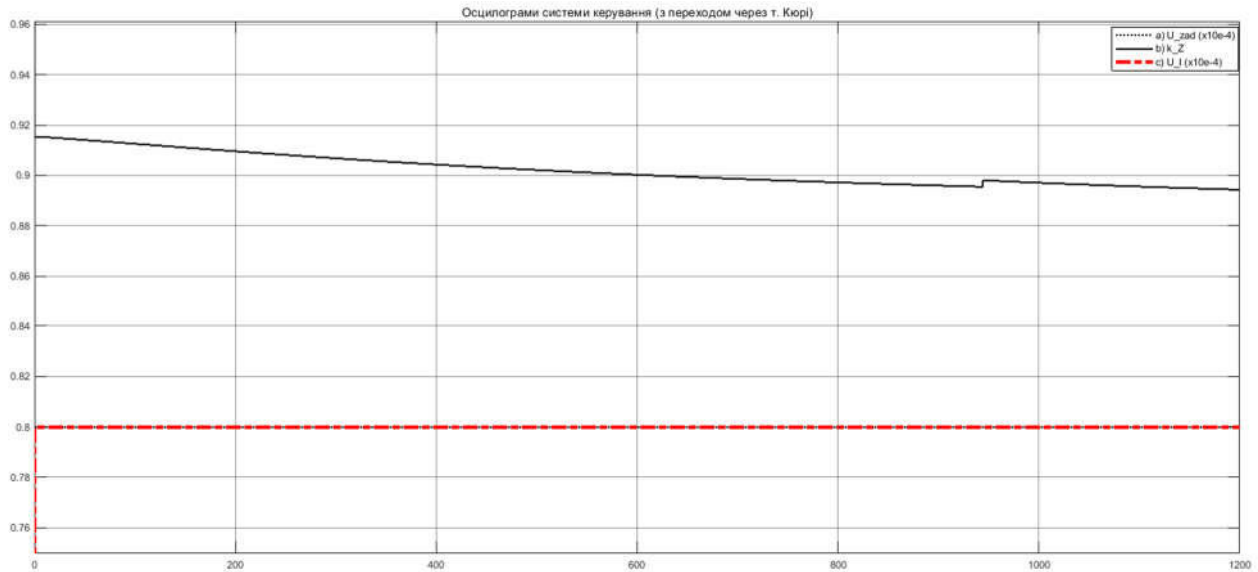


Рисунок 4.18 – Осцилограми системи керування (з переходом через т. Кюрі):

- а) - напруга завдання,  $U_{zad}$ ; б) - коефіцієнт заповнення,  $k_z$ ; в) - напруга на індукторі,  $U_I$ ;

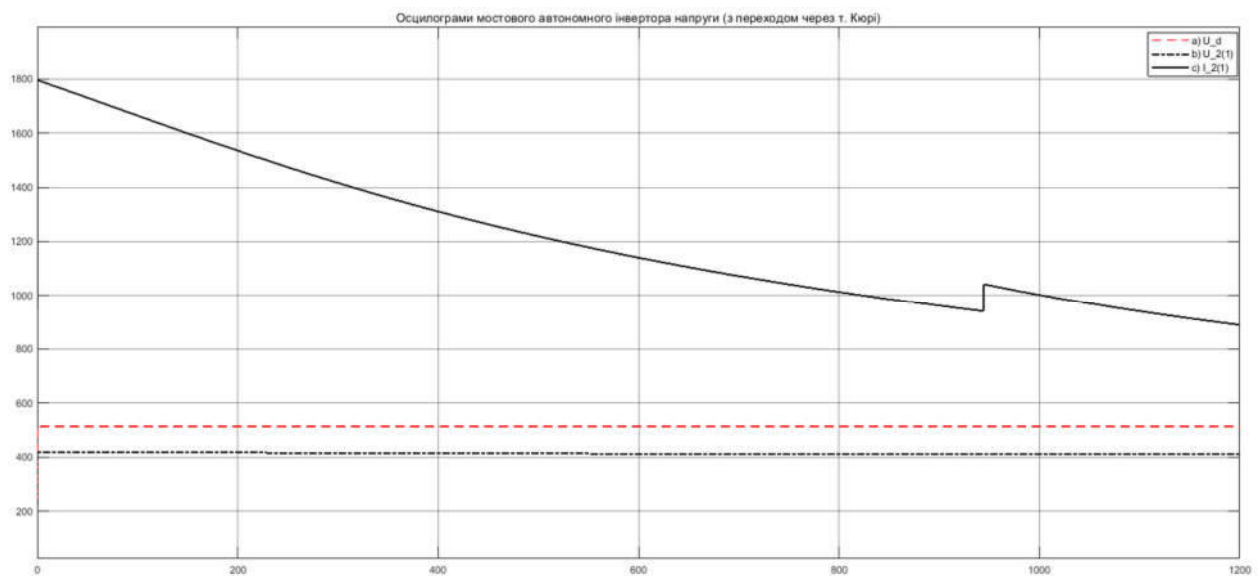


Рисунок 4.19 – Осцилограми однофазного мостового автономного інвертора

- напруги (з переходом через т. Кюрі): а) - напруга живлення інвертору,  $U_d$ ; б) - вихідна напруга інвертору,  $U_{2(1)}$ ; в) - вихідний струм інвертору,  $I_{2(1)}$

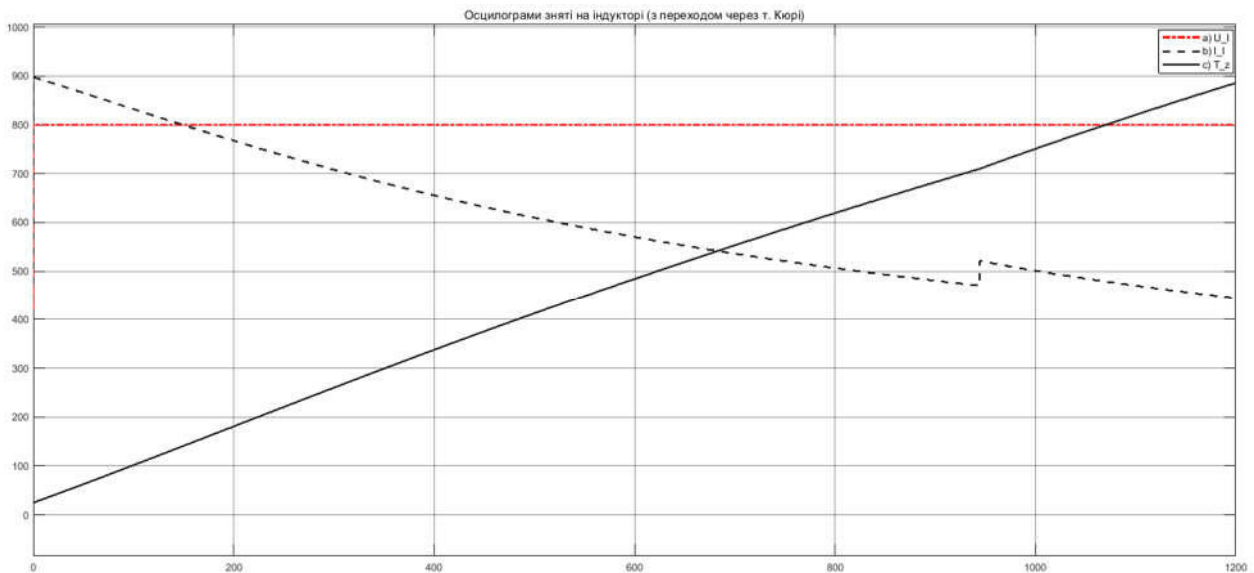


Рисунок 4.20 – Осцилограми зняті на індукторі (з переходом через т. Кюрі): а) - напруга на індукторі,  $U_L$ ; б) - струм, що проходить через індуктор,  $I_L$ ; в) - температура заготовки,  $T_Z$

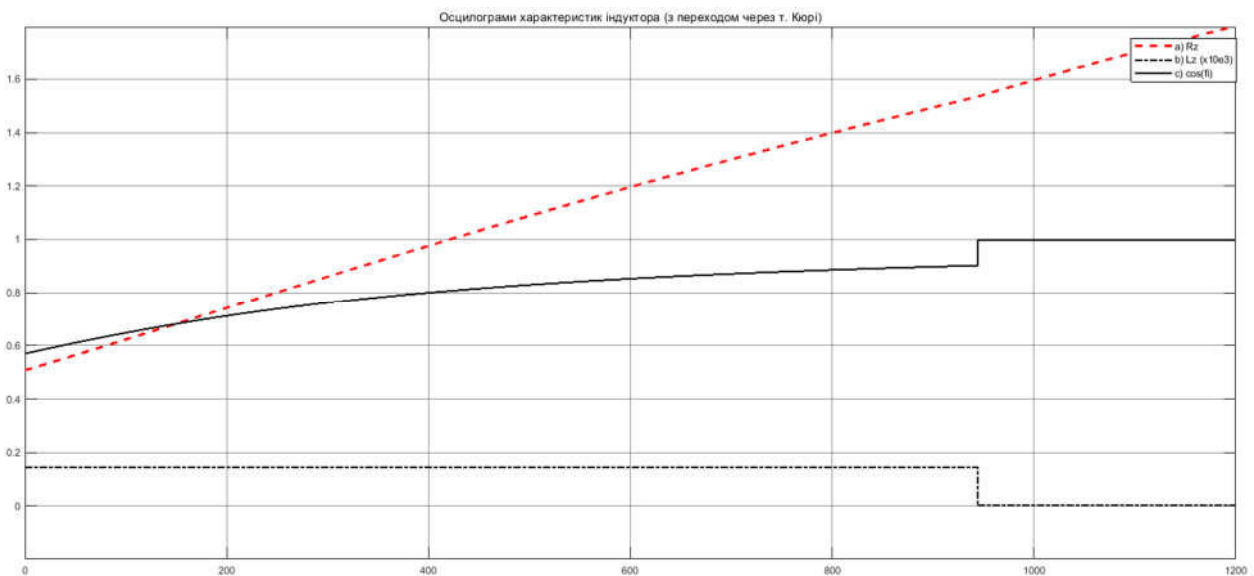


Рисунок 4.21 – Осцилограми характеристик індуктора (з переходом через т. Кюрі): а) - активна складова опору індуктора,  $R_z$ ; б) - індуктивність індуктора,  $L_z$ , в) - коефіцієнт навантаження,  $\cos(\varphi)$

#### 4.11 Аналіз результатів моделювання комплексу індукційного нагріву

Під час моделювання комплексу індукційного нагріву в середовищі MATLAB Simulink тривалістю 240 секунд, з обмеженням по температурі до 300 °С, комплекс не може розігріти заготовку до 300 °С в зв'язку з малим часом моделювання. Відповідно система керування за температурою, заснована на блоці PID1 видає максимально можливе завдання для системи керування коефіцієнтом заповнення, PID2 (рис. 4.10). В результаті напруга на індукторі весь час, крім моменту запуску системи, підтримується блоком PID2 на рівні 800 В (рис. 4.12). На рисунку 4.22 (час моделювання 10 нс) можна побачити як відпрацьовують системи керування момент запуску системи. Система керування за температурою відпрацьовує миттєво, оскільки в момент запуску комплексу температура заготовки дорівнює температурі навколишнього середовища - 25 °С. Система керування за напругою має більшу інерційність, що сумісно з більшим (в зрівнянні з PID1) коефіцієнтом посилення інтегруючої складової, потребує певний час для стабілізації системи керування.

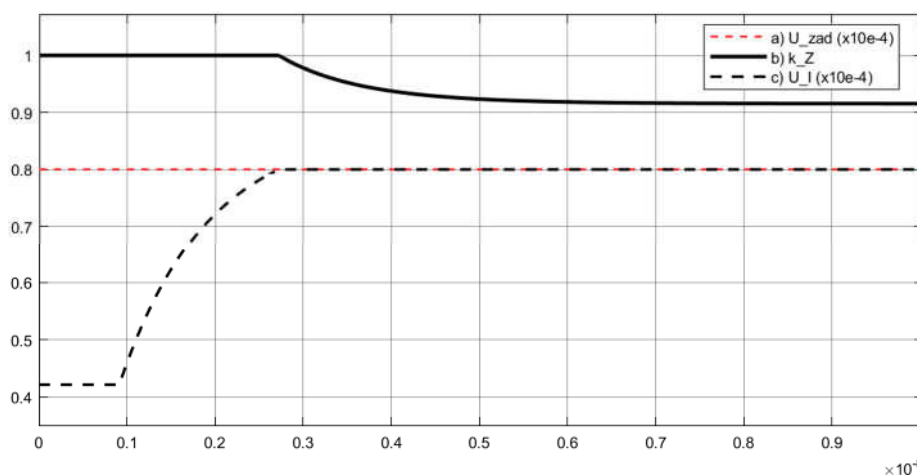


Рисунок 4.22 – Осцилограми системи керування (час моделювання 10 нс):

- а) - напруга завдання,  $U_{zad}$ ; б) - коефіцієнт заповнення,  $k_z$ ; в) - напруга на індукторі,  $U_l$ ;

В кінці моделювання - на 240 с потужність, що споживає комплекс, становила 488,7 кВт. Активна потужність, яку споживає комплекс від інвертора, становить 443,9 кВт. При цьому індуктор споживає активної потужності на 8,1 кВт менше – частина потужності втрачається на проміжних елементах. Інвертор напруги розсіює 4 кВт (на рисунку 4.23 знятий графік втрат за час роботи комплексу в 1200 с) – при частоті вихідної напруги в 800 Гц – статичні втрати напруги становлять 2.15 В, динамічні втрати 0,1 В.

Під час моделювання комплексу індукційного нагріву в середовищі MATLAB Simulink тривалістю 540 секунд, з обмеженням по температурі до 300 °С, заготовка нагрівається до заданої температури (рис. 4.16), відповідно комплекс переходить в режим підтримки заданої температури (рис. 4.14). Комплекс відпрацьовує в очікуваному режимі, для підтримки заданої температури на заготовці витрачається близько 30 кВт.

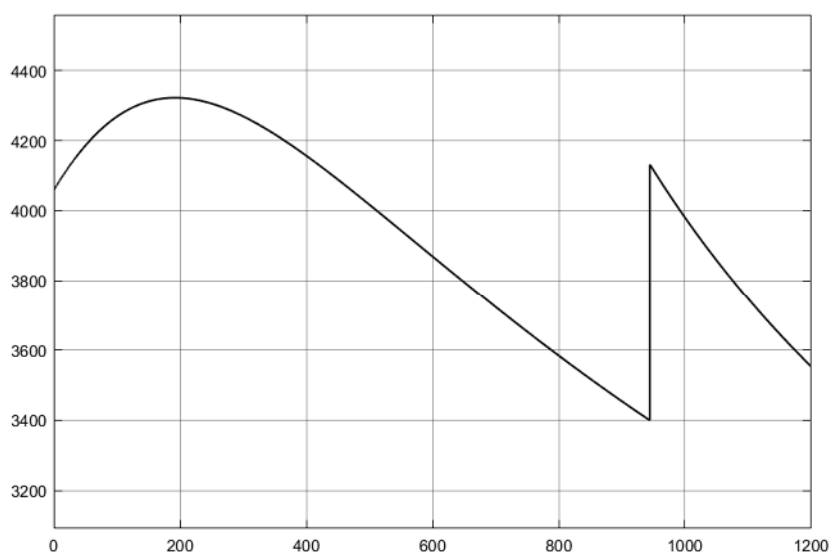


Рисунок 4.23 – Графік потужностей втрат на інверторі напруги

Під час моделювання комплексу індукційного нагріву в середовищі MATLAB Simulink тривалістю 1200 секунд, з обмеженням по температурі до 1000 °С, заготовка нагрівається до температури 885 °С (рис. 4.20). Точка Кюрі для сталі становить 710 °С, відповідно модель відображає режим роботи комплексу з переходом через точку Кюрі. В зв'язку з тим що відносна магнітна

проникність матеріалу при переході через точку Кюрі знижується до 1 [19] індуктивність індуктора стрибкоподібно знижується практично до нуля (рис. 4.21). З рисунку 4.24 можна побачити, що в момент переходу через точку Кюрі, напруга на індукторі просідає. Це пов'язано з тим що загальний опір індуктора зменшується, але система керування підвищує коефіцієнт заповнення (рис. 4.18) коригуючу вихідну напругу. Таким чином в дані й моделі реалізована корекція вихідної потужності через вихідну напругу при переході системи через т. Кюрі.

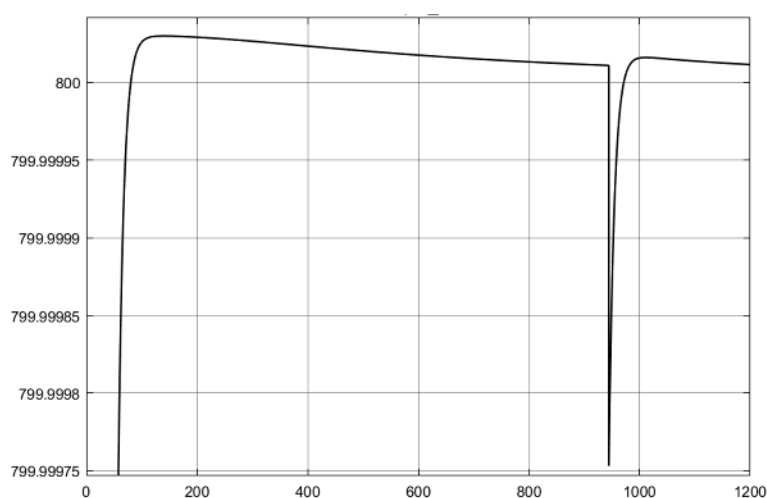


Рисунок 4.24 – Осцилограма напруги на індукторі

## 5 ЕКОНОМІКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

### 5.1 Формуляр проекту

Таблиця 5.1 – Формуляр проекту

Завдання	№ проекту	<i>1</i>
	Дата замовлення	<i>02.01.2019</i>
	Назва проекту	<i>Створення візуально-блочної моделі однофазного мостового автономного інвертора напруги для комплексу індукційного нагріву</i>
	Замовник ПІБ	_____
	Адреса	_____
	Контактна особа ПІБ	_____
	Тел. і факс	_____
Договірна ціна	Усього	<i>1</i>
	План оплати	<i>попередня оплата – 50%</i>
	Додаткові умови	-
Строки	Початок	<i>08.04.2019</i>
	Проміжні строки	-
	Кінець	<i>25.12.2019</i>
Партнери	Кооперація	-
	Субпідрядники	-
	Завдання	-
Персонал	Керівник	_____
	Заступник	_____
	Співробітники	_____
Проект	Скорочена назва	-
	Цілі	<i>Створення моделі</i>
	Критичні строки	<i>1. 01.09.19 (створення моделі АІН)</i>
		<i>2. 15.11.19 (створення моделі комплексу з АІН)</i>
		<i>3.</i>
Особливості та проблеми	<i>Моделювання комплексу складовою частиною якого є автономний інвертор напруги</i>	

## 5.2 Характеристика робіт за проектом

Таблиця 5.2 - Характеристика робіт за проектом

<b>Характеристика робіт за проектом</b>			
<b>Код роботи</b>	<b>Назва чи зміст роботи</b>	<b>Безпосередньо попередня робота</b>	<b>Тривалість, діб</b>
1.1.1	Дослідження стану теорії автономного інвертора напруги (АІН)	-	5
1.1.2	Дослідження напівпровідникових силових ключів	-	5
1.1.3	Дослідження стану теорії моделювання	-	3
1.1.4	Формування основних вимог до моделі інвертора в комплексі індукційного нагріву	1.1.1, 1.1.2, 1.1.3	4
1.1.5	Підготовка технічного звіту	1.1.4	4
1.2.1	Математичне обґрунтування моделі АІН	1.1.5	6
1.2.2	Створення блоків розрахунку втрат на ключах АІН	1.2.1	4
1.2.3	Створення візуально блочної моделі АІН	1.2.2	2
1.2.4	Підготовка технічного звіту	1.2.3	4
1.3.1	Створення еталонної моделі АІН та її відладка	1.1.5	3
1.3.2	Сумісне моделювання еталонної моделі та візуально-блочної моделі	1.2.4, 1.3.1	2
1.3.3	Аналіз результатів. Усунення недоліків роботи системи	1.3.2	5
1.4.1	Створення енергетичного тракту комплексу індукційного нагріву	1.1.5	5
1.4.2	Математичний опис комплексу індукційного нагріву	1.4.1	15
1.4.3	Створення візуально-блочної моделі комплексу індукційного нагріву	1.4.2, 1.3.3	10
1.4.4	Усунення недоліків роботи системи	1.4.3	7
1.4.5	Аналіз результатів	1.4.3	7
1.4.6	Підготовка технічного звіту	1.4.5	8

### 5.3 Робоча структура проекту - WBS

WBS (Work Breakdown Structure) будується в результаті декомпозиції робіт. Вона визначає об'єм робіт, виконання яких призводить до досягнення мети проекту [32]. Структура наведена на рисунку 6.1.

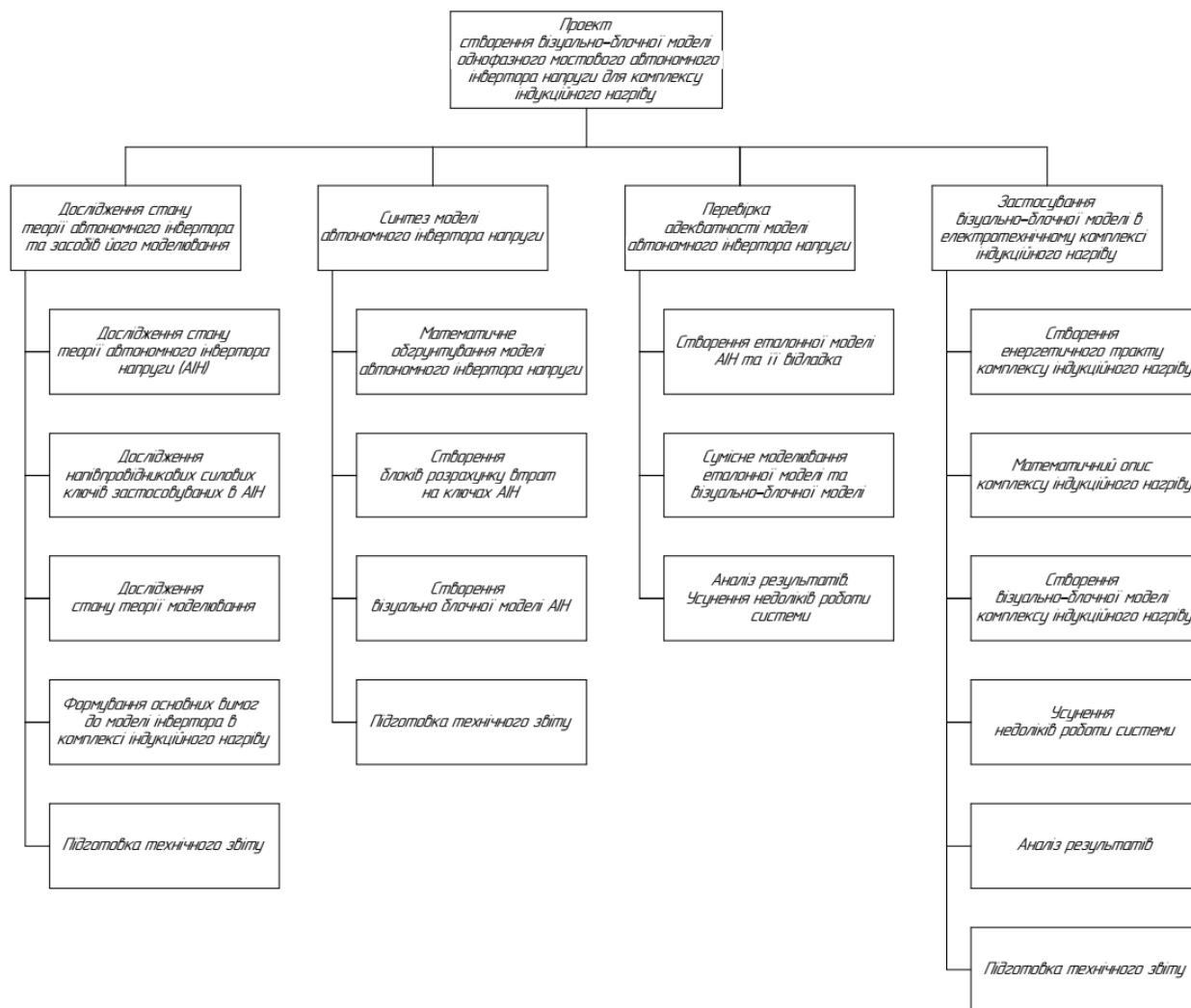


Рисунок 5.1 – Робоча структура проекту – WBS

### 5.3 Організаційна структура проекту - OBS

OBS (Organization Breakdown Structure) визначає виконавців проекту та встановлює систему підпорядкованості. OBS має вигляд ієрархічної системи. Структура OBS визначається структурою проектної організації [32]. Структура наведена на рисунку 6.2.



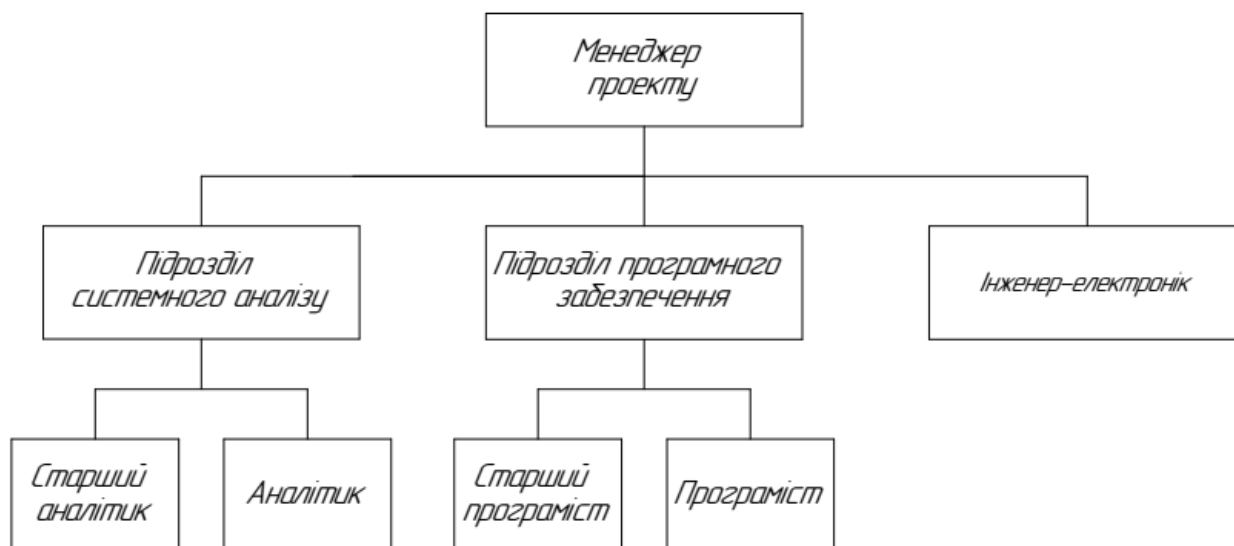


Рисунок 5.2 – Організаційна структура проекту - OBS

#### 5.4 Структура затрат проекту - CBS

CBS (Cost Breakdown Structure) будується в результаті декомпозиції загальних витрат на проект. Структура CBS наведена на рисунку 6.3.



Рисунок 5.3 – Структура затрат проекту - CBS

#### 5.6 Матриця відповідальності

Матриця відповідальності закріплює роботи за виконавцями та встановлює їх міру відповідальності. Вона пов'язує WBS та OBS. Вона приведена в таблиці 6.3.

Таблиця 5.3 - Матриця відповідальності

Матриця відповідальності																		
Виконавці	Роботи																	
	Дослідження стану теорії автономного інвертора напруги (АІН)	Дослідження напівпровідникових силових ключів	Дослідження стану теорії моделювання	Формування основних вимог до моделі АІН в комплексі індукційного нагріву	Підготовка технічного звіту	Математичне обґрунтування моделі АІН	Створення блоків розрахунку втрат на ключах АІН	Створення візуально блочної моделі АІН	Підготовка технічного звіту	Створення еталонної моделі АІН та її відладка	Сумісне моделювання еталонної моделі та візуально-блочної моделі	Аналіз результатів. Усунення недоліків роботи системи	Створення енергетичного тракту комплексу індукційного нагріву	Математичний опис комплексу індукційного нагріву	Створення візуально-блочної моделі комплексу індукційного нагріву	Усунення недоліків роботи системи	Аналіз результатів	Підготовка технічного звіту
Менеджер проекту				p	p				p								p	p
Старший аналітик	p	p	p	s	s		p	p	s		p	p	p	p		p	s	s
Аналітик	s	s	s	+	+	p			+	p		s	+	+	p	s		+
Старший програміст			+			+	s	s			s	+			s	+	+	
Програміст							+	+		+	+				+			
Інженер електронік	+	+				s				s		s	s					
p - первинна відповідальність, s - вторинна відповідальність, + - виконавець																		

## 5.7. Система кодування проекту

Система кодування дозволяє структурувати проект, встановити взаємовідносини WBS та OBS. У кодуванні використовуються багатозначні коди. Структуру коду введено за допомогою наступної форми:

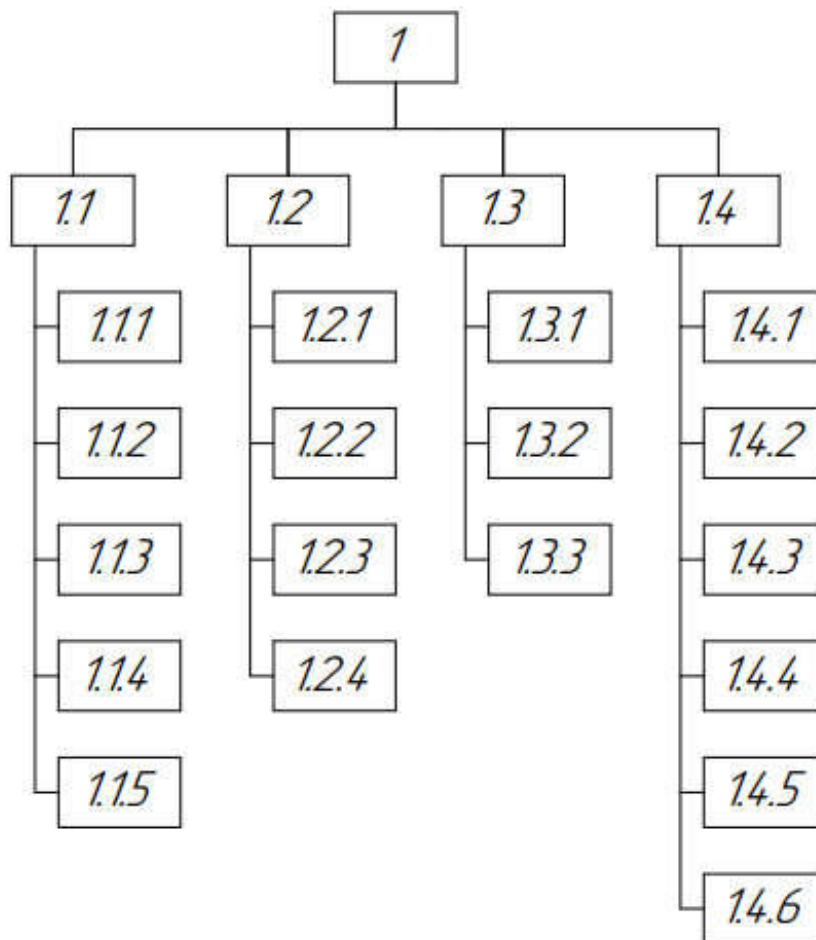
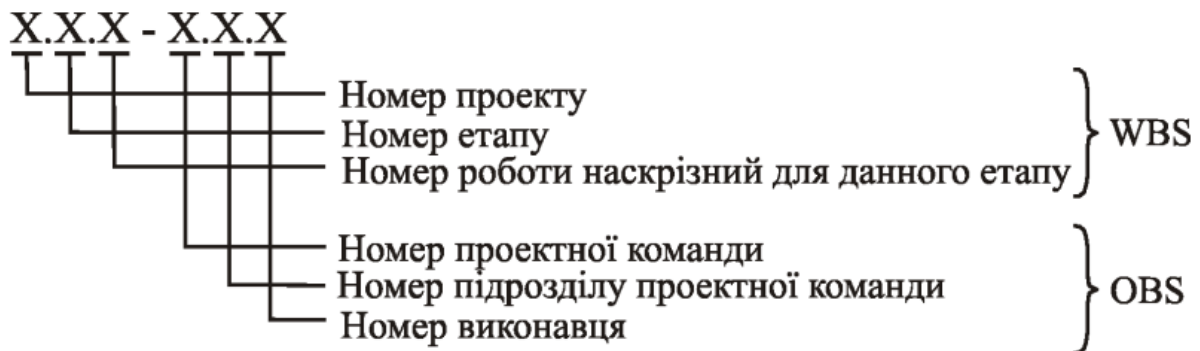


Рисунок 5.4 - Система кодування WBS

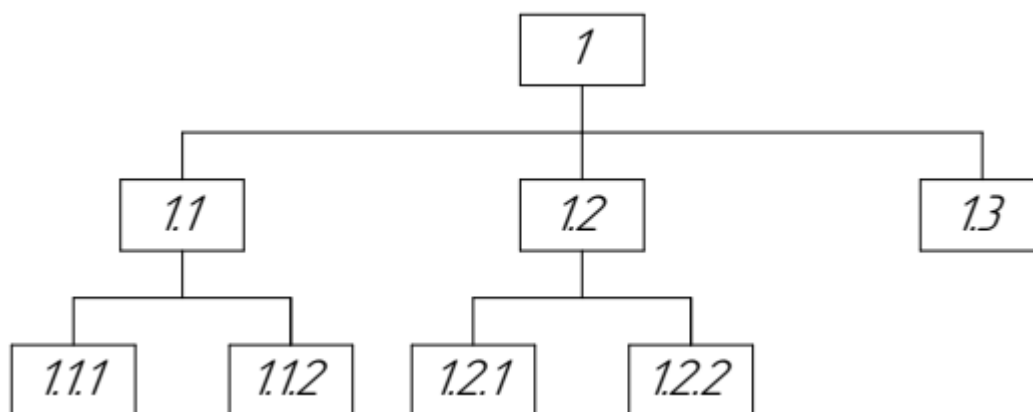


Рисунок 6.5 - Система кодування OBS

### 5.8. CTR - каталог

Після створення системи кодування було зроблено словник (таблиця 5.4), який визначає елементи й облік затрат та гарантує розуміння усім залученим до проекту зміст і значення елементів WBS та OBS [33].

Таблиця 5.4 - CTR - каталог

№	Код роботи	Назва чи зміст роботи	Затрати, грн	Тривалість, дні	Необхідні ресурси
1	2	3	4	5	6
1	1.1.1-1.3	Дослідження стану теорії автономного інвертора напруги (АІН)	6000	5	Аналітик 1 особа Електронік 1 особа
2	1.1.2-1.3	Дослідження напівпровідникових силових ключів	6000	5	Аналітик 1 особа Електронік 1 особа
3	1.1.3-1.2.1	Дослідження стану теорії моделювання	3600	3	Аналітик 1 особа Програміст 1 особа
4	1.1.4-1.1.2	Формування основних вимог до моделі інвертора в комплексі індукційного нагріву	7200	4	Аналітик 2 особи Електронік 1 особа
5	1.1.5-1.1.2	Підготовка технічного звіту	4800	4	Аналітик 2 особи
6	1.2.1-1.2.1	Математичне обґрунтування моделі АІН	10800	6	Електронік 1 особа Програміст 1 особа Аналітик 1 особа
7	1.2.2-1.2.2	Створення блоків розрахунку втрат на ключах АІН	4800	4	Програміст 2 особи

Продовження таблиці 5.4

1	2	3	4	5	6
8	1.2.3.- 1.2.2	Створення візуально блочної моделі АІН	2400	2	Програміст 2 особи
9	1.2.4- 1.1.2	Підготовка технічного звіту	4800	4	Аналітик 2 особи
10	1.3.1- 1.2.2	Створення еталонної моделі АІН та її відладка	3600	3	Електронік 1 особа Програміст 1 особа
11	1.3.2- 1.2.2	Сумісне моделювання еталонної моделі та візуально-блочної моделі	4800	2	Електронік 1 особа Програміст 2 особи Аналітик 1 особа
12	1.3.3- 1.2.1	Аналіз результатів. Усунення недоліків роботи системи	9000	5	Електронік 1 особа Програміст 1 особа Аналітик 1 особа
13	1.4.1- 1.1.2	Створення енергетичного тракту комплексу індукційного нагріву	6000	5	Електронік 1 особа Аналітик 1 особа
14	1.4.2- 1.1.2	Математичний опис комплексу індукційного нагріву	27000	15	Електронік 1 особа Аналітик 2 особи
15	1.4.3- 1.2.2	Створення візуально- блочної моделі комплексу індукційного нагріву	18000	10	Електронік 1 особа Програміст 2 особи
16	1.4.4- 1.2.1	Усунення недоліків роботи системи	12600	7	Електронік 1 особа Програміст 1 особа Аналітик 1 особа
17	1.4.5- 1.2.1	Аналіз результатів	16800	7	Електронік 1 особа Програміст 1 особа Аналітик 2 особи
18	1.4.6- 1.1.2	Підготовка технічного звіту	9600	8	Аналітик 2 особи

### 5.9. Стрілчастий графік

Стрілчастий графік являє собою граф, вузлам якого відповідають події, а стрілкам – роботи [34]. При побудові стрілчастого графіку використовуються позначення приведені на рисунку 5.6. Стрілчастий графік представлено на рисунку 5.7.

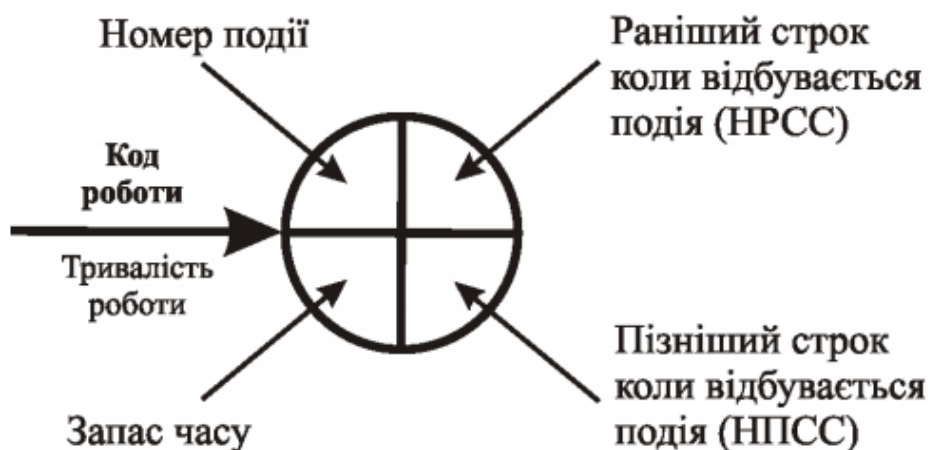


Рисунок 5.6 - Позначення для стрілкового графіку

### 5.10 Розрахунок тривалості проекту з урахуванням запасів часу

Більшість реальних проектів виконуються в умовах невизначеності стосовно строків виконання деяких робіт. Тому при визначенні загального терміну виконання проекту потрібно враховувати імовірнісний характер визначення термінів виконання робіт. Для визначається три оцінки для кожної  $i$ -ї роботи, що входять до критичного шляху, за допомогою експертної оцінки:

- $a_i$  - оптимістичний прогноз тривалості  $i$ -ї роботи;
- $b_i$  - песимістичний прогноз тривалості  $i$ -ї роботи ;
- $m_i$  - найбільш ймовірний прогноз тривалості  $i$ -ї роботи.

Далі було проведено розрахунок дисперсіх тривалості  $i$ -ї роботи за допомогою формули [32]:

$$\sigma^2_i = \left( \frac{b_i - a_i}{6} \right)^2 \quad (5.1)$$

Після цього було розраховано математичне очікування тривалості  $i$ -ї роботи за допомогою формули [32]:

$$t_i = \frac{a_i + 4 \cdot m_i + b_i}{6} \quad (5.2)$$

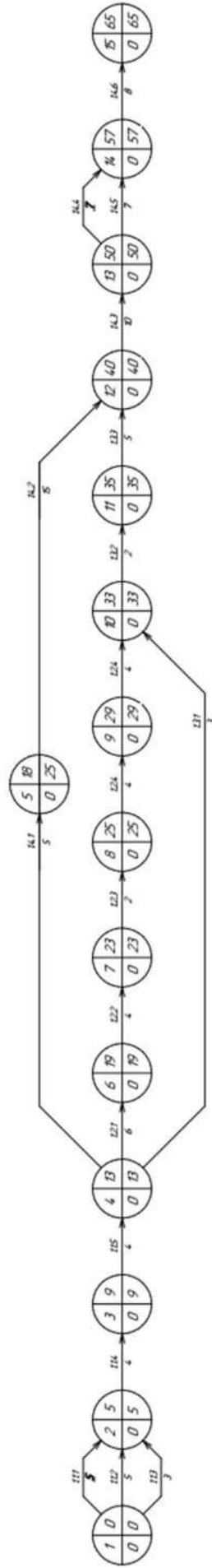


Рисунок 5.7 - Стрілчастий графік

Математичне очікування проекту визначається за допомогою формули:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (5.3)$$

де  $n$  - кількість робіт, що належать до критичного шляху.

Стандартне відхилення терміну виконання проекту визначено через формулу [32]:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (5.4)$$

Результати занесено в таблицю 6.5

Таблиця 6.5 - Тривалість проекту з урахуванням запасів часу

Код роботи	$a_i$	$m_i$	$b_i$	$\sigma_i^2$	$t_i$
1.1.1	4	5	8	0,44	5,3
1.1.4	3	4	10	1,36	4,8
1.1.5	3	4	8	0,69	4,5
1.2.1	4	6	10	1,00	6,3
1.2.2	3	4	7	0,44	4,3
1.2.3	1,5	2	6	0,56	2,6
1.2.4	2	4	6	0,44	4,0
1.3.2	1,5	2	7	0,84	2,8
1.3.3	4	5	9	0,69	5,5
1.4.3	9	10	16	1,36	10,8
1.4.4	6	7	14	1,78	8,0
1.4.6	5	8	12	1,36	8,2
				$\sigma$	$t$
				3,31	67,2

Ймовірність виконання проекту було прийнято в 0,9. Тоді величина  $\varphi$  визначається як:

$$\varphi = F - 0.5 = 0.9 - 0.5 = 0.4 \quad (5.5)$$



По таблиці нормального розподілу  $\varphi(z)$  [32] було визначено  $z = 1,29$ . Далі було проведено розрахунок необхідного терміну виконання проекту, який необхідно прийняти для того, щоб не зірвати строки виконання з ймовірністю 90%:

$$Q = z \cdot \sigma + t = 1,29 \cdot 3,31 + 67 = 72 \quad (5.6)$$

Отже, термін виконання проекту, який необхідно прийняти для того, щоб не зірвати строки виконання з ймовірністю 90%, становить 72 робочих дня.

## 6 ВИМОГИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ У НАУКОВО-ДОСЛІДНІЙ ЛАБОРАТОРІЇ

6.1 Охорона праці для неелектротехнічних працівників, що користуються електроустановками споживачів, які мають групу з електробезпеки I [29][30][31].

### 6.1.1. Загальні положення.

6.1.1.1. Дана інструкція розроблена відповідно до вимог п.2.1.3. (Підпункт 1) "Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів" і обов'язкова для всіх неелектротехнічних працівників підприємства.

6.1.1.2. До користування електроустановками споживачів електричної енергії (персональними електронно-обчислювальними машинами, кондиціонерами, вентиляторами, електричними друкарськими машинками, принтерами, факсами, сканерами, копіювальними пристроями, електронагрівальними приладами, холодильниками, світильниками і т.д.) допускаються працівники, які пройшли вступний, первинний інструктаж з питань охорони праці, які вивчили порядок і правила користування електроприладами, передбачені експлуатаційною документацією.

6.1.1.3 Виробничому неелектротехнічний персоналу, який виконує роботи, при яких може виникнути небезпека ураження електричним струмом, присвоюється 1 група по електробезпеки. Для отримання 1-ї групи необхідно вивчити дану інструкцію після чого підтвердити знання викладеного в ній матеріалу, відповівши на контрольні питання, поставлені відповідальним за електрогосподарство, на якого покладено ці обов'язки, з оформленням в "Журналі перевірки знань з техніки безпеки у персоналу з групою по електробезпеки 1 ". Видача посвідчень працівникам з 1-ю групою не потрібно. Надалі працівники неелектротехнічного персоналу проходять інструктаж з питань електробезпеки один раз на рік.

#### 6.1.1.4. Все електроспоживачі:

- промислове електроустаткування;
- зразки розроблених і серійно випускаються виробів та їх складові;
- оргтехніка (комп'ютери, факси, принтери, модеми тощо);
- освітлювальна техніка;
- побутова електротехніка і електроніка (чайники, кип'ятильники, нагрівачі, каміни, тепловентилятори, холодильники, пылесоси, радіо-, телеприймачі і передавачі т.п.)

є електроустановками.

6.1.1.4.1. Відносно заходів безпеки роботи з електроустановками (в електроустановках) поділяються на 3 категорії:

- роботи зі зняттям напруги;
- роботи без зняття напруги віддалік від струмоведучих частин, що знаходяться під напругою;
- роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах, що знаходяться під напругою та поблизу них.

Роботи зі зняттям напруги - це роботи з електроустановками, на які не подано напругу живлення.

Електроустановка вважається відключеною від напруги живлення (на неї не подано напругу) тільки тоді, коли є видимий розрив між нею і джерелом напруги живлення (вилка шнура живлення вийнята з розетки, підводять кабелі відключені і т.п.). В іншому випадку, незалежно від стану закритого комутаційного апарата (вимикача), електроустановка вважається під напругою (без зняття напруги).

6.1.1.4.2. Роботи з оргтехнікою та побутовими приладами відносяться до робіт без зняття напруги віддалік від струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, оскільки напруга на електроустановках присутній, але доступ до струмоведучих частин неможливий (за умови наявності корпусу з ізолюючого матеріалу або металевого заземленого). При цьому не потрібно застосування захисних засобів. Заземлення може здійснюватися як за

допомогою заземлюючого проводу при трьохпровідній електромережі, так і за допомогою окремо прокладеного заземлювального провідника.

#### 6.1.1.5 Користувачі електроустановок зобов'язані:

- Виконувати вимоги електробезпеки, викладені в цій інструкції та експлуатаційної документації на використовувані електроприлади;

- Виконувати вказівки особи, відповідальної за електрогосподарство і фахівця з охорони праці, з питань електробезпеки та режимів споживання електричної енергії;

- Мати знання і навички звільнення потерпілого від дії електричного струму;

- Знати розташування первинних засобів пожежогасіння та вміння ними користуватися;

- Не проводити технічне обслуговування і ремонт електрообладнання.

6.1.1.6. Струмopрoвідні частини електроустановок повинні бути ізолювані, огорожені або розміщені в місцях, недоступних для дотику до них.

6.1.1.7. Кожен працівник, який виявив порушення цієї інструкції, а також помітив несправність електроустановки або засобів захисту, повинен негайно повідомити про це свого безпосереднього керівника, а в його відсутність - керівника вищого рівня.

6.1.1.8. Порушення вимог цієї інструкції спричиняє за собою дисциплінарну, адміністративну або кримінальну відповідальність у встановленому законодавством порядку в залежності від характеру порушень і їх наслідків.

#### 6.1.1.9. Дія електричного струму на людину.

6.1.1.9.1. Будь-який вплив електричного струму на організм людини небезпечно для здоров'я і життя.

6.1.1.9.2. Внаслідок особливих властивостей електричного струму (відсутність зовнішніх ознак: кольору, звуку, запаху і т.д.), робота в установках і використання електроприймачів вимагає особливої уваги та обережності.

6.1.1.9.3. Електричний струм при проходженні через організм людини надає на нього різного роду вплив: електролітичне (розкладання крові, що приводить до зміни її хімічного складу), біологічне (порушення внутрішніх біоелектричних процесів, зокрема, судорожне скорочення м'язів), термічне (нагрів тканин, органів, опіки ) і механічне (розшарування, розрив тканин і органів).

6.1.1.9.4. Дія електричного струму може заподіяти людині:

- електричний удар, коли струм проходить через тіло людини і вражає весь організм. При цьому, як правило, спочатку порушується дихання, а серце продовжує працювати з порушеннями ритму, але, якщо дія струму триває, може наступити зупинка серця і смерть.

- електричну травму, коли впливу струму піддаються ділянки тіла. В результаті виникають зовнішні і внутрішні місцеві ураження.

Крім того можуть бути травми і опіки від впливу електричної дуги, що виникає при різних коротких замикань. При цьому опіки можуть бути як малої тяжкості (почервоніння шкіри) так і дуже великий (глибоке порушення тканин аж до обвуглювання).

## 6.1.2. Вимоги безпеки перед початком роботи

6.1.2.1. Перед включенням електроустановки в мережу необхідно провести її зовнішній візуальний огляд, переконатися у відсутності незакритих струмоведучих частин, в цілісності сполучних проводів, штепсельних розеток, вилок, вихідному положенні органів управління, відсутності пошкодження ізоляції сполучних і живлять проводів (кабелів) та інших зовнішніх елементів електроустановки, відсутності вологи або крапель води на частинах електроустановки.

6.1.2.2. Якщо для експлуатації електроустановки передбачено заземлення, необхідно переконатися в цілісності заземлюючого провідника і його надійне кріплення до заземлювальної шини.

6.1.2.3. При використанні вилок і розеток з заземлюючим контактом переконатися, що вилка приєднана до розетки з заземлюючим контактом.

6.1.2.4 Приступати до роботи з електроустановкою тільки після вивчення експлуатаційної документації підприємства-виробника (паспорта, керівництва, інструкції по експлуатації і т.п.).

6.1.2.5. Електроприлади, встановлені в приміщеннях з підвищеною вологістю, наявністю струмопровідних підлог і пилу, хімічно активного середовища, які мають неізольовані струмопровідні корпусу, можна включати в електричну мережу тільки при наявності заземлення.

Використання опалювальних, водопровідних та інших труб або конструкцій як заземлення забороняється.

6.1.2.6. При виявленні несправностей в електроустановці, не подавати на неї напругу, а повідомити про несправності своєму безпосередньому керівнику робіт.

### 6.1.3. Вимоги безпеки під час роботи

6.1.3.1. Після подачі напруги живлення на електроустановку необхідно переконатися в її функціонуванні відповідно до експлуатаційної документації підприємства-виробника.

6.1.3.2 Забороняється під час роботи електроустановки відхилятися від вимог її експлуатаційної документації (час безперервної роботи, перерв і т.д.).

6.1.3.3. Користувачеві електроустановки забороняється:

6.1.3.3.1 Самостійно розкривати, ремонтувати електроприладів, електропроводки, розеток, вилок, вимикачів і т.д., а також робити заміну електроламп, запобіжників та інших знімних елементів, відключити і включити автоматичні вимикачі в електрощитах (крім аварійних випадків).

6.1.3.3.2. Користуватися несправними електроприладами, розетками, вилками, рубильниками та іншими комутаційними пристроями.

6.1.3.3.3. Користуватися нестандартним електроустаткуванням (кустарними електронагрівальними приладами, запобіжниками, замінниками штепсельних вилок, розеток, вимикачів і т.п.).

6.1.3.3.4. Включати в електромережу потужні споживачі електроенергії (нагрівальні пристрої, зварювальні апарати і т.п.) без дозволу особи, відповідальної за електрогосподарство.

6.1.3.3.5. Включати в електромережу (розетку), призначену для обчислювальної техніки потужні споживачі електроенергії (кондиціонери, нагрівальні пристрої, зварювальні апарати і т.п.).

6.1.3.3.6. Включати в електромережу і роботу електроприлади з відключеною або несправною автоматикою (блокуванням) і сигналізацією.

6.1.3.3.7. Працювати з електроприладами в мережу при появі в них (на них) вологи і пошкоджень ізоляції струмопровідних проводів (кабелів).

6.1.3.3.8. Проводити підключення, відключення штепсельних роз'ємів (з'єднань) при положенні вимикачів в стані «включено».

6.1.3.3.9. Знімати попереджувальні таблички (плакати) з розподільних електрощитів, самовільно відкривати їх і виробляти в них включення, перемикання.

6.1.3.3.10. Торкатися руками одночасно до включеному в мережу електроприлади і до пристроїв, що мають природне заземлення (радіаторів і труб опалення, водопровідних труб, газових плит і т.п.).

6.1.3.3.11. Експлуатувати електроприлади без спеціального захисного виконання (заземлення, герметичного, пилевологонепроникного корпусу) в приміщеннях з наявністю в них одних з таких умов:

а) вогкості (вологість понад 75%, стеля, стіни, підлога, предмети покриті вологою);

б) струмопровідного пилу;

в) хімічно активного середовища (парів, газів, відкладення яких руйнують ізоляцію и струмоведучі частини електрообладнання), струмопровідних підлог (металевих, земляних, залізобетонних и т.п.).

6.1.3.3.12. Застосовувати переносні світильники з напругою вище 42В в приміщеннях з підвищеною небезпекою (наявністю вологості більше 75%, струмопровідних підлог і пилу, температури понад 35 градусів).

6.1.3.3.13. Застосовувати переносні світильники з напругою вище 12В в приміщеннях з особливо небезпечними умовами (наявність вологи на стелі, стінах, підлогах, предметах, хімічно активних парів, газів, одночасно двох і більше умов підвищеної небезпеки).

6.1.3.3.14. Експлуатувати без захисних кожухів (огороження) електроприлади, які мають обертові частини, неізольовані струмоведучі елементи, що знаходяться під напругою.

6.1.3.3.15. Торкатися руками, іншими відкритими ділянками тіла проводів (кабелів), що знаходяться під напругою, класти на них і електроприлади будь-які предмети, ставати на них.

6.1.3.3.16. Застосовувати стаціонарні світильники в якості ручних переносних ламп.

6.1.3.3.17 Допускати зіткнення електричних проводів з металевими конструкціями і горючими матеріалами.

6.1.3.3.18. Зав'язувати и скручувати електропроводи, відтягувати проводи та світильники, підвішувати світильники на електричному дроту.

6.1.3.3.19. Використовувати електроарматуру для підвішування одягу та других предметів.

6.1.3.3.20. Обгортати електричної лампи (світильники) папером, тканини та іншими горючими матеріалами.

6.1.3.3.21. Встановлювати світильники, нагрівальні електроприлади на відстані менше 0,5 м від горючих матеріалів.

6.1.3.3.22. Застосовувати в електромереж радіо чи телефонний дріт.

6.1.3.3.23. Прибирати в шафи електронагрівальні прилади до їх повного охолодження.

6.1.3.3.24. Використовувати електронагрівальні прилади без теплоізоляційних підставок.



6.1.3.3.25. Сушити одяг або інші горючі матеріали на електронагрівальних приладах або ж коло них.

6.1.3.4. Електроінструмент можна використовувати тільки у випадках, якщо він має подвійну ізоляцію або, якщо він живиться від напруги 42В.

#### 6.1.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

6.1.4.1 Відключення електроустановок від мережі проводити відповідно до вказівок експлуатаційної документації (паспорта, керівництва, інструкції по експлуатації і т.п.).

6.1.4.2. Перед відходом з робочого місця (приміщення) переконатися, що всі споживачі електричного струму відключені.

#### 6.1.5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

6.1.5.1. У разі появи ушкоджень у корпусі електроустановки або в електроживлячому електрообладнанні, відхилень від передбаченого експлуатаційної документацією режиму роботи електрообладнання, ознаках аварійного стану (іскріння, стороннього шуму, самозаймання тощо) користуватися електроустановкою забороняється. Необхідно негайно відключити електроустановку від електромережі, повідомити про те, що трапилося безпосередньому керівнику робіт і особи, відповідальної за електрогосподарство.

Повторне включення електрообладнання допускається тільки після усунення всіх причин, що викликали необхідність відключення електрообладнання.

6.1.5.2. При виникненні пожежі в електрообладнанні або електромережі необхідно виконати всі дії, зазначені в пункті 5.1.5.1, а також повідомити на пост охорони об'єкту про місце і характер пожежі для виклику (при

необхідності) пожежної команди і приступити до гасіння пожежі наявними поблизу первинними засобами пожежогасіння. Використання водяних і пінних засобів пожежогасіння в приміщенні з незабезпеченої електромережею забороняється.

Для гасіння пожежі на електроустановках, що знаходяться під напругою, застосовуються вогнегасники вуглекислотного типу ОУ2, ОУ5, ОУ8 і т.д.

6.1.5.3. При попаданні будь-кого з працівників під електричну напругу необхідно негайно звільнити потерпілого від дії струму, дотримуючись вимог електробезпеки.

6.1.5.3.1. Для цього слід відповідним вимикачем або роз'єднувачем швидко відключити напругу з електроустановки, струмоведучих частин якої стосується потерпілий.

6.1.5.3.2. Якщо відключити швидко неможливо, слід вжити заходів для відділення потерпілого від струмоведучих частин електроустановки. При цьому необхідно застосовувати або захисні засоби, або (тільки в електроустановках до 1000 В) підручні предмети з ізолюючими властивостями.

6.1.5.4. При нещасному випадку, очевидець, працівник, який виявив факт травмування, або сам потерпілий зобов'язаний повідомити про це безпосереднього керівника робіт і зберегти до прибуття комісії з розслідування обстановку, яка була на момент травмування, якщо це не загрожує життю чи здоров'ю інших працівників і не призведе до більш тяжких наслідків.

6.5. При нещасних випадках слід надати першу допомогу:

- при ураженні електричним струмом, якщо потерпілий дихає рідко і судорожно або у нього відсутні ознаки життя (не прослуховується дихання, немає пульсу, розширені зіниці очей) необхідно робити штучне дихання «рот в рот» і непрямий масаж серця (при цьому, організація виклику швидкої допомоги обов'язкова);

- при пораненні - накладити стерильну пов'язку;

- при кровотечі - рану закрити стерильною пов'язкою і тримати в такому стані 35 хвилин. Якщо кровотеча припинилася, пов'язку закріпити бинтом;

- при переломах, ударах, вивихах і розтягненнях забезпечувати спокійне і зручне положення пошкодженої частини тіла.

У всіх випадках після надання першої допомоги, потерпілого (якщо можливо) направити в медпункт або викликати лікаря.

## 6.2 Заземлення і занулення

Основний захисною мірою від ураження електричним струмом є застосування захисного заземлення - обов'язкового з'єднання із заземлюючим пристроєм (землею) металевих частин електричних установок, які можуть опинитися під напругою при пошкодженні ізоляції електричних провідників або електроприймачів.

Крім заземлення, електроустановки напругою до 1000 В, підлягають обов'язковому зануленню - з'єднання металевих частин електроустановки з нульовим проводом мережі живлення. Наявність такого з'єднання перетворює замикання струмопровідних частин електроприймачів на корпус електроустановки в коротке замикання, що призводить до відключення аварійної ділянки автоматичним вимикачем або запобіжником.

Застосування захисного заземлення металевих частин електроустановки без їх занулення забороняється.

Установка комутаційних апаратів в ланцюзі заземлення та зануляють провідників забороняється.

## 6.3 Розрахунок заземлення

Відповідно до ПУЕ 2017 (Глава 1.7) [31], опір заземлення пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.

Вихідні дані:

- кліматична зона - 3;
- питомий опір ґрунту, глина,  $\Psi$  - 70 Ом м;
- нормований опір заземлювального пристрою,  $R_3$  - 4 Ом;
- довжина вертикального електрода,  $L_B$  - 3,0 м;
- діаметр вертикального електрода,  $D_B$  - 25 мм;
- горизонтальний електрод - смугова сталь  $40 \times 4$  мм;
- відстань між вертикальними електродами,  $L$  - 3,0 м;
- розташування вершини вертикального електрода - нижче рівня землі 0,5 - 0,8 м;
- розташування вертикальних електродів — по контуру.

Вертикальні електроди з'єднуються за допомогою горизонтальної сталеві штаби. З'єднання вертикальних і горизонтальних електродів виконується зварюванням.

З урахуванням підвищувальних коефіцієнтів, для третьої кліматичної зони, розрахунковий питомий опір ґрунту:

- для горизонтальних електродів:

$$\Psi_{ГОР} = 2 \cdot \Psi = 2 \cdot 70 = 140 \text{ Ом} \quad (4.1)$$

- для вертикальних електродів:

$$\Psi_{ВЕР} = 1,4 \cdot \Psi = 1,4 \cdot 70 = 98 \text{ Ом} \quad (4.2)$$

Опір розтікання струму одного вертикального електрода:

$$R_B = \frac{\Psi_{ВЕР}}{2 \cdot \pi \cdot L_B} \cdot \left[ \ln \frac{2 \cdot L_B}{D_B} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot t + L_B}{4 \cdot t - L_B} \right] = \quad (4.3)$$

$$= \frac{98}{2 \cdot \pi \cdot 3} \cdot \left[ \ln \frac{2 \cdot 3}{0,025} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,2 + 3}{4 \cdot 2,2 - 3} \right] = 30,34 \text{ Ом}$$

де  $t$  - рівень розташування центру вертикального електрода.

Приблизне число вертикальних електродів з урахуванням прийнятого коефіцієнту використання  $K_B = 0,55$

$$N = R_B / K_B / R_3 = 30,34 / 0,55 / 4 = 14,04 \quad (4.4)$$

Для подальших розрахунків приймаємо кількість вертикальних електродів  $N_{пр} = 14$ . Коефіцієнт використання горизонтального з'єднувального електрода, при розташуванні вертикальних електродів в ряд,  $K_\Gamma = 0,32$ . Опір розтікання струму горизонтального електрода (металевої смуги), яка приварена до верхніх кінців вертикальних електродів:

$$R_\Gamma = \frac{\Psi_{ГОР}}{2 \cdot \pi \cdot L_\Gamma \cdot K_\Gamma} \cdot \ln \frac{2 \cdot L_U^2}{b \cdot T} = \frac{140}{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 0,32} \cdot \ln \frac{2 \cdot 9}{0,04 \cdot 0,72} = 149,4 \text{ Ом} \quad (4.5)$$

де  $b$  - ширина горизонтального електроду;  $T$  - рівень розташування центру горизонтального електроду.

Проводимо уточнення опору розтікання струму вертикальних електродів, з урахуванням опору горизонтального електрода:

$$R_{BY} = \frac{R_\Gamma \cdot R_3}{R_\Gamma + R_3} = \frac{149,4 \cdot 4}{149,4 + 4} = 3,87 \text{ Ом} \quad (4.6)$$

Проводимо уточнення кількості вертикальних електродів, при уточненому коефіцієнті використання  $K_{B\Gamma} = 0,56$

$$n = R_B / K_{B\Gamma} / R_{BY} = 30,34 / 0,56 / 3,87 = 13,99 \quad (4.7)$$

Остаточню, як заземлювальний пристрій приймаємо конструкцію, що складається з 14 вертикальних електродів довжиною 3,0 метра, діаметром 25

мм, розташованих в ряд, на відстані 3 м один від одного, з'єднаних металевою смугою  $40 \times 4$  мм, загальною довжиною 39,0 м.

#### 6.4 Рекомендації з монтажу заземлення

1. Опір заземлення згідно з вимогами ПУЕ 2017 (Глава 1.7) [31], в будь-який час року має бути не більше 4 Ом.

2. По закінченню монтажу зробити вимір дійсного опору розтікання струму заземлювального пристрою. При необхідності збільшити кількість вертикальних і довжину горизонтальної електродів.

3. Роботи по установці елементів заземлювального пристрою виконати відповідно до креслення.

4. Вертикальний електрод - сталевий прут  $l = 3,0$  м,  $d = 25$  мм, кількість - 12 шт.

5. Горизонтальний електрод - сталева смуга  $40 \times 4$  мм,  $l = 39$  м.

6. Перед забиванням в землю один кінець вертикального електрода зрізати під клин (кут 60 градусів).

7. Відстань між вертикальними електродами - 3 м.

8. Глибина залягання горизонтального заземлювача - 0,7 м нижче рівня землі.

9. Всі з'єднання елементів заземлювального пристрою виконати зварюванням внахлест.

10. Всі місця зварювальних з'єднань покрити бітумною мастикою в два шари.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання дослідницької дипломної роботи було створено візуально блочну модель однофазного мостового інвертора напруги в середовищі MATLAB Simulink. Цей блок проводить розрахунок взаємозалежностей між вхідними та вихідними параметрами (напруга, струм частота і т.д.), оцінює статичні та динамічні втрати на приладах інвертору. Візуально блочну модель однофазного мостового інвертора напруги було перевірено за допомогою еталонної моделі, в результаті всі вхідні та вихідні параметри відповідають очікуваним результатам та знаходяться в межах допустимої погрішності.

Після створення візуально блочної моделі інвертора напруги її було застосовано в моделі комплексу індукційного нагріву. В результаті моделювання комплексу індукційного нагріву в середовищі MATLAB Simulink було знято його вихідні залежності в трьох режимах: при рівномірному нагріві заготовки до точки Кюрі (час моделювання 240 с), при нагріві заготовки з пересіканням точки Кюрі (час моделювання 1200 с) та при нагріві заготовки до температури в 300 °C і її утримання на цьому рівні (час моделювання 540 с).

Під час моделювання комплексу індукційного нагріву тривалістю 240 с з обмеженням по температурі до 300 °C, комплекс не може розігріти заготовку до 300 °C в зв'язку з малим часом моделювання. Наприкінці моделювання потужність, що споживає комплекс, становить 488,7 кВт. Активна потужність, яку споживає комплекс від інвертора, становить 443,9 кВт. При цьому індуктор споживає активної потужності на 8,1 кВт менше – частина потужності втрачається на проміжних елементах. Інвертор напруги розсіює 4 кВт – при частоті вихідної напруги в 800 Гц – статичні втрати напруги становлять 2.15 В, динамічні втрати близько 0,1 В.

Під час моделювання комплексу індукційного нагріву в середовищі MATLAB Simulink тривалістю 540 секунд, з обмеженням по температурі до

300 °С, заготовка нагрівається до заданої температури на 350 секунді моделювання, після чого комплекс переходить в режим підтримки заданої температури. Комплекс відпрацьовує в очікуваному режимі, для підтримки заданої температури на заготовці витрачається близько 30 кВт.

Під час моделювання комплексу індукційного нагріву в середовищі MATLAB Simulink тривалістю 1200 секунд, з обмеженням по температурі до 1000 °С, заготовка нагрівається до температури 885 °С. Точка Кюрі для сталі становить 710 °С, відповідно модель відображає режим роботи комплексу з переходом через точку Кюрі. В зв'язку з тим що відносна магнітна проникність матеріалу при переході через точку Кюрі знижується до 1 [19] індуктивність індуктора стрибкоподібно знижується практично до нуля. В момент переходу через точку Кюрі, напруга на індукторі просідає. Це пов'язано з тим що загальний опір індуктора зменшується, але система керування підвищує коефіцієнт заповнення коригуючу вихідну напругу. Таким чином в даній моделі реалізована корекція вихідної потужності через вихідну напругу при переході системи через т. Кюрі.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1982. — 496с.
2. Хоровиц Х., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х т. Пер. с англ.. — Изд. 3-е стереотип. — М.: Мир, 1986.
3. Ирвинг М., Готтлиб. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы.. — 2-е изд. — М.: Постмаркет, 2002. — 544 с.
4. В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. Г. Морозов. Перетворювальна техніка. Частина 1: Підручник. — К.: ІСДО, 1996. — 262 с.
5. Горбачёв Г. Н., Чаплыгин Е.Е Промышленная электроника. — М.: Энергоатомиздат , 1988 — 320с.
6. Криштафович А. К., Трифонюк В. В. Основы промышленной электроники. перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1985. — 287 с
7. Воронин П.А., Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2010. — 384 с.
8. Шустов М.А. - Цифровая схемотехника. Практика применения. - СПб.:Наука и техника, 2018. - 432 с.:ил.
9. Д. Г. Алексієвський. Основи теорії систем: Навчально-методичний посібник. — Запоріжжя, ЗДІА, 2012. — 59 с.
10. Proteus Design – PCB Design and Circuit Simulator. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступу: <https://www.labcenter.com/>
11. MathWorks – MATLAB Simulink. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/>
12. Алексієвський Д.Г., Панкова О.О., Хрестін Р.М. Синтез моделей електротехнічних комплексів. - Наукова періодика України [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/>

13. Сергеев П.В., Білецький В.С. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум) – Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. – 119 с.
14. Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink: учеб.для вузов / С. Г. Герман-Галкин. - СанктПетербург : Лань, 2013. - 448 с
15. [2/2/1]Семенов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. — 416 с.: ил.
16. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2 – 197 с.
17. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. – М.: Изд-во «Солон-Пресс», 2011.
18. Слухоцкий А. Е. Индукторы. -Л.: Машиностроение, 1989. С. 69.
19. Слухоцкий А. Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунэр А.В. - Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов – Л. Энергоиздат, 1981. – 328 с.: ил.
20. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Роцин, М. А. Рысс и др. : под ред. Д. Я. Поволоцкого. М.: Metallurgia, 1984. — 568 с.
21. ГОСТ 16110-82 Трансформаторы силовые. Термины и определения.
22. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка: Підручн. для студентів нерг. спец. вищ. навч. закладів. — К.: Техніка, 2001. — 320 с
23. Савельев И. В. Курс общей физики. — Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.
24. Котенёв С. В., Евсеев А. Н. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов и дросселей. — М.: Горячая линия — Телеком, 2013. — 360 с. — 500 экз. — ISBN 978-5-9912-0186-5.
25. Никулин Е. А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем / Учеб. пособие для вузов — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 640 с.:илл. — с.573-574

26. Semikron – Power modules and systems. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступу: <https://www.semikron.com/>
27. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. -М.: Издательство АН СССР, 1948. С. 471.
28. Фогель А. А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. -Л.: Машиностроение, 1979. С. 104.
29. ПТЕЕС-2006. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів
30. ДНАОП 0.00-1.21-98. ПБЕЕС. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів
31. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок.: Київ 2017. - 617 с.:ил.
32. Алексеев О.Г., Алексієвський Д.Г., Шмалій С.Л., Таранець А.В. Підсумкова атестація здобувачів вищої освіти другого рівня «магістр». Методичні рекомендації до виконання дипломних робіт з напрямку підготовки 171 «Електроніка». – Запоріжжя: 2018. – 30 с.
33. Батенко Л.П., Загородних О.А., Ліщинська В.В. Управление проектами: Навч. посібник.- К.: КНЕУ, 2003. - 231 с.
34. Бэгыюли Ф. Управление проектом -Пер. с англ. В. Петрашек. - М.: ФАИРПРЕСС, 2002. - 208 с.: ил.
35. Alekseevskiy, D. G. (2017). Vizualnoe modelirovanie mnogokanalnykh vetroelektrogeneriruiushchikh system. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut». Spetsvypusk: Problemy avtomatyzovanogo elektropryvoda. Teoria i praktyka, 27(1249), 332–336.