

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ

Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій

Кафедра «Електронні системи»

Кваліфікаційна робота / проект

магістра

(рівень вищої освіти)

на тему синтезу бездифузійно-шумної моделі
трифазного інвертора напруги

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

171- Електроніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Бирянов С.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник доц. С.Ф. ЕС, д.т.н., проф. Крижованський І.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Шершов С.А.

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

м. Запоріжжя – 2020 року

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

Факультет

Енергетики, електроніки та інформаційних технологій
Кафедра

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістра

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність

171- Електротехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Е.С.

[Підпис]
« _____ » _____ 20 _____ року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Баранов Серій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Синтез візуально-блокової моделі
трифазного інвертору напруги

керівник проекту (роботи) Кришак І.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « _____ » _____ 20 _____ року № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 08.01.20

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

Параметри трифазного інвертору: напруга 380V
струм $I_d = 1,5 A$

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, 1 Теоретичний розділ, 2 Розробка моделі,
3 Перевірка адекватності моделі, 4 Техніко-економічне обґрунтування
5 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Постановка завдання (А1) модель АЖ з базисних блоків (А1)
Схема блоків трифазного АЖ (А1) Завдання параметрів блоків (А1)

Результати моделювання (А1) Візуально-слотна модель (А1)
 Сімкований графік (А1) Охорона праці (А1)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Кримська Т.В.		Беру
2	Кримська Т.В.		Беру
3	Кримська Т.В.		Беру
4	Кримська Т.В.		Беру
5	Кримська Т.В.		Беру
6	Кримська Т.В.		Беру

7. Дата видачі завдання 02.10.19

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
	Літературний огляд	16.10	вик.
	Розділ 1	30.10	вик.
	Розділ 2	13.11	вик.
	Розділ 3	27.11	вик.
	Розділ 4	11.12	вик.
	Розділ 6	29.12	вик.
	Оформлення	08.01	вик.

Студент Беру Баранов С.О.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) К. Кісельов Е.М.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер Кісельов Е.М.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект: 85 стор., 35 рис., 9 табл., 18 джерел

Об'єкт дослідження: інвертор напруги.

Предмет дослідження: перехідні процеси в інверторах напруги.

Мета роботи: дослідження роботи інверторів напруги за допомогою візуально-блочної математичної моделі.

У даній роботі розглянуто принципи роботи інверторів напруги з моделюванням перехідних процесів.

Розроблено візуально-блочну математичну модель для середовища MatLab Simulink.

ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ІНВЕРТОР НАПРУГИ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ,
ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, АДЕКВАТНІСТЬ

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Теоретичний розділ	8
1.1 Трифазний АІН з нульовим проводом	9
1.2 Трифазна мостова схема	22
1.3 Вибір програмного продукту для проведення моделювання	27
1.3.1 SamSim	28
1.3.2 SimApp	29
1.3.3 Wolfram SystemModeler	31
1.3.4 MATLAB / Simulink та Simscape	33
1.4 Обґрунтування вибору програмного забезпечення для моделювання	37
2 Розробка моделі	40
2.1 Опис базової моделі інвертора в MATLAB	42
2.2 Розробка моделі інвертора без модуляції ШІМ	47
3 Перевірка адекватності моделі	52
3.1 Перевірка на адекватність математичної моделі інвертору напруги	54
4 Техніко-економічне обґрунтування	56
4.1 Формуляр проекту	56
4.2 Робоча структура проекту (WBS)	58
4.3 Організаційна структура проекту (OBS)	59
4.4 Структура затрат проекту (CBS)	61
4.5 Матриця відповідальності	62
4.6 Система кодування проекту	64
4.7 СТР – каталог	65
4.8 Сіткове планування	66
4.9 Розрахунок тривалості проекту	68
5 Охорона праці	70

5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників цеху виготовлення та тестування інверторів напруги	70
5.1.1 Небезпека поразки електричним струмом	70
5.1.2 Виробничий шум	73
5.1.3 Вібрація	74
5.1.4 Виробничий пил	76
5.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних виробничих чинників	76
5.3 Пожежна безпека в цеху	80
Висновки	82
Список використаних джерел	83
Додаток А	85

ВСТУП

Автономними перетворювачами прийнято називати напівпровідникові перетворювачі, у яких (на відміну від перетворювачів відомих мережею) використовується штучна комутація. В даний час, як правило, використовується два види штучної комутації: ємнісна і примусова. Для реалізації ємнісної комутації необхідно мати відповідний конденсатор, заряд якого виступає як джерело комутуючої напруги. Примусова комутація здійснюється за допомогою цілком керованих приладів, при цьому перехід струму з одного силового приладу на інший відбувається в результаті вимикання приладу, що проводив струм до початку комутації. Основними видами автономних перетворювачів є наступні:

- Автономні інвертори струму (АІС);
- Автономні інвертори напруги (АІН);
- Імпульсні перетворювачі постійної напруги (ІППН).

Кожний з перерахованих видів можна розділити на підвиди, наприклад, інвертори струму поділяються на паралельні, послідовні, послідовно-паралельні, резонансні і т.інш. Інвертори напруги можна розділити на однофазні і трифазні, з амплітудним чи широтно-імпульсним регулюванням. Слід зазначити ту обставину, що кожний з відомих варіантів автономних інверторів може бути виконаний по кожній з відомих схем випрямлення. Наприклад, паралельний інвертор може бути однофазним (мостовим чи з нульовим виводом) чи трифазним і т.інш. Те ж справедливо і стосовно схем АІН.

Слід також відмітити, що третій вид автономних перетворювачів (ІППН) не є цілком самостійним, тому що ІППН можна розглядати як підвид інверторів напруги (однотактні АІН), але в даний час ІППН фактично виділилися в окремий напрямок силової електроніки, що має своєрідні схемні рішення і специфічні методи розрахунку [1].

В даний час автономні інвертори напруги знаходять широке застосування в таких пристроях силової електроніки як джерела живлення з ланкою

підвищеної частоти, агрегати безперебійного електропостачання, перетворювачі частоти для частотно-регульованого електроприводу змінного струму та інші. Застосування сучасних методів формування вихідної напруги (наприклад, широтно- імпульсна чи амплітудно-імпульсна модуляція) дозволяє забезпечити якість вихідної напруги інвертора, що відповідає діючим стандартам, при порівняно невеликих апаратурних витратах.

В наступних розділах будуть розглянуті основи теорії інверторів напруги, а також особливості електромагнітних процесів у найбільш розповсюджених схемах. Також буде вирішено питання побудови візуально-блочної математичної моделі інвертору напруги. Такий підхід дає переваги на рівні усереднених моделей.

Розробив математичні моделі для такого підходу в моделюванні енергетичних пристроїв можна створювати бібліотеки за принципом декомпозиції і вирішити задачу комунікації в науково-технічному співтоваристві. Необхідність такої розробки обумовлена розгалуженою системою перетворювачів, що ускладнює моделювання, а інтенсивність помилок зростає в кілька разів. Одночасно зростає складність налагодження математичної моделі.

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Приблизно половина всієї електроенергії, що виробляється на електростанціях, перетворюється в інший вид електроенергії: електрична енергія постійного струму (для електричного транспорту, електрохімічних установок, електроприводу постійного струму, зварювальних агрегатів, харчування радіоелектронної апаратури, передачі енергії постійним струмом і в цілому ряді інших випадків); електрична енергія змінного струму, але не стандартної частоти (постійної або регульованою) при первинному джерелі змінної напруги (для електроприводу змінного струму, індукційного нагрівання і ін.); електрична енергія змінного струму, постійного струму або імпульсів спеціальної форми при використанні в якості первинного джерела постійної напруги (для енергопостачання рухомих об'єктів, пристроїв гарантованого харчування, рекуперації енергії в мережу змінної напруги та ін.).

Принцип роботи будь-якого статичного перетворювача заснований на періодичному включенні і виключенні електронних ключів (вентилів) в певній послідовності (за заданим алгоритмом). Особливе значення має принцип замикання електронного вентиля, який визначається видом напруги живлення. Процес переходу струму від одного вентиля до іншого називається процесом комутації.

Інверторами напруги називаються автономні перетворювачі енергії постійного струму в енергію змінного струму, що формують у навантаженні криву напруги (звичайно прямокутної чи східчастої форми) [1,2,3,4]. Форма струму в навантаженні в цьому випадку визначається параметрами навантаження. Для інверторів напруги характерно, що як джерело енергії повинно використовуватися "жорстке" джерело напруги, близьке по характеристикам до джерела ЕРС. Особливо це важливо в області високих частот, оскільки, як буде показано нижче, крива вхідного струму інвертора напруги носить розривний характер, точніше, містить ділянки, на яких струм змінюється з дуже великою швидкістю. Практично це приводить до того, що на

вході інвертора напруги необхідно встановлювати ємнісний чи Г-подібний фільтр. У той же час, інвертори напруги, у порівнянні з інверторами струму, мають такі переваги як жорсткість зовнішньої характеристики і кращі масогабаритні показники.

Інвертори напруги, також як і інвертори струму, можуть бути побудовані по кожній з відомих схем випрямлення. Проте, наприклад, однофазна однонапівперіодна схема не має розповсюдження.

Трифазні автономні інвертори напруги (АІН) широко застосовуються в різноманітних перетворювачах електроенергії таких, як перетворювачі частоти для регульованого електроприводу змінного струму, бортові джерела електроживлення, агрегати безперервного живлення та інші. Незважаючи на те, що теоретично трифазний АІН може бути виконаним по будь-якій трифазній схемі випрямлення, на практиці розповсюдження має тільки трифазна мостова схема. Для навантажень, у яких можлива несиметрія струмів у фазах, використовується варіант схеми з нульовим дротом, а для симетричних навантажень (наприклад, асинхронні двигуни) - без нульового дроту.

Практично, необхідними елементами будь-якого АІН є вхідні та вихідні фільтри, параметри яких суттєво залежать від схеми АІН и засобів керування пристрою. Нижче розглянуті електромагнітні процеси у вказаних схемах та приведені основні співвідношення, що необхідні для розрахунку і проектування пристроїв такого типу.

1.1 Трифазний АІН з нульовим проводом

Одним з найпростіших варіантів схем трифазних АІН є інвертор, що складається з трьох однофазних полумостових інверторів (аналогічні, що були розглянуті в попередньому розділі), які керовані із зсувом на 120 градусів. Схема інвертора показана на рисунку 1.1, а розгортки імпульсів управління транзисторами - на рисунку 1.2. На рисунку 1.3 показані розгортки вихідних напруг і струмів в фазах А і В, і лінійної напруги між цими фазами при активно-індуктивному навантаженні. Криві побудовані в припущенні, що позитивна

полухвиля вихідної напруги кожної фази формується при включенні транзистора, що має парний номер. Номери транзисторів відповідають черговості вироблення керуючих імпульсів. Наприклад, позитивна полухвиля напруги фази А формується при включенні транзистора VT4 в момент часу $\vartheta = 0$. Відповідно, негативна полухвиля формується при включенні транзистора VT1 при $\vartheta = \pi$. Амплітуда фазної напруги, яка дорівнює напрузі на верхній ємності фільтра $C_{\Phi 1}$, що становить половину напруги джерела живлення E_d . Струм навантаження фази А замикається через нульовий провід. При наявності нульового проводу, що з'єднує нульову точку зірки навантаження з середньою точкою вхідного фільтра, кожна фаза інвертора працює незалежно один від одного. В принципі, можливо два способи управління транзисторами інвертора: з тривалістю імпульсів 180 градусів, і з тривалістю імпульсів 120 градусів. Оскільки при другому способі управління форма вихідної напруги залежить від параметрів навантаження [3, 4], то в даний час, як правило, використовується лише перший спосіб. При тривалості керуючих імпульсів, яка дорівнює 180 градусів, крива фазної напруги має прямокутну форму з амплітудою, що дорівнює половині напруги в ланці постійного струму. Відповідно, спектр вихідної напруги однієї фази містить всі непарні гармоніки, а діюче значення першої гармоніки вихідної напруги визначається співвідношенням (1.1):

$$U_{2(1)} = 0,45E_d \quad (1.1)$$

Крива лінійної напруги показана на рисунку 1.3.

Амплітуда лінійної напруги дорівнює напрузі E_d , а тривалість імпульсу - 120 градусів. Рівність нулю лінійної напруги відповідає тим моментам, коли фазні напруги рівні. Наприклад, на інтервалі $\frac{2}{3}\pi < \vartheta < \pi$ одночасно включені транзистори VT4 і VT6, отже, потенціали фаз А і В рівні потенціалу верхньої шини моста, а, відповідно, їх різниця потенціалів дорівнює нулю.

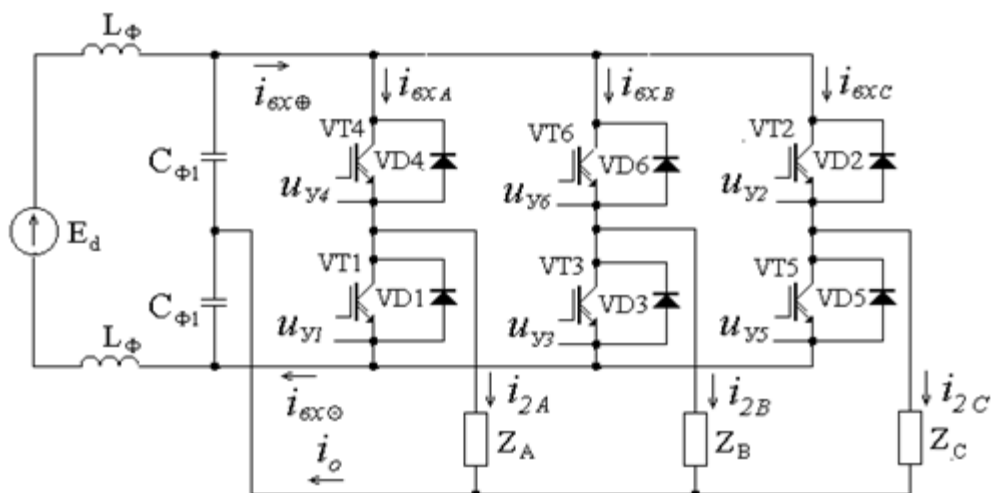


Рисунок 2.1 - Спрощена схема трифазного АІНз нульовим дротом

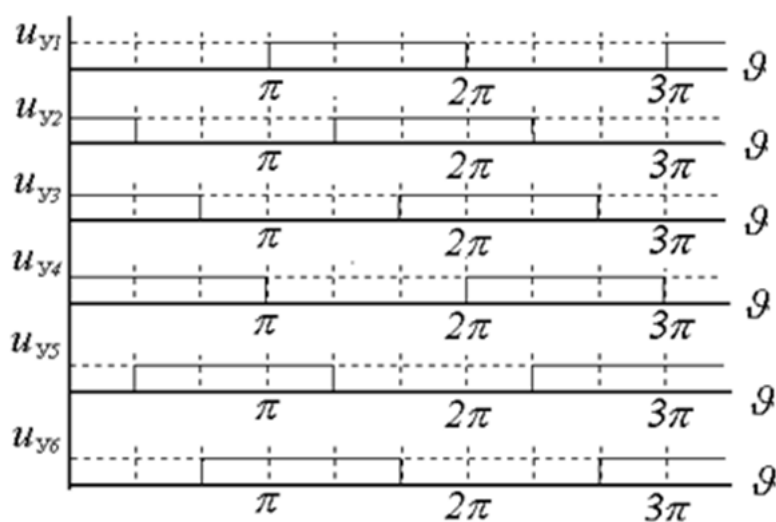


Рисунок 1.2 - Часові діаграми напруги керування для транзисторів трифазного АІН

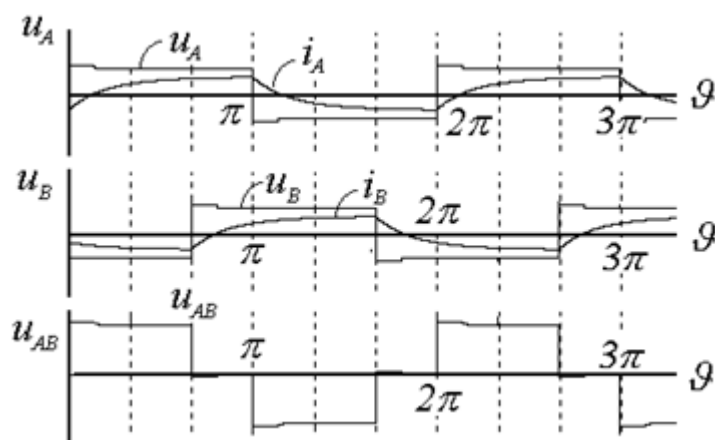


Рисунок 1.3 - Часові діаграми вихідної напруги трифазного АІН

Виходячи з кривої лінійної напруги, неважко визначити його діюче значення:

$$U_{2AB} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} E_d^2 d\vartheta} = E_d \sqrt{\frac{2}{3}} = 0,816 E_d \quad (1.2)$$

При відніманні напруги фаз А і В, перші гармоніки яких зрушені на 120 градусів, відбувається компенсація третьої гармоніки і вищих гармонік з номерами кратними трьом. Відповідно, діюче значення першої гармоніки лінійної напруги більше фазного в $\sqrt{3}$ раз:

$$U_{2AB(1)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_d \cdot \sqrt{3} = 0,78 E_d \quad (1.3)$$

Протягом періоду вихідної напруги відбувається шість перемикань силових транзисторів і, відповідно, є шість станів схеми, які чергуються через 60 градусів. Відповідні інтервали пронумеровані на рисунку 1.4,а. Відповідно до алгоритму формування керуючих імпульсів, показаному на рисунку 1.2, на першому інтервалі включені транзистори VT2, VT3 і VT4. Тобто, включені два транзистора верхньої групи (мають спільні колектори) і лише один транзистор нижньої групи (мають спільні емітери). Отже, до верхньої шини моста підключені дві фази навантаження, а до нижньої тільки одна. Таким чином, від верхньої половини вхідного фільтра споживається струм $2i_2$, а від нижньої - i_2 . Різниця цих струмів замикається через нульовий провід.

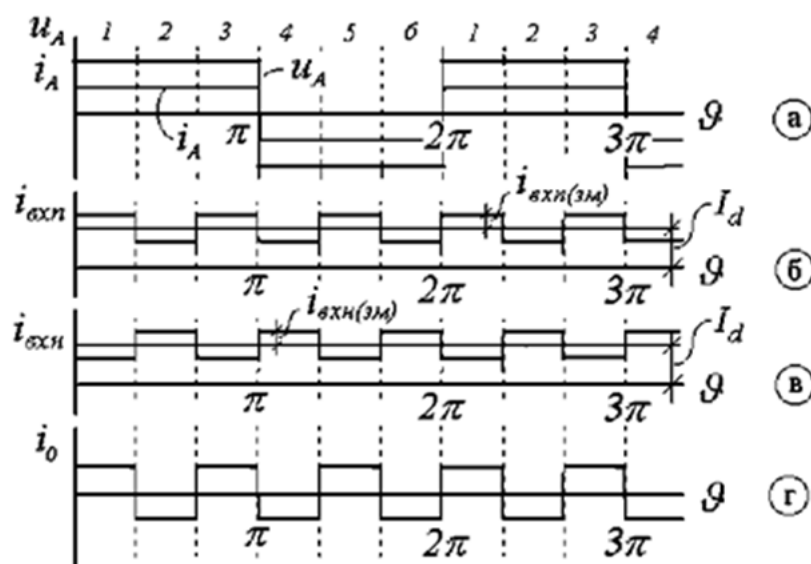


Рисунок 1.4 - Часові діаграми струмів при активному навантаженні

Через 60 градусів вимикається транзистор VT2 і включається транзистор VT5, тепер дві фази навантаження підключені до нижньої шини моста і лише одна до верхньої. Відповідно, струм верхньої половини фільтра зменшується в два рази, а струм нижньої - збільшується. Різниця цих струмів знову ж замикається через нульовий провід. Аналогічна зміна структури схеми відбувається при кожному перемиканні силових транзисторів - шість разів за період вихідної напруги [3].

Таким чином, через нульовий провід тече струм з амплітудою, що дорівнює амплітуді струму фази, але з потрійною частотою. Таку ж частоту має перша гармоніка пульсацій вхідного струму.

Середнє значення вхідного струму при активному навантаженні визначається очевидним співвідношенням:

$$I_{\text{ex}} = \frac{2i_2 + i_2}{2} = \frac{3}{2}i_2 \quad (1.5)$$

Таким чином, амплітуда змінної складової вхідного струму дорівнює половині амплітуди струму навантаження i_1 , відповідно, амплітуда першої гармоніки пульсацій вхідного струму:

$$I_{\text{ex}(1)m} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{i_2}{2} = \frac{2}{\pi}i_2 \quad (1.6)$$

причому частота першої гармоніки пульсацій вхідного струму дорівнює потроєній частоті вихідної напруги.

На рисунку 1.5 показані криві струмів в схемі при активно-індуктивному характері навантаження. Оскільки в цьому випадку крива струму навантаження складається з відрізків експоненти, відповідно змінився вигляд кривих вхідного струму і струму нульового проводу. У той же час, неважко бачити, що миттєві значення вхідного струму на парних і непарних інтервалах відрізняються, що призводить до появи в цій кривій складової потрійної частоти.

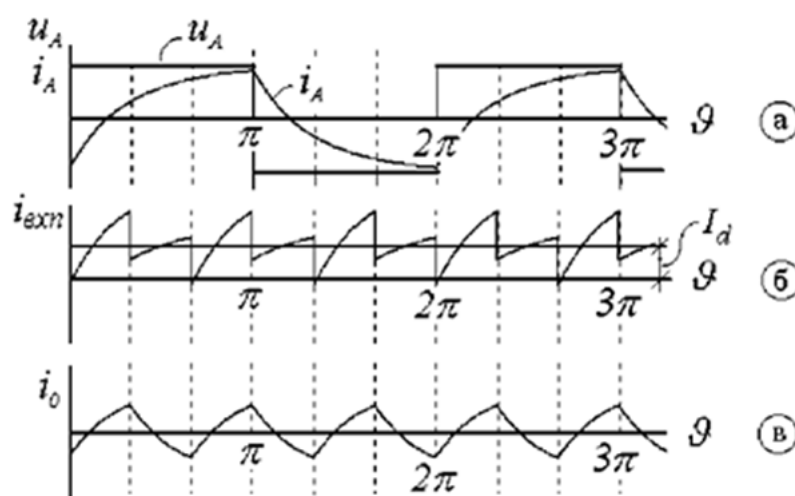


Рисунок 1.5 - Часові діаграми струмів при активно -індуктивному навантаженні

Спектральний склад вхідного струму інвертора можна визначити, якщо скласти спектри вхідних струмів кожної фазної ячейки, оскільки, відповідно до першого закону Кірхгофа, можна записати:

$$i_{\text{вх}+} = i_{\text{вх}A} + i_{\text{вх}B} + i_{\text{вх}C} \quad (1.7)$$

Спектр вхідного струму фазної ячейки можна розрахувати методом комутаційних функцій. Дійсно, вважаючи, що крива вихідної напруги має прямокутну форму, можна уявити напругу фази A як результат множення ЕРС джерела живлення на комутаційну функцію:

$$u_A = \frac{E_d}{2} \cdot F_{kA} = \frac{E_d}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{k} \sin k\vartheta \quad (1.8)$$

де F_{kA} визначена по (1.2) і (1.3).

В цьому випадку, комплексне опір навантаження для k -тої гармоніки дорівнює:

$$z_{(k)} = R + jk\omega L \quad (1.9)$$

Отже, спектр струму навантаження фази А описується наступним тригонометричним рядом:

$$i_A = \sum_{k=1,3,5}^{k=\infty} I_{(k)\max} \sin(k\vartheta - \varphi_{(k)}) \quad (1.10)$$

$$\text{где } I_{(k)\max} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{E_d}{2k\sqrt{R^2 + (k\omega L)^2}} = \frac{2E_d}{\pi R} \cdot \frac{1}{k\sqrt{1 + k^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{(1)}}}; \quad (1.11)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{(k)} = \frac{k\omega L}{R} = k \operatorname{tg} \varphi_{(1)} \quad (1.12)$$

Величини $I_{(k)\max}$ і $\varphi_{(k)}$, були використані в рівнянні (1.10) - амплітуда і фаза k -тої гармоніки струму навантаження, відповідно.

Як впливає з принципу дії полумостової схеми АІН, струм верхньої половини схеми існує тільки на інтервалі від нуля до π (див. рисунок 1.4,д). Отже, для розрахунку кривої вхідного струму фазної ячейки можна використовувати комутаційну функцію такого вигляду:

$$F'_k = \frac{1 + F_{kA}}{2}. \quad (1.13)$$

Підставивши (1.1) в (1.13) легко переконатися, що:

$$F'_k = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < \vartheta < \pi \\ 0 & \text{при } \pi < \vartheta < 2\pi \end{cases} \quad (1.14)$$

Тоді, використовуючи (1.13) можна записати:

$$i_{\text{exA}} = i_A \cdot F'_{kA} = i_A \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} F_{kA} \right) \quad (2.15)$$

Після підстановки (2.10) і (1.3) в (1.15) отримаємо:

$$i_{exA} = \left[\sum_{k=1,3..}^{k=\infty} I_{(k)\max} \sin(k\vartheta - \varphi_{(k)}) \right] \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{i=1,3..}^{i=\infty} \frac{1}{i} \sin i\vartheta \right) \quad (1.16)$$

Індекси членів ряду комутаційної функції в (1.16) замінені на i , оскільки множення рядів має виконуватися почленно. Після розкриття дужок у виразі для i_{exA} можна виділити дві складові, одна з яких містить непарні гармоніки, кратні частоті вихідної напруги, що утворюються після перемноження ряду для вихідного струму на $1/2$, а друга складова містить парні гармоніки, що утворюються після перемноження рядів.

Перша складова дорівнює:

$$i'_{exA} = \frac{1}{2} \sum_{k=1,3..}^{k=\infty} I_{(k)\max} \sin(k\vartheta - \varphi_{(k)}) \quad (1.17)$$

Як відомо [5]:

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad (1.18)$$

Тому друга складова являє собою нескінченну матрицю, що містить косинусні гармоніки сумарних і різницевих частот. Результати перемноження перших трьох членів кожного ряду показані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Матриця результатів перемноження перших трьох членів рядів.

$i \backslash k$	1	3	5
1	$\frac{1}{\pi} I_{(1)\max} \cos \varphi_{(1)};$ $-\frac{I_{(1)m}}{\pi} \cos(2\vartheta - \varphi_{(1)})$	$\frac{I_{(3)m}}{\pi} \cos(2\vartheta - \varphi_{(3)});$ $-\frac{I_{(3)m}}{\pi} \cos(4\vartheta - \varphi_{(3)})$	$\frac{I_{(5)m}}{\pi} \cos(4\vartheta - \varphi_{(5)});$ $-\frac{I_{(5)m}}{\pi} \cos(6\vartheta - \varphi_{(5)})$

3	$\frac{I_{(1)m}}{3\pi} \cos(2\vartheta + \varphi_{(1)});$ $-\frac{I_{(1)m}}{3\pi} \cos(4\vartheta - \varphi_{(1)})$	$\frac{I_{(3)m}}{3 \cdot \pi} \cos \varphi_{(3)};$ $-\frac{I_{(3)m}}{3 \cdot \pi} \cos(6\vartheta - \varphi_{(3)})$	$\frac{I_{(5)m}}{3 \cdot \pi} \cos(2\vartheta - \varphi_{(5)});$ $-\frac{I_{(5)m}}{3 \cdot \pi} \cos(8\vartheta - \varphi_{(5)})$
5	$\frac{I_{(1)m}}{5\pi} \cos(4\vartheta + \varphi_{(1)});$ $-\frac{I_{(1)m}}{5\pi} \cos(6\vartheta - \varphi_{(1)})$	$\frac{I_{(3)m}}{5 \cdot \pi} \cos(2\vartheta + \varphi_{(3)});$ $-\frac{I_{(3)m}}{5 \cdot \pi} \cos(8\vartheta - \varphi_{(3)})$	$\frac{I_{(5)m}}{5 \cdot \pi} \cos \varphi_{(5)};$ $-\frac{I_{(5)m}}{5 \cdot \pi} \cos(10\vartheta - \varphi_{(5)})$

Верхні рядки кожної ячейки матриці відповідають різницеvim частотам, а нижні - сумарним.

Зокрема, різницеві частоти для $k = i$ дорівнюють нулю, а відповідні коефіцієнти, що розміщені на головній діагоналі матриці, формують постійну складову вхідного струму. Вибірка коефіцієнтів для складової "нульової частоти" дозволяє записати співвідношення для постійної складової вхідного струму у вигляді наступного ряду:

$$i''_{\text{ex}(0)} = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1,3,5}^{k=\infty} \frac{1}{k} I_{(k)m} \cos \varphi_{(k)}. \quad (1.19)$$

Аналогічно можна отримати ряд для старшої гармоніки пульсацій вхідного струму, що має подвійну частоту. Ця гармоніка формується при підсумовуванні частот перших членів ряду ($k = i = 1$) і відніманні частот наступних членів ($|k - i| = 2$).

Підставивши (1.11) в (1.19) і виразивши косинус через тангенс, матимемо:

$$i''_{\text{ex}(0)} = \frac{2E_d}{\pi^2 R} \sum_{k=1,3,5}^{k=\infty} \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{1 + k^2 \text{tg}^2 \varphi_{(1)}}; \quad (1.20)$$

Цікаво відзначити, що при чисто активному навантаженні ($\varphi_{(1)} = 0$), коли другий співмножник під знаком суми дорівнює одиниці, решта ряду сходиться

до величини $\frac{\pi^2}{8}$. Тоді рівняння (1.20) дає величину середнього значення вхідного струму полумостової схеми АІН при чисто активному навантаженні:

$$i_{ex}'' = \frac{E_d}{4R} = \frac{1}{2} I_R \quad (1.21)$$

Аналіз інших коефіцієнтів нескінченної матриці показує, що суми коефіцієнтів при косинусів однакових частот при активному навантаженні строго дорівнюють нулю, а при активно-індуктивному навантаженні ними можна знехтувати. Таким чином, повний вираз для кривої вхідного струму однієї фази можна представити у вигляді суми постійної складової по (1.20) і змінної складової по (1.17). Очевидно, що гармонійний склад вхідних струмів двох інших фаз відрізняється від отриманого вище тільки відповідним зрушенням фази. Отже, при підсумовуванні вхідних струмів трьох однофазних полумостових ячеек, будуть складатися постійні складові і складові гармонік потрібної частоти. Що ж стосується першої гармоніки вхідного струму і гармонік, що не кратні трьом, то при симетричному навантаженні вони утворюють трифазну систему струмів, сума яких дорівнює нулю.

Все сказане справедливо за умови рівності фазних струмів. Якщо ж навантаження по фазах не рівні, то результуючий спектр вхідного струму спотворюється. Зокрема, в цьому випадку в кривій вхідного струму з'являється складова, що має частоту вихідної напруги.

Таким чином, середнє значення вхідного струму (при симетричному навантаженні) визначається рівнянням:

$$I_{ex+} = \frac{6E_d}{\pi^2 R} \sum_{k=1,3,5}^{k=\infty} \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{1 + k^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{(1)}} \quad (1.22)$$

Відповідно, спектральний склад змінної складової цього струму буде:

$$i_{ex+(nep)} = \frac{3E_d}{\pi R} \sum_{k=1,3,5}^{k=\infty} \frac{1}{3k} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (3k)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{(1)}}} \sin(3k\vartheta - \varphi_{(3k)}). \quad (1.23)$$

Аналіз отриманих співвідношень показує, що коефіцієнти, що знаходяться під знаком суми, швидко зменшуються з ростом k . Тому для

практичних розрахунків можна використовувати лише перші члени ряду, що істотно спрощує вигляд рівнянь. Вважаючи $k=1$ і підсумовуючи (1.22) і (1.23) отримаємо наближене вираження для вхідного струму трифазного АІН:

$$i_{\text{ex}+} = \frac{6E_d}{\pi^2 R} \cos^2 \varphi_{(1)} + \frac{E_d}{\pi R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+9\text{tg}^2 \varphi_{(1)}}} \cdot \sin(3\vartheta - \varphi_{(3)}) \quad (1.24)$$

де $\varphi_{(3)} = \text{arctg}\left(\frac{3\omega L}{R}\right)$

Неважко переконатися, що співвідношення для амплітуди першої гармоніки пульсацій вхідного струму по (1.24) при $\varphi_{(1)} = 0$ (тобто при чисто активному навантаженні), збігається з (1.6), отриманим із загальних міркувань.

Рівняння для струму в нульовому проводі можна отримати, якщо скласти змінні складові вхідного струму позитивної та негативної шин транзисторного моста. Дійсно, ємності вхідного фільтра не пропускають постійні складові вхідних струмів, які замикаються через джерело живлення. З іншого боку, величини конденсаторів фільтра повинні бути досить великі і, отже, змінні складові вхідних струмів замикаються через ємності фільтра. Спектри вхідних струмів верхньої і нижньої шин моста однакові, але перша гармоніка змінної складової вхідного струму нижньої шини зрушена по фазі по відношенню до першої гармоніки змінної складової вхідного струму верхньої шини на 180 ел. градусів.

Таким чином, отримаємо:

$$i_0 = i_{\text{ex}+(nep)} + i_{\text{ex}-(nep)} = \frac{2E_d}{\pi R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+9\text{tg}^2 \varphi_{(1)}}} \cdot \sin(3\vartheta - \varphi_{(3)}) \quad (1.25)$$

Досить часто при розрахунку спектра вхідного струму АІН робиться припущення про синусоїдальність кривої струму в навантаженні. Формування кривих вхідних струмів трифазного АІН, що складається з трьох полумостових інверторів з нульовим проводом показано на рисунку 2.6. Розрахунок спектра вхідного струму можна виконати таким же чином, як і при активно-

індуктивному навантаженні, якщо в (2.10) покласти $k = 1$, тобто всіма вищими гармоніками струму навантаження знехтувати.

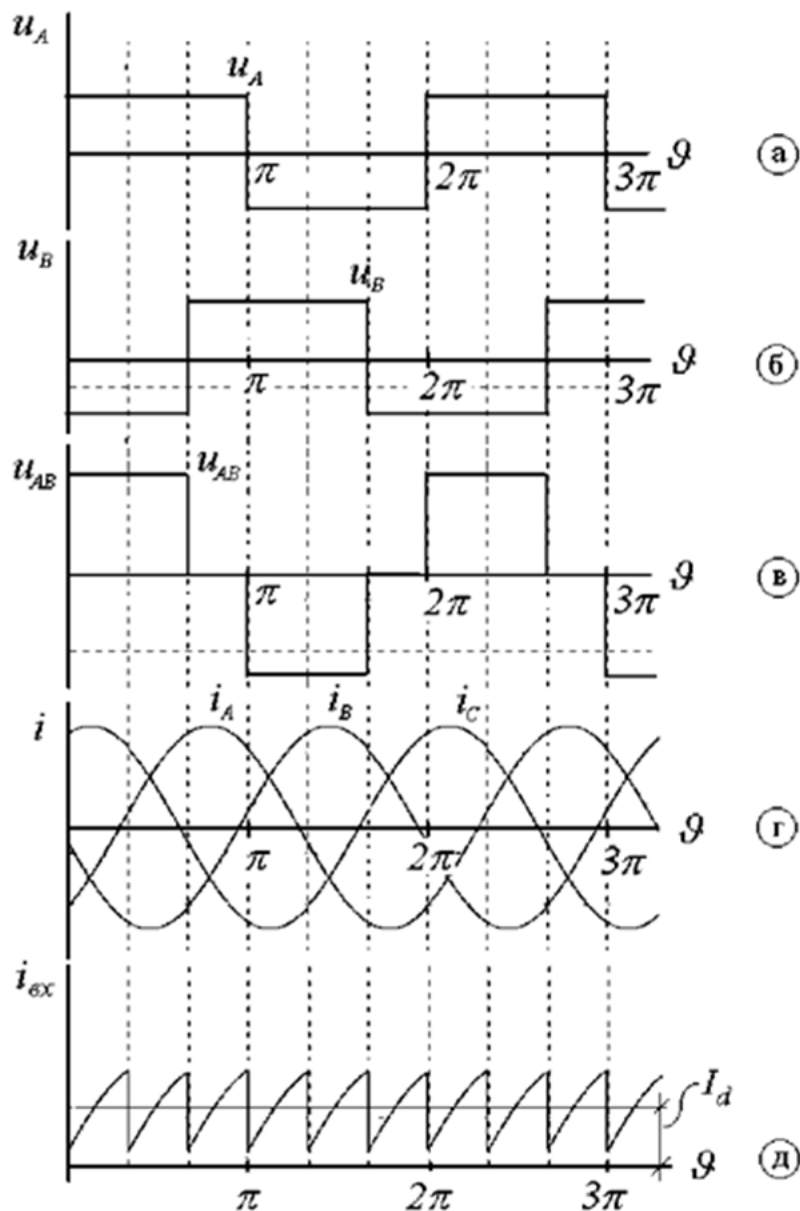


Рисунок 1.6 - Формування кривої вхідного струму при синусоїдальних струмах у фазах навантаження

Тоді рівняння для вхідного струму однієї фазної ячейки записати в наступному вигляді:

$$i_{вхA} = \frac{1}{2} I_{(1)m} \sin(\vartheta - \varphi_{(1)}) + \frac{1}{\pi} I_{(1)m} \cos \varphi_{(1)} -$$

$$-\frac{1}{\pi} I_{(1)m} \cos \varphi_{(1)} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2}{4n^2 - 1} \sqrt{1 + 4n^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{(1)}} \cdot \sin(2n \vartheta + \psi_{(n)}), \quad (1.26)$$

де $\psi_{(n)} = \operatorname{arctg}(2n \cdot \operatorname{tg} \varphi_{(1)})$;

$n = 1, 2, 3, \dots$ - натуральний ряд чисел.

При підсумовуванні вхідних струмів трьох фазних ячеек (з урахуванням фазового зсуву) постійні складові складаються, а в змінній складовій зберігаються лише гармоніки з номерами кратними трьом. Тоді, середнє значення вхідного струму АІН дорівнює:

$$I_d = 3 \cdot \frac{1}{\pi} I_{(1)m} \cos \varphi_{(1)}. \quad (1.27)$$

Відповідно, амплітуда першої гармоніки пульсацій вхідного струму, що має 6-ти кратну частоту ($n = 3$), визначається таким рівнянням [4]:

$$I_{ex(1)m} = \frac{2I_d}{6^2 - 1} \sqrt{1 + 6^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{(1)}} \quad (1.28)$$

Неважко побачити, що при симетричному навантаженні струм нульового проводу дорівнює нулю, (відповідно до вихідним припущенням про синусоїдальності фазних струмів) оскільки криві вхідного струму на парних і непарних інтервалах однакові.

Таким чином, припущення про синусоїдальності фазних струмів призводить до якісних змін спектрального складу вхідного струму інвертора: зникає гармоніка потрійної частоти в змінній складовій.

Крім того, зникає струм в нульовому проводі. Беручи до уваги, що при активно-індуктивному навантаженні трифазного АІН, в реальній схемі струм в нульовому проводі існує при будь-яких співвідношеннях параметрів навантаження, можна зробити висновок про те, що допущення про

синусоїдальність струму в навантаженні є занадто грубим і призводить до якісних погрішностей в результатах аналізу.

1.2 Трифазна мостова схема

Для навантажень з однаковими фазними струмами, наприклад, для трифазних двигунів змінного струму, широко використовується трифазна мостова схема АІН без нульового проводу. Спрощена схема інвертора показана на рисунку 1.7. Алгоритм управління силовими ключами в даній схемі такий же, як і в схемі з нульовим проводом. На відміну від попереднього варіанту схеми, в якій фазні напруги і струми формуються незалежно один від одного, в трифазній мостовій схемі без нульового проводу напруги і струми кожної фази залежать один від одного. Як видно з кривих, показаних на рисунку 1.8 (а) крива лінійної напруги має таку ж форму, як і при наявності нульового проводу, оскільки різниця потенціалів між фазними зажимами визначається тільки черговістю включення силових ключів. Крива фазної напруги (рисунок 1.8 (б)) має ступінчасту форму з амплітудою рівній $2/3 E_d$ і з "полочкою" дорівнює $1/3 E_d$, причому тривалість кожної сходинки дорівнює 60 електричних градусів. Як вже було сказано вище, протягом періоду вихідної напруги відбувається шість перемикань силових транзисторів і, відповідно, є шість станів схеми, які чергуються через 60 градусів. Відповідні інтервали пронумеровані на рисунку 1.8 (а). Відповідно до алгоритму формування керуючих імпульсів, показаному на рисунку 1.2, на першому інтервалі включені транзистори VT2, VT3 і VT4. Відповідна еквівалентна схема включення опорів навантаження представлена на рисунку 1.9 (а). Таким чином, на першому інтервалі опору фаз А і С включені паралельно між собою, і послідовно з ними включений опір фази В. Неважко показати, що за умови рівності опорів в фазах навантаження в загальному випадку - активних і реактивних, відповідно), до опорам фаз А і С буде прикладена $1/3$ напруги джерела живлення, а до опору фази В - $2/3$ [3].

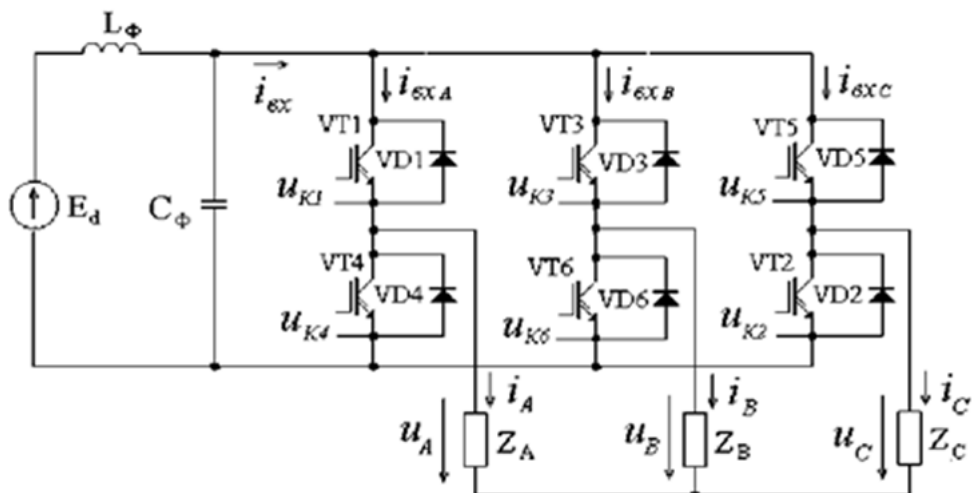


Рисунок 1.7 - Спрощена схема трифазного АІН без нульового дроту

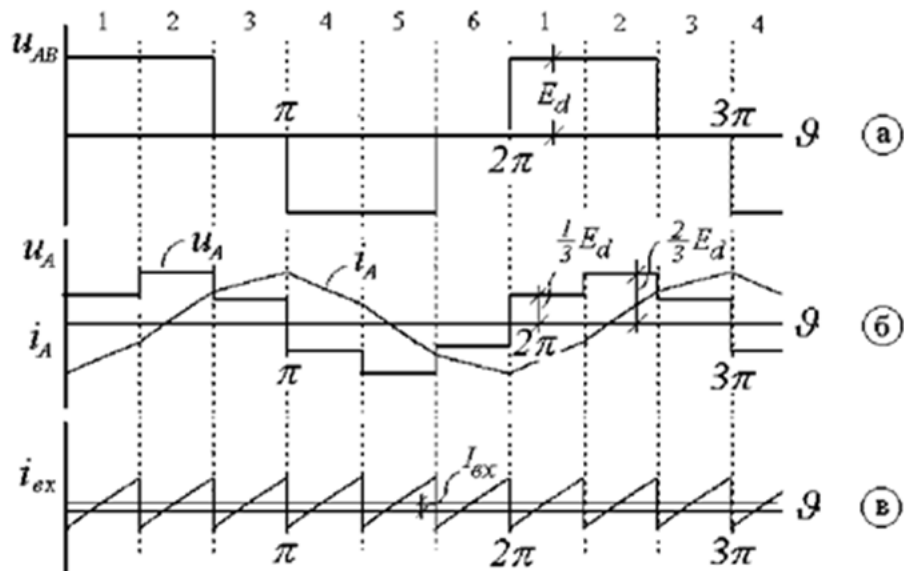


Рисунок 1.8 - Часові діаграми процесів у схемі

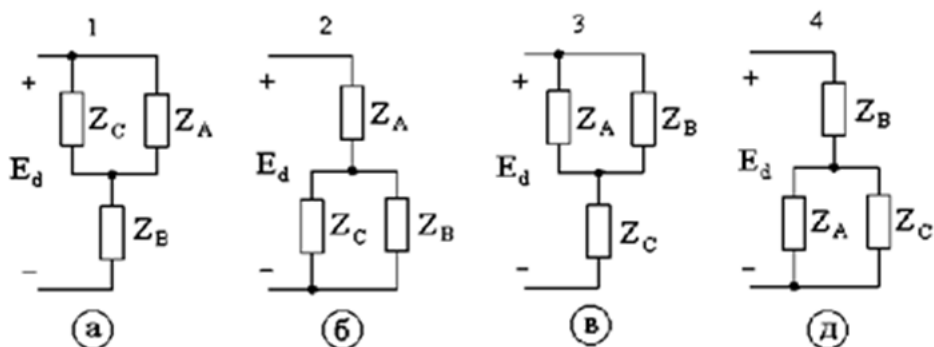


Рисунок 1.9 - Еквівалентні схеми включення резисторів навантаження

Перший інтервал закінчується при виключенні транзистора VT2. При активно-індуктивному навантаженні зміни в кривих фазних напруг відбуваються до того, як включається наступний силовий транзистор VT5, так як після виключення транзистора VT2 струм, запасені в індуктивності фази С обірватися не може і, відповідно, замикається через діод VD5. При цьому вивід фази С відключається від позитивного затискача джерела живлення і підключається до негативного затискача. Відповідна еквівалентна схема показана на рисунку 1.9 (б). В результаті зміни схеми включення опорів навантаження відбувається зміна розподілу напруги між фазами: на другому інтервалі до фази А докладено $2/3 E_d$, а до фаз В і С - $1/3 E_d$.

Таким чином, формування кривої фазної напруги відбувається в момент включення зворотнього діода і, на перший погляд, незалежно від моменту включення наступного силового транзистора. Однак, слід зазначити, що для збереження нормальної форми фазної напруги необхідно, щоб наступний силовий транзистор був включений до моменту виключення зворотнього діода (інакше фаза повністю відключається від джерела). Оскільки цей момент залежить від співвідношення параметрів навантаження, то доцільно величину затримки між моментами виключення транзистора, що виходить з роботи і моментів включення наступного, зробити якомога менше. Мінімальна величина цієї затримки при використанні біполярних транзисторів визначалася часом розсмоктування носіїв (до 5-8 мкс в високовольтних транзисторах), а при використанні сучасних приладів (IGBT або MOSFET) визначається величиною часу вимикання ключа (близько 0,1 - 0,5 мкс).

Подальший алгоритм формування кривих фазних напруг ілюстрований на рисунку 1.9 (в, д): кожні 60 електричних градусів відбувається перемикання одного з фазних опорів від одного затиску джерела живлення до іншого. При цьому забезпечується відповідна черговість проходження фазних напруг.

На рисунку 1.8 (в) показана крива вхідного струму інвертора. Оскільки нульовий провід відсутній, то миттєві значення струму позитивної шини моста і

негативної шини моста рівні і, отже, криві вхідного струму на парних і непарних інтервалах однакові.

Таким чином, при симетричному активно-індуктивному навантаженні усунення нульового проводу дає можливість отримати наступні переваги в порівнянні зі схемою з нульовим проводом:

- спрощується схема вхідного фільтра: необхідний лише один конденсатор, а не два;
- поліпшується спектральний склад кривої фазної напруги: як відомо [2], така ступінчаста крива не містить гармонік кратних трьом;
- поліпшується спектральний склад вхідного струму: перша гармоніка пульсацій вхідного струму має шестикратну частоту.

Недоліком схеми є те, що при порушенні симетрії в навантаженні (наприклад, при перевантаженні або короткому замиканні в одній фазі) відбувається спотворення кривих вихідної напруги у всіх трьох фазах.

Основні розрахункові співвідношення для даної схеми зручно отримати, якщо знехтувати вищими гармоніками вихідної напруги та зробити припущення про синусоїдальність фазних струмів. Крива лінійної напруги на виході інвертора, що складається з імпульсів напруги, тривалістю 120 електричних градусів, з амплітудою рівній E_d , описується наступним рівнянням Фур'є:

$$u_{AB} = \frac{4}{\pi} E_d \sum_{k=1,3,5}^{k=\infty} \frac{1}{k} \cos \frac{k\pi}{6} \sin k\vartheta. \quad (1.29)$$

Беручи $k = 1$, з (1.29) знаходимо амплітуду першої гармоніки лінійної напруги на виході інвертора:

$$U_{AB(1)m} = \frac{4}{\pi} E_d \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,103 E_d. \quad (1.30)$$

Відповідно, діюче значення першої гармоніки лінійної напруги:

$$U_{AB(1)} = \frac{U_{AB(1)m}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} E_d = 0,78 E_d \quad (1.31)$$

Звідси неважко визначити діюче значення першої гармоніки фазної напруги на виході АІН:

$$U_{2(1)} = \frac{U_{AB(1)}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_d = 0,45 E_d \quad (1.32)$$

При активно-індуктивному характері навантаж повний опір навантаження однієї фази для першої гармоніки вихідного напруги дорівнює:

$$Z_{(1)} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (1.33)$$

Відповідно, перша гармоніка фазного струму описується рівнянням:

$$i_{2(1)} = \frac{U_{2(1)m}}{Z_{(1)}} \cdot \sin(\theta - \varphi_{(1)}) = I_{2(1)m} \sin(\vartheta - \varphi_{(1)}) \quad (1.34)$$

де $\varphi_{(1)} = \arctg \frac{\omega L}{R}$ кут зсуву між першими гармоніками струму і напруги навантаження.

Далі будемо опускати номер гармоніки: $\varphi = \varphi_{(1)}$ и $I_{2m} = I_{2(1)m}$.

Амплітуда колекторного струму (без урахування процесів в пристрої формування траєкторії перемикавання), а також амплітуда анодного струму зворотнього діода, в гіршому випадку дорівнює амплітуді фазного струму:

$$I_{km} = I_{am} = I_{2m} \quad (1.35)$$

Амплітуда напруги між колектором і емітером силового транзистора і, відповідно, анодом і катодом зворотнього діода дорівнює напрузі джерела живлення:

$$U_{kem} = U_{bm} = E_d \quad (1.36)$$

Середнє значення колекторного струму транзистора можна обчислити так само, як і для однофазного інвертора:

$$I_k = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\pi} I_{2m} \sin(\vartheta - \varphi) d\vartheta = \frac{I_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \varphi) \quad (1.37)$$

Аналогічно можна визначити і середнє значення анодного струму зворотнього діода:

$$I_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi} I_{2m} \sin(\vartheta - \varphi) d\vartheta = \frac{I_{2m}}{2\pi} (\cos \varphi - 1) \quad (1.38)$$

Для розрахунку втрат від прямого струму в діодах, транзисторах типу IGBT і MOSFET бажано знати діючі значення колекторного або анодного струму. Чинне значення струму колектора можна обчислити за визначенням:

$$I_{k\varphi} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\pi} I_{2m}^2 \sin^2(\vartheta - \varphi) d\vartheta} = I_{2m} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right)} \quad (1.39)$$

Аналогічно для діючого значення анодного струму зворотнього діода будемо мати:

$$I_{a\varphi} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi} I_{2m}^2 \sin^2(\vartheta - \varphi) d\vartheta} = I_{2m} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \left(\varphi + \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right)} \quad (1.40)$$

Сума виразів (1.37) і (1.38) дає середнє значення струму однієї вертикалі моста, а якщо підсумувати струми трьох вертикалей, то можна отримати середнє значення вхідного струму інвертора:

$$I_d = 3(I_k + I_a) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{2(1)} \cos \varphi_{(1)} = 1,35 I_{2(1)} \cos \varphi_{(1)} \quad (1.41)$$

Неважко переконатися, що вираз (1.41) можна отримати виходячи з умови рівності активної потужності на вході і виході інвертора.

Амплітуда першої гармоніки пульсацій вхідного струму інвертора, необхідна для розрахунку параметрів вхідного фільтра, може бути обчислена по (1.28).

1.3 Вибір програмного продукту для проведення моделювання

Для моделювання та розробки математичних моделей частіше використовують математичні процесори та системи автоматизованого інжинірингу (Computer Algebra System (CAS) та Computer Aided Engineering (CAE) відповідно).

На даний момент існує багато програм рівня CAE, які дозволяють, зокрема, моделювати (modeling & simulation) динамічні системи різної природи

(біологічні, економічні, соціальні, технічні), причому деякі є вузькоспеціалізованими, а інші – більш універсальними: Vensim, IThink, Dynamo, Stella, Powersim, MedModel, Arena, GPSS, Stratum, Scilab, MATLAB\Simulink, Simscape, MapleSim, Dynast, Multisim, K2.SimKernel, Jigrein, EASY5, AMESim, Dymola, PSIM, SamSim, SimApp, SimulationX, Simplorer, VisSim, SystemModeler, 20-sim, ПК MBTU та інші.

Оскільки динамічні системи можуть бути представлені безпосередньо диференціальними рівняннями, то для прогнозування їх поведінки у часі також можуть бути використані математичні пакети, CAS, які можуть розв'язувати диференціальні рівняння (чисельно чи у символічній формі): Maple, MATLAB, Mathcad, Mathematica, Maxima, SymPy, O-Matrix, SciPy, Octave, NumPy, Python(x,y), MuPAD, Sage та інші.

1.3.1 SamSim

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

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

- експорт результатів розрахунку в MS Excel;
- виведення на друк схеми моделі та її параметрів, результатів розрахунку.

Програма має всього одну редакцію, яку можна скачати з сайтів автора: samsim.fromru.com, samsim2002.chat.ru, samsim2002.narod.ru. Не потребує встановлення, працює з поточного каталогу. Є файл допомоги і приклади схем. Розроблена в 2002 році, поширюється вільно [5].

Програма має три алгоритми інтегрування (розв'язувача): 1-го порядку точності; 2-го порядку точності; 4-го порядку точності. Тобто, передбачається використання методів Ейлера і Рунге-Кутти. SamSim не має засобів автоматичної структурної або параметричної оптимізації моделі.

Програма проста, наочна, може бути використана для попереднього моделювання САУ, відпрацювання та дослідження чисельних методів розрахунку. Дозволяє представляти модель системи тільки як блок-схему, типові ланки САУ (лінійні) задаються через передаточну функцію (ПФ), в якій можна редагувати коефіцієнти чисельника і знаменника. SamSim може будувати АЧХ, ФЧХ, АФЧХ і ЧХ в логарифмічному масштабі, також може здійснювати моделювання в часовій області.

Однак, є певні недоліки, наприклад, відсутні можливості для розрахунку нулів і полюсів ПФ моделі. Моделювання (simulation) у часовій і частотній областях неможливо без зміни моделі: для отримання частотних характеристик необхідно в якості джерела сигналу ставити генератор качаючої (змінної) частоти ГКЧ. Не має автоматичних засобів визначення показників стійкості та якості САУ[22].

1.3.2 SimApp

SimApp це програма моделювання поведінки динамічних систем в часовій та частотній областях. Можливе моделювання (modeling & simulation) безперервних і дискретних систем. Найкраще підходить для дослідження систем автоматичного управління. Графічний, блочно-орієнтований інтерфейс з

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

Крім того, програма має докладну довідку з функцій та стандартних блоків. SimApp версії 2.6 існує в чотирьох різних редакціях, які відрізняються з точки зору максимального розміру системи (кількість блоків у проекті), функцій і вартості покупки: Workstation (UAH 3,072.84 / EUR 290.00), Light (UAH 1,271.52 / EUR 120.00), Student (UAH 529.80 / EUR 50.00) та Server Edition. Остання має чотири типи ліцензій, їх ціни відрізняються. Пробна версія SimApp 2.6 (Workstation edition 30-day Free Trial) дозволяє розташовувати у проекті всього лише 10 блоків [6].

Перелік доступних алгоритмів інтегрування в SimApp 2.6:

- Euler (Ейлера);
- Euler-Cauchy (метод Ейлера-Коші для неоднорідних ODE);
- Heun predictor-corrector method (багатокроковий метод прогнозу-корекції за схемою Хойна, з предиктором Ейлера та корекцією методом трапецій);
- Runge-Kutta order 3 (метод Рунге-Кутти третього порядку);
- Runge-Kutta order 4 (як попередній, тільки четвертого порядку точності).

SimApp не має структурної чи програмної оптимізації. Хоча у довідкових додатках до програми і викладається дві методики Зіглера-Нікольса (Ziegler-Nichols) для автоматизованого (табличний розрахунок у Microsoft Excel) тюнінгу ПІД регуляторів, але відсутність параметричної оптимізації робить її

неконкурентоспроможною у випадку, якщо потрібен буде автоматичний пошук коефіцієнтів для створення оптимального регулятора. Також SimApp не може моделювати (simulate) у часовій області алгебраїчні петлі (algebraic loops) без встановлення у коло зворотного зв'язку ланки затримки чи аперіодичної ланки (бо вихідна величина безпосередньо залежить від вхідної та вихідної величини), тобто процес подолання проблеми алгебраїчних петель у кращому випадку автоматизований, але не автоматичний у цій програмі [23].

1.3.3 Wolfram SystemModeler

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

Серед функціональних можливостей Wolfram SystemModeler можна відзначити:

- використання за основу непатентованої, об'єктно-орієнтованої мови Modelica, що спирається на рівняння;
- графічний інтерфейс для drag-and-drop моделювання;
- текстовий інтерфейс для моделювання на мові Modelica за допомогою рівнянь;
- некаузальне (компонентно-орієнтоване) і каузальне (блочно-орієнтоване) моделювання;

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

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

SystemModeler має наступні солвери (solvers) або вирішувачі (розв'язувачі):

- DASSL (метод зі змінними шагом та порядком, що використовує формулу зворотного диференціювання).
- CVODES (як і попередній, але ще підтримує передній аналіз чутливості);
- Explicit Euler (явний метод Ейлера);
- Heun's method (алгоритм Хойна);
- Runge-Kutta 4 (метод Рунге-Кутти 4-го порядку).

Три останніх метода мають постійний розмір (довжину) кроку та рекомендуються до використання при симуляції в реальному часі.

SystemModeler не має модулів оптимізації, оскільки є у деякому сенсі дочірньою програмою, тому для виконання параметричної оптимізації треба мати батьківську програму Wolfram Mathematica, яка купується за окремі кошти. Model Center та Simulation Center рознесені як окремі програми та мають різні виконавчі файли .exe, що збільшує час переходу від однієї до іншої та незручні інструменти і підхід (спосіб) до моделювання (modeling), тобто створення

моделі. Також програма не має інтерактивної довідкової системи та передумованих можливостей для відображення та аналізу частотних характеристик (АЧХ, ФЧХ, різні годографи), що є важливим аспектом при дослідженні САУ.

1.3.4 MATLAB / Simulink та Simscape

Система математичного моделювання MATLAB / Simulink (компанії MathWorks) в даний час є одним з найбільш популярних інструментів чисельних розрахунків і застосовується в різних областях знань. Головна особливість середовища MATLAB – ретельна опрацьованість і налагодженість всього багатого арсеналу засобів і методів. Можливості MATLAB перекривають більшу частину потреб розробників систем управління в різних областях техніки. Широкий набір різних чисельних методів у поєднанні з потужними засобами графічної візуалізації робить MATLAB універсальним інструментом інженерних розрахунків і наукових досліджень. Серйозними перевагами середовища MATLAB є її відкритість і розширюваність. Більшість команд і функцій системи реалізовані у вигляді текстових m-файлів (файлів з розширенням .m) і файлів на мові Сі, причому всі файли доступні для модифікації. Це дозволяє користувачеві створювати не тільки окремі файли, але і цілі бібліотеки файлів, формуючи, таким чином, власне предметно-орієнтоване середовище моделювання [7].

Найважливішою складовою середовища MATLAB є пакет структурного моделювання динамічних систем Simulink. Розробку цього пакету можна розглядати як принципову модернізацію середовища MATLAB, в результаті якої вона придбала всі риси сучасної САЕ – компонентне моделювання, графічна форма завдання інформації про об'єкт і т.інш. Simulink настільки органічно інтегрований з системою MATLAB, що, розглядаючи сучасні засоби дослідження технічних систем, логічно говорити про середовище візуального

компонентного моделювання MATLAB / Simulink. На базі пакету Simulink розроблені додаткові бібліотеки блоків для різних областей застосування (наприклад, Power System Blockset – моделювання електротехнічних пристроїв, Digital Signal Processing Blockset – набір блоків для розробки цифрових пристроїв, Control System Toolbox – пакет для розробки систем управління і т.д.). Можна очікувати, що така політика буде продовжена і в наступних модифікаціях середовища MATLAB, з'являться нові предметно-орієнтовані бібліотеки.

При моделюванні в Simulink користувач може скористатися досить широкою палітрою методів рішення диференціальних рівнянь, а також вибрати спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком), що дозволяє проводити моделювання для широкого кола систем, що включають безперервні, дискретні і гібридні системи будь-якої розмірності. Окремий напрямок досліджень пов'язаний з можливим переходом в область лінеаризованих систем, де реалізовано весь арсенал методів лінійного аналізу. Засоби візуалізації дають можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць. Базова бібліотека Simulink містить більше 200 блоків, що найчастіше зустрічаються при моделюванні різних систем. Додаткові бібліотеки дозволяють розширити можливості Simulink для застосування в аерокосмічній галузі, обробці сигналів, зв'язку та в інших додатках. Бібліотеки блоків MATLAB / Simulink можуть поповнюватися за рахунок підпрограм, написаних як на мові середовища MATLAB, так і на мовах C++, Fortran і Ada. Крім того, в ньому реалізована процедура інкапсуляції, яка є ще одним зручним для користувача засобом розширення бібліотек.

Недоліки MATLAB / Simulink є загальними для всіх інструментів структурного моделювання. Як у всіх подібних пакетах при створенні складних моделей доводиться будувати досить громіздкі багаторівневі блок-схеми, що не відображають природної структури модельованої системи. Частково, цей

спільний недолік пакетів структурного моделювання усувається використанням додатків, в яких реалізований принцип фізичного мультидоменного моделювання, таких як SimMechanics і SimPowerSystems, що забезпечують можливість побудови моделей механічних та електричних систем відповідно, а також тим, що розробники більшості сучасних пакетів фізичного мультидоменного моделювання передбачають можливість підключення бібліотек Simulink до інших програм [8].

Програму Simscape [5] і MATLAB \ Simulink пов'язує одна компанія-виробник – MathWorks. Проте, є суттєва відмінність між Simulink та Simscape, остання володіє широким спектром функцій та можливостей фізичного мультидоменного моделювання. Simscape надає середовище для моделювання та симуляції фізичних систем у механічній, електричній, гідравлічній та інших фізичних областях. Вона забезпечує фундаментальними елементами (блоками) з цих областей, які можна зібрати в моделі фізичних компонентів, таких як електричні двигуни, операційні підсилювачі, гідравлічні клапани та інші механізми. Моделі будуть відповідати структурі розроблюваної системи, тому що компоненти Simscape використовують фізичне з'єднання.

Моделі Simscape можуть бути використані для розробки систем управління і тестування продуктивності системного (структурного) рівня. Бібліотеки елементів можуть бути розширені за рахунок використання основаної на MATLAB мови Simscape, яка дозволяє текстове редагування та створення фізичних компонентів, доменів і бібліотек. Є можливість параметризування моделі з використанням змінних та виразів MATLAB, а також проектування моделі об'єкту управління фізичної системи, система управління якої може бути побудована в Simulink. Для розгортання моделі в інших середовищах моделювання Simscape підтримує генерацію Сі-коду.

Для основних продуктів компанії MathWorks (MATLAB, Simulink, Simscape) можливі три типи ліцензій (Commercial, Academic, Student), причому у відкритому доступі цін на продукти з цими ліцензіями немає, а для отримання прайсу потрібно авторизуватися на офіційному сайті та відправити відповідний

запит. Для використання Simscape обов'язково потрібна наявність і Simulink, і MATLAB. Враховуючи, що кожна програма постачається за окрему плату, такий набір буде коштувати чималу суму: MATLAB (USD \$2,150.00) + Simulink (USD \$3,250.00) + Simscape (USD \$2,000.00) = USD \$7,400.00. Причому це тільки мінімальна конфігурація, вже не кажучи про додаткові важливі пакети SimMechanics (USD \$2,000.00), SimHydraulics (USD \$2,000.00), SimElectronics (USD \$2,000.00), SimPowerSystems (USD \$3,000.00), Simulink Control Design (USD \$1,000.00), Simulink Design Optimization (USD \$1,000.00), Control System Toolbox (USD \$1,000.00), Optimization Toolbox (USD \$1,000.00), Global Optimization Toolbox (USD \$1,000.00). Також треба відмітити, що компанія MathWorks не надає безкоштовні пробні версії студентам і приватним особам (Individual License).

Навіть якщо продукти компанії MathWorks і перекривають усі запити споживачів (інженерів, науковців) в багатьох областях науки і техніки стосовно електронних розрахунків, моделювання, аналізу, оптимізації та інших видів процесінгу в віртуальній лабораторії, то ціна на ці продукти відповідна. Є безкоштовна пробна версія (free 30-day trial) програми Simulink (включаючи MATLAB).

В програмі MATLAB широкі можливості щодо рішення ODE; вирішувачі поділяються на методи зі змінним та постійним кроком. Параметрична оптимізація у MATLAB можлива за допомогою додаткового інструментарію Optimization Toolbox – прикладний пакет для розв'язання оптимізаційних задач і систем нелінійних рівнянь. Підтримує основні методи оптимізації функцій ряду змінних:

- безумовна оптимізація нелінійних функцій;
- метод найменших квадратів та нелінійна інтерполяція;
- рішення нелінійних рівнянь;
- лінійне програмування;
- квадратичне програмування;
- умовна мінімізація нелінійних функцій;

- багатокритеріальна оптимізація.

Optimization Toolbox реалізує наступні методи гладкої безумовної оптимізації:

- а) метод найшвидшого спуску (Steepest Descent method);
- б) квазі-Ньютонівський BFGS-метод (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno);
- в) квазі-Ньютонівський DFP-метод (Davidson-Fletcher-Powell);
- г) методи, засновані на побудові довірчих двовимірних областей (trust region).

Перші три з них віднесені до «medium-scale»-методів і призначені для вирішення завдань оптимізації середньої розмірності (не більше 100 змінних), останній – до «large-scale»-методів. За замовчуванням, якщо задається аналітичний вираз для градієнта, запускається метод довірчого інтервалу. В іншому випадку використовується BFGS-метод, але є можливість переключитися і на інші. Метод найшвидшого спуску, як правило, дуже повільний і його не рекомендується використовувати для вирішення практичних завдань [8].

1.4 Обґрунтування вибору програмного забезпечення для моделювання

Система математичного моделювання MATLAB / Simulink в даний час є одним з найбільш популярних інструментів чисельних розрахунків і застосовується в різних областях знань. Можливості MATLAB перекривають більшу частину потреб розробників систем управління в різних областях техніки. Широкий набір різних чисельних методів у поєднанні з потужними засобами графічної візуалізації робить MATLAB універсальним інструментом інженерних розрахунків і наукових досліджень.

Найважливішою складовою середовища MATLAB є пакет структурного моделювання динамічних систем Simulink. Simulink включає в собі всі риси сучасної САЕ – компонентне моделювання, графічна форма завдання

інформації про об'єкт і т.п. Simulink настільки органічно інтегрований з системою MATLAB, що, розглядаючи сучасні засоби дослідження технічних систем, логічно говорити про середовище візуального компонентного моделювання MATLAB / Simulink. На базі пакету Simulink розроблені додаткові бібліотеки блоків для різних областей застосування (наприклад, Power System Blockset – моделювання електротехнічних пристроїв, Digital Signal Processing Blockset – набір блоків для розробки цифрових пристроїв, Control System Toolbox – пакет для розробки систем управління і т.д.).

При моделюванні в Simulink користувач може скористатися досить широкою палітрою методів рішення диференціальних рівнянь, а також вибрати спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком), що дозволяє проводити моделювання для широкого кола систем, що включають безперервні, дискретні і гібридні системи будь-якої розмірності. Окремий напрямок досліджень пов'язаний з можливим переходом в область лінеаризованих систем, де реалізовано весь арсенал методів лінійного аналізу. Засоби візуалізації дають можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць.

Базова бібліотека Simulink містить більше 200 блоків, що найчастіше зустрічаються при моделюванні різних систем. Додаткові бібліотеки дозволяють розширити можливості Simulink для застосування в аерокосмічній галузі, обробці сигналів, зв'язку та в інших додатках. Бібліотеки блоків MATLAB / Simulink можуть поповнюватися за рахунок підпрограм, написаних як на мові середовища MATLAB, так і на мовах C++, Fortran і Ada. Крім того, в ньому реалізована процедура інкапсуляції, яка є ще одним зручним для користувача засобом розширення бібліотек.

Simulink автоматизує найбільш трудомісткий етап моделювання: він складає і вирішує складні системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують задану функціональну схему (модель), забезпечуючи зручний і

наочний візуальний контроль за поведінкою створеного користувачем віртуального пристрою – достатньо уточнити (якщо потрібно) вид аналізу і запустити Simulink в режимі симуляції створеної моделі системи або пристрою.

Розглянуті переваги дозволяють виділити MATLAB Simulink з ряду інших програм і вибрати його для розробки візуально-блочної моделі інвертору напруги.

2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ

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

До квазіусталених характеристик в силовій електроніці слід віднести:

- миттєві електромагнітні процеси в навантаженні, в джерелі живлення і силових напівпровідникових елементах в сталому режимі роботи напівпровідникового перетворювача;
- спектральні характеристики - спектри напруги і струму в ланцюзі харчування і в навантаженні перетворювача.

Статичні характеристики встановлюють зв'язок між середніми, що діють (ефективними) або амплітудними значеннями змінних стану, до них відносяться:

- регульовальні характеристики, що представляють собою залежності вихідної напруги або струму від сигналу управління;
- навантажувальні (зовнішні) характеристики, які є залежностями вихідної напруги від струму навантаження;
- електромагнітні характеристики, що представляють собою залежності амплітудних, що діють (середніх) струмів (напруг) в ланцюзі харчування і напівпровідникових елементах перетворювача від струму навантаження;
- енергетичні характеристики - залежності потужності в ланцюзі живлення перетворювача, а також потужності втрат в напівпровідникових елементах перетворювача від потужності в навантаженні.

До динамічних характеристик в силовій електроніці відносяться:

- перехідні електромагнітні процеси в навантаженні і джерелі живлення при стрибкоподібному зміні величини вхідного сигналу;
- перехідні електромагнітні процеси в навантаженні при стрибкоподібному зміні параметрів джерела живлення;
- перехідні електромагнітні процеси в джерелі живлення при стрибкоподібному зміні параметрів навантаження;
- перехідні електромагнітні процеси в напівпровідникових елементах

перетворювача при їх перемиканні.

Незалежної змінної при моделюванні є час. Тому квазіусталені і перехідні характеристики є результатом моделювання і можуть бути легко отримані в результаті моделювання.

Незалежними змінними при побудові статичних характеристик є діючі або середні значення змінних стану в сталому режимі. Тому отримання статичних характеристик вимагає спеціального модельного експерименту, при якому необхідно змінювати незалежну змінну і визначати необхідні залежності в сталому режимі.

Нижче розглянуті способи отримання всіх перерахованих характеристик і залежностей на прикладі трифазного автономного інвертора напруги з синусоїдальної широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) на частоті. У порівнянні з однофазним інвертором, в трифазному автономному інверторі напруги моделюють напруги управління транзисторами кожного плеча інвертора зрушені на 120 градусів (рис. 2.1).

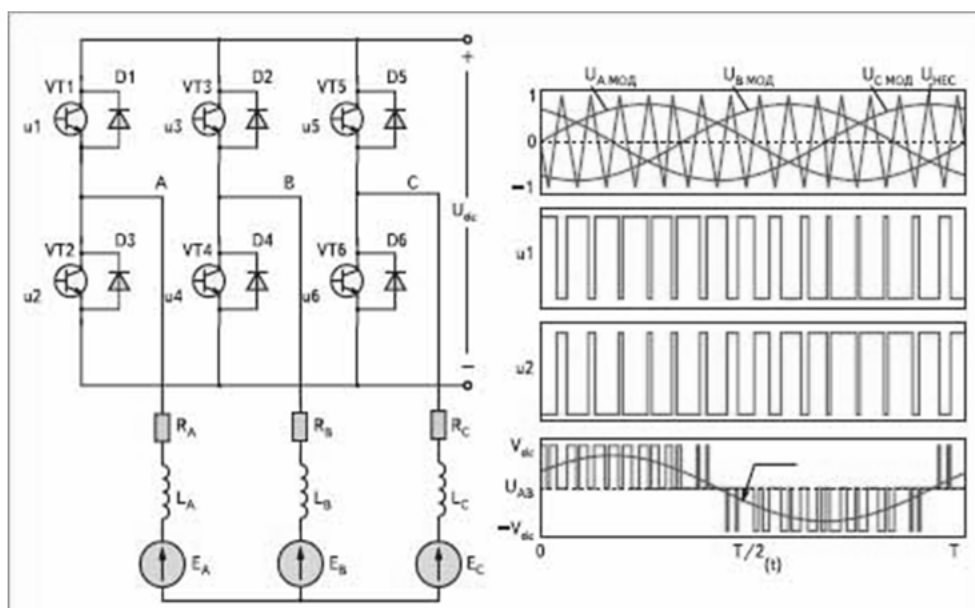


Рисунок 2.1 – Трифазний інвертор з синусоїдальною ШІМ

Ці сигнали порівнюються з пилкоподібним несучим напругою і формують сигнали управління кожним плечем (на рис. 2.1 показані сигнали управління плечем фази А). Відповідно до сигналами управління транзисторами

формується напруга на кожній фазі навантаження.

В даний час автономні інвертори все частіше використовуються в електромеханічних системах для управління двигунами змінного струму, системах електроживлення в якості активних випрямлячів, активних фільтрів, компенсаторів реактивної потужності і т. д. У всіх цих пристроях інвертор з одного боку приєднаний до джерела змінної напруги, а з іншого - до джерела постійної напруги.

Коефіцієнтом модуляції в інверторі називається відношення амплітуди напруги, що модулює до амплітуди пилкоподібної напруги.

$$M = U_{m\text{мод}} / U_{m\text{нес}} \quad (2.1)$$

В діапазоні зміни коефіцієнта модуляції $0 < m < 1$ інвертор знаходиться в лінійній зоні.

2.1 Опис базової моделі інвертора в MATLAB

Для отримання основних характеристик інвертора використовуються різні моделі, що відрізняються в основному блоками вимірювання і запису результатів вимірювання в робочий простір MATLAB. При цьому сам інвертор, його блок живлення, управління і навантаження залишаються без змін, вони представлені на рис. 2.2 [9].

Параметри моделі:

Напруга живлення $U = 540$ В, інвертор (Universal Bridge) -трехфазний міст на IGBT транзисторах, частота модулюючого напруги - 25 Гц., коефіцієнт модуляції $m = 0.9$, параметри навантаження - $L = 0.1$ Гн., $R = 10$ Ом., час моделювання - 0.5 с., крок моделювання - 0.1 мс.

Програмований джерело, вікно настройки якого показано на рис.2.3, призначений для зміни навантаження інвертора протягом моделювання.

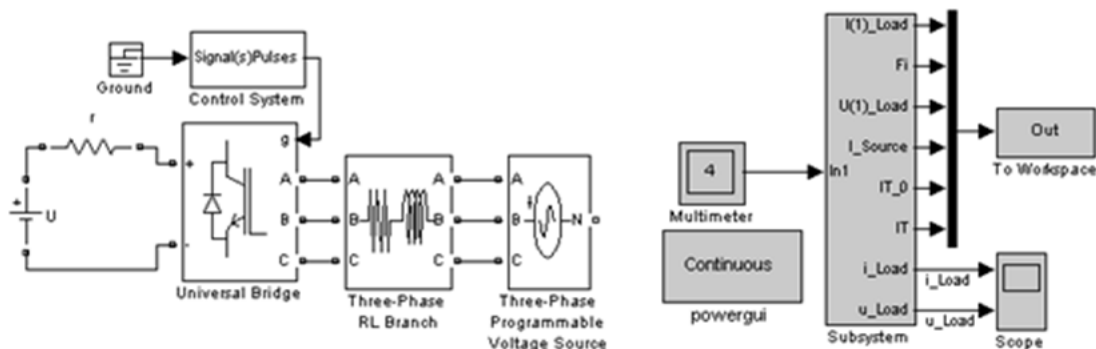


Рисунок 2.2 – Модель трифазного інвертора з синусоїдальною ШІМ



Рисунок 2.3 – Програмований джерело в навантаженні АІН

Вимірювальна частина моделі містить 5 блоків (рис. 2.4). Блоком Multimeter вимірюються миттєві значення струму навантаження, напруги навантаження, струму в ланцюзі харчування і струму в напівпровідниковому ключі інвертора. Блок Powergui служить для спектрального аналізу миттєвого струму і напруги навантаження, зафіксованих блоком Scope. Блок To Workspace служить для запису в робочий простір Matlab величин, виміряних блоком Subsystem. Зміст блоку Subsystem представлено на рис. 2.4.

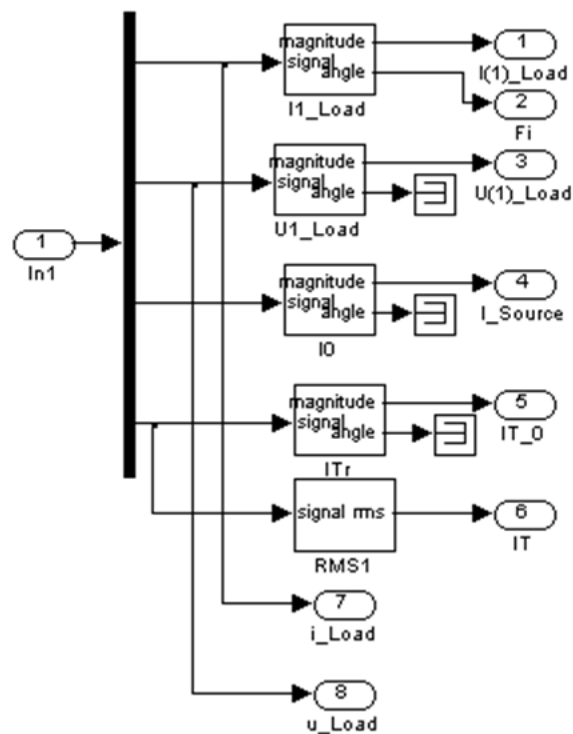


Рисунок 2.4 – Вимірювальна частина моделі

У цьому блоці послідовно вимірюються:

- амплітуда першої гармоніки струму навантаження;
- фаза першої гармоніки струму навантаження;
- амплітуда першої гармоніки напруги навантаження;
- середній струм живлення інвертора;
- середній і ефективний струми в напівпровідниковому ключі інвертора;
- миттєві струм і напруга навантаження.

Для побудови основних характеристик служить програма, представлена в лістингу 2.1. Ці характеристики показані на рис.2.5.

```

Листинг 2.1
I1Load=Out(:,1);
Fi=Out(:,2);
U1Load=Out(:,3);
ISource=Out(:,4);
IT0=Out(:,5);
IT=Out(:,6);

```

```

S11=(1.73*U1Load.*I1Load)/2;
P11=S11.*cos(Fi*pi/180);
Q11=S11.*sin(-Fi*pi/180);
subplot(3,1,1);
plot(I1Load,U1Load);
grid on;
ylabel('U Load (V)');
subplot(3,1,2);
plot(I1Load,ISource,I1Load,IT0,I1Load,IT);
grid on;
ylabel('I Source,IT0,IT (A)');
subplot(3,1,3);
plot(I1Load,S11,I1Load,P11);
grid on;
xlabel('Load current (A)');
ylabel('S1 (VA), P1 (Wt)');

```

Лінійна напруга на виході інвертора і його спектр представлені на рис.2.6.
Струм на виході інвертора і його спектр видно з рис.2.7.

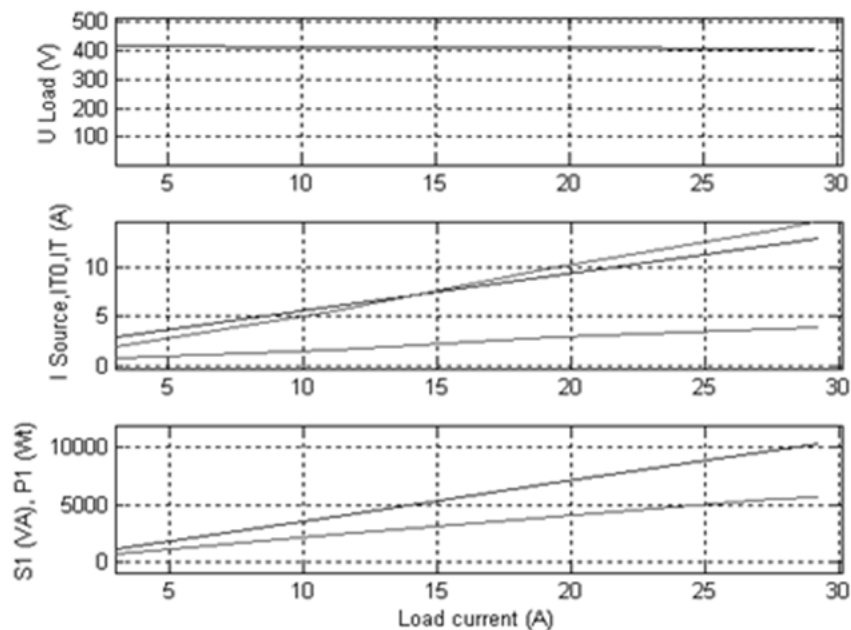


Рисунок 2.5 – Основні характеристики інвертора

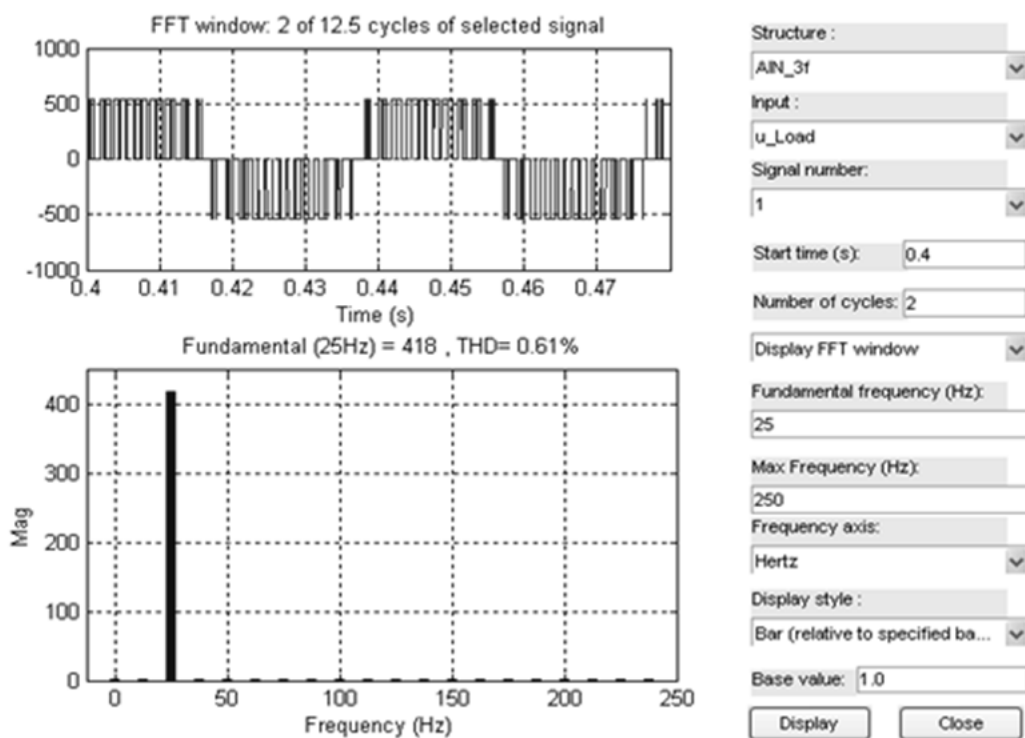


Рисунок 2.6 – Спектр вихідної напруги інвертора

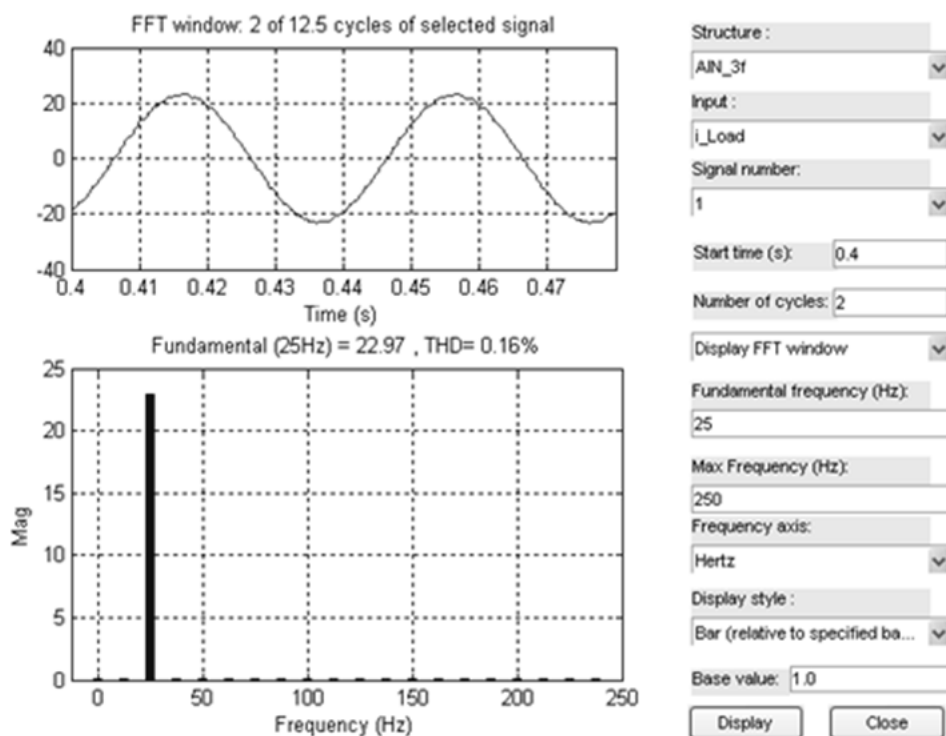


Рисунок 2.7 – Спектр струму на виході інвертора

В даний час автономні інвертори все частіше використовуються в системах електроживлення в якості активних випрямлячів, активних фільтрів,

компенсаторів реактивної потужності і.т.д. У всіх цих пристроях інвертор з одного боку приєднаний до джерела змінної напруги, а з іншого - до джерела постійної напруги.

2.2 Розробка моделі інвертора без модуляції ШІМ

Математична модель, яка складена в середовищі Matlab представлена на рис. 2.8. Вона складається з базового блоку DS/AS1, джерела напруги, навантаження, датчиків струму та напруги. На рис. 2.9 представлена математична модель на дискретних елементах з демпферними ланцюгами, тобто на схемотехнічному рівні.

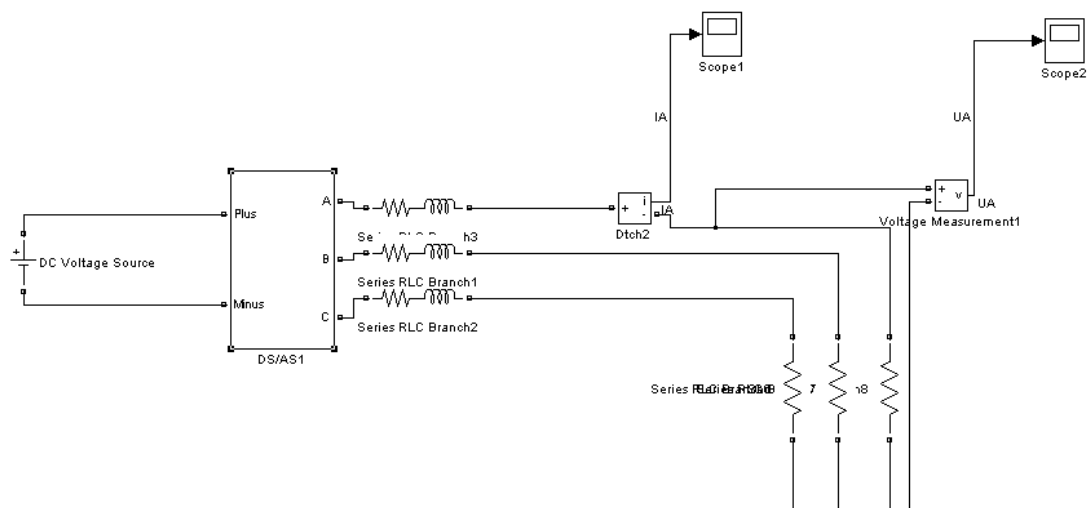


Рисунок 2.8 – Математична модель з базових блоків

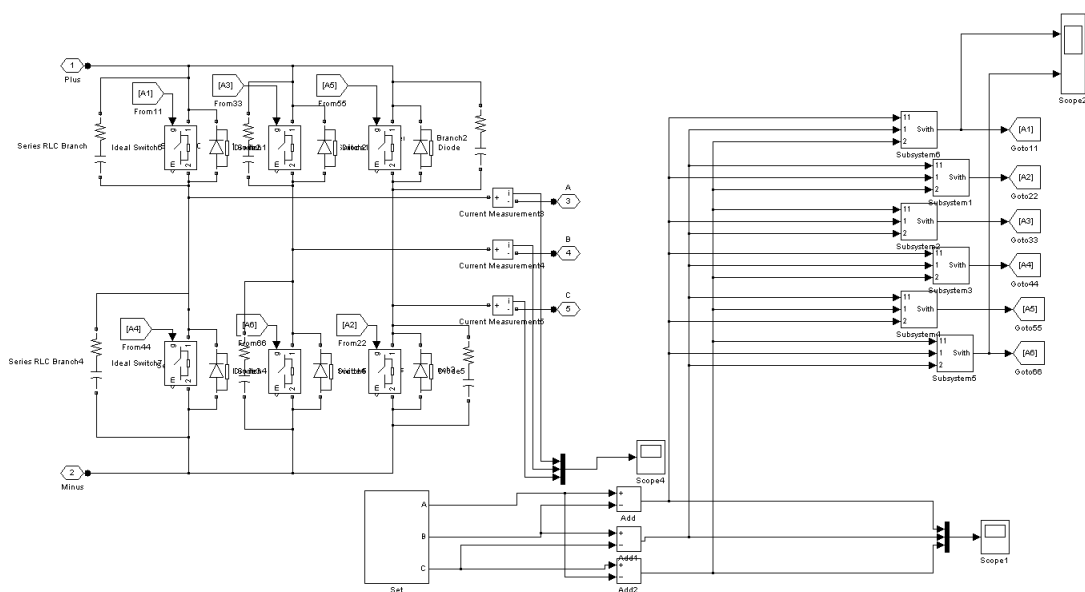


Рисунок 2.9 – Математична модель на схемотехнічному рівні

На рис. 2.10 представлено розгорнутий блок Switch, який використовується в моделі на рис. 2.9.

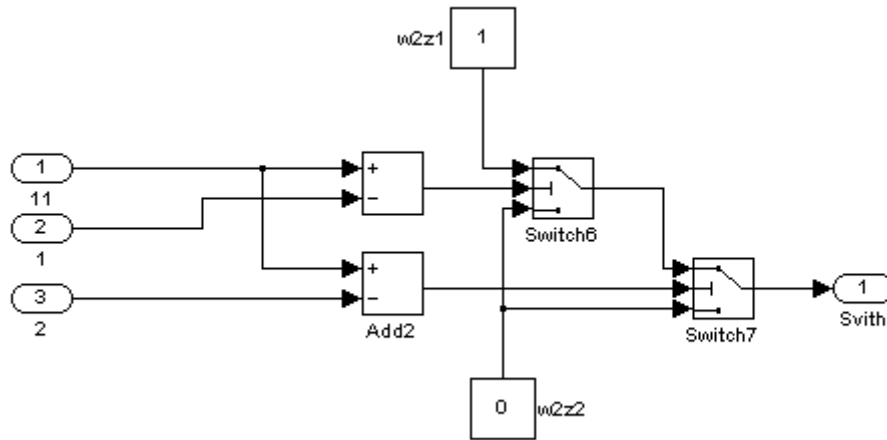


Рисунок 2.10 – Блок Switch

Для генерації трифазної напруги живлення розроблено блок, який показано на рис. 2.11.

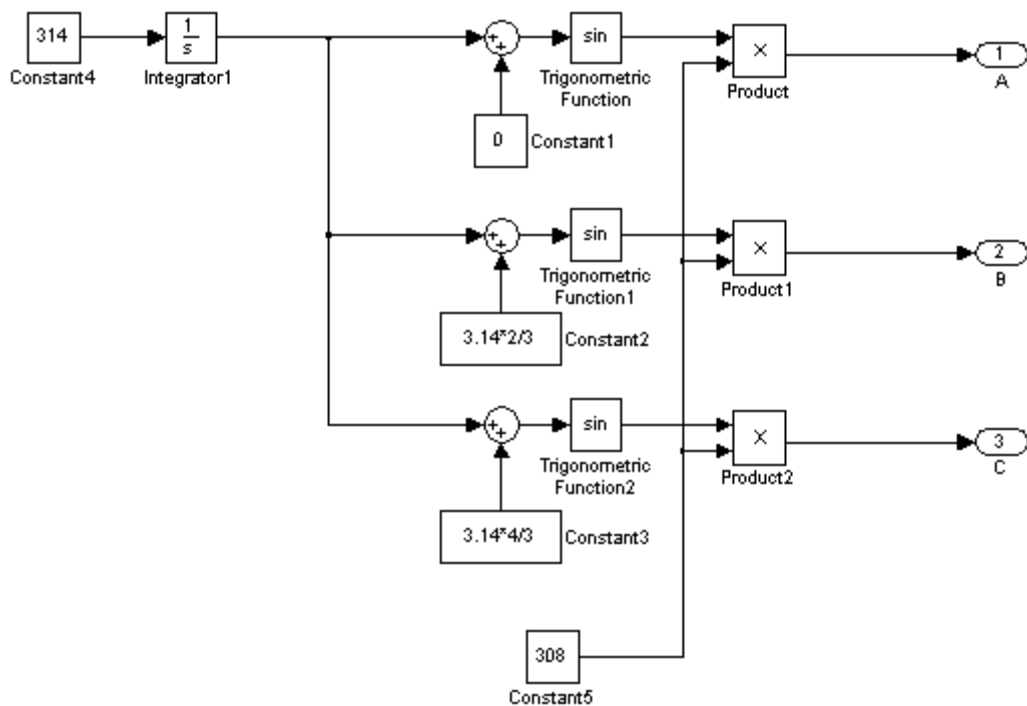


Рисунок 2.11 – Блок генерації опорної напруги для ключів

На рис. 2.12 та 2.13 представлені параметри блоків Switch та діоду. Результати моделювання представлені на рис. 2.14 – 2.16.

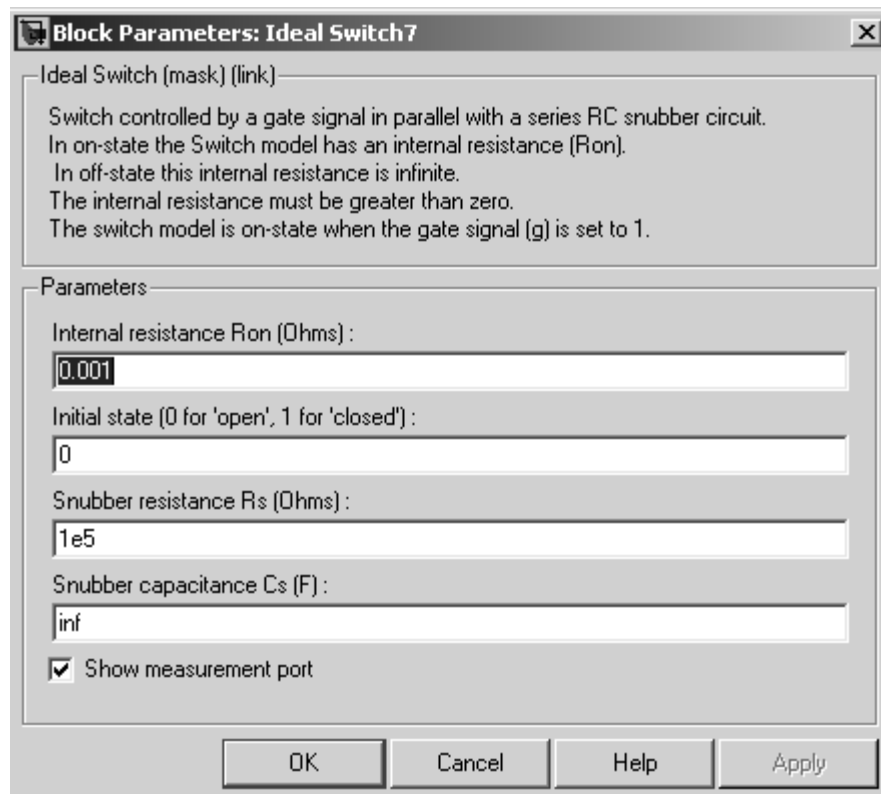


Рисунок 2.12 – Блок параметрів елемента Switch

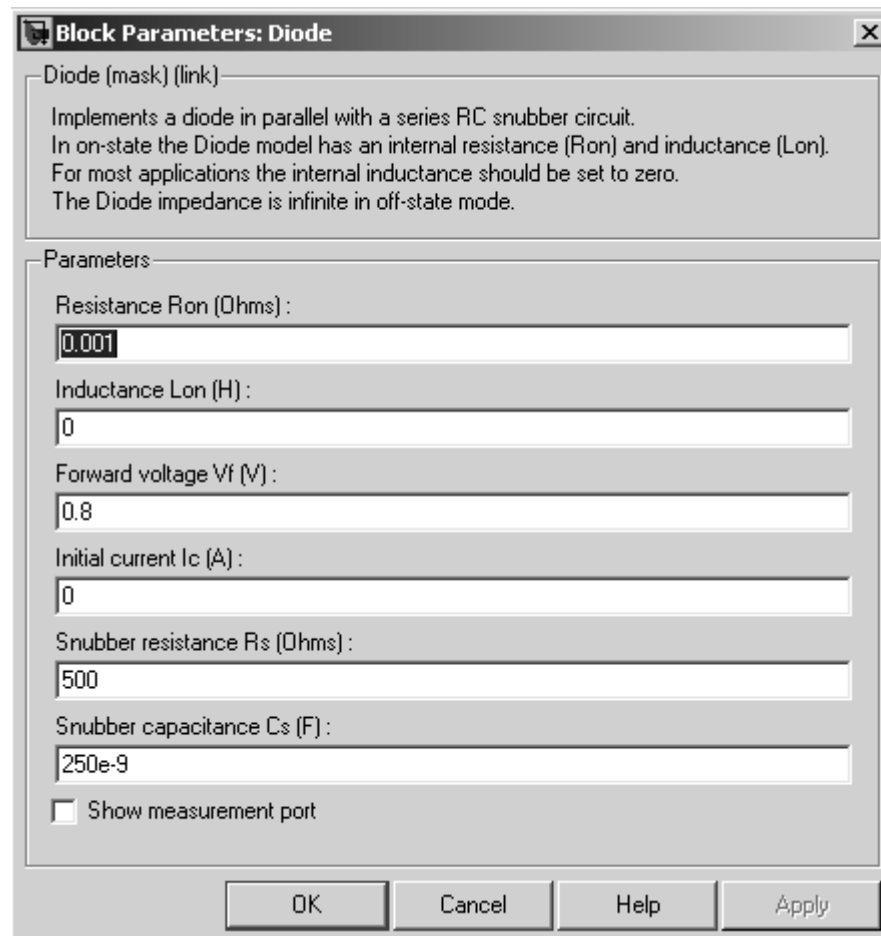


Рисунок 2.13 – Блок параметрів діоду

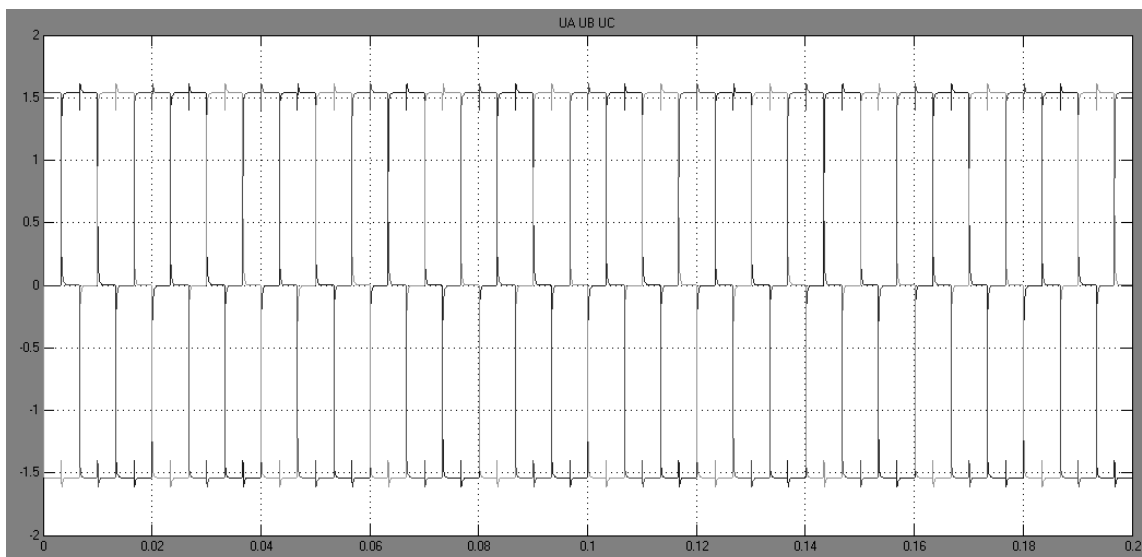


Рисунок 2.14 – Результати моделювання інвертору

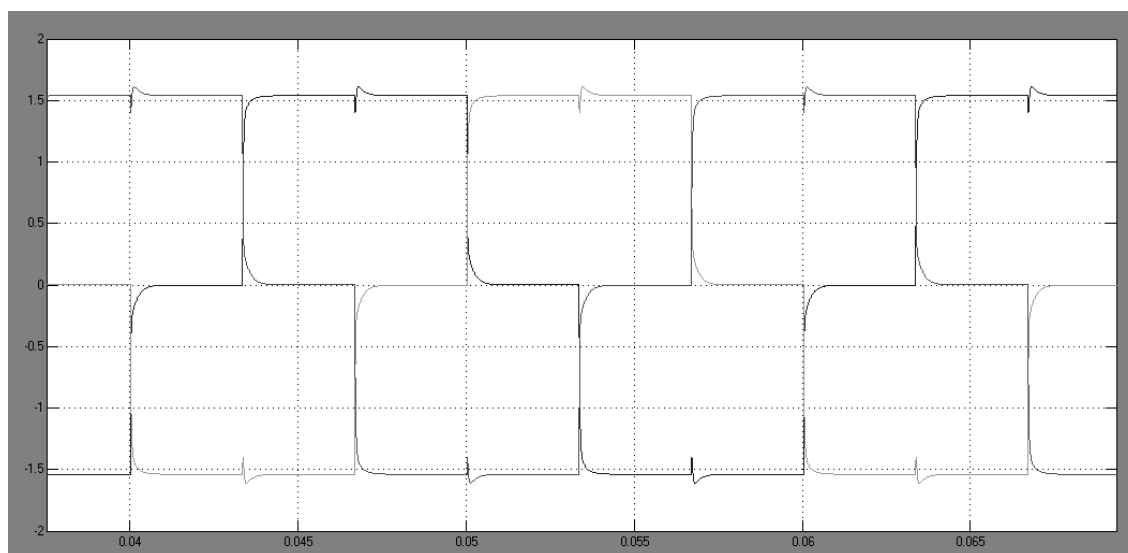


Рисунок 2.15 – Збільшення результатів моделювання по часу

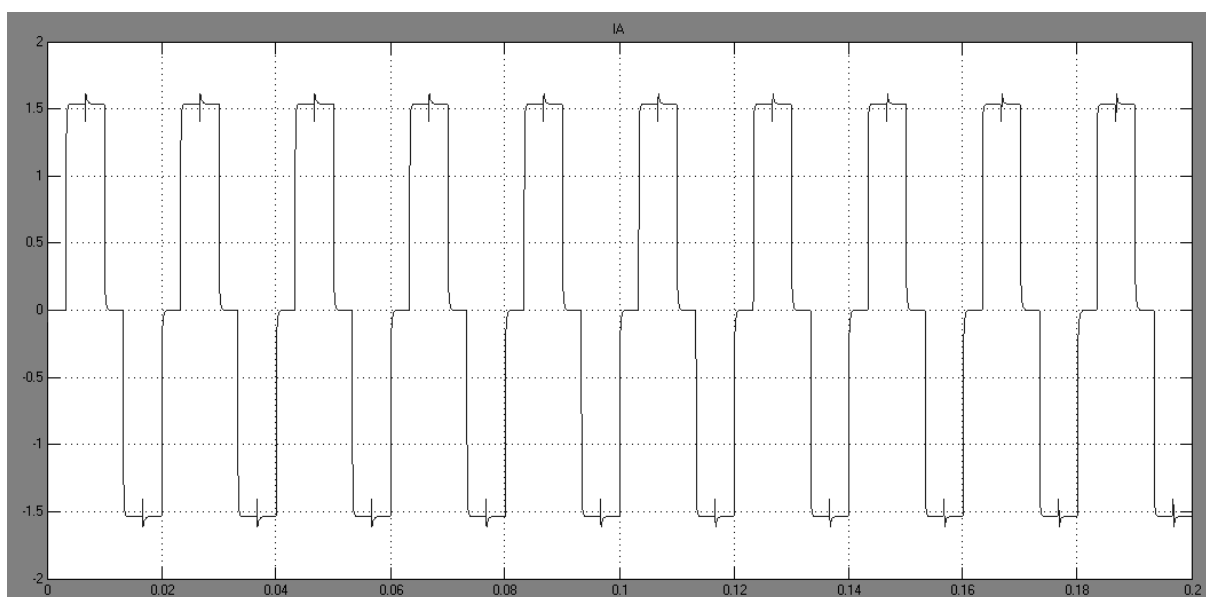


Рисунок 2.16 – Результати моделювання вихідного струму

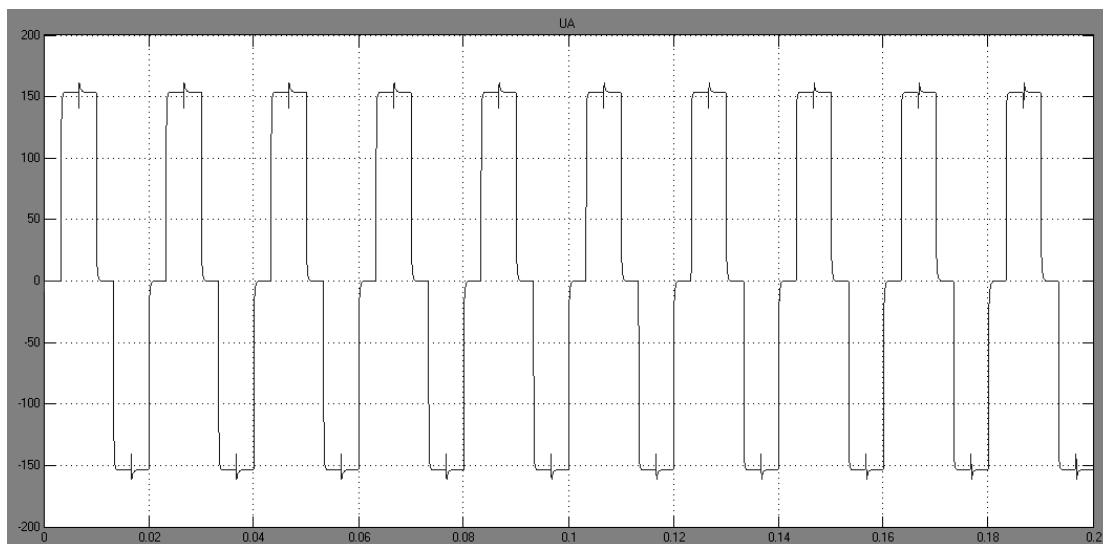


Рисунок 2.17 – Результати моделювання вихідної напруги фази А

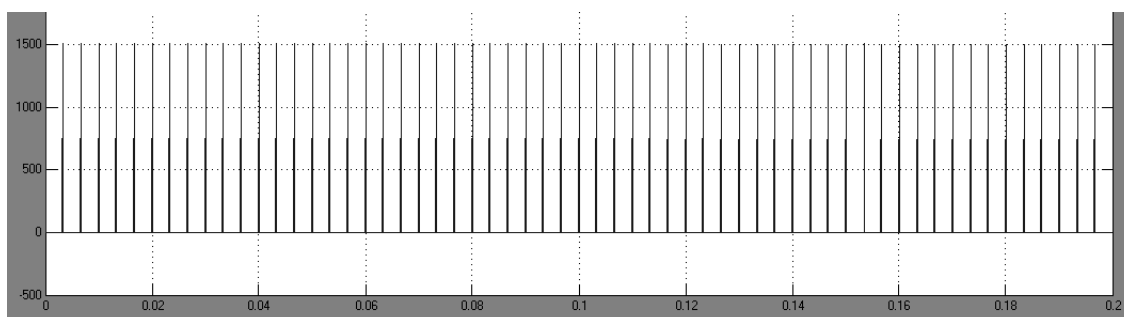


Рисунок 2.18 – Струм на виході інвертору

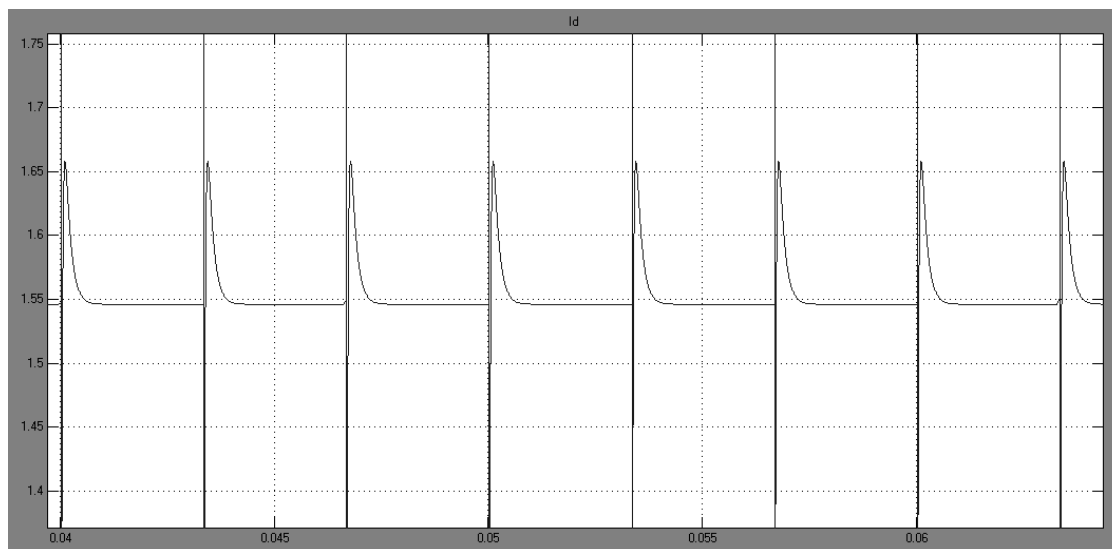


Рисунок 2.19 – Збільшений фрагмент моделювання вихідного струму

По результатам моделювання можна зробити висновок, що розроблена модель працездатна, але потребує перевірки на адекватність, яку буде проведено в наступному розділі.

3 ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛІ

Модель інвертору, яка розроблена на основі візуально-блочному рівні потребує перевірки на адекватність. Модель інвертору призначена для заміни оригіналу при дослідженнях, яким піддавати оригінальний пристрій не можна або недоцільно. Але заміна оригіналу моделлю можлива, якщо вони в достатній мірі схожі або адекватні.

Адекватність (від лат. *Adaequatus* - прирівняний) - відповідність моделі модельованого об'єкту (оригіналу) або процесу.

Адекватність - в якійсь мірі умовне поняття, так як повної відповідності моделі реальному об'єкту бути не може, інакше це була б не модель, а сам об'єкт. При моделюванні мається на увазі адекватність не взагалі, а за тими властивостями моделі, які для дослідження вважаються суттєвими.

Кажуть, що модель адекватна оригіналу, якщо при її інтерпретації виникає «портрет», що значною мірою схожий з оригіналом.

До тих пір поки не вирішено питання, чи правильно відображає модель досліджувану систему (тобто адекватна вона), цінність моделі нульова!

Термін «адекватність», як видно, носить дуже розпливчастий сенс. Зрозуміло, що результативність моделювання значно зросте, якщо при побудові моделі і перенесенні результатів з моделі на систему оригінал може скористатися деякою теорією, що уточнює ідею подібності, пов'язану з використовуваною процедурою моделювання.

На жаль, теорії, що дозволяє оцінити адекватність математичної моделі і системи, що моделюється, немає, на відміну від добре розробленої теорії подібності явищ однієї і тієї ж фізичної природи.

Перевірку адекватності проводять на всіх етапах побудови моделі починаючи з самого першого етапу - концептуального аналізу. Якщо опис системи буде складено не адекватно реальній системі, то і модель, як би точно вона ні відображала опис системи, що не буде адекватної оригіналу. Тут сказано «як би точно», так як мається на увазі, що взагалі не існує математичних

моделей, абсолютно точно відображають процеси, що існують в реальності.

Якщо вивчення системи проведено якісно і концептуальна модель досить точно відображає реальний стан справ, то далі перед розробниками стоїть лише проблема еквівалентного перетворення одного опису в інше.

Отже, можна говорити про адекватність моделі в будь-якій її формі і оригіналу, якщо:

- опис поведінки, створене на будь-якому етапі, досить точно збігається з поведінкою, що моделюється в однакових ситуаціях;
- опис переконливо представницький щодо властивостей системи, які повинні прогнозуватися за допомогою моделі.

Попередньо вихідний варіант математичної моделі піддається таким перевіркам:

- чи всі суттєві параметри включені в модель;
- чи немає в моделі несуттєвих параметрів;
- чи правильно відображені функціональні зв'язки між параметрами;
- чи правильно визначені обмеження на значення параметрів;
- чи не дає модель абсурдні відповіді, якщо її параметри приймають граничні значення.

Така попередня оцінка адекватності моделі дозволяє виявити в ній найбільш грубі помилки.

Але всі ці рекомендації носять неформальний, рекомендаційний характер. Формальних методів оцінки його не існує! Тому в основному якість моделі (і в першу чергу ступінь її адекватності системі) залежить від досвіду, інтуїції, ерудиції розробника моделі та інших суб'єктивних факторів.

Остаточне судження про адекватність моделі може дати лише практика (хоча для оцінки його використовуються і експертні методи), тобто порівняння моделі з оригіналом на основі експериментів з об'єктом і моделлю. Модель і об'єкт піддаються однаковим впливам, і порівнюються їх реакції. Якщо реакції однакові (в межах допустимої точності), то робиться висновок про те, що модель адекватна оригіналу. Однак треба мати на увазі наступне:

- впливу на об'єкт носять обмежений характер через можливе руйнування об'єкта, недоступності до елементів системи і т.д.;

- впливу на об'єкт мають фізичну природу (зміна струму і напруги, температури, швидкості обертання валів і т.д.), а впливу на математичну модель - це числові аналоги фізичних впливів.

При моделюванні складних систем досягти такої повної відповідності важко, та й недоцільно. При моделюванні абсолютна подібність не має місця. Прагнуть лише до того, щоб модель досить добре відображала досліджувану сторону функціонування об'єкта. Модель за складністю може стати аналогічною досліджуваній системі, і ніякого спрощення дослідження не буде.

3.1 Перевірка на адекватність математичної моделі інвертору напруги

Для перевірки математичної моделі на адекватність проведемо моделювання трехфазного інвертору на основі базових блоків Matlab.

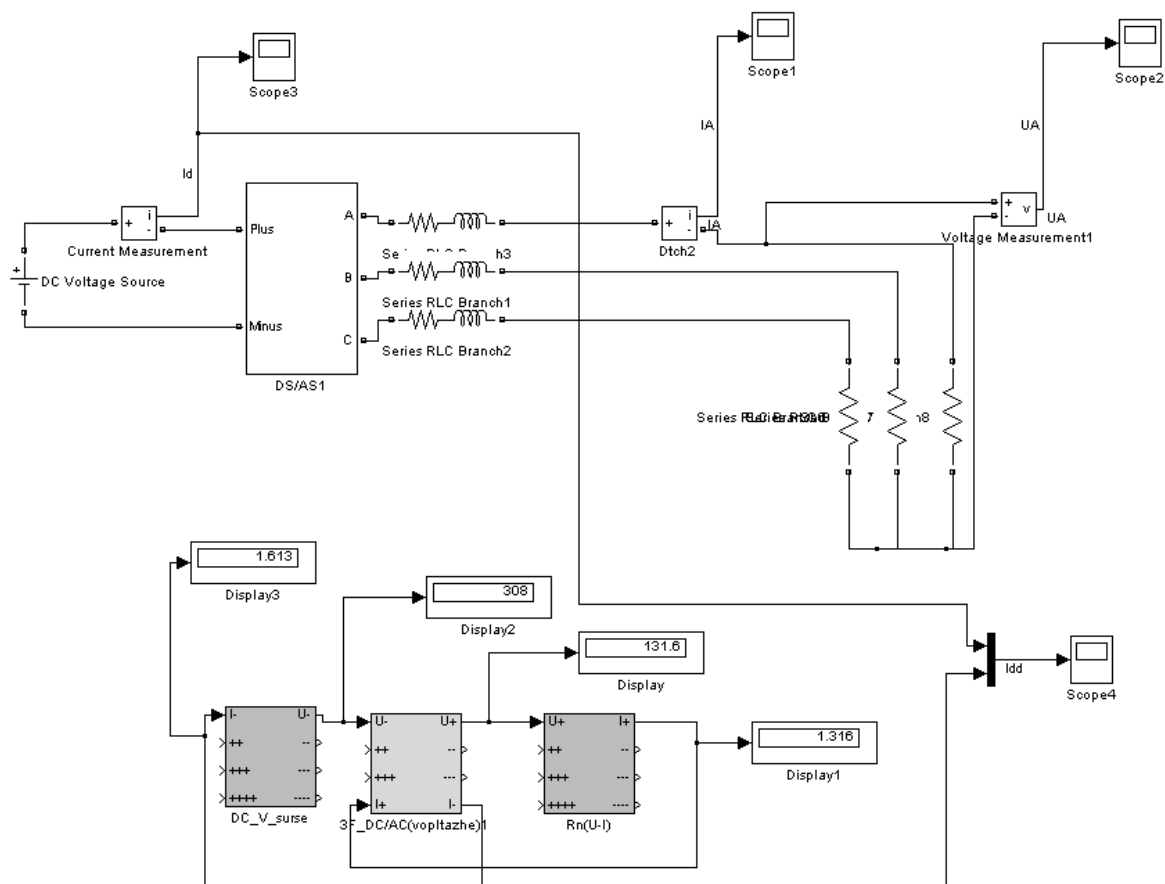


Рисунок 3.1 – Схема для перевірки на адекватність

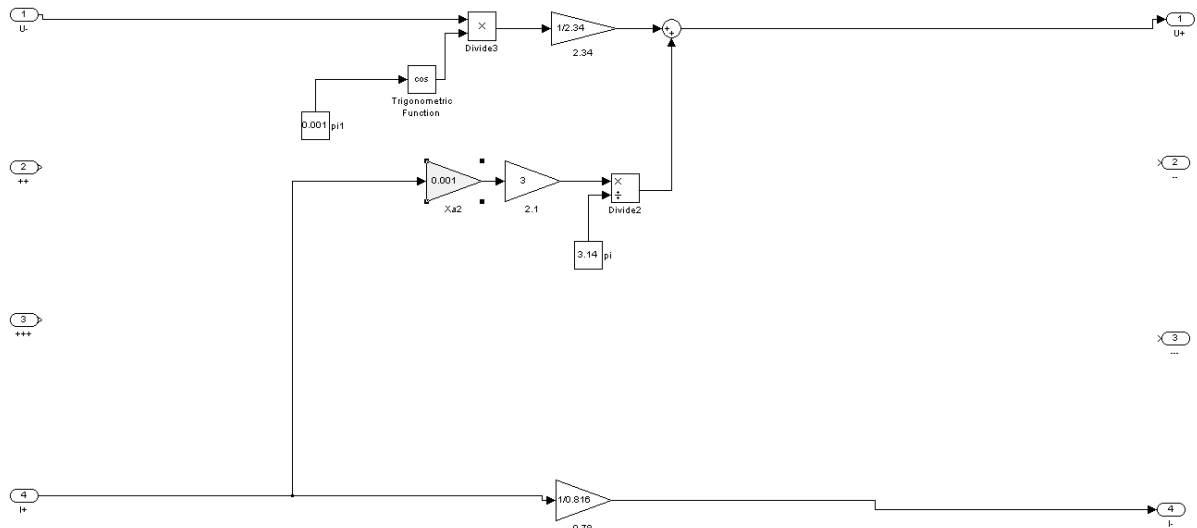


Рисунок 3.2 – Структура візуально-блочної моделі

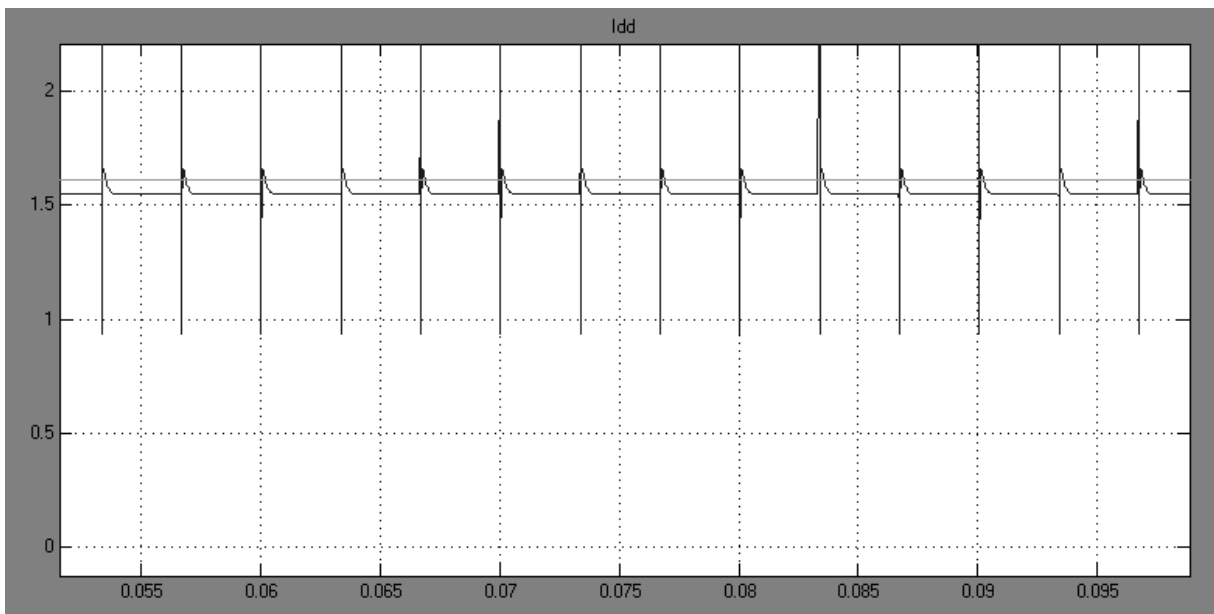


Рисунок 3.3 – Результат моделювання

Результати моделювання показали, що розроблена математична модель на візуально-блочному рівні адекватна. Так як модель не включає реактивні елементи, то результати моделювання відображають основні перехідні процеси в інверторі.

Головна перевага створеної моделі перед вже існуючими рішеннями, це прискорення моделювання в рази. Це дозволяє моделювати перетворювачі більш складної структури та в складі інших пристроїв.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Побудова економічної моделі проекту розглянуто. До складових моделі проекту належать наступні основні частини [10]:

- формуляр проекту;
- робоча структура проекту - WBS;
- організаційна структура проекту - OBS;
- структура затрат проекту - CBS;
- матриця відповідальності;
- система кодування проекту;
- CTR - каталог;
- сіткові плани;
- робочі плани проекту.

4.1 Формуляр проекту

Мета та основні параметри проекту фіксуються у спеціальному формулярі наведеному нижче.

Формуляр проекту	
Завдання	№ проекту <u>1</u> Дата замовлення <u>02.06.2019</u> Назва проекту <u>Дослідження електромагнітних процесів в трифазному інверторі напруги</u> Замовник ПП <u>П ЗДІА</u> Адреса <u>м. Запоріжжя, пр. Леніна 224</u> Контактна особа ПП <u>Критська Тетяна Володимірівна</u> Тел. і факс <u>222-22-22</u>
Договірна	Усього <u>10 000</u> грн.

ціна	Додаткові умови _____ - _____
Строки	Початок _____ 02.06.2019 _____ кінець 14.01.2020 _____ Проміжні строки 21.09.2019 - попередня перевірка виконаної роботи
Партнери	Кооперація _____ - _____ Субпідрядники _____ - _____ Завдання Розробка візуально-блочної моделі
Персонал	Керівник Критська Т.В. Заступник _____ - _____ Співробітники Баранов С.О.
Проект	Скорочена назва "Модель ІН" Цілі Розробка ефективної моделі інвертору напруги Критичні строки 1. 02.10.2019 (завершення дослідної роботи) 2. 14.02.2020 (завершення проекту) Особливості та проблеми Проблеми дослідження перехідних процесів за допомогою математичної моделі інвертору напруги.

Стадії, необхідні, для дослідження та аналізу ефективності системи керування, а також зміст робіт на кожній стадії зведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - характеристика робіт за проектом

Характеристика робіт за проектом			
Код роботи	Назва чи зміст роботи	Безпосередньо попередня робота	Тривалість, діб
1.1.1	Знаходження, вивчення теоретичних матеріалів з літературних джерел.	-	2
1.1.2	Аналіз зібраного матеріалу, обґрунтування актуальності питання.	-	2

1.1.3	Підготовка технічного звіту	1.1.1, 1.1.2	2
1.2.1	Вибір засобів та програм для моделювання трифазного інвертора напруги	1.1.3	2
1.2.2	Моделювання системи	1.2.1	4
1.3.1	Розробка електричної принципової схеми	1.2.2	3
1.3.2	Розробка програмного забезпечення	1.3.1	3
1.3.3	Розробка конструкції	1.3.2	3
1.4.1	Отримання результатів	1.3.3	2
1.4.2	Контрольна перевірка результатів	1.4.1	2
1.4.3	Усунення недоліків роботи системи	1.4.2	2
1.4.4	Представлення замовнику.	1.4.3	2

4.2 Робоча структура проекту (WBS)

WBS (Work Breakdown Structure) будується в результаті декомпозиції робіт. WBS створюється за допомогою поділу проекту на основні елементи, частини, послуги на логічній основі. Ці елементи, в свою чергу, поділяються на свої елементи, і цей процес повторюється доти, доки на нижчому рівні WBS елемент можна поділити на роботи, які мають виконуватись окремими групами. Кожного разу, як проект і його елементи поділяються, створюється так званий рівень. Кожний рівень у структурі — це рівень, на якому управління проектом потребує збору й аналізу контрольної інформації і кожний елемент цього рівня має свій аналіз виконання і звіт. Вона визначає об'єм робіт, виконання яких призводить до досягнення мети проекту [10].

Основні етапи розробки WBS:

- 1) визначення ступеня деталізації проектних робіт (так, щоб вони піддавались оцінюванню);
- 2) визначення кількості рівнів (як правило три-чотири, для сучасних компаній — чотири оптимально);

- 3) розробка структури кожного рівня (формується горизонтальні рівні);
- 4) підготовка опису елементів WBS (стисла назва кожної складової WBS);
- 5) формування системи кодування (кодуються всі блоки);
- 6) проведення зворотних обчислень (затрати знизу догори за принципом: відділ локалізації — субпідрядник).

Структура WBS для даного проекту наведена на рис. 4.1.

4.3 Організаційна структура проекту (OBS)

Наступним кроком розробки структури проекту є визначення організаційної структури (OBS) проекту.

OBS (Organization Breakdown Structure) визначає виконавців проекту та встановлює систему підпорядкованості. OBS має вигляд ієрархічної системи.

Елементами OBS можуть бути:

- 1) окремі виконавці (керівники, фахівці, службовці);
- 2) організації, структурні підрозділи і служби, у яких зайнята та або інша кількість фахівців, що виконують певні функціональні обов'язки;
- 3) зовнішні постачальники обладнання, послуг;
- 4) інші організації.

Типи зв'язків між елементами OBS:

- вертикальні, або зв'язки підпорядкування;
- горизонтальні, або відносини під час співпраці і узгодження.

Правила побудови OBS:

- 1) на верхньому рівні OBS проекту знаходиться керівник та команда управління проектом;
- 2) на наступному рівні – виконавці: організації, відділи, підрозділи тощо.

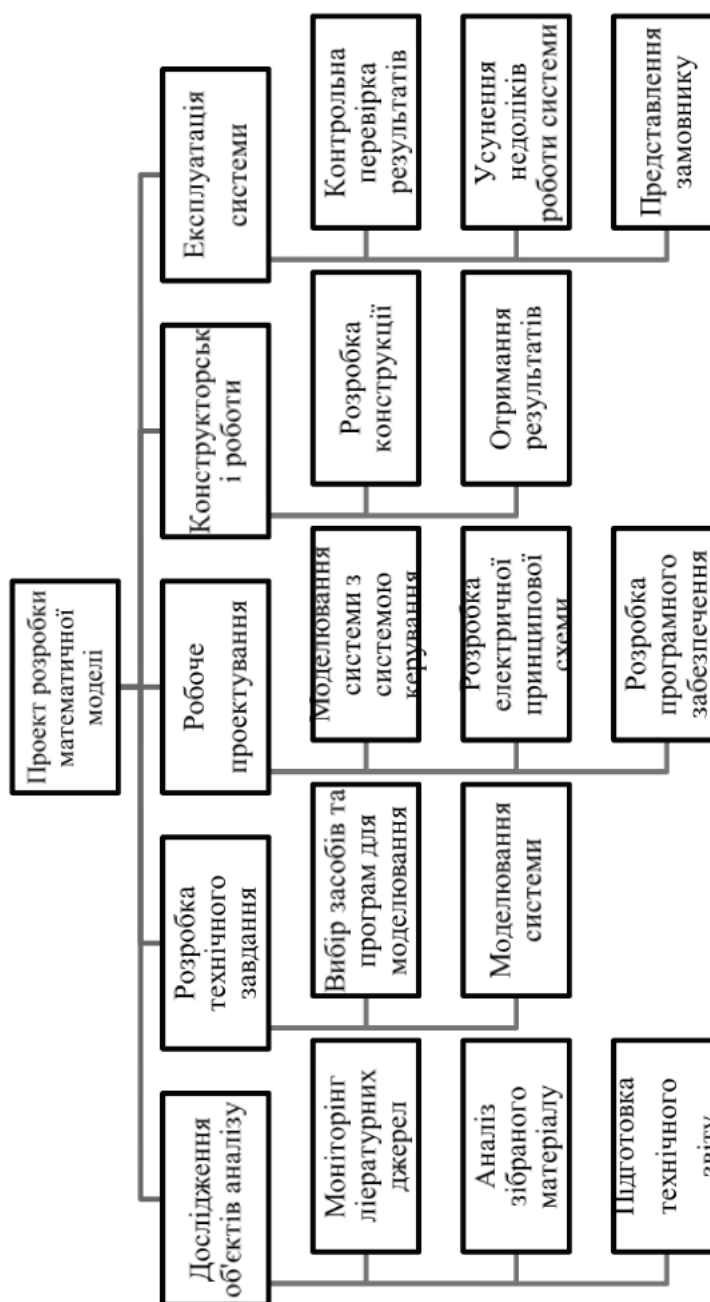


Рисунок 4.1 - Структура WBS для даного проекту

3) останнім рівнем OBS-структури є відповідальні особи виконавців. Це не обов'язково повинні бути керівники, а ті співробітники, яким доручено безпосередньо організувати і відповідати перед виконавцем за виконання конкретного елемента WBS-структури;

4) на етапі планування, коли розробляють OBS-структуру проекту, дуже часто невідомо, які конкретні організації та їхні відповідальні особи будуть залучені до проекту. Відповідь на це запитання буде отримана тільки після проведення відповідних тендерів на виконання робіт. Тому попередньо в OBS-структуру вводять умовні позначення виконавців та їх відповідальних осіб, які потім змінюють на конкретні дійсні назви та прізвища.

Структура OBS визначається структурою проектної організації, має вигляд, зображений на рисунку 4.2.

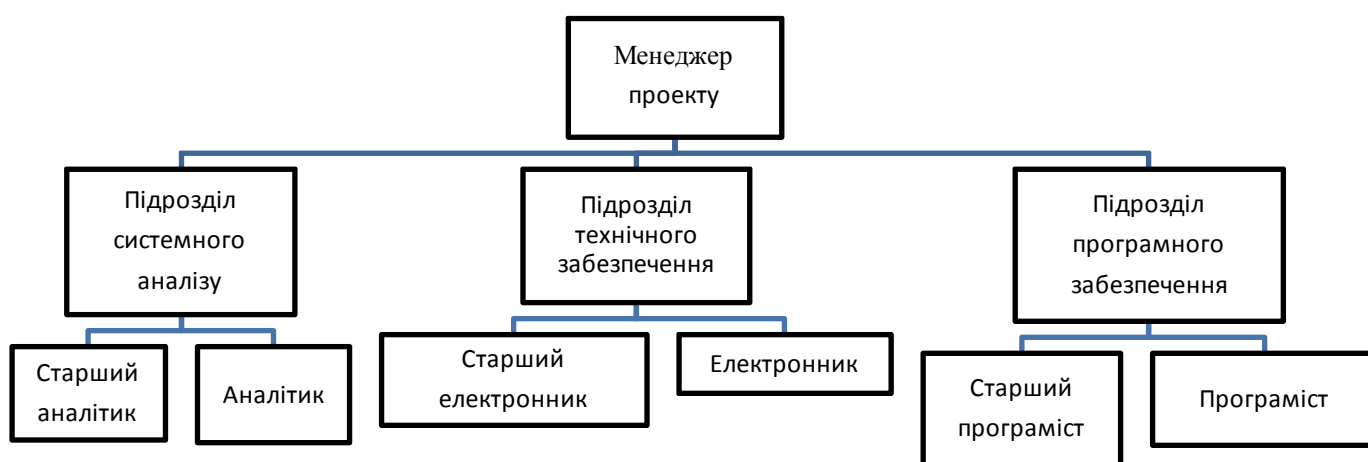


Рисунок 4.2 - Структура OBS для даного проекту

4.4 Структура затрат проекту (CBS)

CBS (Cost Breakdown Structure) будується в результаті декомпозиції загальних витрат на проект.

CBS утворюється за алгоритмом, аналогічним алгоритму створення WBS і OBS. Перший рівень — це всі витрати на проект. Другий рівень — основні елементи CBS: матеріали, вузли, комплектуючі; витрати на утримання устаткування; трудові витрати; інші витрати [10].

Третій рівень — подальша розбивка. Для трудових витрат це будуть: витрати на добір і навчання; витрати на оплату праці з поставки і монтажу устаткування; витрати на оплату праці з програмного забезпечення.

Четвертий рівень — подальша розбивка, наприклад, для оплати праці з програмного забезпечення: оплата праці програмістів; оплата праці системних аналітиків; оплата праці операторів.

Ця структура дає змогу збирати інформацію про затрати, аналізувати й готувати звіти по затратах будь-якого підрозділу або елементу робіт.

Таким чином, проведена за всіма напрямками структуризація проекту формує необхідну інформацію для подальшого планування і контролю його строків, ресурсів і затрат.

Структура CBS проекту наведена на рисунку 4.3.

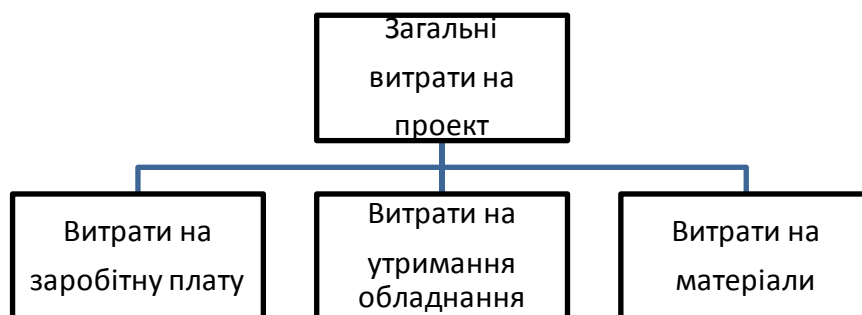


Рисунок 4.3 - Структура CBS проекту

4.5 Матриця відповідальності

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

Матриця відповідальності — пов'язує пакети робіт з організаціями-виконавцями. Використовується для контролю відповідності розподілу ролей цілям проекту. На верхньому рівні розподіляються ролі та відповідальність по елементах ІСР. На нижньому – по операціях проекту.

Матриця відповідальності даного проекту приведена у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Матриця відповідальності

Виконавці	Вивчення теоретичних матеріалів	Аналіз зібраного матеріалу	Підготовка технічного звіту	Вибір засобів та програм для моделювання системи стабілізації	Моделювання системи	Вибір алгоритмів управління для подальшого дослідження	Розрахунок системи керування	Синтез моделі системи керування	Моделювання системи з системою керування	Розробка електричної принципової схеми	Розробка програмного	Розробка конструкції	Отримання результатів	Контрольна перевірка результатів	Усунення недоліків роботи систематизація моделі	Представлення замовнику.
Менеджер			р											р	р	р
Старший аналітик	р	р	s	р		р		р								
Аналітик	+	+	+	+												
Старший електронік					р		р	+	р	р	р	р	s			
Електронік										+						
Інженер - конструктор												+				
Старший програміст					+	+	+		+		р		р			
Програміст											+		+			+

р - первинна відповідальність

s - вторинна відповідальність

+ - виконавець

4.6. Система кодування проекту

Система кодування дозволяє структурувати проект, встановити взаємовідносини WBS та OBS. У кодуванні використовуються багатозначні коди. Структуру коду можна ввести за допомогою наступної форми наведеної на рисунку 4.4: На рисунку 4.5 наведено кодування WBS (рис.4.5 а) та OBS (рис. 4.5 б) структур дослідженого проекту [10].

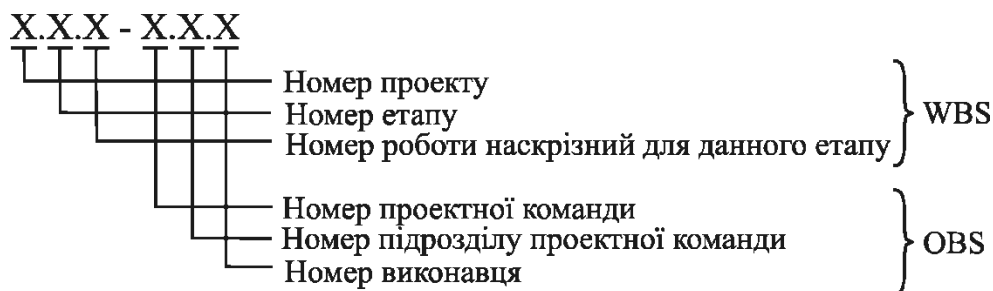


Рисунок 4.4 – Система кодування проекту

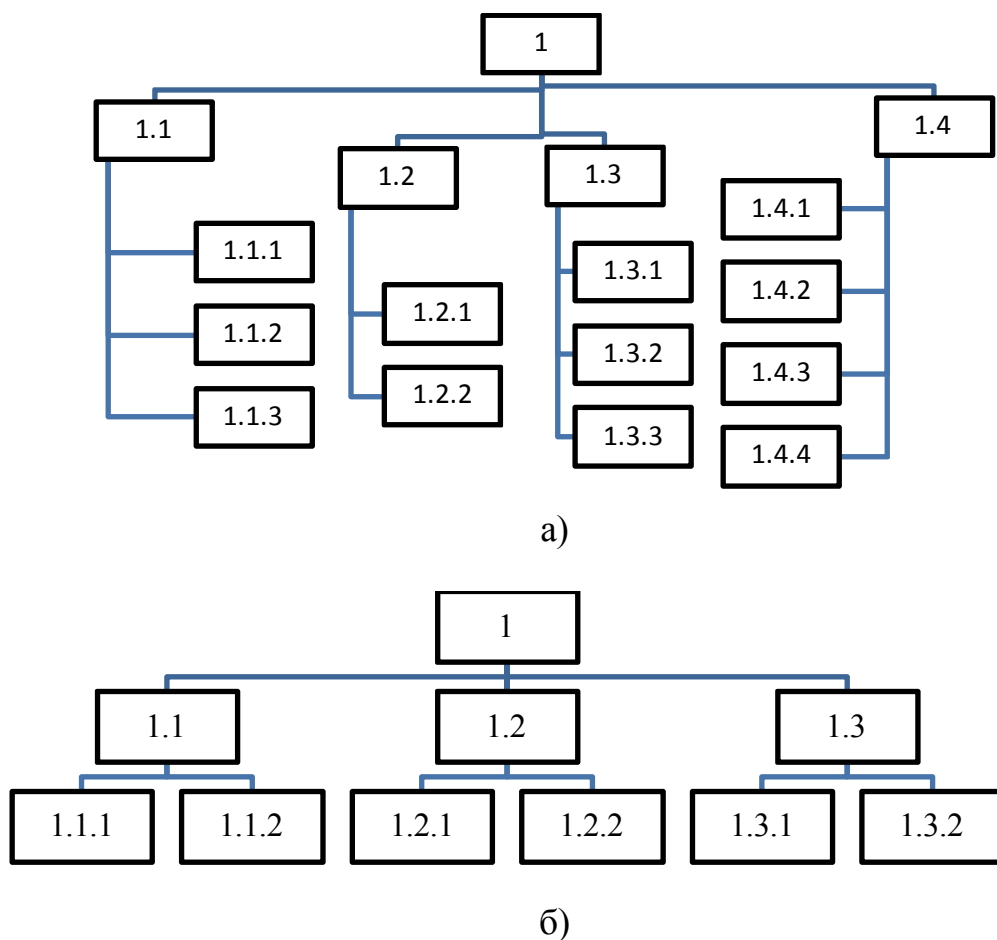


Рисунок 4.5 – Структура кодування у даному проекті: а) WBS структури;

б) OBS структури

4.7 CTR - каталог

Після створення системи кодування потрібно зробити словник, який визначає елементи й облік затрат та гарантує розуміння усім залученим до проекту зміст і значення елементів WBS та OBS [10]. CTR - каталог наведений у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. - CTR – каталог

№	Код роботи	Зміст роботи	Затрати, грн	Тривалість, дні	Необхідні ресурси
1	1.1.1	Знаходження, вивчення теоретичних матеріалів з літературних джерел.	800	2	Аналітики 2 особи
2	1.1.2	Аналіз зібраного матеріалу, обґрунтування актуальності питання.	400	2	Аналітики 2 особи
3	1.1.3	Підготовка технічного звіту	400	2	Менеджер Аналітики 2 особи
4	1.2.1	Вибір засобів та програм для моделювання трифазного інвертора напруги	600	2	Аналітики 2 особи
5	1.2.2	Моделювання системи	1500	4	Старший електронник 1 особа Старший програміст 1 особа
9	1.3.1	Розробка електричної принципової схеми	1200	3	Електроніки 2 особи ПК 1 шт
10	1.3.2	Розробка програмного забезпечення	2000	3	Програмісти 2 особи ПК 2 шт
11	1.3.3	Розробка конструкції	3000	3	Електронік 1 особа Інженер – конструктор 1 особа
12	1.4.1	Отримання результатів	2000	2	Старший електронник 1 особа Програмісти 2 особи
13	1.4.2	Контрольна перевірка результатів	600	2	Менеджер 1 особа ПК 1 шт
14	1.4.3	Усунення недоліків роботи системи	500	2	Менеджер 1 особа ПК 1 шт
15	1.4.4	Представлення замовнику.	500	2	Менеджер 1 особа Програміст 1 особа

4.8 Сіткове планування

Сіткове планування - це графічне подання робіт проекту, що відображає їх послідовність та взаємозв'язок. Розглянемо сіткове планування на прикладі стрілчатого графіку.

Сіткове планування передбачає спрощення ситуаційних проблем, що не вступає у протиріччя з методологією вироблення управлінських рішень, а є одним із найважливіших її принципів. СПУ передбачає реалізацію таких положень:

- застосування ситуаційного підходу до процесів управління;
- створення сіткової моделі й сіткового графіку;
- визначення параметрів: подій, робіт і шляхів сіткових графіків;
- запровадження лінійного графіка виконання робіт і графіка зайнятості виконавців;
- визначення критеріїв оптимізації й обмежень у плануванні;

застосування методів оптимізації сіткових моделей.

Процес складення сіткових графіків здійснюється у такій послідовності:

- розробка вихідного варіанта сіткового графіка виконання робіт;
- розрахунок параметрів подій і робіт сіткового графіка;
- визначення першого варіанта календарного плану виконання робіт;
- проведення аналізу оптимальності вихідного варіанта плану;
- проведення оптимізації першого варіанта плану виконання робіт;
- розрахунок вартісної оцінки варіантів оптимізованого плану.

Розробка вихідного варіанта сіткового графіка виконання робіт є одним із найвідповідальніших моментів у сітковому плануванні й управлінні [17].

На рисунку 4.6 наведено сітковий план для даного проекту.

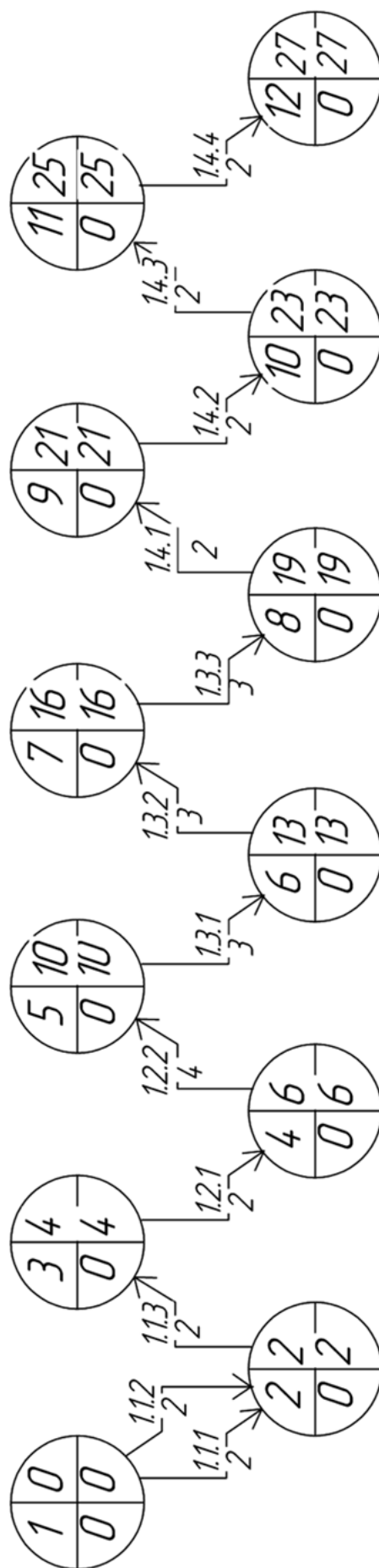


Рисунок 4.6 Сітковий план для даного проекту

4.9 Розрахунок тривалості проекту

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.

Оцінка строків проекту може бути зроблена за наступною методикою.

1. Визначення 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.

2. Розрахунок математичного очікування тривалістю i -ї роботи за допомогою формули:

$$t_i = \frac{a_i + 4 \cdot m_i + b_i}{6} . \quad (4.1)$$

3. Розрахунок дисперсії тривалістю i -ї роботи за допомогою формули:

$$\sigma^2_i = \left(\frac{b_i - a_i}{6} \right)^2 . \quad (4.2)$$

4. Математичне очікування проекту визначається за допомогою формули:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i , \quad (4.3)$$

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

5. Стандартне відхилення терміну виконання проекту визначається за допомогою формули:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2_i} . \quad (4.4)$$

6. Задаємо ймовірність виконання проекту $F = 0.9$.

7. Розрахуємо величину

$$\varphi = F - 0.5 = 0.9 - 0.5 = 0.4 . \quad (4.5)$$

8. З таблиці нормального розподілу (Додаток А) $\varphi(z)$ визначаємо значення $z = 1.29$.

9. Розрахуємо необхідний термін виконання проекту, який необхідно прийняти для того, щоб не зірвати строки виконання з ймовірністю 90% за допомогою формули:

$$\hat{O} = z \cdot \sigma + t , \quad (4.6)$$

10. Результати обчислення зведені у таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 - Розрахунок тривалості проекту з урахуванням запасів часу

Код роботи	a_i	m_i	b_i	σ_i^2	t_i
1.1.1	1	2	5	0,67	2,17
1.1.2	1	2	5	0,67	2,17
1.1.3	1	2	5	0,67	2,17
1.2.1	1	2	5	0,67	2,17
1.2.2	2	4	8	1	4,33
1.3.1	2	3	6	0,67	3,33
1.3.2	2	3	6	0,67	3,33
1.3.3	2	3	6	0,67	3,33
1.4.1	1	2	5	0,67	2,17
1.4.2	1	2	5	0,67	2,17
1.4.3	1	2	5	0,67	2,17
1.4.4	1	2	5	0,67	2,17
				σ	t
				2,89	31,68

Термін проекту виконання даного проекту складає:

$$T = 1,29 \cdot 2,89 + 31,68 = 35,4 \text{ діб} \quad (4.7)$$

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників цеху виготовлення та тестування інверторів напруги

До небезпечних чинників в цеху відносяться: незахищені рухомі елементи (приводні і передавальні механізми, ріжучі інструменти (фреза), пристосування, що переміщуються); відлітаючі частинки при обробці матеріалу і інструменту; електричний струм в обладнанні; підвищена температура оброблюваних матеріалів. Небезпека існує безперервно під час тестового запуску. Наслідки можливої дії цієї небезпеки на обслуговуючий персонал - механічні травми, при отриманні яких можлива часткова або повна втрата працездатності, смертельний результат.

Основним шкідливими чинниками є шум, що видається при роботі рухомих частин охолоджуючого обладнання і вібрації. Наявність струмопровідного пилу в цеху (шкідливий чинник) підвищує небезпеку поразки людини електричним струмом (небезпечний чинник).

Надають негативну дію також психофізичні чинники, такі як перенапруження зорових і слухових аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження, що приводять до стомлення, що розвивається, і зниження працездатності.

5.1.1 Небезпека поразки електричним струмом

Одним з найнебезпечніших чинників в цеху є електричний струм. Електропривод, струмоведучі провідники, корпус інвертора має велику потенційну небезпеку, оскільки в процесі експлуатації або проведення профілактичних робіт чоловік може торкнутися частин, що знаходяться під

напругою в результаті пошкодження (пробою) ізоляції. Реакція людини на електричний струм виникає лише при протіканні останньої через тіло людини.

Проходячи через організм, електричний струм надає термічне (опіки, нагрів кровоносних судин, електрометалізація), електролітичне (розкладання крові), біологічне (судоми, порушення діяльності органів дихання і кровообігу) дії.

Небезпека дотику людини до токоведущим частин інвертора визначається величиною струму, що протікає через тіло оператора.

Як показує аналіз випадків електротравматизму, двополюсне торкання зустрічається відносно рідше, ніж однофазний дотик в ізольованих і глухозаземлених мережах.

При двофазному дотику чоловік зазвичай торкається однією рукою однієї фази, іншою рукою – іншої фази. Струм проходить шляхом рука-рука. Ця петля струму вельми небезпечна, оскільки його значна частина проходить через грудну клітку і серце. Небезпека двофазного дотику полягає також в тому, що до тіла людини прикладається найбільша в даній мережі напруга – лінійне. Однофазний дотик менш небезпечно, оскільки струм, що проходить через робочого, обмежується впливом багатьох чинників (опір ізоляції, підлоги, взуття і так далі).

Як розрахунок визначимо величину струму, що проходить через оператора при однофазному і двофазному дотику, залежно від величини опору ізоляції устаткування.

Струм, що проходить через людину при двофазному дотику, визначається по формулі:

$$I_{np} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{R_{ч} + r_{из}}, \quad (5.1)$$

де $\sqrt{3}U_{\phi}$ - лінійна напруга ($U_{\phi} = 220 \text{ В}$);

$R_{ч}$ – опір тіла людини (приймаємо $R_{ч} = 1000 \text{ Ом}$);

$r_{из}$ – опір ізоляції (приймаємо $r_{1из} = 30 \text{ кОм}$, $r_{2из} = 40 \text{ кОм}$)

$r_{из} = 60 \text{ кОм}$)

Отже

$$I_{np1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{1000 + 30 \cdot 10^3} \approx 12,3 \text{ мА}$$

$$I_{np2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{1000 + 40 \cdot 10^3} \approx 9,3 \text{ мА}$$

$$I_{np3} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{1000 + 60 \cdot 10^3} \approx 6,2 \text{ мА}$$

Порівняємо розрахункові значення струмів дотику зі встановленими: безпечний струм – 10 мА, пороговий невідпускаючий струм – 15 мА, смертельноопасное значення струму (фибрилляционный) – 100 мА.

Таким чином, струм $I_{np3} = 6,2 \text{ мА}$ при опорі ізоляції 60 кОм є менш небезпечним для оператора.

Тепер розрахуємо величину струму, що протікає через тіло людини при однофазному дотику по формулі:

$$I_{np} = \frac{3U_{\phi}}{3R_{\phi} + r_{из}}$$

$$I_{np1} = \frac{3 \cdot 220}{3 \cdot 1000 + 30 \cdot 10^3} = 20 \text{ мА}$$

$$I_{np2} = \frac{3 \cdot 220}{3 \cdot 1000 + 40 \cdot 10^3} \approx 15,3 \text{ мА}$$

$$I_{np3} = \frac{3 \cdot 220}{3 \cdot 1000 + 60 \cdot 10^3} \approx 10,4 \text{ мА}$$

В цьому випадку значення струму дотику $I_{np3} = 10,4 \text{ мА}$ є менш небезпечним при опорі ізоляції 60 кОм .

З виконаних розрахунків слід зробити висновок: опір ізоляції устаткування, рівний 60 кОм , - найбільш оптимальний варіант, оскільки значення струмів при однофазному і двофазному дотику менш небезпечні для людини.

5.1.2 Виробничий шум

Під виробничим шумом в цеху розуміється шум на робочих місцях, який виникає в результаті роботи інвертора, а також допоміжного устаткування (вентиляційних установок, кондиціонерів).

Залежно від рівня і характеру шуму, його тривалості, а також від індивідуальних особливостей людини, шум може надавати на того, що працює різну дію.

Невеликий шум (при рівні 50—60 дБ) створює значне навантаження на нервову систему людини, надаючи на нього психологічну дію. Слабкий шум різно впливає на людей. Причиною цього можуть бути: вік, стан здоров'я, вид праці, фізичний і душевний стан людини у момент дії шуму і інші чинники. Ступінь шкідливості якого-небудь шуму залежить також від того, наскільки він відрізняється від звичного шуму.

Під впливом шуму, що перевищує 85—90 дБ, в першу чергу знижується слухова чутливість на високих частотах.

Сильний шум шкідливо відбивається на здоров'ї і працездатності людей. Людина, працюючи при шумі, звикає до нього, але тривалу його дію викликає загальне стомлення, може привести до погіршення слуху, а іноді і до глухоти, порушується процес травлення, відбуваються зміни об'єму внутрішніх органів.

Впливаючи на кору головного мозку, шум надає дратівлива дія, прискорює процес стомлення, ослабляє увагу і уповільнює психічні реакції.

Ці шкідливі наслідки шуму виражені тим більше, чим сильніше шум і чим продовжительнее його дія.

Таким чином, цей шкідливий чинник викликає небажану реакцію всього організму людини. Патологічні зміни, що виникли під впливом шуму, називаються шумовою хворобою.

Звукові коливання можуть сприйматися не тільки вухом, але і безпосередньо через кістки черепа (так звана кісткова провідність). Рівень шуму, передаваного цим шляхом, на 20—30 дБ менше рівня, що сприймається вухом.

При дії шуму дуже високих рівнів (більше 145 дБ) можливий розрив барабанної перетинки [11].

Як загальна характеристика шуму на робочих місцях застосовується оцінка рівня звуку в дБ, що є середньою величиною частотних характеристик звукового тиску.

У таблиці 5.1 приведені допустимі рівні шуму на робочих місцях у виробничих приміщеннях і на території підприємства.

Таблиця 5.1 – Допустимі спектри рівнів звукового тиску

Рівень звукового тиску в дБ в октавних смугах з середнегеометричеськими частотами, Гц								Рівень звуку і еквівалентний рівень звуку, дБА
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
95	87	82	78	75	73	71	69	80

Шум вважається допустимим, якщо вимірювані рівні звукового тиску у всіх октавних смугах частот нормованого діапазону (63—8000 Гц) будуть нижчі, ніж значення, які визначаються граничним спектром.

5.1.3 Вібрація

Причиною збудження вібрацій є ті, що виникають при роботі обладнання неврівноважені силові дії. Їх джерело – індуктивні елементи, вентилятори

охолодження.

Високочастотна вібрація може передаватися через опорні поверхні на тіло людини і через руки оператора.

Наслідку від дії цього шкідливого чинника - порушення фізіологічного і функціонального станів людини. Стійкі шкідливі фізіологічні зміни - це вібраційна хвороба, симптоми якої виявляються у вигляді головного болю, оніміння пальців рук, болю в кистях і передпліччі, виникають судоми, підвищується чутливість до охолодження, з'являється безсоння. При вібраційній хворобі виникають патологічні зміни спинного мозку, серцево-судинної системи, кісткових тканин і суглобів, змінюється капілярний кровообіг.

Функціональні зміни, пов'язані з дією вібрації на оператора — погіршення зору, зміна реакції вестибулярного апарату, виникнення галюцинацій, швидка стомлюваність. Особливо шкідливі вібрації з частотами, близькими до частот власних коливань тіла людини, більшість яких знаходяться у межах 6...30 Гц.

Норми вібрації представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Допустима тривалість вібраційного впливу при перевищенні нормативних значень

Перевищення нормативів вібрацій для робочих місць, не більш		Допустима тривалість вібраційного впливу при роботі за верстатом, не більш, <i>мин.</i>
<i>дБ</i>	<i>раз</i>	
0	1,0	480
3	1,4	120
6	2,0	60
9	2,8	30
12	4,0	15

Гігієнічні норми вібрації, які впливають на людину у виробничих умовах, встановлені для тривалості 8 годин. При впливі вібрації, яка перевищує встановлені нормативи, тривалість її дії на людину слід зменшити.

Тривала дія вібрації з середнегеометричeskими значеннями частот 16-250 Гц є особливо небезпечним.

5.1.4 Виробничий пил

Виробничий пил достатньо поширений небезпечний і шкідливий виробничий чинник в цеху, джерелом якої є обладнання для обробки корпусних елементів інвертору напруги.

Пил може надавати на людину фиброгенне дію, при якій в легенях відбувається розростання сполучних тканин, яке порушує нормальну будову і функцію органу. Шкідливість виробничого пилу обумовлена її здатністю викликати професійні захворювання легенів, в першу чергу пневмоконіозу. Надаючи дратівливу дію, пил може викликати пилові бронхіти, пневмонії, астматичні риніти, бронхіальну астму, понизити захисні властивості організму. Під впливом пилу розвиваються кон'юктивіти, ураження шкіри.

5.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних виробничих чинників

Забезпечення безпечної експлуатації електроустановок (в даному випадку інвертору напруги) досягається шляхом обов'язкового виконання правил технічної експлуатації електроустановок споживачів, правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів. При проведенні ремонтних робіт у верстаті, повинні виконуватися організаційні і технічні заходи.

До організаційних заходів відносяться:

- допуск до роботи;
- нагляд під час роботи;
- оформлення перерви під час роботи;
- оформлення роботи по наряду-допуску.

До технічних заходів при виконанні робіт із зняттям напруги на токоведущих частинах і поблизу них відносяться:

- перевірка відсутності напруги на токоведущих частинах;
- накладення заземлителя;
- вивішування попереджувальних і приписуючих плакатів, огорожа робочих місць і токоведущих частин, які залишилися під напругою.

Технічним засобом безпечної експлуатації інвертору є захисне заземлення – навмисне електричне з'єднання із землею металевих нетоковедущих частин, які можуть опинитися під напругою унаслідок замикання на корпус і по інших причинах.

До роботи по тестуванню та налагодженню інвертору допускаються робочі, минулі технічні навчання і ознайомлені з обслуговуванням, управлінням і наладкою даного обладнання, з вивченням правил техніки безпеки і виробничої санітарії, з подальшою перевіркою знань.

До ізолюючих електрозахисних засобів, призначених для ізоляції людини від частин корпусу, які знаходяться під напругою, а також від землі, відносяться: ізолюючі і вимірювальні штанги, штанги для накладення тимчасових переносних заземлень; ізолюючі і електровимірювання кліщі; покажчики напруги; ізольовані ручки монтерського інструменту; діелектричні рукавиці, боти або калоші; гумові килимки; ізолюючі накладки [16].

Зниження шуму, що створюється на робочому місці, а також шуму проникаючого ззовні, є дуже важливим завданням. Це можна забезпечити застосуванням пружних прокладок між підставою верстата, приладу і опорною поверхнею. Як прокладки використовуються гума, повсть, пробка, різній конструкції амортизатори.

Не менш важливим для зниження шуму в процесі експлуатації є питання правильного і своєчасного регулювання, змазування і заміни механічних вузлів шумлячого устаткування. Зниження рівня шуму може бути також досягнуте збільшенням звукоізоляції конструкцій, що захищають, ущільненням по периметру притворів вікон, дверей.

Раціональне планування приміщення, розміщення устаткування є важливим чинником, що дозволяє понизити шум.

Таким чином, для зниження шуму, що створюється на робочих місцях внутрішніми джерелами, а також шуму, проникаючого ззовні слідує:

- ослабити шум самих джерел (застосування екранів, звукоізолююючих кожухів);
- понизити ефект сумарної дії відбитих звукових хвиль (звукопоглинальні поверхні конструкцій);
- застосовувати раціональне розташування устаткування;
- використовувати архітектурно-планувальні і технологічні вирішення ізоляцій джерел шуму.

Для захисту робочих від шкідливої дії шуму застосовуються засоби індивідуального захисту (антифони, заглушки і ін.). Ефективність засобів індивідуального захисту може бути забезпечена їх правильним підбором залежно від рівнів і спектру шуму, а також контролем за умовами їх експлуатації.

Боротьба з шумом в джерелі його виникнення — найбільш дієвий спосіб боротьби з шумом. Створюються мал шумні механічні передачі, розробляються способи зниження шуму в підшипникових вузлах, вентиляторів.

Організаційно-технічні засоби захисту від шуму пов'язані з вивченням процесів шумостворення технологічного і інженерного устаткування, а також з розробкою досконаліших мал шумних конструкторських рішень, норм гранично допустимих рівнів шуму обладнання [11].

Зниження дії шкідливого чинника - вібрації може бути досягнуто застосуванням матеріалів з великим внутрішнім тертям. Велике значення має підвищення точності обробки і зниження шорсткості поверхонь, що труться. Для ослаблення вібрацій істотне значення має запобігання резонансним режимам роботи з метою виключення резонансу з частотою примушуючої сили.

Для обмеження і усунення шкідливої дії вібрації в цеху виготовлення інверторів необхідний: ретельний догляд за устаткуванням, своєчасна заміна

рухомих частин, що зношуються, труться, застосування вібропоглинаючих прокладок, використання різних типів глушників.

У комплексі заходів важлива роль відводиться розробці і впровадженню науково обгрунтованих режимів праці і відпочинку. Наприклад, сумарний час контакту з вібрацією не повинен перевищувати 2/3 тривалість робочої зміни; рекомендується встановлювати що 2 регламентуються перерви для активного відпочинку, проведення фізіопрофілактичних процедур, виробничої гімнастики по спеціальному комплексу.

В цілях профілактики несприятливої дії вібрації, що працюють повинні використовувати засоби індивідуального захисту: рукавиці або рукавички, спецвзуття.

Зниженню надходження в повітря робочої зони пилу сприяє хороша герметизація устаткування, своєчасний і якісний ремонт обладнання, наявність дистанційного керування, заміна небезпечних технологічних процесів і операцій – на менш небезпечні.

До санітарно-технічних заходів щодо усунення шкідливого впливу пилу відноситься: устаткування робочих місць місцевою витяжною вентиляцією або переносними місцевими відсмоктуваннями, укриття устаткування суцільними пиленепроникними кожухами з ефективною аспірацією повітря і ін. Нормами підприємства встановлено також щоденне вологе прибирання приміщення, де знаходяться верстати.

У комплексі профілактичних заходів важливе місце займають періодичні і попередні медичні огляди, дотримання правил особистої гігієни.

Коли технологічні, санітарно-технічні заходи не повністю виключають наявність виробничого пилу в повітряному середовищі, використовують засоби індивідуального захисту. До них відносяться респіратори, що фільтрують і ізолюють, захисні окуляри, спеціальний одяг.

5.3 Пожежна безпека в цеху

Пожежі представляють особливу небезпеку, оскільки зв'язані з великими матеріальними втратами. Пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин, в результаті окислення і від джерел спалаху. Горючими компонентами є будівельні матеріали для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист - це комплекс організаційних і технічних заходів, направлених на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його розповсюдження, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі [18].

Джерелами спалаху можуть бути пристрої електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри і дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

Для приміщень, де розміщені фрезерні верстати, встановлена категорія пожежної небезпеки В.

До засобів гасіння пожежі, призначених для локалізації невеликих спалахів, відносяться пожежні стовбури, внутрішні пожежні водопроводи, вогнегасники, сухий пісок, азбестові ковдри і тому подібне

Для швидкої ліквідації вогнищ спалаху використовуються вогнегасники типу ОХП-10 (вогнегасник хімічний пінний) і ОУ-5А (углекислотний вогнегасник), призначений для гасіння легкозаймистих і горючих рідин, твердих речовин, електроустановок, що знаходяться під напругою, цінних речей і матеріалів. Розташовуються вогнегасники в безпосередній близькості від верстата.

Для запобігання виникненню пожежі в приміщенні передбачена електрична пожежна сигналізація, що складається із сповіщаючих датчиків, встановлених в приміщенні цеху.

Організаційні заходи щодо пожежної безпеки проводять з метою забезпечення правильної експлуатації електроустановки і проведення протипожежного інструктажу серед оперативно-ремонтного персоналу [18].

Приміщення цеху більшою мірою забезпечує відносно чисту, суху і ізольовану площу для установки такого роду електроустаткування [16].

Приміщення для постійного перебування робочих комфортабельне, з повітрям, що кондиціонує [15].

Протипожежні вимоги до електроустановок:

- висота установки не менше 1,2 метра;
- два вимикачі при довжині приміщення більше 25 метрів [18].

Таким чином, розроблені заходи засновані на аналізі можливих небезпечних і шкідливих чинників при виробництві інверторів напруги дозволяють забезпечити безпечні умови роботи, усунути причини травматизму.

ВИСНОВКИ

В ході дослідження було розглянуто принцип роботи трифазного інвертору напруги, та проаналізовані перехідні процеси, які відбуваються під час його роботи.

Розроблена візуально-блочна модель інвертору напруги для програмного середовища Matlab. Це дозволило сформуванню елемент бібліотеки для подальшого користування.

Розробка візуально-блочної моделі дуже важлива для створення та поширення бібліотек. Це дозволяє налагодити комунікації в науково-технічному співтоваристві.

Проведена перевірка на адекватність, яка показала дуже високий процент схожості результатів на рівні усередненої моделі.

Головна перевага створеної моделі перед вже існуючими рішеннями, це прискорення моделювання в рази. Це дозволяє моделювати перетворювачі більш складної структури та в складі інших пристроїв.

В 4-му та 5-му розділі проведено економічні розрахунки, які показали доцільність розробки та розглянуті заходи з охорони праці при проектуванні виробу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. -М.: Высшая школа, 1982. - 496 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебное пособие. - Изд. 2-е испр. и доп. - Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2003. - 644 с.
3. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. Учеб. пособие для специальности "Промышленная электроника". - М.: "Высшая школа", 1974. - 430 с.
4. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч.2 / Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов, М.В. Панасенко, В.Я. Ромашко, В.С. Руденко. За ред. В.С. Руденка. - Харків: Фоліо, 2000. - 360 с.
5. О программе для моделирования систем автоматического управления SamSim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://samsim2002.chat.ru>
6. SimApp, Ordering Information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simapp.com/order-simapp.php>
7. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + SIMULINK 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. М.: СОЛОН-Пресс. – 2003. – 576с.
8. MathWorks Documentation Center, Solver Pane [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/simulink/gui/solver-pane.html>
9. Воронин А.В. Моделирование мехатронных систем: учебное пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 137 с.
10. Попова В.Д. Методичні вказівки до виконання економічної й організаційної частини дипломної роботи – Запоріжжя, 2005,-36с.
11. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448с., ил.

12. НАПБ Б.03.002-2007 Нормы определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
13. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
14. СНИП 11-4-79. Естественное и искусственное освещение.
15. СНиП 2.04.05-92. «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».
16. Правила устройства электроустановок.- «Госэнергонадзор», 2009г. 704с.
17. Конов А. А. Электрооборудование жилых зданий. – М.: Додека 21, 2003. –256 с.
18. СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы.

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
<u>Документация</u>							
A1			ЕС.М1.180311.00.00.00.00 Д1	Сінтез візуально-блочної моделі трифазного інвертору напруги Постановка завдання			
A1			ЕС.М1.18031100.00.00.00 Д2	Сінтез візуально-блочної моделі трифазного інвертору напруги Модель АІН з базових блоків			
A1			ЕС.М1.180311.00.00.00.00 Д3	Сінтез візуально-блочної моделі трифазного інвертору напруги Склад блоків трифазного АІН			
A1			ЕС.М1.180311.00.00.00.00 Д4	Сінтез візуально-блочної моделі трифазного інвертору напруги Завдання параметрів блоків			
A1			ЕС.М1.180311.00.00.00.00 Д5	Сінтез візуально-блочної моделі трифазного інвертору напруги Результати моделювання			
A1			ЕС.М1.180311.00.00.00.00 Д6	Сінтез візуально-блочної моделі трифазного інвертору напруги Візуально-блочна модель			
A1			ЕС.М1.180311.00.00.00.00 Д7	Сінтез візуально-блочної моделі трифазного інвертору напруги Економічні показники			
A1			ЕС.М1.180311.00.00.00.00 Д8	Сінтез візуально-блочної моделі трифазного інвертору напруги Охорона праці			
				ЕС.М1.180311.00.00.00.00			
Ізм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Лит.	Лист	Листов
	Разрад.	Баранов	Меруц	27.12.19			
Проб.	Критська			28.12.19	ІІ ЗНУ ЕЛ-18-1М		
Н.контр.	Туришев			28.12.19			
Утв.	Критська			28.01.20			

Копировал

Формат А4