

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка системи керування
перетворювачем напруги для
лабораторного компенсатора реактивної
потужності

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група ЕТ-21-1


Підпис

В.І. Загородний
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

К.Т.Н., доц. П.С. Майдан
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

К.Т.Н., ст. викл. С.І. Пундик
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

К.Т.Н., доц. В.С. Неймак
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Спеціалізація _____

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

2.06.2025

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Загородний Володимир Ігорович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка системи керування перетворювачем напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності

керівник роботи Майдан Павло Сергійович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи енергетичні характеристики силового обладнання та мережі

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень систем керування силовими напівпровідниковими перетворювачами. 2. Розроблення системи керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність. Загальні висновки. Перелік джерел посилань.

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

1. Системи керування перетворювача напруги (ДО, А1). 2. Модель перетворювача напруги (С2, А1). 3-5 Дослідження роботи системи керування перетворювачем напруги (РР, 3А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

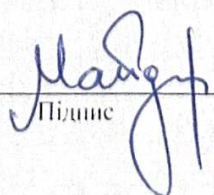
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень систем керування силовими напівпровідниковими перетворювачами		
2. Розроблення системи керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності		
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент


Підпис

В.І. Загородний
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

П.С. Майдан
Ініціали, прізвище

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

АНОТАЦІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Загородний Володимир Ігорович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

Тема роботи Розробка системи керування перетворювачем напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності

1. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____

2. Обсяг бакалаврської роботи: креслень 5 арк, сторінок записки 57

3. Характеристика розділів пояснювальної записки:

В першому розділі виконано огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень систем керування силовими напівпровідниковими перетворювачами. Розглянуто особливості використання систем імпульсно-фазового керування перетворювачами сили струму та систем керування перетворювачами рівня напруги та ШІМ. В другому розділі розроблено систему керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності, спочатку було розроблено алгоритм керування перетворювачем рівня напруги, потім і саму систему керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності. В третьому розділі розроблено систему керування лабораторним перетворювачем напруги, запропоновані алгоритми керування ключами і виконана програмна реалізація на моделі в програмному середовищі MATLAB/Simulink, а потім і в мікроконтролері керування на лабораторному стенді.

Підпис студента _____

" 2 " 06 2025 р.

Р І Ш Е Н Н Я Е К ЗА М Е Н А Ц І Й Н О Ї К О М І С І Ї:

Протокол 6 від 26 06 2025 р.

Оцінка роботи ЕК 4,0/5

Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

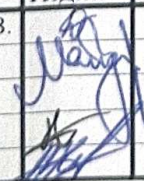
Підпис

Антон Буряк
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

" 26 " 06 20 25 р.

ЗМІСТ

	с.
Вступ	5
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРІОВАЧАМИ	6
1.1 Використання систем імпульсно-фазового керування перетворювачами сили струму	7
1.2 Використання систем керування перетворювачами рівня напруги та ШІМ	12
Висновки до першого розділу	15
2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЕРЕТВОРІОВАЧЕМ РІВНЯ НАПРУГИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	16
2.1 Розроблення алгоритму керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності	16
2.2 Розроблення системи керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності	23
Висновки до другого розділу	29
3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ	30
3.1 Розроблення моделі в середовищі Simulink	30
3.2 Дослідження роботи системи керування перетворювачем напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності	43
Висновки до третього розділу	52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	54
ДОДАТКИ	57

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>			
Зм.	Арк.	Нодокум.	Підпис	Дата	Розробка системи керування перетворювачем напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав	Загородний В.					у	4	57
Перевір.	Майдан П.С.				ХНУ гр. ЕТ-21-1			
Н.контр.	Пувдик С.І.							
Затвер.	Неймак В.С.							

ВСТУП

Розвиток технології в області використання систем передачі електроенергії відбувається в напрямку підвищення їх надійності, динамічної стійкості та керованості. Крім того повинне бути забезпечене надійне та якісне електропостачання споживачів. Одним із способів досягнення встановлених цілей є використання так званих керованих ліній електропередач (або FACTS). Перспективним напрямком розвитку пристроїв FACTS є використання спеціалізованих перетворювачів напруги, що використовуються в якості компенсаторів реактивної потужності, інверторів або випрямлячів на підстанціях постійного струму [1-3].

Даній актуальній задачі і відповідає і кваліфікаційна робота, спрямована на створення системи керування (СК) для лабораторного перетворювача рівня напруги, який буде використовуватися з метою моделювання складних процесів в лініях постійної або лініях змінної сили струму із керуванням компенсацією реактивної потужності.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Загально відомо, що електроенергетична система (ЕЕС) – це єдиний великий технологічний комплекс систем генерації та транспортування і розподілення електричної енергії. Керування даним комплексом виконується через диспетчерські управління та спеціальні служби, а також інтегрована в систему спеціальна автоматика, яка відповідає за стійкість і захист системи від виникання КЗ в мережі. У нормальних режимах роботи це технологічна автоматика, а в аварійних – релейний захист (РЗА) і протиаварійна автоматика. У двадцятому столітті основним способом підвищення ефективності ЕЕС було освоєння обладнання більшої потужності та впровадження мереж більш високих рівнів напруги. Еволюція СК гальмувалася через відсутність надійних і потужних силових перетворювачів.

Однак у другій половині двадцятого століття з'явилися швидкодіючі високонадійні силові пристрої керування режимом роботи засновані на використанні керованих силових напівпровідникових перетворювачів (СНП), почала зростати здатність до відстеження режимів роботи ЕЕС за рахунок постійного використання телевимірювань і спеціалізованих пристроїв передачі отриманих даних, що в цілому різко підвищило надійність всієї ЕЕС [4-7].

Коли отримуєте дані про параметри режиму роботи, диспетчер або РЗА можуть створити сигнал керування на зміну того чи іншого параметра ЕЕС. А для того щоб змінити будь-який з параметрів, потрібне встановити обладнання, яке може безпосередньо впливати на роботу силових ланцюгів. До появи СНП єдиними способами змінити параметри або цілу конфігурацію схеми були пристрої розроблені на електромеханічній базі, такі як: роз'єднувачі, силові вимикачі, РПН, короткозамикачі тощо. Всі перераховані вище пристрої мають досить малу швидкість комутації і не можуть забезпечити плавне регулювання

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

режиму роботи ЕЕС [4-7].

Ситуація змінилася із появою СНП у другій половині двадцятого століття. Пристрої зі швидкістю комутації від одиниць до декількох десятків мікросекунд, здатні комутувати силові ланцюги, дозволили створювати апарати, здатні плавно керувати потужністю, що протікає по них.

Також за рахунок достатньо високої швидкості комутації дані пристрої знайшли використання в випрямних та інверторних підстанціях, ЧП, компенсаторах реактивної потужності тощо [4-7].

1.1 Використання систем імпульсно-фазового керування перетворювачами сили струму

СНП в даний момент велика кількість, але в бакалаврській роботі розглянемо лише ті схеми, що призначені для використання в трифазній мережі. Найпоширенішою схемою є саме трифазна мостова схема представлена на рисунку 1.1.

У такому випадку в якості силових ключів застосовують тиристори, проте це можуть бути будь-які силові ключі, але необхідно пам'ятати, що від того які ключі використовують розробники, будуть залежати властивості схеми та весь принцип роботи СК. В залежності від властивостей джерел живлення і схеми підключення вхідних/вихідних ланцюгів перетворювачі класифікують на:

- перетворювачі рівня напруги (ПН), пов'язані з джерелами напруги або включені в схеми, в яких стала часу зміни рівня напруги значно перевищує період частоти напруги перетворювача;

- перетворювачі сили струму (ПС), пов'язані з джерелами сили струму або включені в схеми, в яких стала часу зміни сили струму значно вище за період частоти напруги перетворювача [4-7].

ПН можуть виконуватися тільки з використанням повністю керованих вентилів, ПС же може бути виконано і на діодах, і на повністю керованих

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

вентиліях, і на одноопераційних тиристорах.

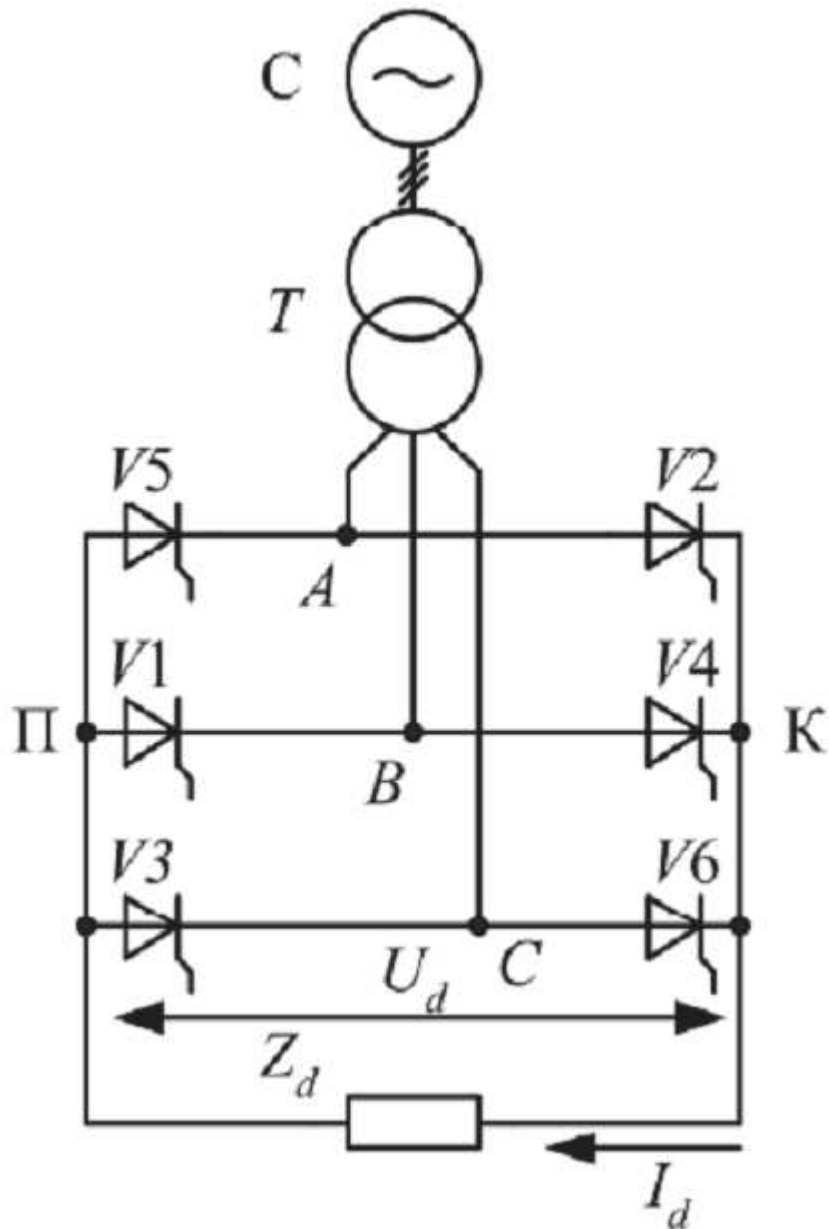


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд трифазної мостової схеми [4-7]

Обидва типи перетворювачів можуть використовуватись як в автономному режимі в трифазній мережі, без власних джерел живлення, так і спільно з мережею, що має загальні джерела живлення.

ПН керуються за допомогою використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), в свою чергу ПС зазвичай виконуються із системою імпульсно-фазового керування тиристорами (СІФК).

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

8

Можливе використання різних способів керування тиристорами, що, в свою чергу, реалізують різні способи керування в перетворювачі: симетричне або несиметричне, СІФК, різні способи ШІМ.

У ПС, поширених в електроенергетиці, використовують саме симетричне імпульсно-фазове керування або система ІФК, при якому кути запізнювання включення для всіх змонтованих тиристорів однакові.

СІФК – призначена для формування сил струмів керування тиристорами з необхідним рівнем амплітуди, заданої форми і тривалості в моменти часу, що визначаються керуючим впливом, згідно із заданим сигналом керування.

Розглянемо в якості прикладу, існуючу СІФК універсального стенду, яка по своїй побудові є аналоговою, багатоканальною, побудованою за вертикальним принципом. Параметри СІФК наведено в табличному вигляді.

Таблиця 1.1 – Характеристики СІФК універсального стенду [4-7]

№	Параметр стенду	Значення
1	Закон регулювання	arccos
2	Діапазон напруги керування, В	мінус 12 до +12
3	Діапазон напруги зміщення, В	мінус 6 до +6
4	Ширина діапазону регулювання, град. ел.	від 120 до 140
5	Міжфазна асиметрія, не вище, град. ел.	5
6	Діапазон амплітуди імпульсу на світлодіоді оптрону, В	від 0,9 до 1,2
7	Діапазон амплітуди імпульсу в контрольному гнізді, В	від 2,4 до 3,5
8	Тривалість короткого імпульсу, град. ел.	від 10 до 15
9	Тривалість довгого імпульсу, град. ел.	від 110 до 120
10	Кількість каналів	6

На рисунку 1.3 наведено принципову та функціональну схеми каналу керування СІФУ (в якості прикладу використано канал 6). Також на рисунку 1.3, в-і, для наочності, показані форми рівнів напруги і сили струмів у контрольних

виконаного на мікросхемі *DD2*. Тривалість імпульсу керування, що формується *DD2*, визначається постійною часу *RC* ланцюга, підключеного до відповідних виводів *R* і *C* мікросхеми [4-7].

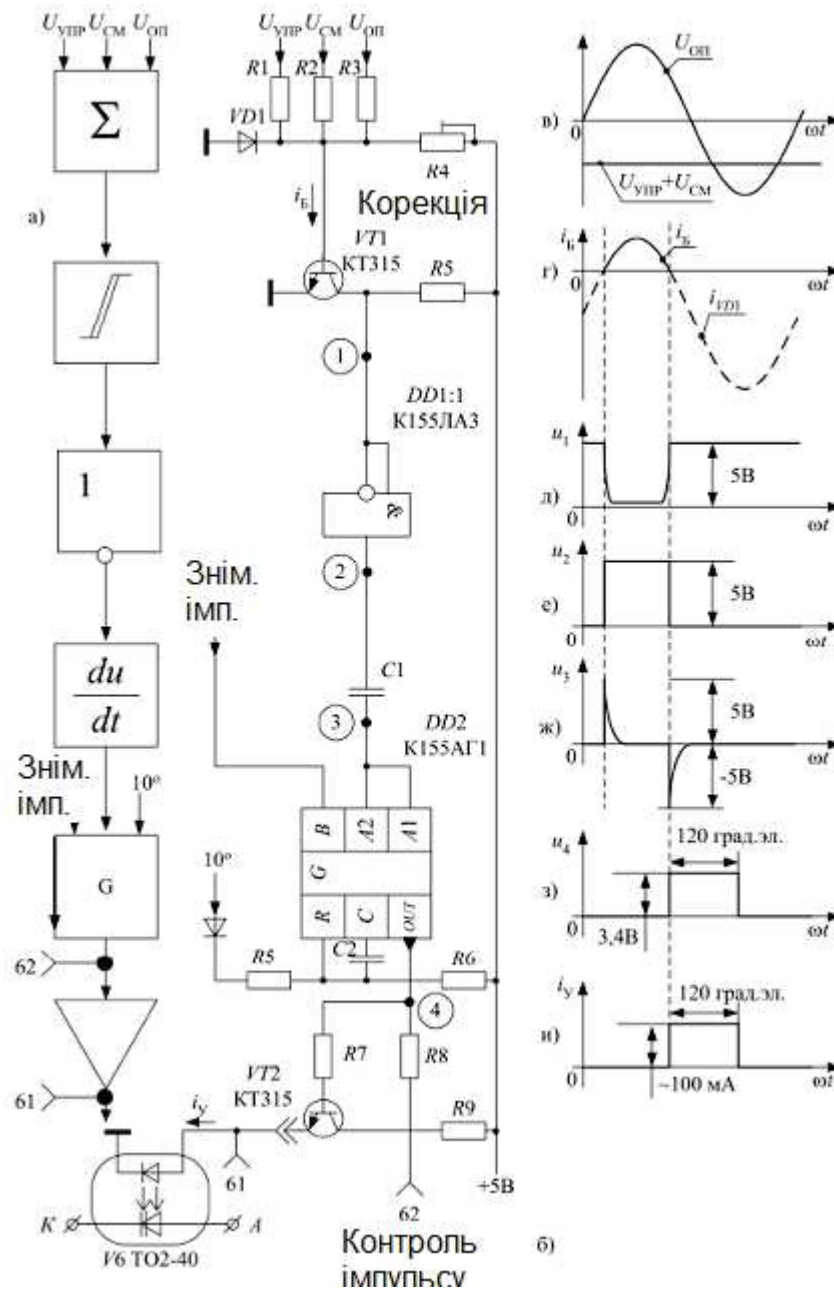


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд одного каналу керування СІФК

СІФК універсального стенду реалізована на аналогових елементах, що робить будову досить складною, так як дана система створювалася досить давно, коли мікропроцесорні пристрої були складними в керуванні та досить дорогими. На сучасному етапі, аналогові СК відходять у минуле, через складність будови

та відсутності достатньої багатофункціональності. На зміну їм приходять мікроконтролери, які в даний момент є більш простими в користуванні, і відрізняються більш широким спектром можливостей.

1.2 Використання систем керування перетворювачами рівня напруги та ШІМ

Як було сказано раніше, ПН для керування необхідний ШІМ. Він може комбінуватися з СІФК, що дозволяє використовувати всі можливості схеми, і працювати в усіх чотирьох квадрантах графіка потужності, проте без використання ШІМ ПН працювати не буде. ШІМ може бути реалізована на аналогових схемах, але на сучасному етапі розвитку набагато простіше прописати логіку і розрахункові функції в мікроконтролері.

Оскільки виникає необхідність модулювати синусоїду, періодичний сигнал, коефіцієнт заповнення ШІМ повинен регулюватись з тим же періодом, що і вихідний сигнал. При цьому потрібно передбачити можливість керування двома параметрами сигналу – коефіцієнтом заповнення (або шпаруватістю), і фазою сигналу ψ щодо рівня напруги в мережі. На рисунку 1.4 представлено один із способів формування ШІМ сигналу за допомогою накладення декількох графіків функцій.

Функція, що дає пилкоподібної форми графік, виглядає наступним чином [4-7]:

$$f(t) = \frac{8 \cdot V}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \cdot \frac{\sin(\omega t)}{k^2}, \quad (1.1)$$

де V – діапазон амплітуда пилкоподібного сигналу; $\omega = 2\pi/T$ – кутова частота; T – період часу.

Знайдемо керуючу синусоїда рівня напруги із наступної формули [4-7]:

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$f(t) = n \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \psi), \quad (1.2)$$

де ω – кутова частота; φ_0 – початкова фаза сигналу; ψ – величина керованого зміщення; n – коефіцієнт, що відповідає за шпаруватість сигналу і змінюється від 0 до 1, де 0 – це мінімальна шпаруватість, а 1 – максимальна.

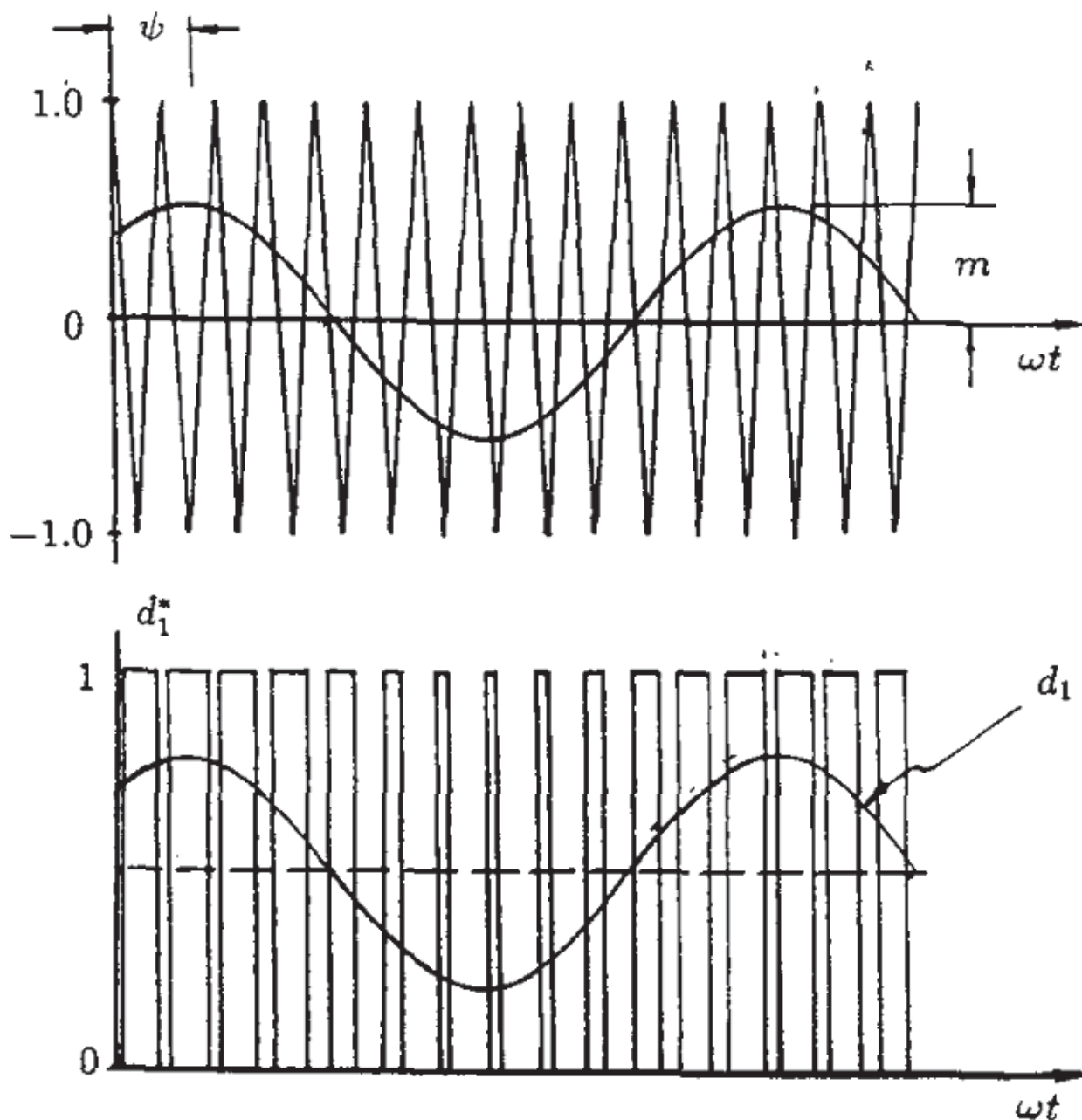


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд формування ШІМ сигналу

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Важливо розуміти, що період пилкоподібної форми сигналу керування набагато менший, ніж період модульованої синусоїди, оскільки частота пилкоподібної форми сигналу рівна частоті ШІМ, а частота ШІМ повинна бути мінімум в десятки разів більшою за частоту модульованого сигналу.

Для визначення моменту подачі імпульсу керування на відкриття ключів накладаються два графіки – опорна синусоїда і пилкоподібної форми сигнал, що генерується самим мікроконтролером [4-7].

Опорна синусоїда може як генеруватися за допомогою мікроконтролера, так і підводитися через трансформатор напруги (ТН) ззовні та оцифровуватися. Більш детально процес формування сигналу керування представлено на рисунку 1.5.

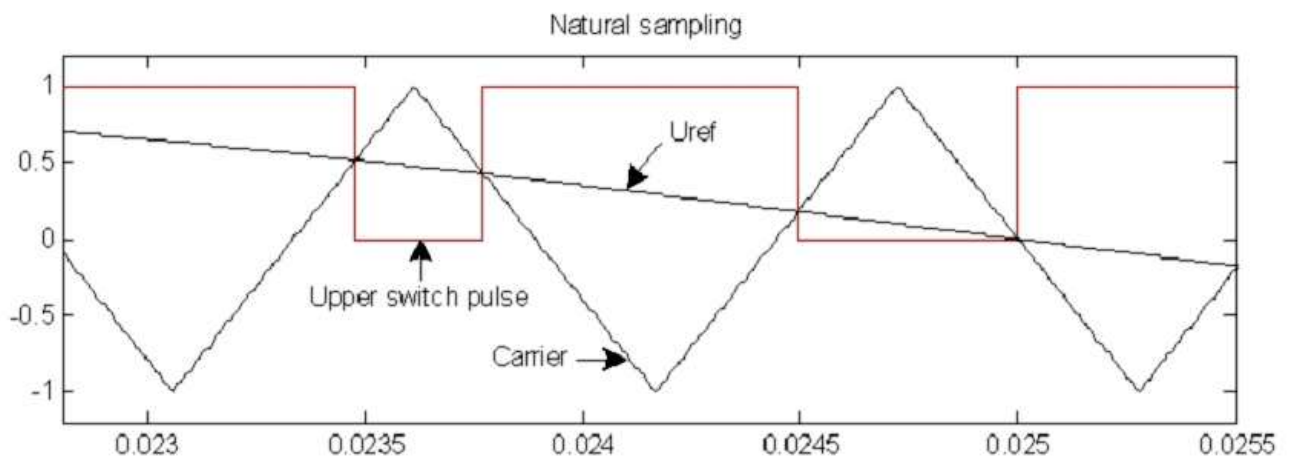


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд принципу роботи ШІМ генератору

Синусоїда керування (рис. 1.5) позначена як U_{ref} , при перетині пилкоподібної форми графік *carrier*, створює точки, відстань між якими і буде тривалістю сигналу керування, позначено червоним кольором. Таким чином, чим вище миттєве значення рівня напруги керування, тим вище коефіцієнт модуляції, відповідно, на даній ділянці синусоїда модульованого рівня напруги буде мати своє максимальне значення. Регулювати фазу сигналу керування в даному випадку гранично просто, потрібно лише змістити синусоїду керування вправо або вліво на необхідний кут ψ .

Керування шпаруватістю виконується шляхом зміни величини амплітуди синусоїди керування, а в формулі (1.2) визначається зміною величини множника синусоїди n [4-7].

Висновки до першого розділу

Було виконано огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень систем керування силовими напівпровідниковими перетворювачами. Розглянуто особливості використання систем імпульсно-фазового керування перетворювачами сили струму та систем керування перетворювачами рівня напруги та ШІМ.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		15

2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ РІВНЯ НАПРУГИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.1 Розроблення алгоритму керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності

Як було описано в вище, алгоритм керування перетворювачем рівня напруги, що буде використано у складі лабораторного компенсатора реактивної потужності, насамперед, повинен мати керований зсув сигналу на ± 180 ел. град. Це необхідно для того, щоб перетворювач мав можливість працювати у всіх чотирьох квадрантах графіка потужності [4-7].

Більш детально опишемо всі можливі варіанти реалізації СК.

Перший варіант реалізації алгоритму зі зміщенням сигналу керування - на початковому етапі головним завданням було реалізувати зміщення керуючого сигналу на ± 180 ел. град. Для спрощення реалізації алгоритму від ШІМ було вирішено відмовитися. Загальну схему перетворювача представлено на рисунку 2.1.

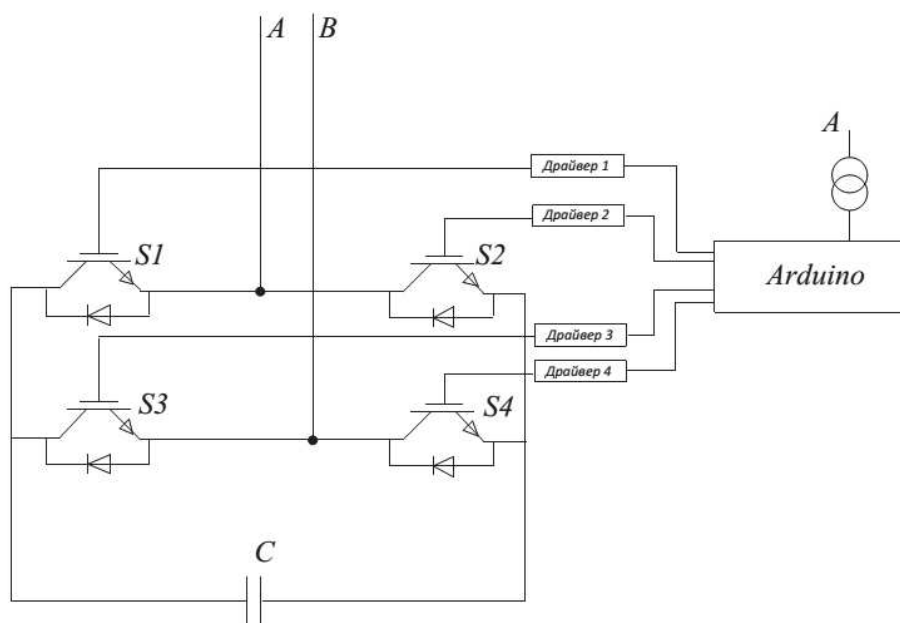


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд схеми першого варіанту перетворювача

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
16

Для забезпечення синхронізації з мережею живлення було створено програмне переривання, що викликається при появі на керуючому контакті рівня напруги високого рівня (+5 В, або логічна одиниця), а всі функції програми було прописано в блоці переривання. Оскільки переривання викликається на кожному позитивному напівперіоді рівня напруги, розрахунок сигналів керування виконувався для кожного періоду окремо, і зміна частоти опорного рівня напруги не може вплинути на синхронізацію [8-11].

Під час виклику переривання насамперед вимірюється рівень напруга на виводі, приєднаному до резистора для налаштування. Контролер порівнює даний рівень напругу з рівнем логічної одиниці (або +5 В), і видає значення від 0 до 1023, де 0 відповідає рівню напруги 0 В, а 1023 відповідає рівню +5 В, і записує це значення у перемінну *faza*. Далі, для зручності буде виконано переведення перемінної *faza* з діапазону значень від 0 до 1023 в діапазон від 0 до 19600, і перезапис значення в перемінну. Далі виконаємо розподіл діапазону перемінної *faza* на дві перемінні *val* і *val1* таким чином, щоб значення перемінної *val* змінювалися в діапазоні від 0 до 9800, а перемінної *val1* в діапазоні від 9800 до 19600.

При цьому якщо значення перемінної *faza* нижче за 9800, то $val = faza$, а $val1 = 9800$, і якщо значення перемінної *faza* вище за 9800, то перемінна $val = 9800$, а перемінна $val1 = faza$ [8-11].

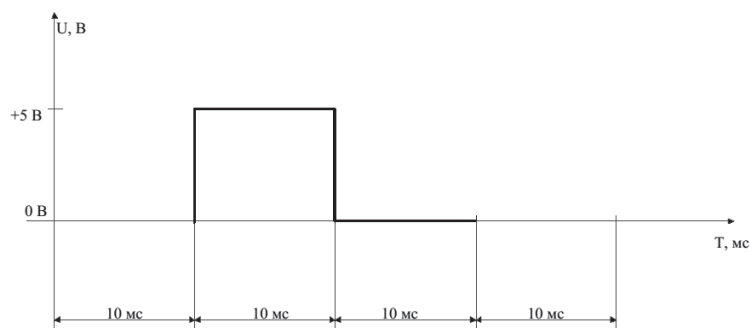


Рисунок 2.2 – Графічна залежність сигналу керування одного транзистору на одному періоді

Якщо уявити рівень напруги керування одного транзистора на одному періоді на графіку, вона матиме наступний вигляд (рис. 2.2).

Оскільки період рівня напруги мережі $T = 20$ мс, кожен транзистор повинен відкриватися на половину періоду час, або на 10 мс. При цьому необхідно забезпечити можливість зсуву сигналу керування на величину ± 180 ел. град.

Але керувати моментом вмикання програми не можливо, оскільки даний момент прив'язаний до моменту виклику переривання, і програма повинна бути виконана за 20 мс, оскільки через 20 мс переривання буде викликано повторно і буде порушено синхронізацію [8-11].

Якщо уявити графічну залежність сигналу керування протягом 40 мс, то вона матиме наступний вигляд (рис. 2.3).

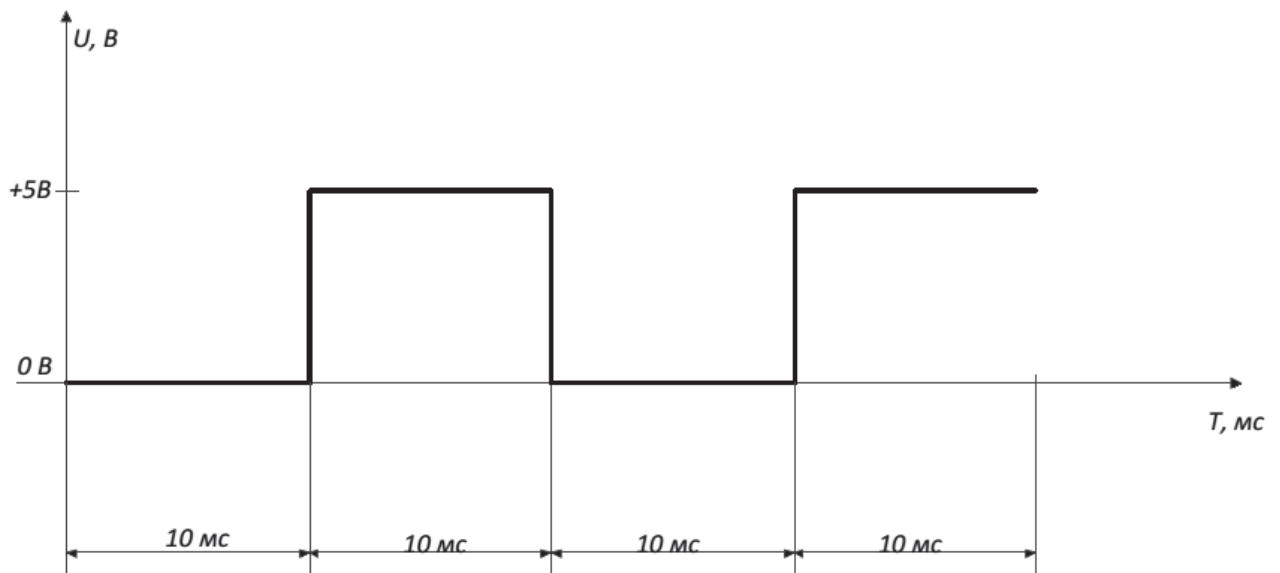


Рисунок 2.3 – Графічна залежність сигналу керування одного транзистору в періоді 40 мс

При цьому, сигнал керування, що відповідає зміщенню 0 ел. град. буде відповідати центральній частині даної графічної залежності, тобто від 10 до 30 мс (рис. 2.3). Якщо взяти першу половину графічної залежності тривалістю 20 мс і подати сигнал керування даної форми на транзистор, вийде, що виконається зміщення відкриття транзистора на мінус 180 ел. град. Провівши аналогічну

операцію, взявши другу половину графічної залежності буде отримано регулювання на +180 ел. град.

Для плавної зміни фази використано спеціальний регулювальний резистор. Оскільки зміну рівня напруги контролер сприймає в діапазоні від 0 до 1023, у користувача є 1024 ступені регулювання, або ж регулювання із кроком у 0,35 ел. град., що є цілком достатньо.

Якщо розділити графічну залежність сигналу керування на одному транзисторі на чотири рівні частини, і врахувати, що транзистори в принциповій схемі вмикаються попарно, тоді отримаємо 4 лінійні ділянки, де рівень напруги керування однієї пари транзисторів буде рівним логічній одиниці, а другої пари буде відповідно рівним нулю. Кожна з даних лінійних ділянок в алгоритмі описана найпростішою конструкцією «*digitalWrite*», що означає «встановити логічну одиницю», і виділена окремою умовою «*if*». В структурі блоку умови прописано затримку, яка залежить від положення спеціального резистора регулювання, і змінюється в діапазоні від 0 до 9,8 мс.

Хоча в ідеалі максимальна тривалість сигналу керування повинна бути не більше 10 мс, тобто половина періоду, у таку тривалість реалізувати неможливо, тому що переривання викликається кожні 20 мс, і повинна виконуватися наступна умова [8-11]:

$$T_{пер} \geq t_{ен} + t_{зат}, \quad (2.1)$$

де $T_{пер}$ - період спрацьовування переривання; $t_{ен}$ - час виконання програми; $t_{зат}$ - час затримки.

Якщо права частина виразу (2.1) виявиться більшою за ліву частину, тоді коли буде викликано наступне переривання, програма попереднього не буде виконана до кінця. А коли знадобиться подача сигналу керування на другу пару транзисторів, контролер буде деякий час подавати сигнал керування на першу пару транзисторів, тобто порушиться синхронізація роботи.

Таким чином, маючи чотири окремі блоки, кожен з яких описує частину графічної залежності (див. рис. 2.2), необхідно обрати величину інтервалу, на якому працюватиме СК (рис.2.4).

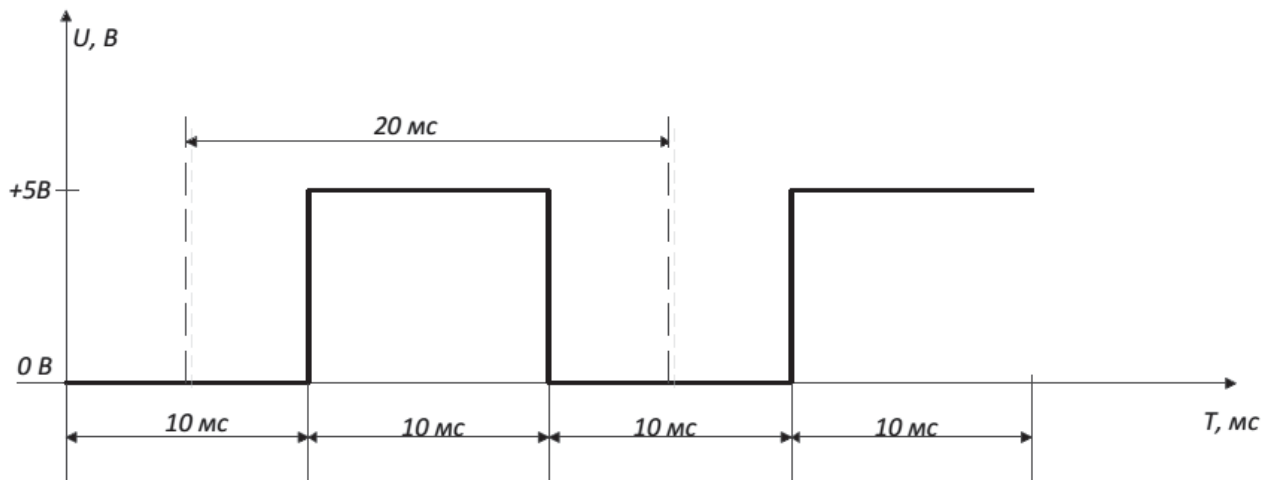


Рисунок 2.4 – Графічна залежність інтервалу, що відповідає куту керування на мінус 90 град. ел.

Подаючи на транзистори сигнал керування, що відповідає вказаному інтервалу, буде забезпечено регулювання на мінус 90 ел. град., також, змінюючи положення спеціального резистора регулювання, отримаємо можливість плавно зміщувати інтервал вправо або вліво.

У випадку використання описаного вище способу керування видача реактивної потужності дуже мала, і перетворювач не працює належним чином. Було з'ясовано, що для коректної роботи перетворювача необхідна саме модуляція синусоїди, чого неможливо досягти використанням стандартного меандру. Так, як меандр представляє собою ШІМ-сигнал зі шпаруватістю, рівною нулю [8-11].

Текст коду програми та отримані результати наведено в додатку А.

Другий варіант реалізації алгоритму керування через використання ШІМ і кероване зміщення сигналу. Головним критерієм працездатності пристрою, що розробляється, була керована робота перетворювача в III і IV квадрантах графіка потужності, тобто повністю керована видача і споживання реактивної

потужності, керування величиною шпаруватості ШІМ сигналу реалізовано не було. Схема перетворювача аналогічна попередньому варіанту виконання, але СК повністю перероблена.

Під час реалізації ШІМ сигналу довелося враховувати деякі обмеження схеми. По-перше, конструктивні особливості драйвера керування IGBT транзисторів, встановленого в стенді, не дають можливості збільшувати частоту перемикачів більше ніж 500 Гц. Тобто загалом, на період рівня напруги не може бути більше ніж 10 імпульсів. По-друге, мікроконтролер Arduino дуже повільно рахує тригонометричні вирази, через що довелося відмовитися від способу формування ШІМ-сигналу за допомогою накладення графічних залежностей 2-х функцій, описаного вище, ШІМ-сигналу.

Найпростішим способом створення ШІМ-сигналу здалося ручне вписування періодів відкритих і закритих станів у двовимірний масив, і, аналогічно описаному вище, методом зсуву початку відліку по двовимірному масиву реалізовано зсув сигналу керування. Графічні залежності сигналів, записані у двовимірний масив, зображено на рисунку 2.5.

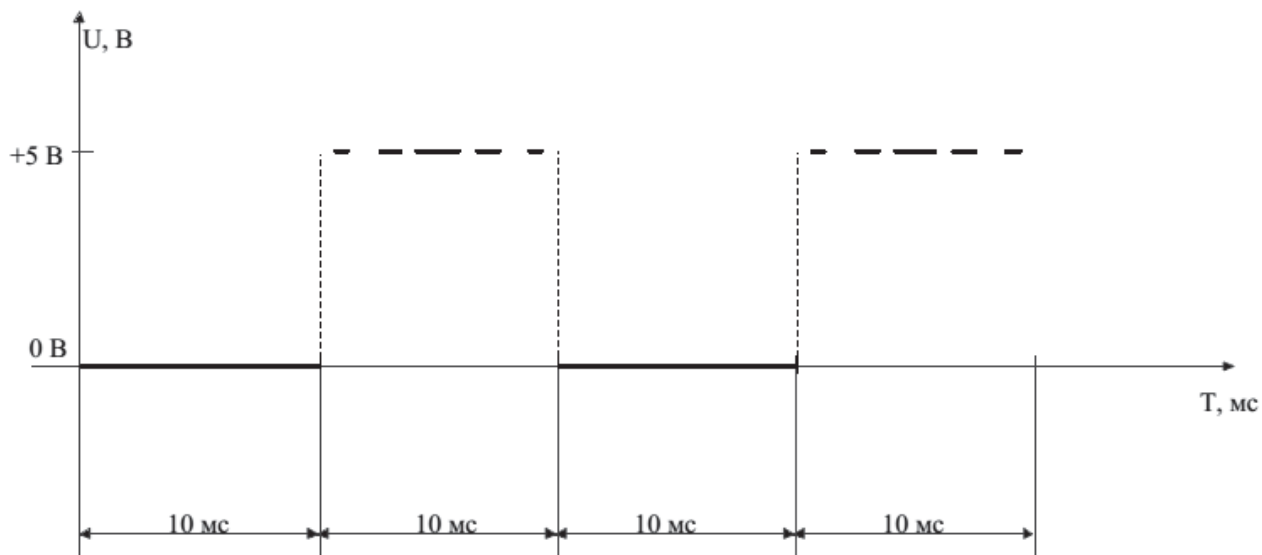


Рисунок 2.5 – Графічні залежності сигналів керування

Як і в описаній вище СК, змінюючи положення потенціометра, буде зміщуватись робоча зона за графіком, як представлено на рисунку 2.6.

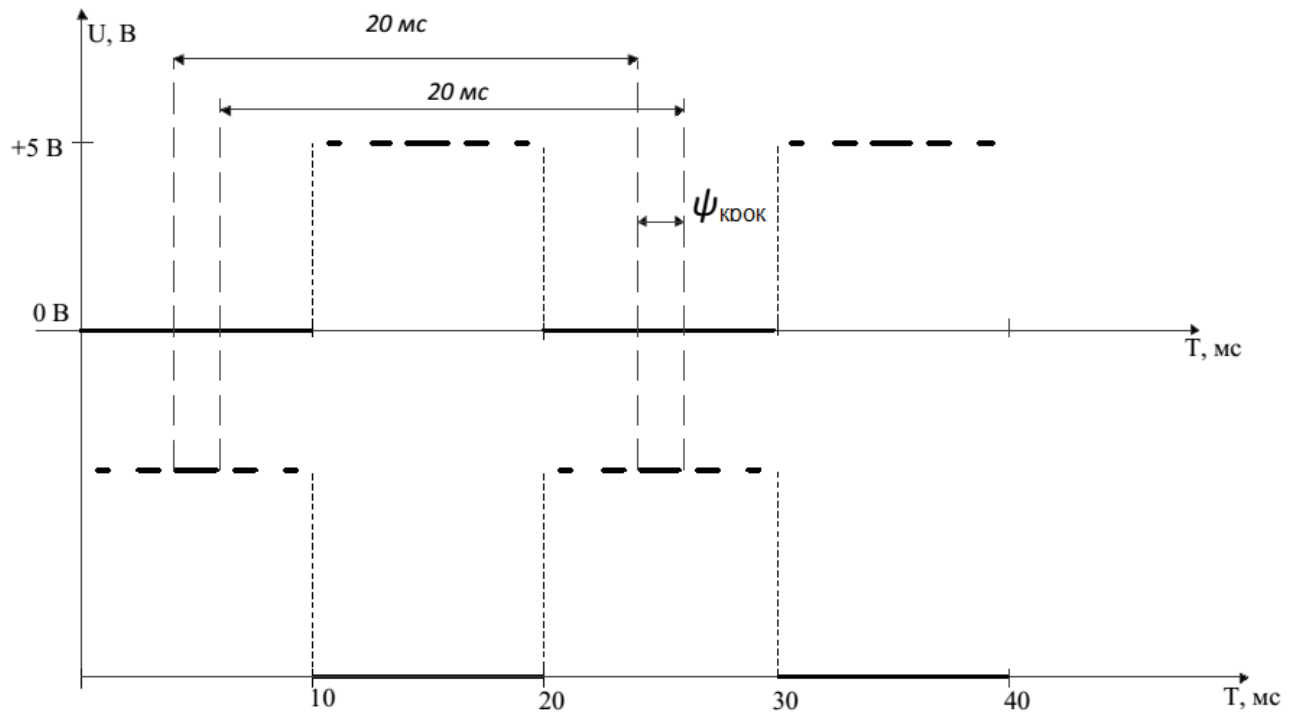


Рисунок 2.6 – Графічна залежність ШІМ сигналу на 2 плечах

У такому випадку крок зміни кута керування $\psi_{\text{крок}}$ буде значно вищим, близько 40 ел. град. Проте через особливості алгоритму керування, не можна зробити більше ступенів регулювання, ніж імпульсів ШІМ за період рівня напруги, не можливо розділити один ШІМ-імпульс на декілька частин, а оскільки $n_{\text{имп}} = 10$, відповідно крок керування буде рівним [8-11]:

$$\psi_{\text{крок}} = \frac{360^\circ}{n_{\text{имп}}} = 36^\circ. \quad (2.2)$$

У такому випадку перетворювач рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності показав значну зміну реактивної потужності, що свідчить про працездатність схеми навіть у неповнофазному режимі роботи.

Код програми керування та отримані результати представлені в додатку Б.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

2.2 Розроблення системи керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності

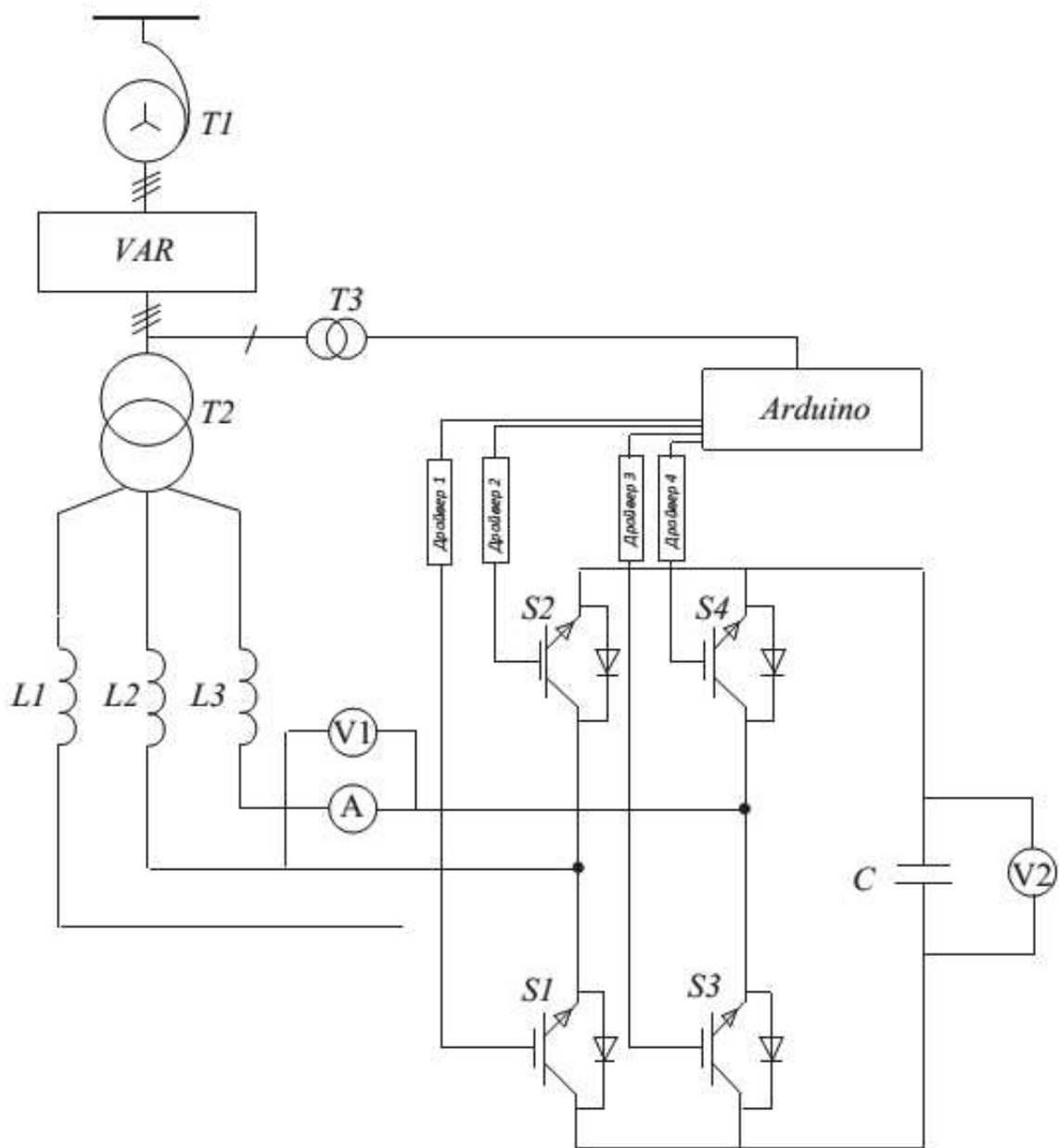


Рисунок 2.7 – Електрична схема розроблюваного стенду

Лабораторний автотрансформатор $T1$ використовується для зниження мережевого рівня напруги із 380 В до 220 В. Вимірювальний комплекс, позначений на рисунку 2.7 як VAR , використовується для вимірювання сили

струму, рівня напруги, активної, реактивної і повної потужності. Трансформатор *T2* має кілька відпайок на вторинній обмотці, зі значеннями рівнів напруги від 3 до 12 В, у даному випадку будемо використовувати рівень напруги - 12В. Трансформатор *T3* призначений для зниження мережевого рівня напруги до рівня напруги логіки Arduino, а також для гальванічної розв'язки силових та ланцюгів керування. Індуктори *L1, L2, L3* - використовуються в якості фільтрів вищих гармонік. Вольтметр *V1* вимірює рівень напруги на виводах перетворювача рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності, *V2* - рівень напруги конденсаторної батареї, амперметр *A* – силу струму перетворювача рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності.

Драйвери керування *IGBT* призначені для посилення імпульсів керування, для прискорення відкриття відповідних транзисторів. Плата Arduino здійснює розрахунок імпульсів, можливого зсуву і тривалості, і створювати сигнали керування за необхідності.

Поставленим завданням було лише створення СК, в якості контролеру було обрано плату Arduino nano [12, 13], через простоту середовища розроблення і величезну кількість літератури та бібліотек у відкритому доступі. Схему ланцюгів керування представлено на рисунку 2.8.

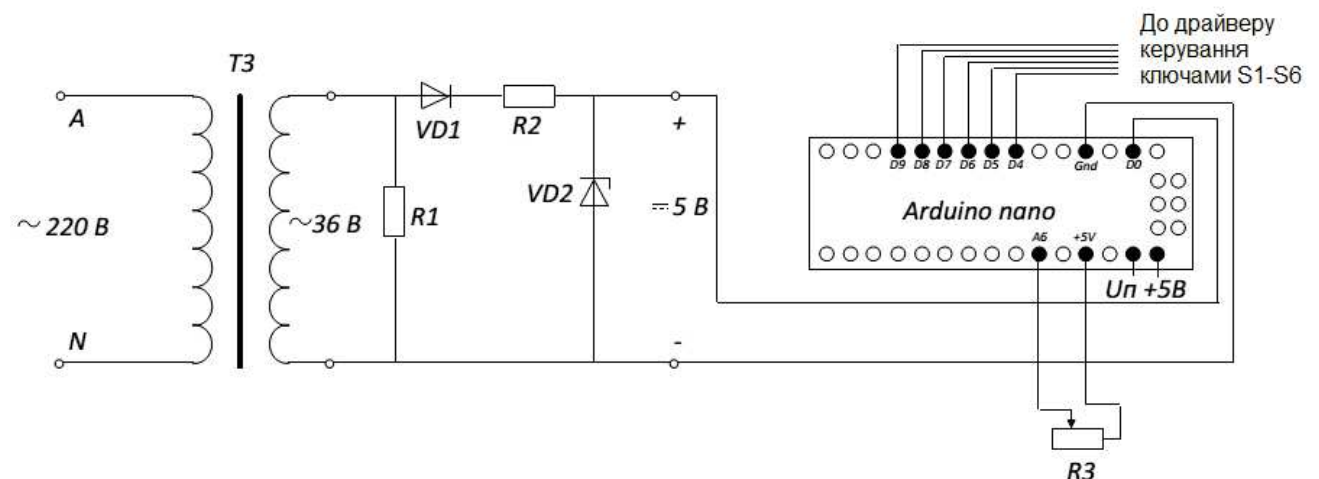


Рисунок 2.8 – Електрична схема ланцюгів керування Arduino nano

Для того щоб визначити момент увімкнення СК, необхідно визначити, що відбувається в силовому ланцюзі. Проте неможливо просто завести силові ланцюги в мікроконтролер, через високий рівень напруги і з міркувань техніки безпеки. Для гальванічної розв'язки, а також для зниження рівня напруги в ланцюг включається трансформатор $T3$.

Для визначення моменту увімкнення СК немає необхідності бачити всю синусоїду мережевого рівня напруги. Оскільки частота напруги мережі величина практично стала, знаючи одну ключову точку на синусоїді, будемо знати, що відбувається на решті періоду, за період напруги існує чотири такі точки.

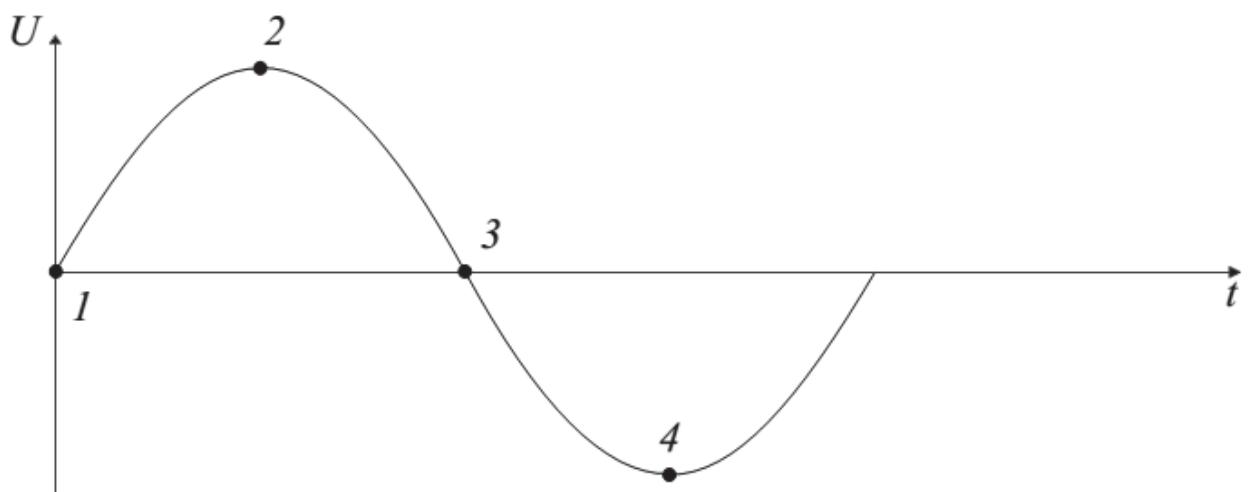


Рисунок 2.9 - Можливі тригери або точки переривання

Кожну з даних точок можна використовувати в якості тригера для переривання, тобто в якості початку циклу керування довжиною в один повний період рівня напруги. У нашому випадку буде використовуватись точка №1, і вся СК побудована навколо цього. Діод $VD1$ відсікає від'ємну півхвилю рівня напруги (рис. 2.10, а). Стабілітрон $VD2$ обмежує рівень напруги на виході до величини +5В (рис. 2.10, б) [8-11].

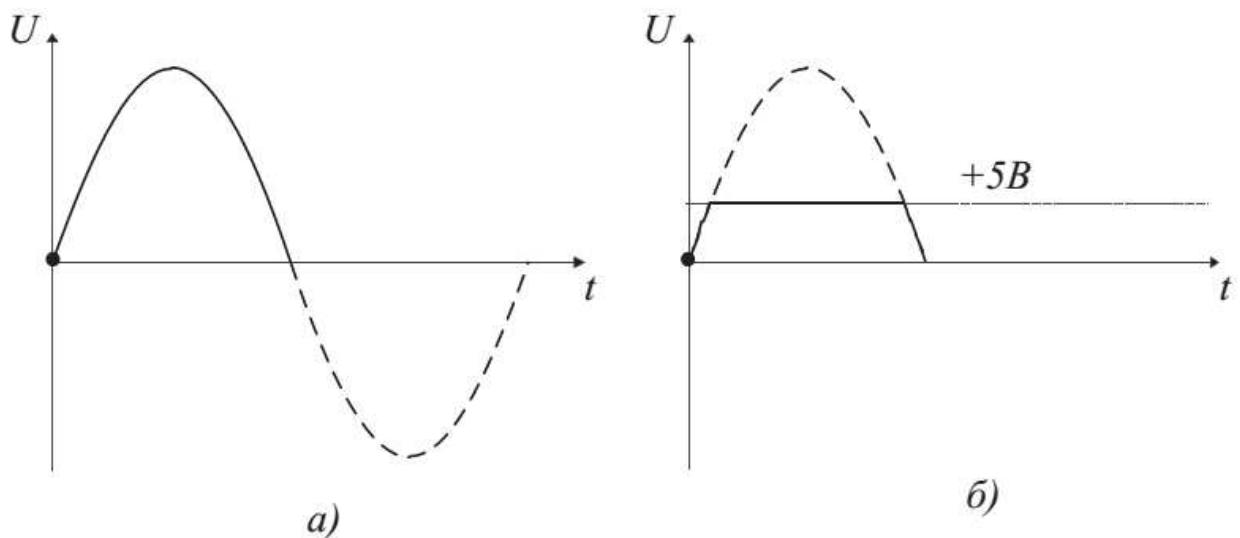


Рисунок 2.10 - Перетворення рівня напруги синусоїди керування

Резистор налаштування $R1$ має велике значення і призначений для стікання заряду, резистор $R2$ обмежує силу струму, що тече по колах керування.

Таким чином, на вхід мікроконтролера подається майже прямокутний імпульс керування, амплітудою $+5V$, значення яке є логічною одиницею, і надходить сигнал керування у момент переходу синусоїди керування через нуль. Даний сигнал викликає переривання, яке запускає цикл розрахунку сигналу керування. Далі відбувається знімання сигналу з резистора $R3$ налаштування, положення якого визначає зсув сигналу керування, після чого буде визначено номер елемента в масиві, з якого буде розпочато відлік.

Детальніше алгоритм роботи СК описано в блок-схемі на рисунку 2.11.

На рисунку 2.12 представлено осцилограми сигналу керування, отримані в результаті перевірного дослідження.

Верхній сигнал (рис. 2.12, а) – це тригер переривання, сигнал якого йде з трансформатора пониження $T3$, нижній сигнал - зміщений ШІМ сигнал керування. Два сигнали керування зміщені на 180 ел. град., що йдуть на протилежні пари транзисторів (рис. 2.12, б) [8-11].

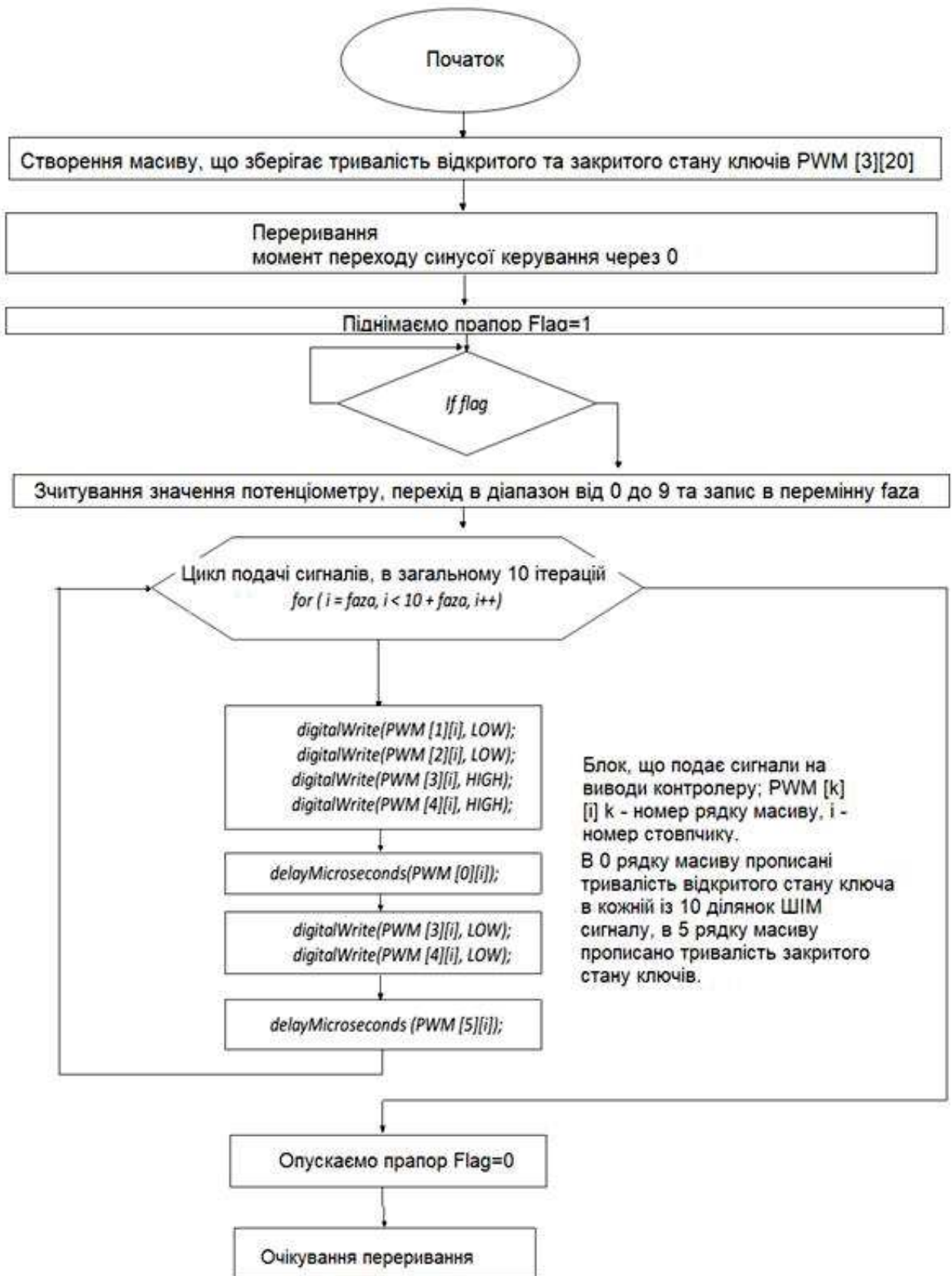
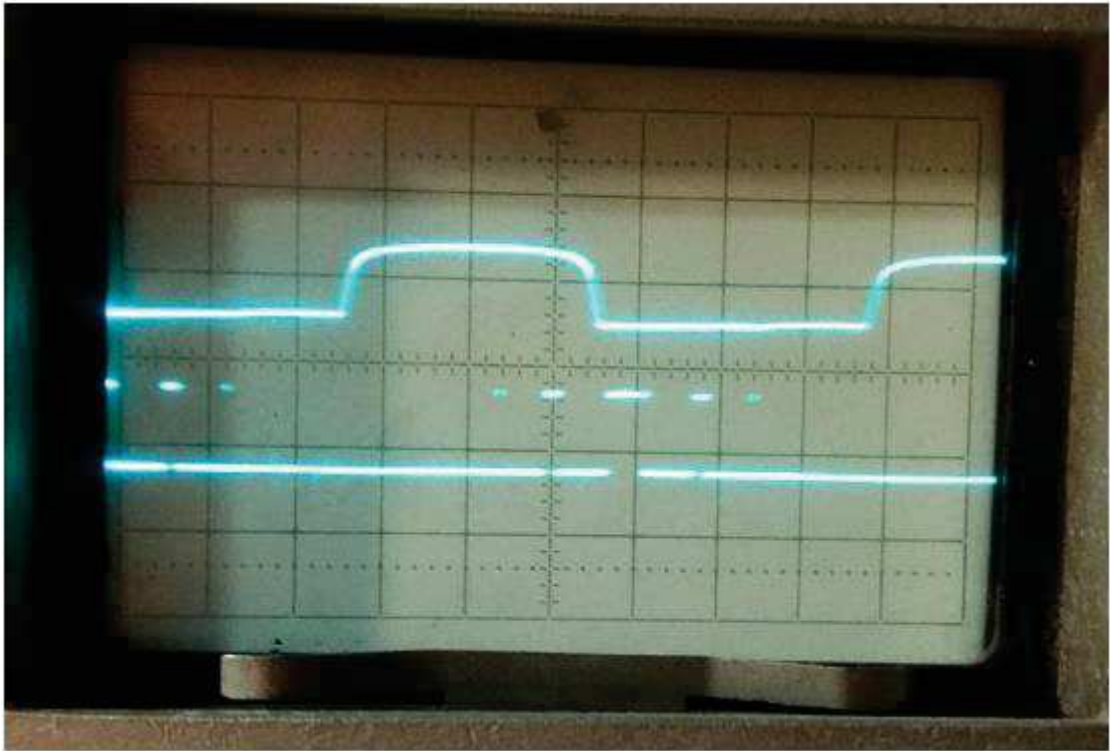
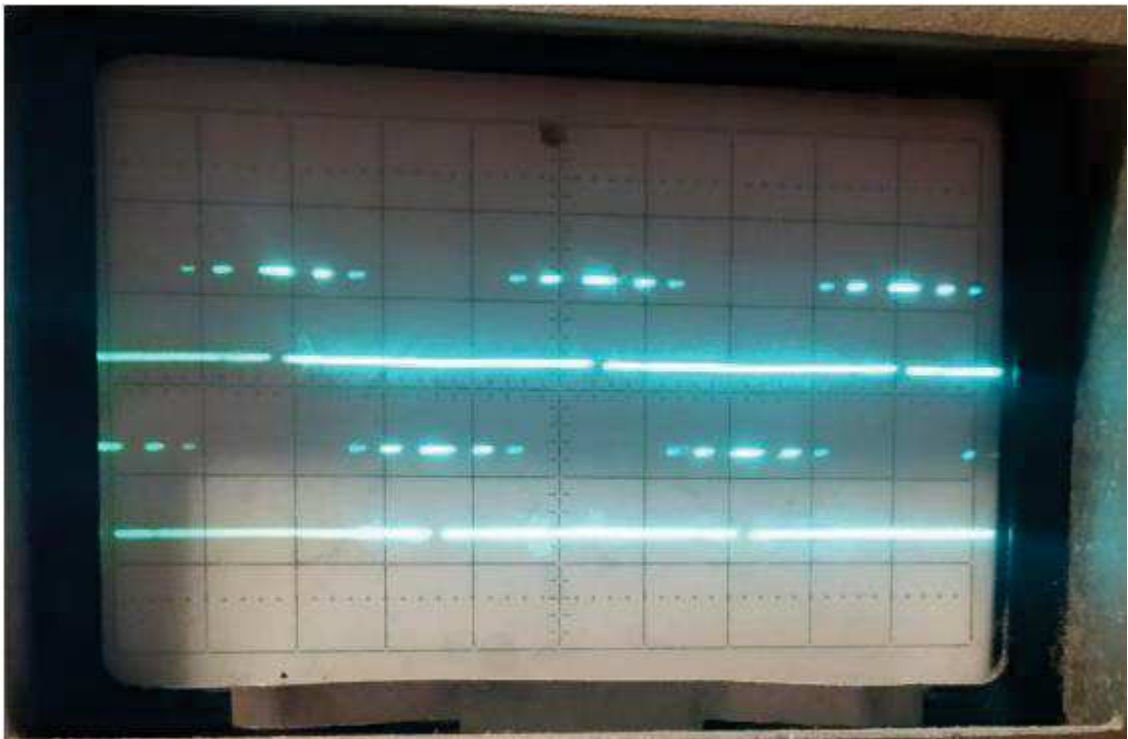


Рисунок 2.11 - Блок-схема алгоритму керування перетворювачем



а



б

а – тригер переривання; б – два сигнали керування, зміщені на 180 ел. град.

Рисунок 2.12 – Осцилограми сигналу керування:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
28

Осцилограф оснащено лише двома каналами, так що всі чотири імпульси керування одночасно побачити не можливо, проте за цими двома осцилограмами вже цілком зрозуміло, що тригер переривання працює належним чином, так як в іншому випадку сигнал керування «спливав» би в одну зі сторін, через порушення синхронізації. Видно, що зміщення сигналу керування працює і регулюється, інакше сигнал керування був би в тій же фазі, що і тригер переривання, або протилежний йому. Також видно (рис. 2.12), що сигнали протилежних пар транзисторів знаходяться в повній протифазі, і перетин сигналів (коли два транзистори в одному плечі одночасно відкриті) відсутній [8-11].

Висновки до другого розділу

Було проведено розроблення системи керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності, спочатку було розроблено алгоритм керування перетворювачем рівня напруги, потім і саму систему керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		29

3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ

3.1 Розроблення моделі в середовищі Simulink

Загально відома, стандартна модель для дослідження режиму роботи перетворювача створена програмно в середовищі MATLAB/Simulink [14-16] – power_bridges.slx, представлена на рисунку 3.1.

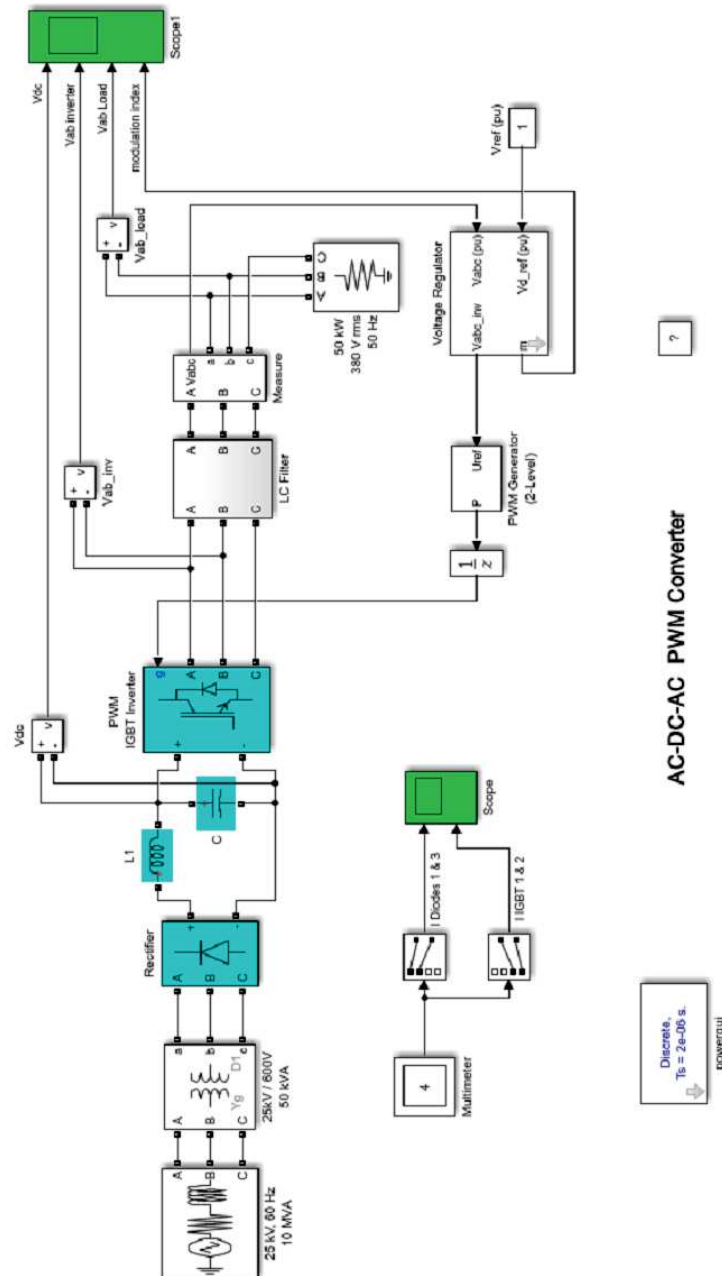


Рисунок 3.1 – Стандартна модель перетворювача в програмно середовищі MATLAB/Simulink [14-16]

Базова модель представляє собою модель вставки постійного струму із використанням некерowanego випрямляча *rectifier*, спеціальним фільтром гармонік $L1$, конденсатором C для стабілізації, і випрямлячем у вигляді перетворювача рівня напруги з синхронізованою СК. За ПН видно встановлений модуль фільтра *LCFilter*, модуль для вимірювання *measurements* і еквівалентне навантаження. СК включає в себе регулятор рівня напруги *voltageregulator* і генератор ШІМ сигналів *PWMgenerator* (рис. 3.1). Для вирішення поставленого технічного завдання базова модель не підходить, через занадто спрощену модель ПН та використання в якості випрямляча, що не дозволяє розглянути можливості використання ПН в якості компенсатора реактивної потужності.

Розроблена та запропонована модель представлена на рисунку 3.2. В запропонованій моделі в мережі відсутня вставка постійної сили струму, живлення до навантаження надходить відразу після встановленого понижуючого трансформатора. Крім того змінено спосіб підключення ПН, тепер вмикання виконується паралельно, не має живлення в ланцюзі постійної сили струму і працює ПН і в якості компенсатору реактивної потужності. Було трохи ускладнено модель ПН, представлений не єдиним суцільним модулем, а системою із IGBT-блоків, з можливістю регулювати сигнал керування кожного вентиля окремо, і знімати вимірювання з кожного окремого вентиля. Було змінено СК ПН, тепер вона несинхронна, оскільки система керуючих рівнів напруги створюється окремим блоком, додана можливість зміщення сигналу керування по фазі (рис. 3.2 та БРМА25.00.00.000С2).

Розглянемо більш детально складові елементи моделі та їх параметри [14-16].

Модуль системи живлення (рис. 3.3) - має наступні параметри, що можливо налаштувати: лінійний рівень напруги, режим нейтралі, кут фазового зсуву (несиметричність), рівень частоти, величина потужності, середньоквадратичний рівень напруги, відношення внутрішніх активного і реактивного опорів джерела.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

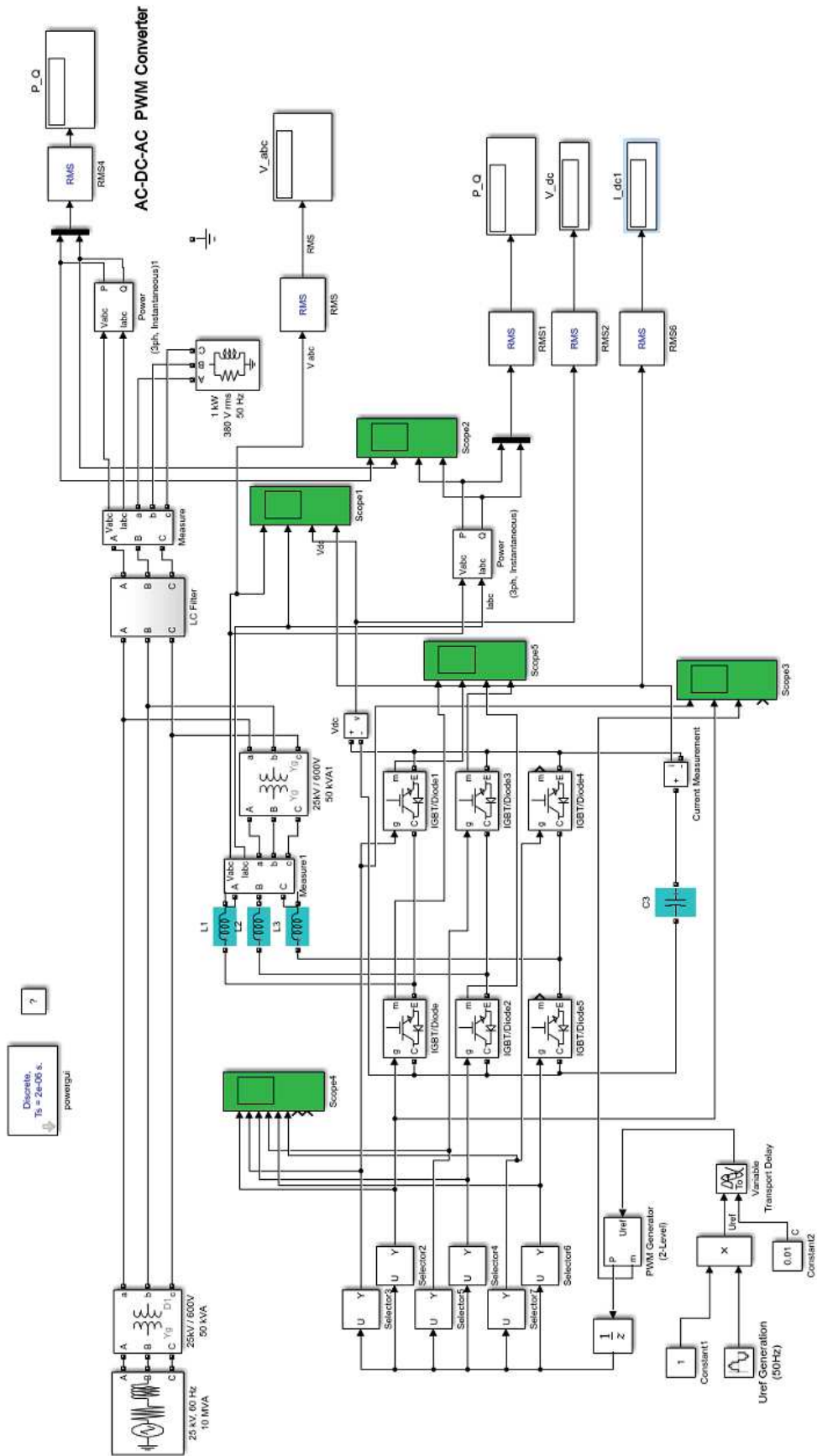
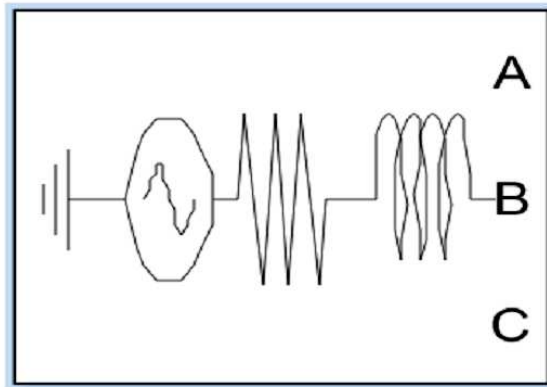


Рисунок 3.2 – Розроблена модель ПН в програмному середовищі MATLAB/Simulink [14-16]

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------



**25 kV, 50 Hz
10 MVA**

Block Parameters: 25 kV, 50 Hz 10 MVA

Three-Phase Source (mask) (link)
Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters Load Flow

Configuration: Yg

Source

Specify internal voltages for each phase

Phase-to-phase voltage (Vrms): 25e3

Phase angle of phase A (degrees): 0

Frequency (Hz): 50

Impedance

Internal Specify short-circuit level parameters

3-phase short-circuit level at base voltage(VA): 10e6

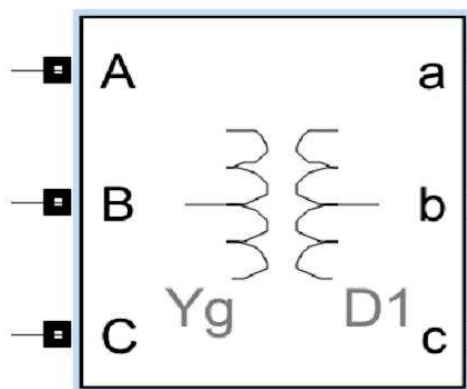
Base voltage (Vrms ph-ph): 25e3

X/R ratio: 5

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд та параметри модулю системи живлення

Модуль трансформатора (рис. 3.4) виконує роль трансформатора в електричній схемі і володіє наступними параметрами: група з'єднання обмоток, рівень напруги, номінальна величина частоти і потужність, режим нейтралі, індуктивні та активні опори обмоток, втрати ХХ і КЗ [14-16].



**25kV / 380V
50 kVA**

Block Parameters: 25kV / 380V 50 kVA

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)] [50e3 , 50]

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu)] [25e3 , 0.004 , 0.02]

Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu)] [380 , 0.004 , 0.02]

Magnetization resistance Rm (pu) 200

Magnetization inductance Lm (pu) 200

Saturation characteristic [i1 , phi1 ; i2 , phi2 ; ...] (pu) ; 0.005,1.2 ; 1.0,1.4]

Initial fluxes [phi0A , phi0B , phi0C] (pu): [0.8 , -0.8 , 0.7]

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд та параметри модулю трансформатора

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
33

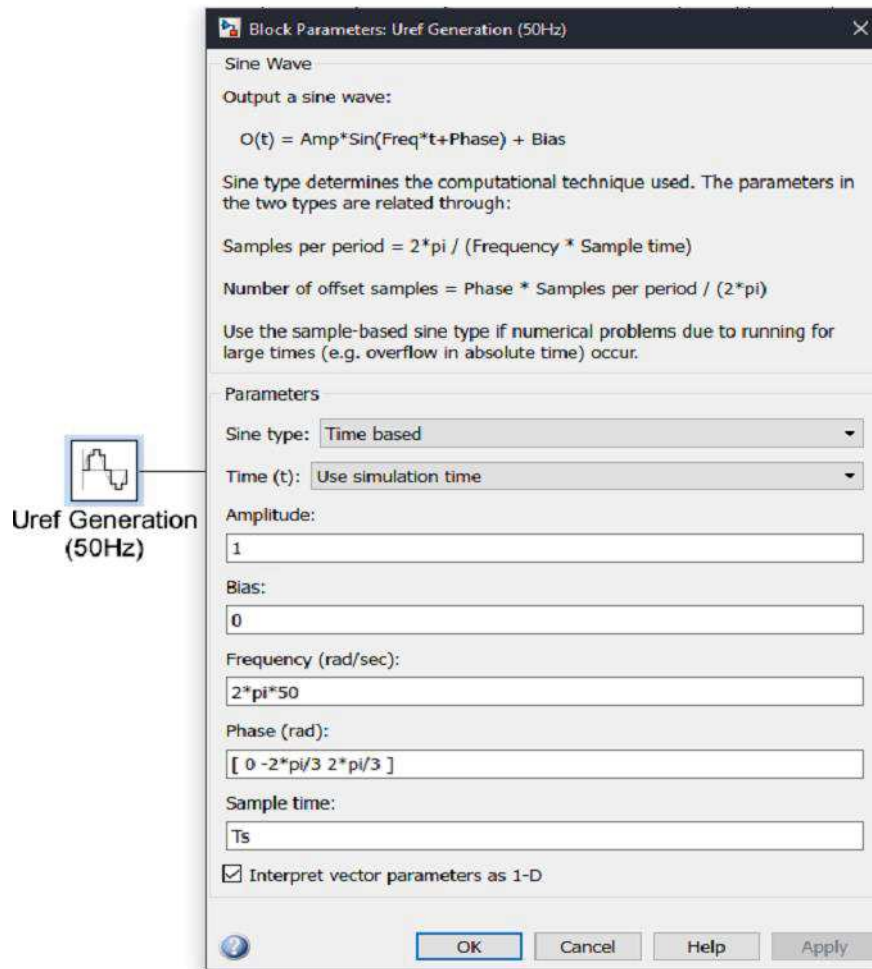


Рисунок 3.9 – Загальний вигляд та параметри генератора синусоїдальних сигналів

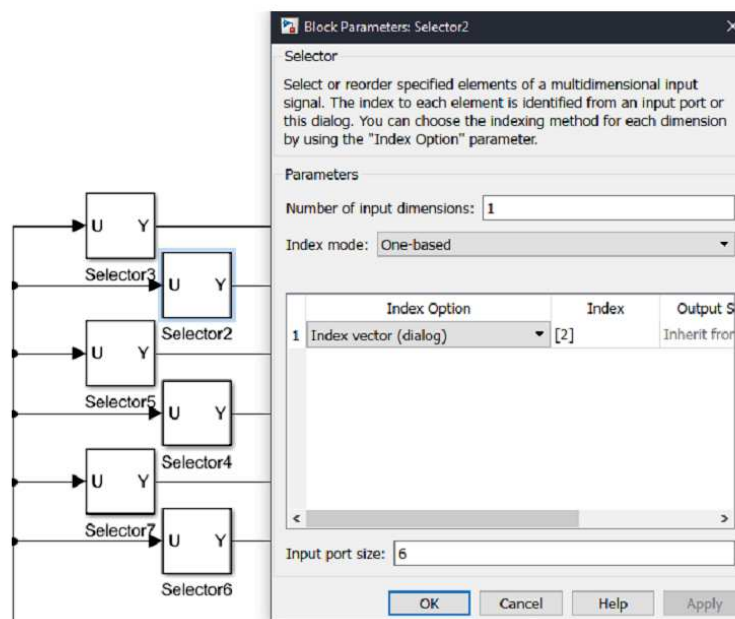


Рисунок 3.10 – Загальний вигляд та параметри селектору

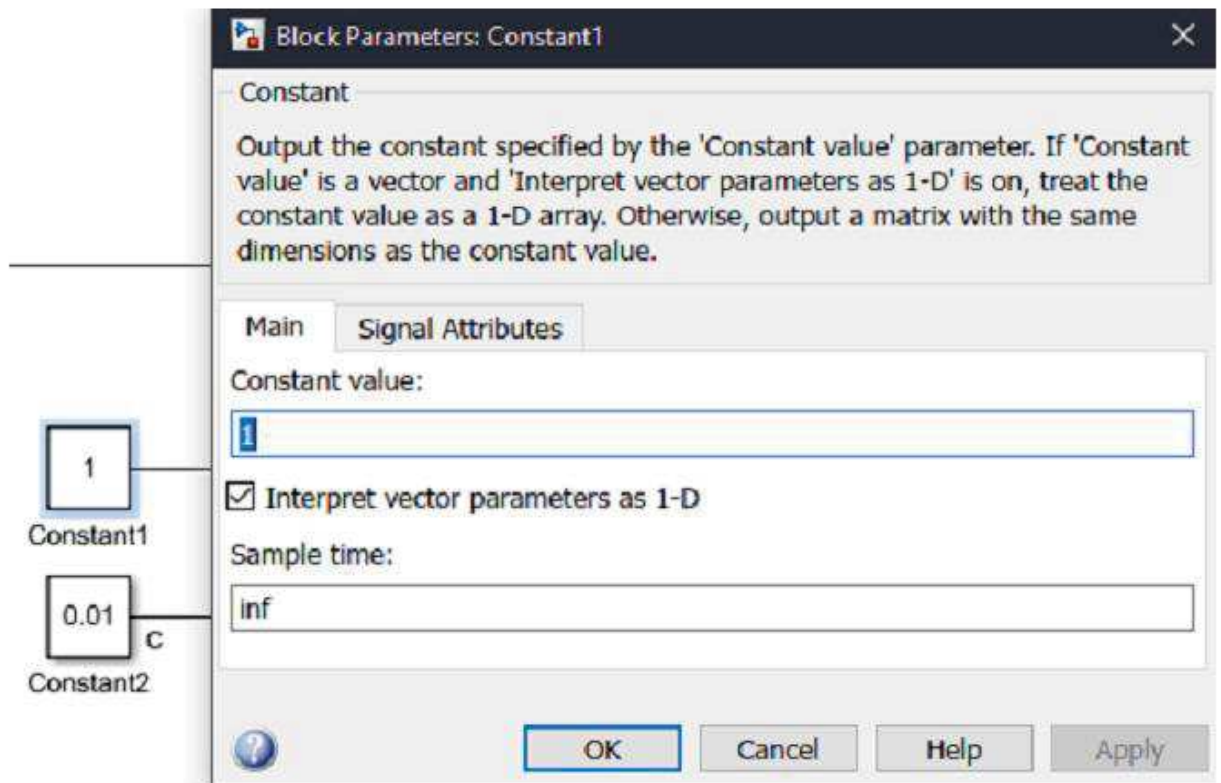


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд та параметри блоку константа

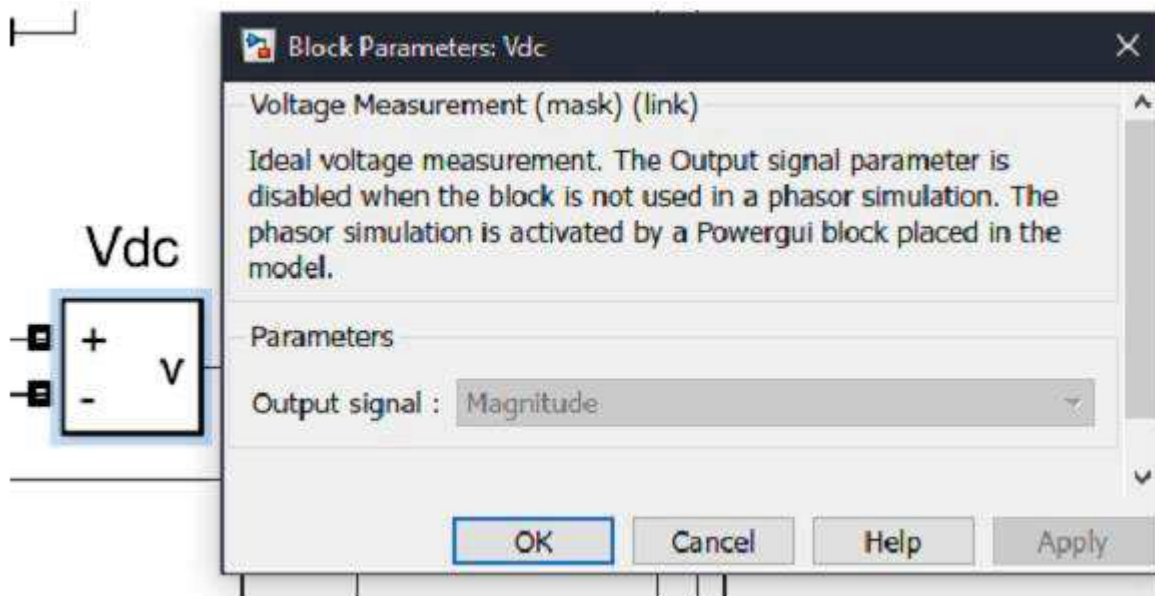


Рисунок 3.12 – Загальний вигляд та параметри блоку вимірювання рівня напруги

Блок вимірювання сили струму (рис. 3.13) – застосовується для вимірювання миттєвого значення сили струму, що проходить крізь нього. Може використовуватися як для постійної, так і для змінної сили струму [14-16].

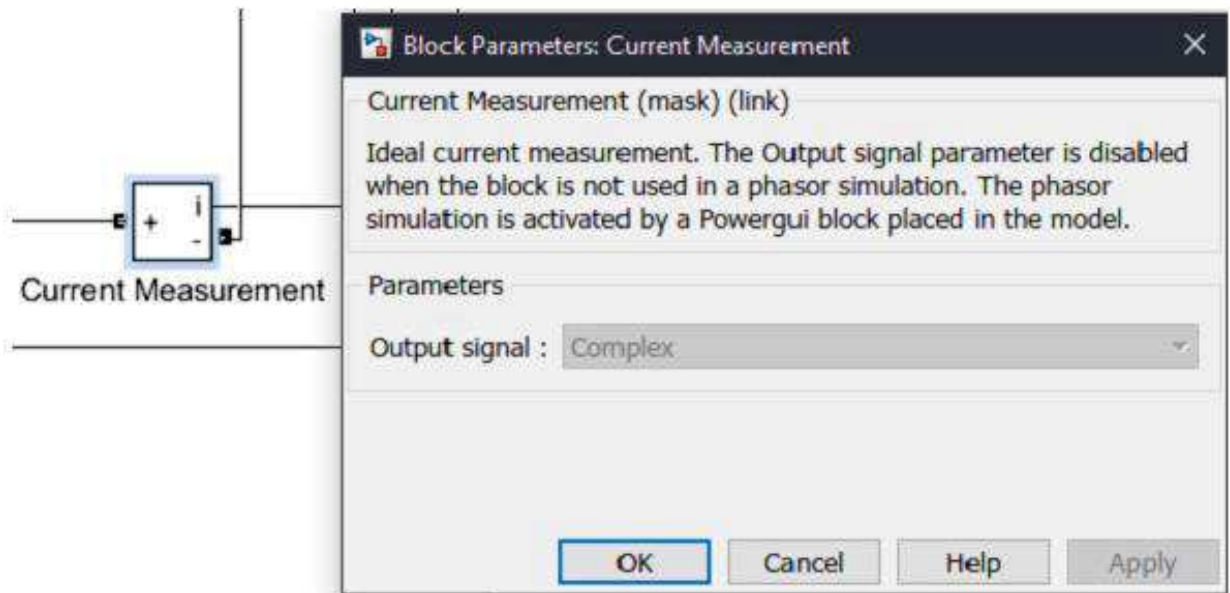


Рисунок 3.13 – Загальний вигляд та параметри блоку вимірювання сили струму

Трифазний блок вимірювань (рис. 3.14) - монтується в трифазний ланцюг послідовно і виконує вимірювання сил струмів і рівнів напруги фаз. На виході отримуються 2 масиви значень, окремо масив сил струмів і масив рівнів напруги.

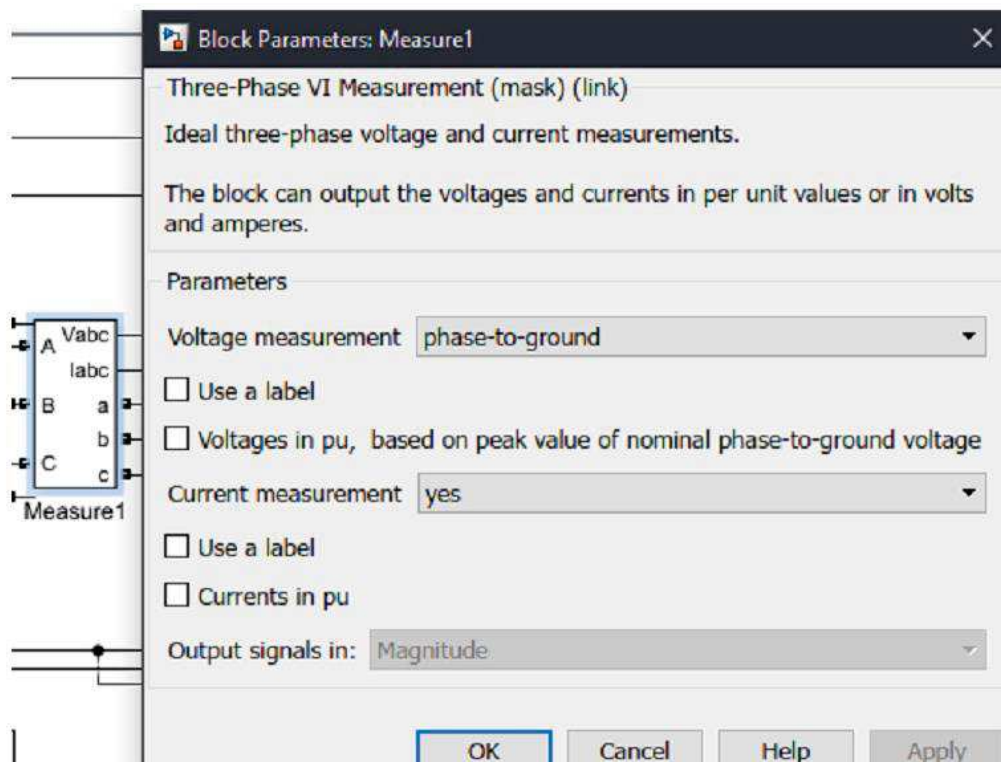


Рисунок 3.14 – Загальний вигляд та параметри трифазного блоку вимірювань

Блок вимірювання потужності (рис. 3.15) - на вхід блоку подаються 2 масиви, що зберігають значення сил струмів і рівнів напруги фаз. Шляхом множення блок розраховує реактивну і активну потужності, що протікають через блок, з якого надійшли векторні вимірювання [14-16].

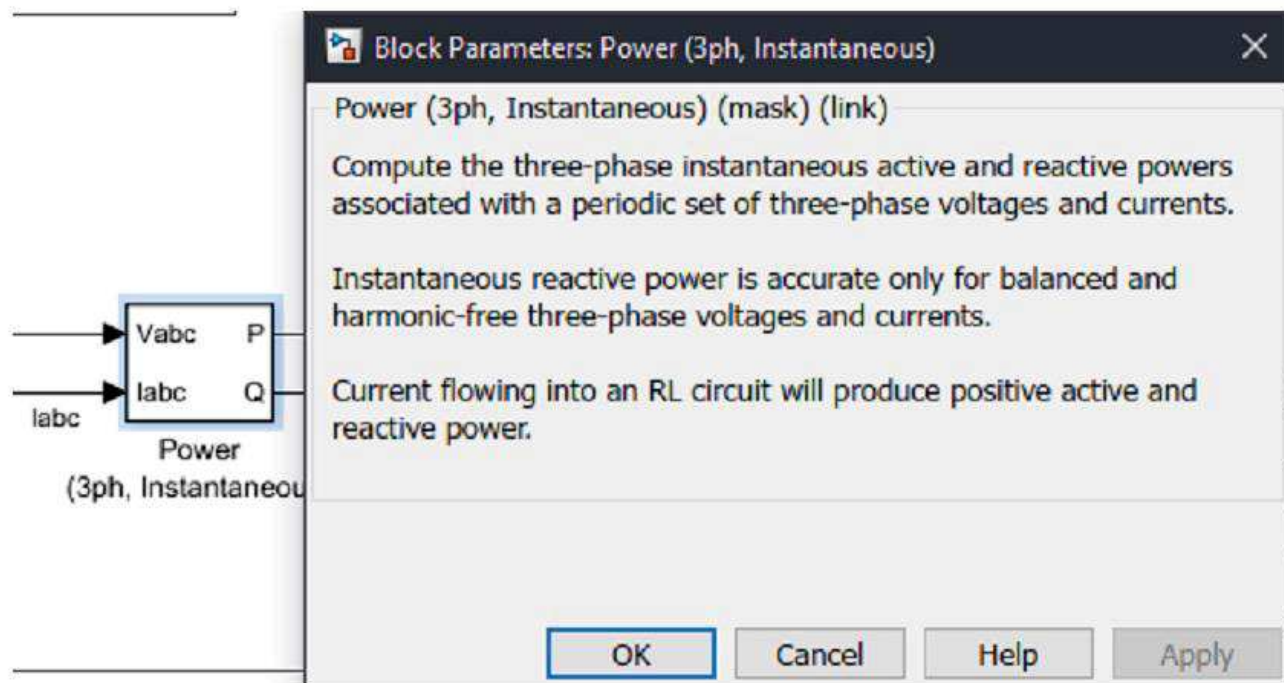


Рисунок 3.15 – Загальний вигляд та параметри блоку вимірювання потужності

Блок Осцилограф (рис. 3.16) - візуалізує на графіках миттєві значення величин, що надходять на входи.

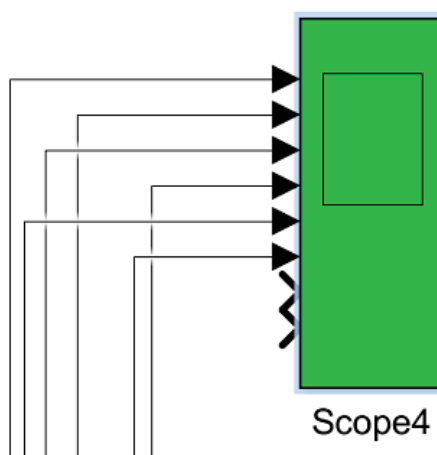


Рисунок 3.16 – Загальний вигляд осцилографу

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

RMS-блок (рис. 3.17) – використовується для виконання розрахунків середньоквадратичного значення з масиву миттєвих значень величин, що надходять на вхід. Працює в парі з дисплеєм, для виведення будь-яких потрібних параметрів на дисплей, так як в більшості випадків цікавлять лише середньоквадратичні значення, а не миттєві, які відображає осцилограф [14-16].

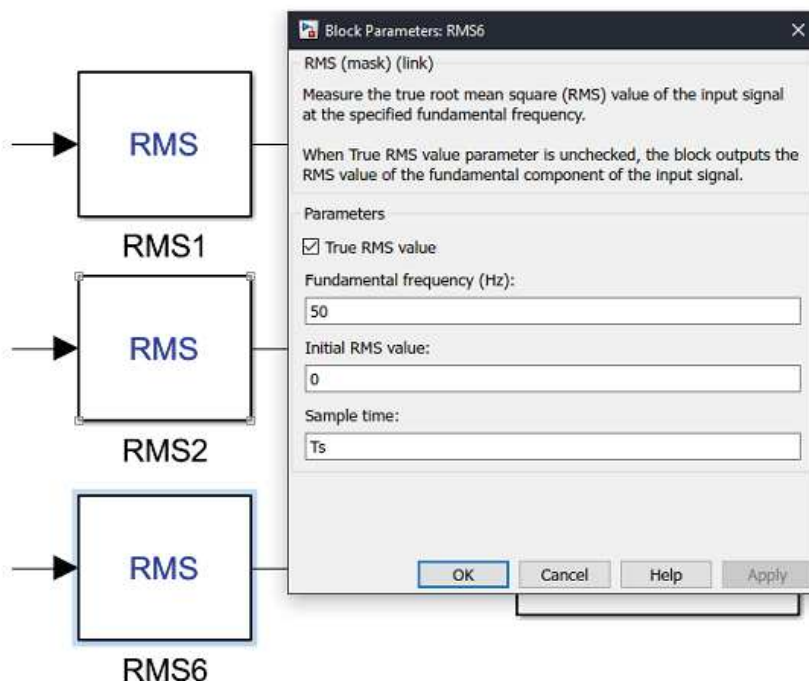


Рисунок 3.17 – Загальний вигляд та параметри блоку RMS

Дисплей (рис. 3.18) - використовується завжди в тандемі з блоком RMS (або блоком розрахунку середньоквадратичного значення), для візуалізації параметрів електричної схеми там, де необхідний контроль режиму роботи СК, а не відображення миттєвих значень [14-16].

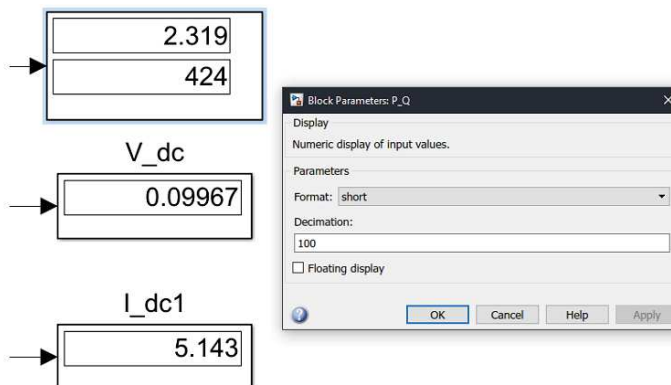


Рисунок 3.18 – Загальний вигляд та параметри дисплею

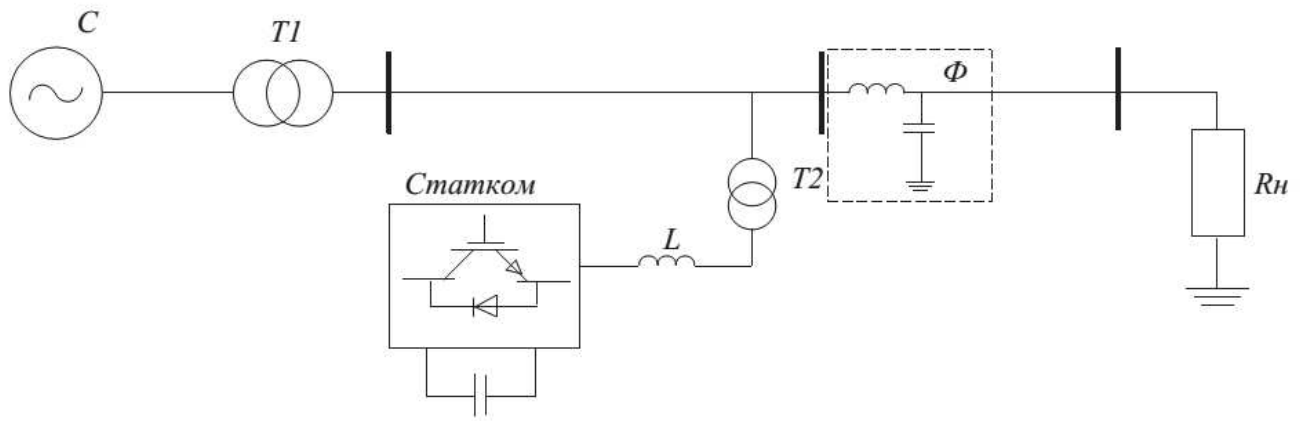


Рисунок 3.19 – Електрична принципова схема розроблюваної моделі

Таблиця 3.1 – Параметри розроблюваної схеми [8-12]

Елемент схеми	Параметр	Значення
ЕЕС С	Лінійний рівень напруги $U_{л}$, кВ	25
	Величина частоти f , Гц	50
	Загальна потужність S , МВА	10
Понижувальний трансформатор T1	Рівень напруги первинної обмотки V_1 , кВ	25
	Опір первинної обмотки R_1L_1 , Ом	0,004;0,02
	Рівень напруги вторинної обмотки V_2 , кВ	0,38
	Опір вторинної обмотки R_1L_1 , Ом	0,004;0,02
	Частота f , Гц	50
	Номинальна потужність S , кВА	50
Сполучний трансформатор T2	Рівень напруги первинної обмотки V_1 , кВ	12
	Опір первинної обмотки R_1L_1 , Ом	1,0;0,02
	Рівень напруги вторинної обмотки V_2 , кВ	380
	Опір вторинної обмотки R_1L_1 , Ом	0,4;0,02
	Частота f , Гц	50
	Номинальна потужність S , ВА	500
Фільтр гармонік Ф	Ємність C , мкФ	60
	Індуктивність L , Гн	0,002

Реактор L	Індуктивність L, Гн	0,001
Навантаження R_n	Активна потужність P, Вт	1000
	Реактивна потужність Q, ВАр	1000
Конденсатор на ланцюзі постійної сили струму ПН	Ємність C, мкФ	1000

На рисунку 3.19 наведено силову частину моделі, побудованої в MATLAB/Simulink [14-16] (див. рис. 3.2). ЕЕС позначається С, понижувальний трансформатор T1, ПН в якості компенсатора реактивної потужності STATCOM [17], реактор для фільтрації вищих гармонік L, сполучний трансформатор T2, фільтр вищих гармонік Φ та еквівалентне навантаження R_n . Параметри електричної принципової схеми представлені в табличному вигляді (див. табл. 3.1).

3.2 Дослідження роботи системи керування перетворювачем напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності

Дослідження роботи СК ПН на віртуальній моделі і в першому, і в другому випадках виконувались при наступних налаштуваннях: коефіцієнт заповнення ШІМ, $k = 1$; частота ШІМ $f_{ШІМ} = 500 \text{ Гц}$.

На віртуальній моделі виконано два дослідження в неповнофазному та повнофазному режимах роботи.

Умовні позначення, що використовувались під час виконання дослідження роботи СК: ψ – кут зміщення сигналу керування; $P_{ПР}$ – активна потужність ПН; $P_{нав}$ – споживана активна потужність навантаження; $Q_{ПР}$ – реактивна потужність ПН; $Q_{нав}$ – споживана реактивна потужність навантаження, $U_{ном}$ – фазний рівень напруги на навантаженні; U_{dc} – рівень напруги в ланцюзі постійної сили струму;

I_{dc} – сила струму в ланцюзі постійної сили струму.

Виконаємо дослідження роботи ПН в повнофазному режимі на віртуальній моделі. Отримані в ході дослідження дані представимо в табличному вигляді. За отриманими даними побудовані залежності на рисунках 3.20-3.22.

Таблиця 3.2 – Дані дослідження в повнофазному режимі на моделі

ψ	P_{PP}	$P_{нав}$	Q_{PP}	$Q_{нав}$	$U_{ном}$	U_{dc}	I_{dc}
0	-1,66	1020	-151,3	1020	5,9	9,11	4,5
18			-71,5		6,73	15,93	1,86
36	-1,87	1021	37,55	1021	6,9	21,19	0,95
54	-3,78		134,1		6,4	24,37	3,67
72	-5,83		181,5		5,27	25,17	6,03
90	-6,87		161,4		3,63	23,5	7,81
108	-6,41		81,7		1,62	14,54	8,81
126	-4,59		-27,8		0,55	13,66	9,96
144	-2,12	-124,1	2,65	6,44	8,23		
162	-0,58	-167	4,15	0,27	6,55		
180	-0,45	-167,6	4,18	0,09	3,88		
198	-0,38	-167,8		0,02	1,75		
216	-0,35	1020	1020	4,19	0,01	0,9	
234	-0,33					1,03	
252						0,973	
270	-167,9					1,00	
288	-0,35					2,38	
306	-0,39						
324	-0,48	-168	4,21	0,13	4,715		
342	-0,65	-171,3	4,49	1,415	6,691		
360	-1,65	-151	5,90	9,11	4,498		

З даних, отриманих на дослідженні моделі роботи СК, добре видно два режими роботи ПН, режим видачі та режим споживання реактивної потужності. Дані режими видно на рисунках 3.20-3.21 та БРМА25.00.00.000РР, в діапазоні зміни кутів керування в діапазоні від 342 (мінус 18) до 162 ел. градусів. Пряма ділянка в діапазоні від 162 до 342 градусів обумовлена тим, що в ланці постійної сили струму у ПН немає джерела енергії. Оскільки I та II квадранти графічних залежностей потужності передбачають видачу активної потужності, а в нашому випадку ПН не може отримати даний вид потужності, на цій ділянці діапазону керування ПН не впливає на мережу. Як видно з рисунку 3.22, на ділянці значень в діапазоні від 162 до 342 ел. градусів спостерігається зниження сили струму в ланці постійної сили струму практично до нуля [8-11].

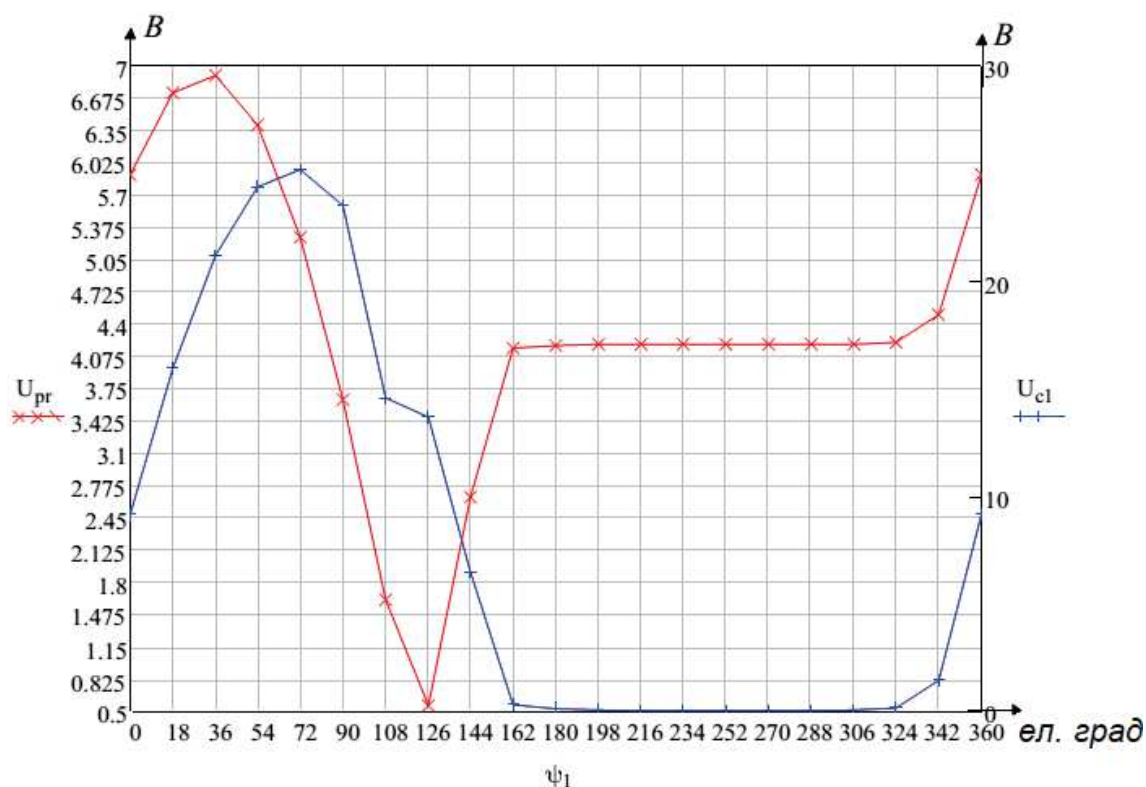


Рисунок 3.20 – Графічна залежність рівня напруги ПН і рівня напруги конденсатора від зміни кута керування

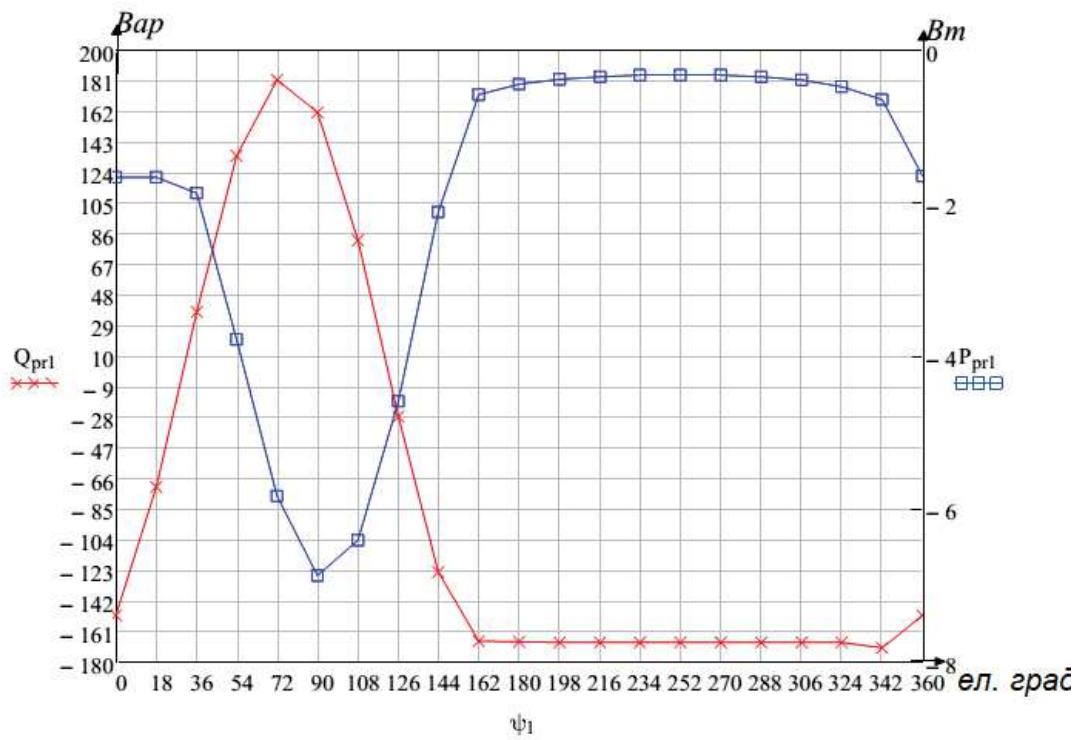


Рисунок 3.21 – Графічна залежність активної і реактивної потужності ПН від зміни кута керування

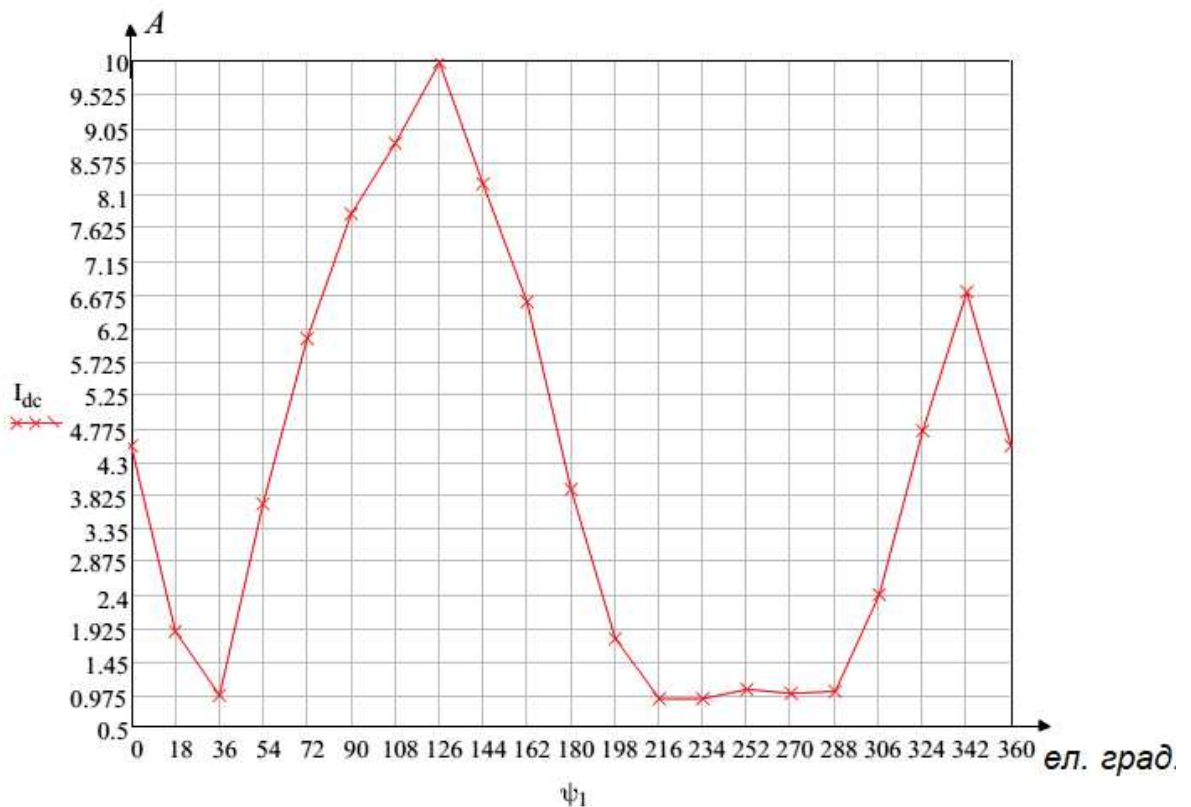


Рисунок 3.22 – Графічна залежність сили струму в ланці постійної сили струму від зміни кута керування

Проведемо дослідження роботи ПН в неповнофазному режимі роботи на моделі та на стенді. Результати експериментів, отримані на моделі, представимо в табличному вигляді та побудуємо графічні залежності на рисунках 3.23-3.25 та БРМА25.00.00.000РР.

Таблиця 3.3 - Дані дослідження в неповнофазному режимі на моделі

ψ	U_c	I	U_{AB}	U_A	U_B	P_{np}	Q_{np}	$Q_{нав}$
0	16,37	0,15	11,99	6,92		-1,93	-1,52	1021
18	16,14	0,24		6,94	6,9	-2,92	2,92	
36	14,93	1,69	11,94	7,18	6,61	-11,66	26,54	
54	16,21	5,25	11,34	7,6	5,51	-40,55	73,23	
72	17,5	8,44	9,98	7,51	4,16	-62,42	105,5	
90	18,62	10,22	8,39	7,1	2,98	-65,37	122,2	
108	18,83	11,59	6,21	6,28	1,95	-55,4	131	
126	17,79	12,25	3,66	5,11	2,13	-34,8	102,4	
144	15,53	12,04	1,51	3,72	3,57	-20,15	-10,9	
162	12,26	11,08	2,71	2,38	4,68	-35,03	-98,3	
180	8,43	9,47	4,92	1,72	5,75	-51,06	-136,5	
198	4,73	7,7	6,5	2,02	6,4	-57,91	-134,1	
216	2,24	6,54	7,27	2,38	6,68	-58,88	-131	
234	2,99	6,98	7,52	2,52	6,77	-59,08	-130,5	
252	6,74	7,91	8,08	2,92	6,93	-62,42	-131	
270	10,98	8,01	9,11	3,74	7,17	-69,11	-127,4	
288	14,26	7,12	10,22	4,79	7,29	-70,7	-105,7	
306	15,3	4,99	11,21	5,85	7,27	-57,05	-63,15	
324	15,26	2,02	11,85	6,59	7,11	-26,4	-22,13	
342	16,11	0,29	11,98	6,89	6,94	-3,96	-2,8	
360	16,37	0,15	11,99	6,92		-1,93	-1,52	

Неповнофазний режим роботи ПН не є нормальним, оскільки утворюється значна асиметрія в роботі трифазної системи. Наочний приклад несиметричності представлено на рисунку 3.24, на всьому діапазоні регулювання є велика різниця рівнів напруги фаз А та В. Тому даний режим роботи може розглядатись лише з точки зору перевірки правильності обраного шляху розроблення лабораторного компенсатора реактивної потужності, оскільки можливість випробувати фізично розроблену схему на стенді в даний момент відсутня.

Головним критерієм працездатності СК є наявність 2-х режимів роботи – режиму видачі та споживання реактивної потужності. На рисунку 3.25, в діапазоні зміни кутів керування від 0 до 180 ел. градусів, видно регулювання наявної реактивної потужності, спочатку в бік видачі, потім - в споживання, можна вважати успішним регулюванням наявної реактивної потужності [8-11].

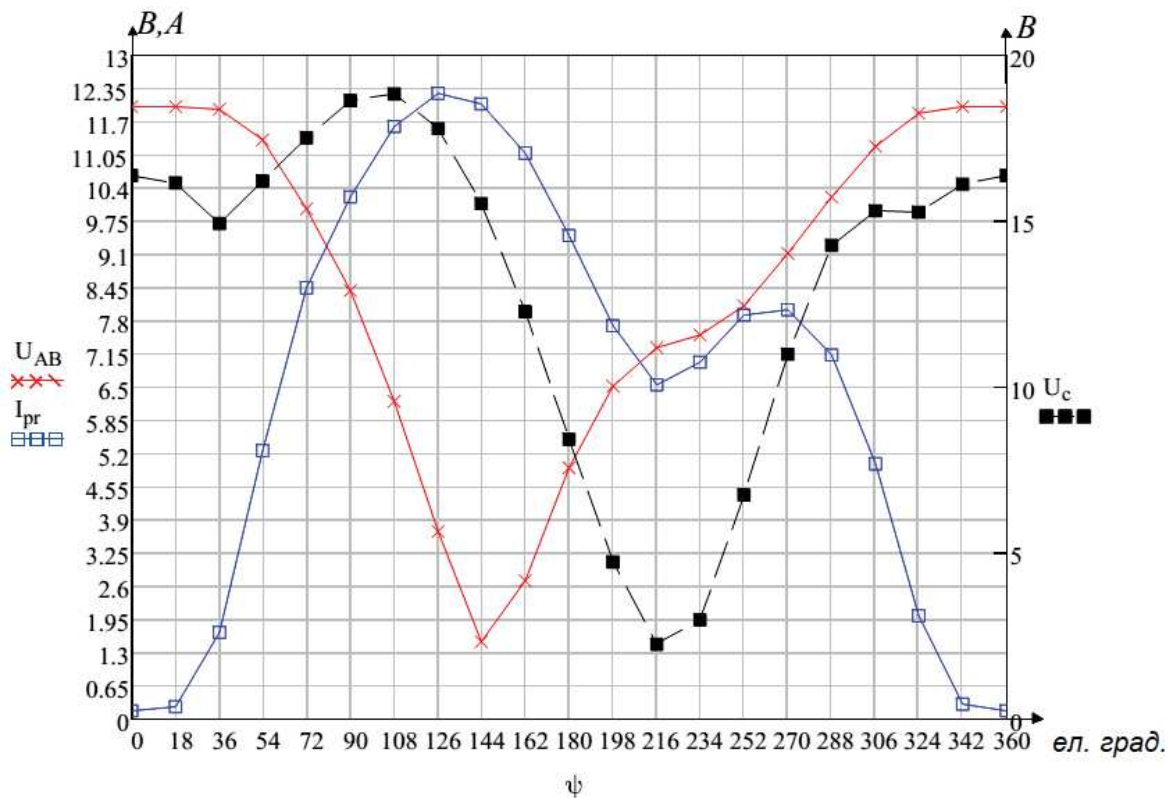


Рисунок 3.23 – Графічна залежність міжфазного рівня напруги, рівня напруги і сили струму в ланці постійної сили струму від зміни кута керування у моделі

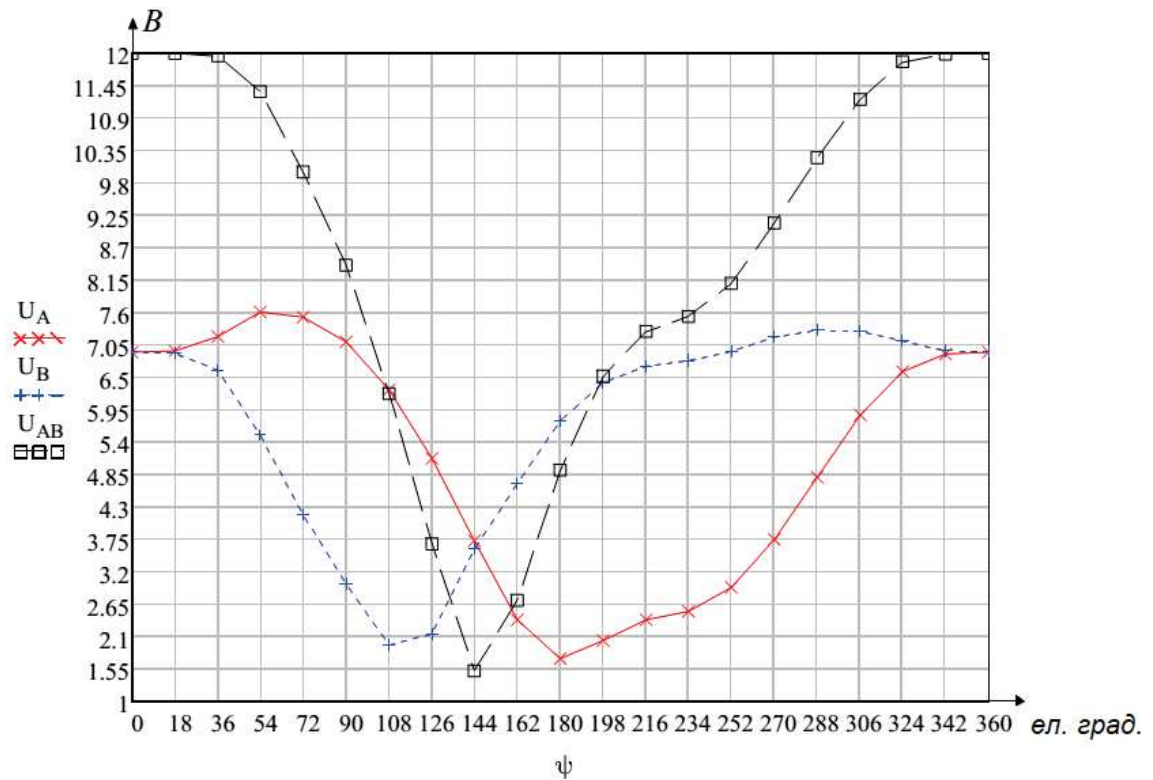


Рисунок 3.24 – Графічна залежність фазних рівнів напруги від зміни кута керування у моделі

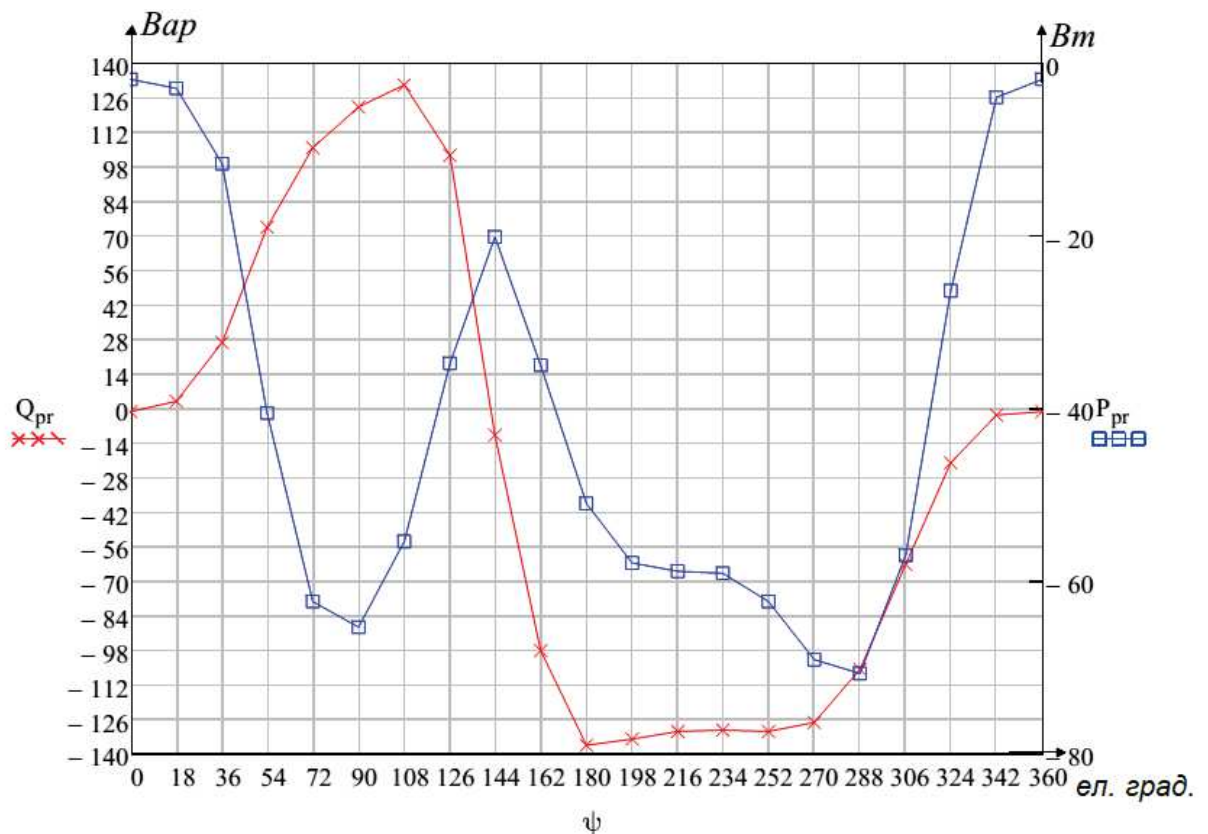


Рисунок 3.25 – Графічна залежність активної і реактивної потужності від зміни кута керування у моделі

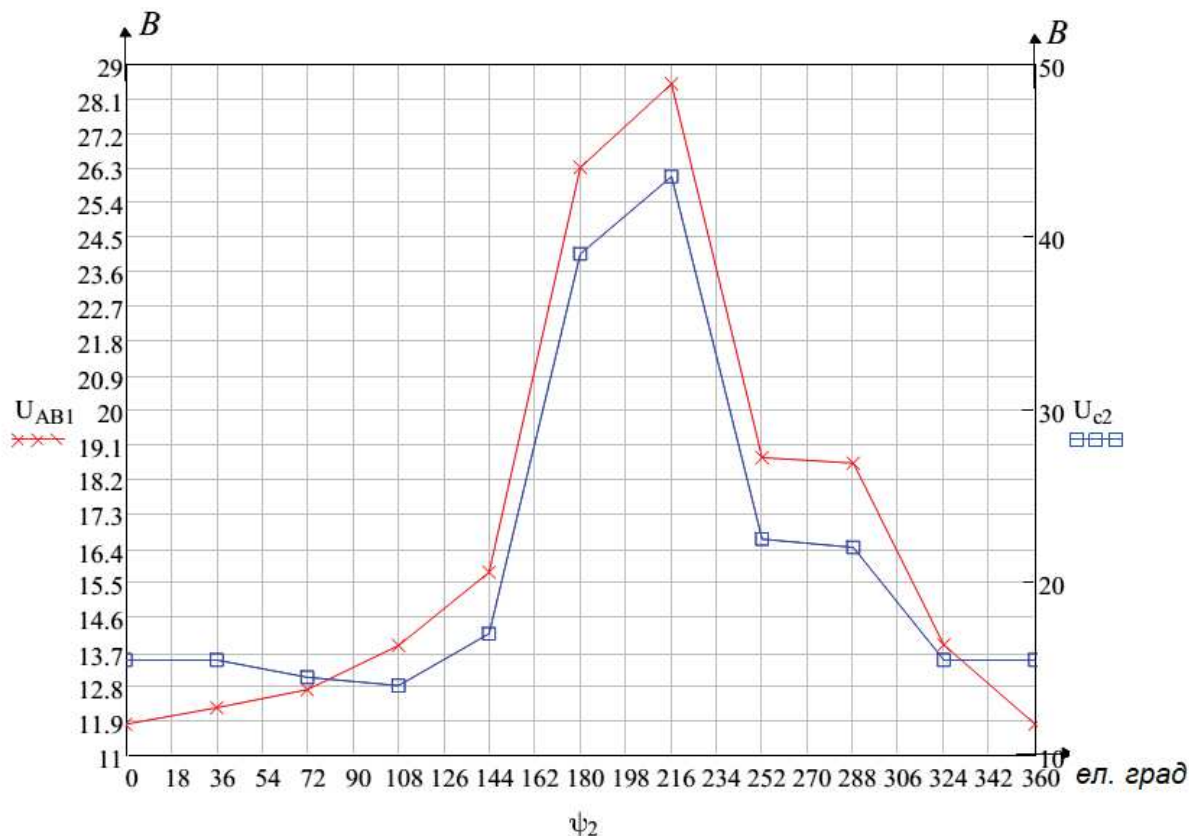


Рисунок 3.26 – Графічна залежність міжфазного рівня напруги і рівня напруги в ланці постійної сили струму від зміни кута керування в лабораторному стенді

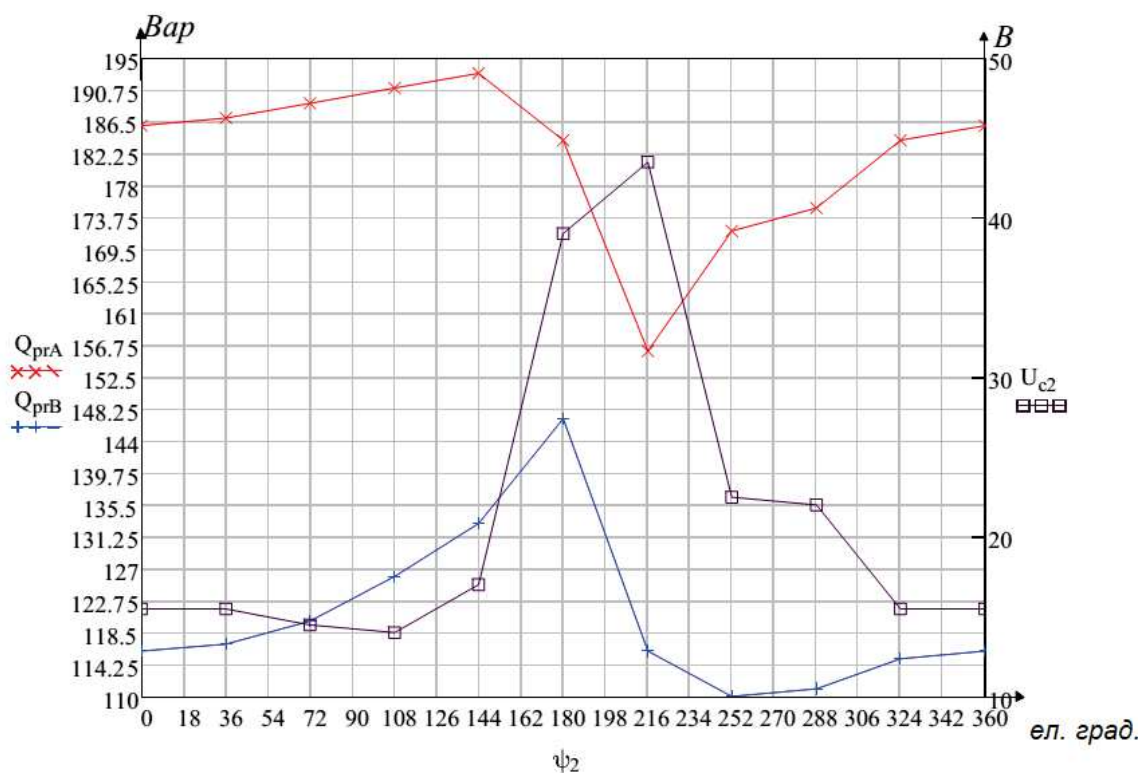


Рисунок 3.27 – Графічна залежність реактивних потужностей фаз і рівня напруги в ланці постійної сили струму від зміни кута керування в лабораторному стенді

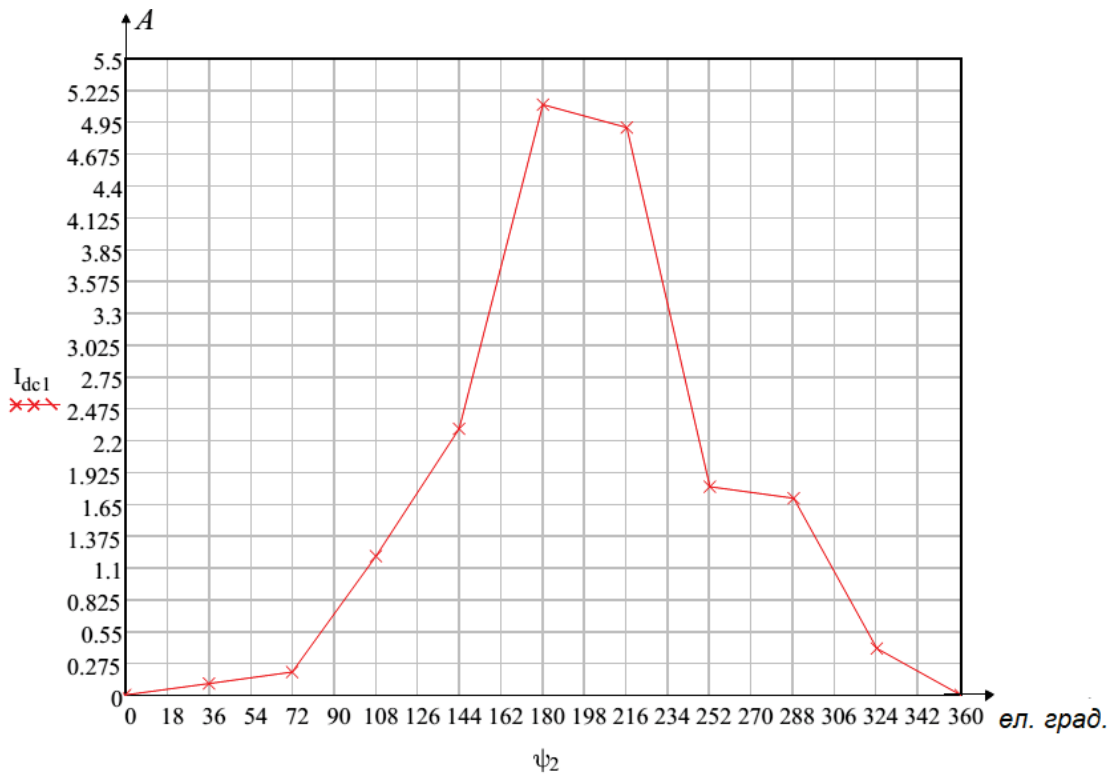


Рисунок 3.28 – Графічна залежність сили струму в ланці постійної сили струму від зміни кута керування в лабораторному стенді

Також варто відмітити, що СК лабораторним стендом не синхронізована рівнем напруги по фазі, тому справжня точка відліку, в якій сигнал керування збігається по фазі з рівнем напруги мережі, знаходиться не в нулі, показаному в таблиці 3.4 та на рисунках 3.26-3.28 та БРМА25.00.00.000PP [8-11].

Висновки до третього розділу

Було виконано розробку моделі системи керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності в програмному середовищі MATLAB/Simulink та проведено аналітичне дослідження роботи системи керування перетворювачем напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Було виконано огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень систем керування силовими напівпровідниковими перетворювачами. Розглянуто особливості використання систем імпульсно-фазового керування перетворювачами сили струму та систем керування перетворювачами рівня напруги та ШІМ.

Було проведено розроблення системи керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності, спочатку було розроблено алгоритм керування перетворювачем рівня напруги, потім і саму систему керування перетворювачем рівня напруги для лабораторного компенсатора реактивної потужності.

В результаті виконаної бакалаврської кваліфікаційної роботи була розроблена СК лабораторним ПН, запропоновані алгоритми керування ключами і виконана програмна реалізація на моделі в програмному середовищі MATLAB/Simulink, а потім і в мікроконтролері керування на лабораторному стенді.

За допомогою моделі виконана перевірка алгоритмів СК, яка продемонструвала їх адекватність. Реалізація алгоритмів СК в залізі і результати досліджень показали працездатність ПН в неповнофазному і повнофазному режимах роботи в якості компенсатора реактивної потужності, і підтвердили здатність ПН виконувати необхідні функції на заданому рівні напруги.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка» / М. І. Шпіка, С. О. Закурдай, В. А. Герасименко. – Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2019. – 82 с.

10. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с. ISBN 978-617-7470-78-5

11. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги / М.Я. Островерхов, В.І. Сенько, В.І. Чибеліс. – Київ, 2020. – 242 с. ISBN 78-617-7844-10-4

12. Основи мікропроцесорної техніки: лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / В.С.Баран, Г.Г.Власюк, Ю.О.Оникієнко, О.І.Смоленська ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,42 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. –140 с.

13. Офіційний сайт Arduino [Електронний ресурс]. - Режим доступу:
<https://www.arduino.cc>.

14. Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: Комп'ютерний практикум / М.Д. Гераїмчук, Ю.Ф. Лазарєв, Т.О. Толочко – К., 2006. – 175с.

15. Моделювання динамічних систем у MATLAB. Електронний навчальний посібник / Лазарєв Ю. Ф. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.

16. Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с.

17. Control system for a PWM-based STATCOM P. Garcia-Gonzalez and A. Garcia-Cerrada (Member IEEE) E.T.S. de Ingenieria (ICAI) Universidad Pontificia

Comillas de Madrid c/ Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid, Spain

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Текст програми першої версії СК мовою Arduino Wiring

```
volatile long faza1;
volatile long faza2;
volatile long faza3;
volatile long faza4;
volatile int faza;
volatile int val;
volatile int val1;
void setup() {
pinMode (3,OUTPUT);
pinMode (4,OUTPUT);
pinMode (6,OUTPUT);
pinMode (8,OUTPUT);
pinMode (2, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(0, blink2, RISING);
faza1 = 0;
faza2 = 9800;
faza3 = 9800;
faza4 = 0;
Serial.begin(9600);
}
void loop() { }
void blink2(){
faza = analogRead(6);
faza = map(faza, 0, 1023, 0, 19600);
val = constrain(faza, 0, 9800);
val1 = constrain(faza, 9800, 19600);
faza1 = 9800 - val;
```

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		58

```

faza2 = 19600 - val1;
faza3 = 0 + val;
faza4 = -9800 + val1;
if (faza1 > 0){
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(8, HIGH);
delayMicroseconds(faza1);
}
if (faza2 > 0){
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(6, HIGH);
delayMicroseconds(faza2);
}
if (faza3 > 0){
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(8, HIGH);
delayMicroseconds(faza3);
}
if (faza4 > 0){
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(6, HIGH);
delayMicroseconds( faza4);
} }

```

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

59

Таблиця А.1 - Результати експерименту з перетворювачем напруги першої версії

α_0	I_Φ	U_C	P_Σ	Q_Σ	S_Σ	U_{AB}
-180,0	8,1	1,0	95	441	467	2,0
-158,4	8,1	1,0	94	444	468	2,0
-144,0	8,1	1,0	93	445	470	2,0
-129,6	8,1	1,0	93	444	468	2,0
-115,2	8,0	1,0	93	441	465	2,0
-100,8	8,0	1,0	93	442	465	2,0
-86,4	8,0	1,0	93	446	469	2,0
-72,0	7,9	1,0	94	443	467	2,0
-57,6	7,8	1,0	93	442	465	2,0
-43,2	7,0	2,0	92	433	457	2,5
-28,8	4,8	5,0	72	414	436	4,5
-14,4	2,0	9,0	53	387	411	9,5
0	0,8	12,0	48	364	390	12,5
14,4	1,3	13,5	51	350	376	14,0
28,8	2,3	14,0	61	341	367	14,0
43,2	3,7	15,0	76	335	362	14,0
57,6	5,5	15,5	97	334	365	14,0
72,0	7,0	15,0	117	340	377	13,5
86,4	8,1	14,0	133	356	395	12,5
100,8	8,5	11,5	137	372	410	11,0
115,2	9,0	9,0	136	394	431	9,5
129,6	9,3	7,0	131	412	445	7,5
144,0	9,4	5,0	121	427	456	5,5
158,4	9,2	3,0	107	438	463	3,0
180	8,8	1,0	96	440	464	2,5

Додаток Б

Код програми для другого варіанту мовою Arduino Wiring

```
int8_t i;
volatile boolean flag; // перемінна, що запускає цикл після переривання
int faza; // перемінна, що зберігає дані з резистора налаштування
boolean flag2; // перемінна для індикації завершення циклу
int16_t PWM [6][20] = {
  {32, 408, 1364, 408, 32, 32, 408, 1364, 408, 32, 32, 408, 1364, 408, 32, 32, 408,
  1364, 408, 32},
  {6, 6, 6, 6, 6, 3, 3, 3, 3, 3, 6, 6, 6, 6, 6, 3, 3, 3, 3, 3},
  {4, 4, 4, 4, 4, 8, 8, 8, 8, 8, 4, 4, 4, 4, 4, 8, 8, 8, 8, 8},
  {3, 3, 3, 3, 3, 6, 6, 6, 6, 6, 3, 3, 3, 3, 3, 6, 6, 6, 6, 6},
  {8, 8, 8, 8, 8, 4, 4, 4, 4, 4, 8, 8, 8, 8, 8, 4, 4, 4, 4, 4},
  {1768, 1960, 1960, 1768, 4, 1768, 1960, 1960, 1768, 4, 1768, 1960, 1960, 1768, 4,
  1768, 1960, 1960, 1768, 4,} // масив, що зберігає затримки та тривалості ШІМ
  сигналів, а також номери пінів на які відправляють даний сигнал
};
void setup() {
  pinMode (3, OUTPUT); // піни керуючі транзисторами пари транзисторів 4-8 і 3-6
  pinMode (6, OUTPUT);
  pinMode (4, OUTPUT);
  pinMode (8, OUTPUT);
  pinMode (A6, INPUT); // пін резистора налаштування
  pinMode (2, INPUT_PULLUP); // пін переривання
  attachInterrupt (0, blink2, RISING);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  faza = analogRead(6);
```

```

faza = map(faza, 0, 1023, 0, 9);
faza = constrain(faza, 0, 9);
while (flag){
Serial.println(flag);
for (i = faza;i < 10 + faza; i++){
digitalWrite(PWM [1][i], LOW);
digitalWrite(PWM [2][i], LOW);
digitalWrite(PWM [3][i], HIGH);
digitalWrite(PWM [4][i], HIGH);
delayMicroseconds(PWM [0][i]);
digitalWrite(PWM [3][i], LOW);
digitalWrite(PWM [4][i], LOW);
delayMicroseconds (PWM [5][i]);
}
flag = 0; }
}
void blink2(){
flag = 1;
}

```

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		62

Таблиця Б.2 - Результати експерименту із системою керування другої версії

ψ	U_{AB}	I	U_c	Q_A	Q_B	Z_Σ
-180	26,3	5,1	39	184	147	508
-144	28,47	4,9	43,5	156	116	448
-108	18,74	1,8	22,5	172	110	460
-72	18,60	1,7	22	175	111	465
-36	13,87	0,4	15,5	184	115	477
0	11,8	0,0	15,5	186	116	480
36	12,22	0,1	15,5	187	117	483
72	12,69	0,2	14,5	189	120	487
108	13,85	1,2	14	191	126	496
144	15,76	2,3	17	193	133	505