

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
Кафедра електричної інженерії

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «**РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ  
НА БАЗІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА**»

Виконав: студент VI курсу, групи ЕТм-61,  
спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Пихач Василь Ігорович

(прізвище та ініціали)

Керівник Дупенко А.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Тернопіль – 2022 рік

## Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

Кафедра Електричної інженерії

Освітньо-кваліфікаційний рівень - магістр

Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

**Електричної інженерії**

**д.т.н., проф. Тарасенко М.Г.**

“14” листопада 2022 року

### **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Пухачу Василю Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка системи автономного електропостачання споживачів на базі вітрогенератора»

керівник роботи Дупенко Анатолій Миколайович, д.т.н., професор

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 09.11. 2022 р. № 4/7-883

2. Строк подання студентом роботи - грудень 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Виконати розробку принципової схеми перетворення енергії вітру в електричну. Розробити схему широко-імпульсного регулювання для управління силовими ключами. Розробити генератори пилоподібної синусоїдної форми напруги, П-подібних імпульсів, схеми вибору і контролю джерел енергії, схеми блоку живлення перетворювача. Розробити друковану плату перетворювача для вітрогенератора.

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунково-дослідницький розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

1. Актуальність теми, предмет і об'єкт дослідження, поставлені задачі та шляхи їх розв'язку

2. Структурна схема вітрогенератора

3. Функціональна схема вітрогенератора

4. Схема електрична принципова перетворювача для вітрогенератора

5. Алгоритм розробки друкованої плати перетворювача вітрогенератора

6. Діаграми роботи вітрогенераторної установки

7. Загальні висновки до кваліфікаційної роботи

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Гурик О.Я., к.т.н., доцент</i>		
	<i>Клевич В.М., ст. викладач</i>		
<i>Напмоконтроль</i>	<i>Мовчан Л.Т., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання - листопад 2022 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Аналітичний розділ</i>		
2	<i>Проектно-конструкторський розділ</i>		
3	<i>Розрахунково-дослідницький розділ</i>		
4	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>		
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>		
6	<i>Оформлення графічної частини</i>		

Студент

\_\_\_\_\_ **Пихая В. І.**  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ **Дупенко А. М.**  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пихач В.І. Розробка системи автономного електропостачання споживачів на базі вітрогенератора, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕЕМ-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2022

Стор. - 77; рис. - 40; табл. - 1; плакатів - 7; джерел – 41.

У кваліфікаційній роботі розроблено проект пристрою перетворення енергії вітру в електричну енергію для автономного електропостачання споживачів. Таким пристроєм є блок, що перетворює вироблену енергію обертанням лопатей вітрогенератора за рахунок вітру, в електроенергію мережі. На виході перетворювача отримуємо напругу 220 В з частотою 50 Гц і потужністю 500 Вт.

Особливість даного пристрою полягає в тому, що форма сигналу на виході пристрою повторює форму синусоїди, у відсутності вітру пристрій працює в автономному режимі від акумуляторної батареї з можливістю самостійного заряджання батареї від вітрогенератора. Крім того, є можливість постійно стежити за джерелами електропостачання і проводити вибір між ними, що дозволяє даному пристрою бути повністю автономним. Час роботи пристрою від резервного джерела живлення становить до 8 годин.

**Ключові слова:** автономне електропостачання, вітрогенератор, електрична мережа, інвертор, функціональна схема, генератор імпульсів

## ABSTRACT

Pyhach V. Development of a system of autonomous electricity supply to consumers based on a wind generator. 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Chair of Electrical Engineering, group EEM-61. – Ternopil: TNTU, 2022

Page – 77; Illustrations – 40; Tables – 1; Blueprints – 7; Sources – 41.

In the qualifying work, a project of a device for converting wind energy into electrical energy for autonomous power supply of consumers was developed. Such a device is a unit that converts the energy produced by the rotation of the wind generator blades due to the wind into electricity from the network. At the output of the converter, we get a voltage of 220 V with a frequency of 50 Hz and a power of 500 W.

The peculiarity of this device is that the shape of the signal at the output of the device repeats the shape of a sine wave, in the absence of wind, the device works in autonomous mode from the battery with the possibility of independent charging of the battery from the wind generator. In addition, it is possible to constantly monitor the sources of power supply and make a choice between them, which allows this device to be completely autonomous. The operating time of the device from a backup power source is up to 8 hours.

**Key words:** autonomous power supply, wind generator, electrical network, inverter, functional scheme, pulse generator

# ЗМІСТ

## ВСТУП

### 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Класифікація вітроенергетичних установок

1.2 Аналіз вітрогенераторів з різними осями обертання

1.3 Інсталяція, надійність і продуктивність вітроелектричної установки

1.4 Розрахунок згенерованої вітрогенераторною установкою енергії

1.5 Доцільність встановлення вітрогенераторної установки

### 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Дослідження та розробка генераторів напруги

2.2 Дослідження та розробка пристрою розподілу імпульсів управління

2.3 Дослідження схеми вибору і контролю джерел енергії

2.4 Дослідження схеми блоку живлення перетворювача

2.5 Алгоритм розробки друкованої плати перетворювача для вітроенергетичної установки

### 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Аналіз завдання і способи його реалізації

3.2 Розробка структурної схеми перетворювача

3.3 Розробка функціональної схеми перетворювача

3.4 Розробка принципової схеми перетворення енергії вітру в електричну

3.5 Розробка схеми регулювання для управління силовими ключами

### 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Заходи з охорони праці під час експлуатації вітрових турбін

4.2 Техніка безпеки при монтажі і експлуатації системи стабілізації

4.3 Розрахунок блискавкозахисту об'єкта

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Вітроенергетика представляє собою галузь енергетики, яка пов'язана з розробкою методів та засобів перетворення енергії вітру на механічну, теплову чи електричну енергію. Енергія вітру (кінетична енергія вітрового потоку) є формою сонячної енергії: утворення вітру є наслідком діяльності сонця [1].

Сам процес використання енергії вітру, яка є практично невичерпною, не вимагає спалювання вуглеводневого палива, не має викидів вуглекислого газу, не пов'язаний з наявністю радіоактивних відходів, які можуть бути небезпечними протягом доволі тривалого періоду. На думку екологів вітроенергетика є одним із найважливіших напрямків для боротьби з викидами парникових газів, а також сучасною зміною клімату [2].

Але вітроенергетика володіє деякими недоліками, зокрема:

- нестабільна та нерегульована генерація електроенергії;
- досить значні капітальні витрати на одиницю потужності у порівнянні класичними тепловими електростанціями;
- потреба у розвитку мережної інфраструктури;
- присутнє явище шумового, візуального та електромагнітного вплив на навколишнє середовище, а також здоров'я людини.

Проблеми, які виникають при роботі з вітроелектростанціями, уже зараз успішно вирішуються, зокрема конструктори добилися зниження рівня шуму та вібрацій за рахунок підбору швидкості обертання вітроколеса і покращенням профілю лопатей. Завдяки цьому вдалося зменшити зрив кінцевих потоків та вихрових навантажень. Було запропоновано спосіб боротьби з ще одним недоліком вітроенергетичних установок, а саме: вітроколесо стали огороджувати сітчастим кожухом, щоб птахи не потрапляли під його лопаті під час руху [3].

На сьогоднішній день вітроенергетика є одним із перспективних напрямків використання альтернативних джерел енергії в енергетичній галузі. Але маючи досить сприятливі природні умови та достатню привабливість вітрової енергетики, Україна на даний час практично не володіє ні потужними

вітровими парками, ні одиничними вітроенергетичними установками навколо сільських господарств та заміських ділянок [4].

Енергія вітру уже протягом довгого часу розглядається в якості екологічно чистого безмежного джерела енергії. Але щоб енергія вітру змогла дати якусь користь, необхідно спочатку вирішити багато проблем, основними з яких є: висока ціна вітроенергетичних установок, їх здатність надійно працювати в автоматичному циклі на протязі довгого часу і забезпечувати стабільне електропостачання. Відповідно, на даний час найбільш актуальною задачею, яку ставлять перед вітроенергетикою, є зменшення питомої вартості електричного обладнання. І одним із таких шляхів зниження вартості може бути застосування ряду економічних структур електричного обладнання.

Поштовхом до цієї кваліфікаційної роботи стали доволі часті та досить неприємні на сьогоднішній день відключення електроенергії. Так як однією із причин відключення, окрім наслідків воєнних дій, є також сильний вітер, то було прийнято рішення саме його використовувати в якості джерела енергії.

У запропонованій моделі цієї кваліфікаційної роботи було використано не класичний пропелер, який доволі складним у виготовленні, а жорстку конструкцію, що у робочому режимі здійснює рух перпендикулярно до напрямку вітру, а в холостому режимі - повертається у початкове положення при мінімальному опорі вітру.

Можна сказати, що робота є досить актуальною, оскільки запаси невідновлюваних сировинних ресурсів, а саме нафти, газу та вугілля мають свій резерв і будуть вичерпані. Чим активніше ми їх використовуємо сьогодні, тим менше їх залишається на майбутнє і тим дорожчими вони стають для споживача. Згідно даних розрахунків, проведених фахівцям, за нинішніх обсягів та темпів видобутку вугілля їх запасів вистачить десь 400 років, а нафти та газу приблизно на 100 років. Завдання освоєння екологічно чистих, відновлюваних, тобто нетрадиційних джерел енергії сьогодні є досить актуальним і серед них тільки сонячна енергія та енергія вітру є насправді невичерпними і не впливають на будь які зміни в природньому середовищі [5].



**Мета і завдання досліджень.** Метою цієї кваліфікаційної роботи є розробка вітроенергетичної установки з контролером керування та визначення її оптимальних технічних характеристик і яка буде використовуватися у якості автономного джерела живлення для споживачів.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені такі завдання:

- проведено аналіз вітрогенераторів з різними осями обертання, їх класифікацію, аналіз методів розрахунку згенерованої вітрогенераторною установкою енергії та доцільність їх встановлення;
- розроблено структурну схему вітрогенератора;
- розроблено функціональну схему вітрогенератора;
- розроблено схему електричну принципову перетворювача для вітрогенератора;
- запропоновано алгоритм розробки друкованої плати перетворювача вітрогенератора;
- отримано діаграми роботи вітрогенераторної установки.

**Об'єктом дослідження** є електротехнічний комплекс на основі вітроенергетичної установки, що використовується в якості автономної системи електропостачання.

**Предметом дослідження** є вітроенергетична установка, що застосовується в якості альтернативного джерела електропостачання в умовному гаражному кооперативі.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в розробці схеми широко-імпульсного регулювання для управління силовими ключами та схеми генератора пилоподібної і синусоїдної форми напруги для запропонованої вітроенергетичної установки.

**Практичне значення одержаних результатів роботи.** Практична значимість виконаної роботи полягає в можливості застосування розробленої моделі вітроенергетичної установки в якості альтернативного джерела постачання електричної енергії.

## **Апробація результатів магістерської роботи.**

Основні положення роботи і її результати доповідалися на XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 7-8 грудня 2022 р. (м. Тернопіль)

## **Публікації.**

За результатами виконаних досліджень опубліковано 1 тезу доповідей «Дослідження стійкості роботи електропередачі вітроенергетичної установки в енергосистемі». Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7-8 грудня 2022) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2022.

## **Структура роботи.**

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (41 найменування).

Загальний обсяг текстової частини: 77 сторінок, 1 таблиця, 40 рисунків.

# 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Класифікація вітроенергетичних установок

Вітроенергетика є галуззю енергетики, яка спеціалізується на перетворенні кінетичної енергії вітру атмосфери в електричну, механічну, теплову або іншу форму енергії, що використовується різними споживачами. Процес перетворення енергії можна реалізувати такими агрегатами, як вітрогенератор, який служить для отримання електричної енергії і вітряк, що використовується для перетворення енергії вітру на механічну енергію та інші допоміжні вузли [6].

Енергію вітру є відновлюваним видом енергії, а сама вітроенергетика досить швидко розвивається і на сьогодні потужність вітрових електростанцій складає біля 800 ГВт та продовжує зростати [6].

Вітроенергетичні установки класифікують за наступними ознаками [7].

1. За положенням осі обертання вітроколеса, яка може бути паралельною або перпендикулярною до повітряного потоку. У 1-му випадку буде мати горизонтально-осьовий тип, у 2-му це буде вертикально-осьовий тип (рис. 1.1).



а)



б)

Рисунок 1.1 – Вітрогенератори з осями обертання вітроколеса:  
а) горизонтальною; б) вертикальною

2. За привідною силою установки в рух, яка може бути обертальною або підйомною. Установки з використанням обертальної сили опору зазвичай

обертаються з лінійною швидкістю, яка є меншою від швидкості вітру, а установки з підйомною силою мають лінійну швидкість кінців лопатей, яка є набагато більшою за швидкість вітру.

3. За геометричним заповненням вітрового колеса. Більшість установок визначається за кількістю лопатей і вітроенергетичні установки з великим геометричним заповненням вітрового колеса можуть досягати великої потужності при невеликій силі вітру, а максимальна потужність виникає при малих обертах вітроколеса. Вітроенергетичні установки з малим наповненням розвивають максимальну потужність при значних обертах і довго виходять на цей режим. Установки з великим геометричним заповненням вітрового колеса використовуються в якості водяних насосів і можуть працювати при слабкому вітрі з повною працездатністю, а установки з малим наповненням використовуються в якості електрогенераторів, де необхідна висока частота обертання колеса.

4. За кількістю лопатей розрізняють наступні типи (рис. 1.2):

- однолопатеві вітрогенератори;
- дволопатеві і трилопатеві вітрогенератори;
- багатолопатеві вітрогенератори.

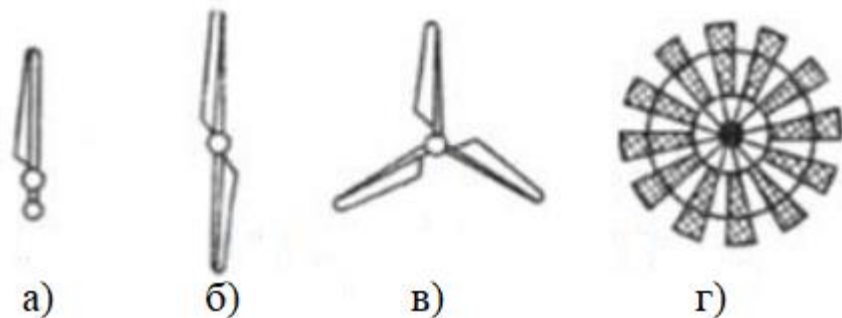


Рисунок 1.2 – Вітрогенератори за кількістю лопатей:  
а) однолопатеві; б) дволопатеві; в) трилопатеві; г) багатолопатеві

Багатолопатеві вітроустановки розпочинають рух на малих швидкостях у порівнянні з 1-, 2- і 3-лопатевиими генераторами, але для генерації електричної енергії головним чинником є досягнення необхідних оборотів. Наприклад, генератори з малими оборотами на постійних магнітах можуть досягати в номіналі більше 400 оборотів за хвилину.

Кожна додаткова лопать викликає збільшення загального опору вітрового колеса, що утруднює досягнення робочих обертів генератора, тобто необхідно збільшити швидкість вітру. Відповідно багатолопатеві генератори для вироблення ж електроенергії на практиці починають рух на малих швидкостях, створюючи видимість активної роботи. Багатолопатеві вітроустановки можна використати у тих випадках, коли потрібно підтримати низькі оберти, наприклад, при перекачуванні води, при роботі простих механізмів. В цих установках можна встановлювати редуктори для підвищення обертів, але приводить до зниження надійності системи в цілому та підвищення рівня обслуговування.

5. За матеріалами лопатей розрізняють наступні типи (рис. 1.3):

- вітрогенератори з жорсткими лопатями;
- вітрогенератори з вітрильними лопатями.



а)



б)

Рисунок 1.3 – Вітрогенератори за матеріалом лопатей:  
а) жорсткі; б) вітрильні

Іноді виникають питаннями при встановленні вітрильних лопатей, оскільки вони є недорогими, а також простими при виготовленні. Хоча вітрильні лопаті значно дешевші за жорсткі лопаті зі склопластику та металу і простіші у виготовленні, але такий вибір може потім спричинити великі витрати.

Якщо взяти вітроколесо діаметром 3 метри при робочих обертах генератора до 600 обертів за хвилину, то кінець лопаті буде обертатися зі швидкістю біля 500 км/год. Така швидкість є складним навантаженням навіть при ідеальних умовах, а ще потрібно врахувати наявність пилу і піску в повітрі, що зумовлює щорічне обслуговування для жорстких лопатей, зокрема необхідно замінити антикорозійну плівку на кінцях лопатей. На відміну від парусної, жорстка лопата у цьому випадку може працювати без обслуговування, хоча можуть знизитися технічні характеристики та виникнути неприємний шум.

А от вітрильна лопать вимагає повної заміни після сильного вітру, відповідно для автономного електропостачання споживачів її застосовувати не рекомендують, бо тут потрібна велика надійність складових системи.

6. За кроком гвинта розрізняють наступні типи:

- з фіксованим кроком гвинта;
- зі змінним кроком гвинта.

Вітрогенератори першого типу досягають великої ефективності тільки в певному діапазоні швидкостей. Змінний крок гвинта дозволяє розширити цей діапазон, але використання цього механізму підвищує складність конструкції лопаті, веде до зменшення загальної надійності генератора, збільшення маси і, відповідно до додаткового посилення конструкції та частішого обслуговування. Ці фактори впливають на високу ціну та складність при експлуатації. На практиці оправдав себе фіксований крок лопатей при змінному куті закрутки, який дозволяє в певних межах збільшити діапазон швидкостей та не тягне за собою суттєвого подорожчання вітроколеса та зниження його надійності.

На даний час найбільшого розповсюдження у світі отримали вітроелектричні установки із горизонтальною віссю обертання з трьома лопатями, оскільки це є оптимальним числом лопатей згідно теорії «ідеального вітроколеса». Із-за масивної конструкції та малого коефіцієнта використання вітру вертикально-осьові установки є менш розповсюдженими. До основних типів вертикально-осьових установок можна віднести чашковий ротор, ротор Дар'є та ротор Савоніуса (рис. 1.4).



а)



б)



в)

Рисунок 1.4 – Вертикально-осьові вітроустановки:  
а) чашковий ротор; б) ротор Дар'є; в) ротор Савоніуса

Миттєву потужність вітрогенератора з ідеальним вітроколесом та горизонтальною віссю обертання може знайти за формулою:

$$P = (\eta \cdot K_{\text{вев}} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot D^2)/8, \quad (1.1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії генератора;

$K_{\text{вев}}$  – значення коефіцієнта використання енергії вітру;

$\rho$  - значення щільності повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  - значення поточної швидкості вітру, м/с

$D$  – значення діаметру вітроколеса, м.

Погодинну, добову та річну генерацію може розрахувати на основі даних метеоспостережень за поточним місцем розташування установки або при допомозі гістограм Вейбула.

Миттєву потужність вітрогенератора з ідеальним ротора Дар'є та вертикальною віссю обертання може знайти за формулою:

$$P = (\eta \cdot K_{\text{вев}} \cdot \rho \cdot V \cdot H \cdot D)/2, \quad (1.2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії генератора;

$K_{\text{вев}}$  – значення коефіцієнта використання енергії вітру;

- $\rho$  - значення щільності повітря, кг/м<sup>3</sup>;  
 $V$  - значення поточної швидкості вітру, м/с  
 $H$  - значення висоти ротора, м;  
 $D$  – значення діаметру вітроколеса, м.

## 1.2 Аналіз вітрогенераторів з різними осями обертання

Вітрові генератори потужністю від 100 кВт до декількох мегават, які відносяться до класу великих генераторів, відповідно до своєї конструкції передбачені тільки на роботу з трилопатеvim вітродвигуном, оскільки тільки така схема є динамічною і збалансованою, досить стійкою при великих розмірах та значних навантаженнях на конструкцію [9].

До переваг зазначених вітрогенераторів можна віднести відносно малий рівень шуму у порівнянні з іншими конструкціями.

До недоліків таких вітрогенераторів можна віднести наступне:

- низький коефіцієнт корисної дії;
- невисока швидкість обертання генератора;
- присутність динамічного балансу, що позначається на згинальному моменті лопаті під тиском вітру;
- потреба в синхронізації повороту лопатей.

В малих вітроенергетичних установках малої потужності вигідно використовувати одну лопать (рис. 1.5), хоча в цьому випадку є свої переваги і недоліки.



Рисунок 1.5 – Вітрогенератор з однією лопаттю



До переваг цього типу вітрогенераторів можна віднести наступне:

- швидкість обертання у порівнянні з 3-х лопатевими є в 3 рази вищою;
- для високошвидкісних вітроустановок потрібен менш тихохідний генератор, який значно дешевшим та легшим;
- має високий коефіцієнт корисної дії;
- вартість є у два рази меншою у порівнянні з 3-лопатевими вітроенергетичними установками;
- присутнє статичне балансування, тобто лопать завжди має рівноважне положенні між тиском вітру і відцентровою силою обертання вітродвигуна, відповідно немає впливу згинального моменту при напорі вітру як жорстко закріплених на валу генератора 2-лопатевих або 2-лопатевих моделях;
- має відносно малу вагу.

До недоліків таких вітрогенераторів можна відзначити наступне:

- із-за однієї лопаті є невелика площа, що вимагає більшої початкової швидкості вітру. Виходом із цієї ситуації може бути більший кут установки лопаті під час запуску;
- розміщення лопата біля самої щогли збільшує ймовірність виходу із ладу, зокрема при діаметрі вітродвигуна більше 5 метрів. Для вирішення цієї ситуації генератор та вітродвигун потрібно розмістити даліше від щогли.

Вітровим генераторам з вертикальною віссю притаманні такі основні недоліки:

- вони мають малий коефіцієнт корисної дії (20-25% у порівнянні з 40-45% з генераторами з горизонтальною віссю);
- вони мають дуже низьку швидкість обертання при рівній швидкості вітру (до 10 раз), відповідно в цьому випадку генератор має мати в 10 раз більшу потужність і його вартість також буде більшою (генератор вітряку становить біля 80% вартості установки);
- вони мають високу місткість матеріалів і конструкція виходить великою та важкою і, відповідно дорожчою у виготовленні, а велика вага та значні динамічні навантаження потребують значно потужнішої та дорожчої щогли;

- варто спростувати такі приписані їм переваги як безшумність і відсутність необхідності спрямовувати установку на вітер, оскільки вони є безпідставними: перша вказана перевага є не суттєво, а друга не впливає на ефективність роботи (вартість у цьому випадку може зменшитись тільки на 1%).

Дослідження тридцятих років минулого століття показали, що вітрові генератори з вертикальною віссю, зокрема Савоніуса, карусельні, роторні мають набагато менший ефект як за коефіцієнтом корисної дії, так і за ціною у порівнянні вітровими генераторами з горизонтальною віссю. На даний час пропонуються різні варіанти розробок вітрових генераторів з вертикальною віссю, але вони не в принципі не підвищили проблему з коефіцієнтом корисної дії установок цього типу [10].

### **1.3 Інсталяція, надійність і продуктивність вітроелектричної установки**

При виборі місця для розміщення вітроенергетичної установки, як правило, до уваги приймають цілий ряд критеріїв, основними з яких є [11]:

- значення вітрового потенціалу вибраної місцевості;
- контури рельєфу вибраної місцевості та відсутності значних перешкод для вітрових потоків;
  - наявність під'їзних шляхів для доставки технічного обладнання;
- сприятливі геологічні умови на вибраному місці для спорудження фундаменту;
- план розробленого монтажу та інсталяції вітрової електричної установки;
- невелика відстань до об'єкта електричного постачання.

Генерація електричної енергії за допомогою вітроелектричної установки має залежність від таких її параметрів:

- значення мінімальної робочої швидкості вітру;
- значення максимальної робочої швидкості вітру;
- значення номінальної швидкості вітру;

- величини потужності ротора в залежності від значення швидкості вітру;
- вибраного методу управління;
- вибраного методу регулювання потужності;
- розрахованої висоти встановлення ротора і інших параметрів.

Для визначення надійності вітроелектричної установки необхідно дотримуватись наступних вимог:

- граничної швидкістю вітру відносно параметрів міцності конструкції;
- наявності системи обмеження потужності;
- хорошої якості вибраних конструкційних матеріалів;
- убезпечення струму кіл вітрової генераторної установки;
- дотримання технології виробництва;
- вибору простої конструкції установки;
- забезпечення технічного сервісу протягом часу експлуатації;
- невеликої ціни вітрогенераторної установки, яка повинна залежати від простоти конструкції та технології виробництва.

При виборі вітрових генераторів у першу чергу звертають увагу на його технічні дані, зокрема на параметри номінальної потужності і швидкості вітру, при якій вона досягається. У більшості випадків при швидкостях вітру 7-11 м/с вітрові генератори виходять на свою номінальну потужність. При виборі типу вітроелектричної установки необхідно завжди брати до уваги значення коефіцієнта ефективності генератора та враховувати у цьому випадку, що всі дані швидкості вітру та /спрацьовування генератора були отримані при умовах звичайного атмосферного тиску та температурі навколишнього середовища 15°C (густина повітря при цьому рівна 1,23 кг/м<sup>3</sup>).

З метою підвищення більшої ефективності роботи вітрових електричних станцій впроваджують різні варіанти технічних рішень:

1) вибирають найкраще місце встановлення вітроенергетичної установки – на найвищому місці вершина пагорба або на рівнині. Але на практиці ситуація виявляється набагато складнішою. Коли потрібно розмістити вітроенергетичну установку біля будинку, то висота її щогли повинна бути вищою за будинок на 4-6 м. Якщо щогла є нижчою, то її

необхідно розмістити на відстані такій від будинку, яка рівна 3-кратній висоті будинку. Наприклад, якщо висота будинку 12 м, то щоглу необхідно встановити на відстані не менше, ніж 36 м від будинку. Якщо біля будинку ростуть високі дерева, то відстань до них повинна бути в межах дворазової висота дерева;

2) вітровий генератор в більшості випадків встановлюють на високій щоглі. Наприклад, вітровий потік на висоті 20 м дає зростання генерації електричної енергії більше 20% у порівнянні зі щоглою, яка є в два рази нижчою, особливо в густо забудованій місцевості. Якщо 5-и метрову щоглу замінити на 20-и метрову, то вироблення електроенергії зросте у 2 рази;

3) необхідно включати в схему вітроенергетичної установки спеціальні контролери заряду, які при малій швидкості вітру спочатку надають можливість лопатям набрати оберти, і тільки після вже підключають навантаження споживача. При використанні такого режиму вітровий генератор зможе генерувати певну кількість енергії навіть при слабкому вітровому потоці;

4) забороняється інсталиювати на дахах будинків вітроенергетичні установки, які мають потужність більше 1 кВт, а також забороняється закріплювати щоглу до стіни будинку або його конструкцій, так як шум і вібрації є надзвичайно відчутними у нічну пору та при сильних вітрових потоках.

Прі розміщені та монтажі вітроенергетичної установки необхідно зібрати детальні статистичні дані про вітер і його енергетичні властивості [12]:

- значення середньорічної швидкості вітру, зокрема значення середньої швидкості вітру помісячно в році;

- фронтальне розміщення швидкості вітру, а також його градація, тобто знати, що середня швидкість вітру може бути у визначених спектрах та інші необхідні показники.

Перераховані вище статистичні дані можна отримати в найближчій метеостанції. Якщо відстань від метеостанції до майбутньої ділянки вітроенергетичної установки знаходиться в межах 20 км і відсутні перешкод, зокрема

пагорби, будівлі, лісові насадження, то ці дані можна використати при встановленні та монтажі вітроенергетичної установки.

#### **1.4 Розрахунок згенерованої вітрогенераторною установкою енергії**

При розрахунку виробленої вітрогенераторною енергії дотримуються наступних правил і рекомендацій [13].

1. Вітрогенератор потрібно вибирати тільки за значенням кВт·годин на місяць. Наприклад, однокіловатний вітряк з шестикіловатним інвертором здатний повністю забезпечити житловий будинок, потрібно тільки врахувати 20% на втрати енергії в акумуляторних батареях. Також не варто обирати вітрогенератор з великим запасом, оскільки обладнання є доволі дорогим. Для вибору вітрогенератора спочатку розраховують необхідне місячне споживання в кВт·годинах, загальну сумарну потужність усіх приладів споживача та враховують середньорічну швидкість вітру у місцевості встановлення вітроенергетичної установки [14].

2. Для розрахунку отримання необхідного обсягу електричної енергії потрібно врахувати, що кількість виробленої вітряком енергії безпосередньо залежить від охопленої ним площі або максимального перерізу вітродвигуна. Наприклад, щоб мінімально забезпечити роботу декількох освітлювальних ламп, телевізора, холодильника і електричного чайника, діаметр вітряка вітроустановки має бути більше 2,5 метрів при середніх вітрових потоках [15].

3. Особливу увагу при розрахунку вітроенергетичної установки варто приділяти не тільки її потужності, але також швидкості вітру, при якій ця потужність може бути отримана, оскільки деякі виробники представляють максимальні показники. Для цього потрібно виконати простий розрахунок потужності, яку здатний виробити вітряк із гвинтом певного діаметру. Ця потужність зазвичай залежить тільки від швидкості вітру і діаметра гвинта, а інші параметри (кількість лопатей, їх вага, площа, профіль, генератор) є другорядними та мають суттєвої похибки. При однаковій потужності

вітроенергетичних установок потрібно вибирати з більшим діаметром вітроколеса [16].

4. Практично доведено, що чим менше лопатей має вітроколесо, тим вищий його коефіцієнт корисної дії. Це підтверджується і теоретичними дослідженнями і продуванням в аеродинамічній трубці, хоча різниця між однією, двома та трьома лопатями є незначною [17].

5. Деякі виробники представляють результати випробувань в аеродинамічній трубці своїх вітроелектричних установок за потужністю, що свідчить про серйозний підхід до випуску обладнання. Але при цьому необхідно також враховувати, що потужність в аеродинамічній трубці і природа потужності при вітровому потоці будуть відрізняються десь на 20-30%, оскільки присутній ефект ламінарності повітряного потоку в трубці.

6. Можна також проектувати вітроенергетичні установки на базі вертикально-осьових генераторів, але наукою і досвідом практично доведена їх доволі низька ефективність у порівнянні з горизонтально-осьовими генераторами [18].

7. При розрахунку та виборі вітроенергетичних установок не варто вибирати установки, що починають працювати на малих швидкостях вітру (до 3 м/с), оскільки на цих швидкостях вітру їх енергія є дуже малою. Наприклад, для вітроенергетичної установки з діаметром гвинта 5 м вихідна потужність при швидкості вітрового потоку в 2 м/с буде менше 30 Вт, а також втрачається половина цієї потужності на різні втрати, а решта 15 Вт є нульовим показником для акумуляторних батарей, які розраховані на потужність 5 кВт.

### **1.5 Доцільність встановлення вітрогенераторної установки**

При встановленні вітроенергетичної установки необхідно врахувати наступні практичні аспекти [19].

1. При наявності недорогої та стабільної стаціонарної електричної мережі немає необхідності встановлювати вітрогенераторну установку, оскільки навіть при безкоштовному вітровому потоці вартість вітроенергетичного обладнання є достатньо високою. Виключенням із цього правила можуть бути

дуже сильні вітрові потоки у вибраній місцевості, коли середньорічна швидкість вітру становить 5-6 м/с і вище, то на тривалу перспективу це буде правильним вибором.

2. При наявності нестабільної стаціонарної електричної мережі також немає необхідності встановлювати вітрогенераторну установку. Можна придбати акумуляторні батареї та інвертор для їх зарядки у той період, коли працює електрична мережа, а при її відключенні - використовувати запасену в акумуляторах енергію. Можна також додатково встановити бензо- чи дизель-генератор для аварійного резервного електропостачання.

3. При наявності дорогої та стабільної стаціонарної електричної мережі потрібно врахувати наступні випадки. Якщо вітрові потоки є слабкими (середньорічна швидкість 1-2 м/с), то немає змісту встановлювати вітрогенераторну установку, якщо швидкість вітру становить 3 м/с і вище, то в майбутній перспективі за три роки або більше ця установка повинна себе окупити.

4. При відсутності стаціонарної електричної мережі вітрогенераторна установка є просто незамінною при будь яких вітрових умовах, оскільки генератор на різних видах палива при тривалому використанні буде вартувати дуже дорого, крім того він створює багато шуму та проблем при обслуговуванні. Якщо використовувати тільки сонячні електричні панелі за помірну ціну, то покрити потреби в електричній енергії тільки весною, літом і восени.

## 2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Дослідження та розробка генераторів напруги

Для реалізації на виході інвертора напруги синусоїдної форми на силові ключі необхідно подати ШІМ-імпульси. Для створення ШІМ-імпульсів підсумовуємо сигнали від генератора пилоподібних імпульсів (рис. 2.1) і генератора напруги синусоїдної форми, тобто скористаємося формуванням синусоїдної ШІМ. Для цього використовуємо генератор пилоподібних імпульсів (генератор тактових імпульсів або мультивібратор) [20].

Існує велика різноманітність засобів і методів побудови схем мультивібраторів. В даний час для побудови мультивібраторів найбільшого поширення набули операційні підсилювачі інтегрального виконання. Можливість створення мультивібратора на операційному підсилювачі ґрунтується на використанні операційних підсилювачів (ОП) в якості порогового вузла (компаратора). Схема симетричного мультивібратора на ОП приведена на рис. 2.1. Її основою служить ОП з позитивним зворотним зв'язком [21].

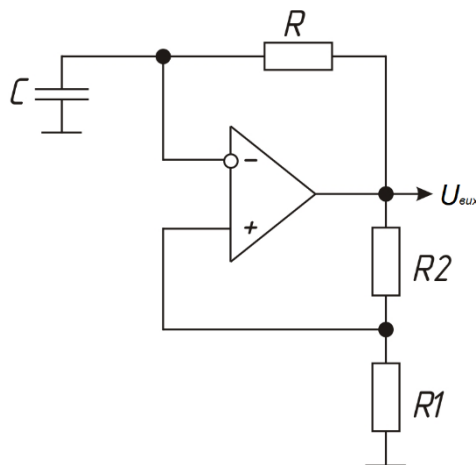


Рисунок 2.1 - Симетричний мультивібратор на операційному підсилювачі

Автоколевальний режим роботи створюється завдяки підключенню до інвертуючого входу ОП часозадаючого кола з конденсатора  $C$  і резистора  $R1$ . Принцип дії схеми ілюструють часові діаграми, приведені на рис. 2.2, а-в.



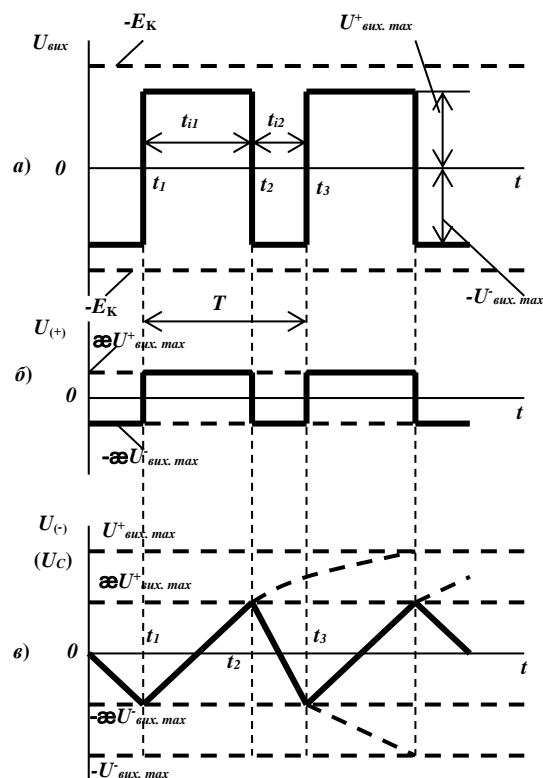


Рисунок 2.2 – Часові діаграми симетричного мультивібратора

Припустимо, що до моменту часу  $t_1$  напруга між входами ОП  $U_0 > 0$ . Це визначає напругу на виході ОП  $U_{\text{вих}} = U_{\text{вих max}}^-$  і на його неінвертуючому вході  $U_{(+)} = -\alpha U_{\text{вих max}}^-$  (рис. 2.2, а, б), де  $\alpha = R_2 / (R_2 + R_3)$  - коефіцієнт передачі кола позитивного зворотного зв'язку. Наявність на виході схеми напруги  $-U_{\text{вих max}}^-$  обумовлює процес заряду конденсатора С через резистор R1.

У момент часу  $t_1$  експоненціально змінювана напруга на інвертуючому вході ОП досягає напруги на неінвертуючому вході  $-\alpha U_{\text{вих max}}^-$  (рис. 2.2, в). Напруга  $U_0$  стає рівною нулю, змінюється полярність напруги на виході ОП:  $U_{\text{вих}} = U_{\text{вих max}}^+$  (рис. 2.2, а). Напруга  $U_{(+)}$  змінює знак і стає рівною  $+\alpha U_{\text{вих max}}^+$ , що відповідає  $U_0 < 0$  і  $U_{\text{вих}} = U_{\text{вих max}}^+$  (рис. 2.2, б). З моменту часу  $t_1$  починається перезарядка конденсатора від рівня напруги  $-\alpha U_{\text{вих max}}^-$ . Конденсатор перезаряджається в колі з резистором R1 до рівня  $U_{\text{вих max}}^+$ . У момент часу  $t_2$  напруга на конденсаторі досягає значення  $U_{\text{вих max}}^+$ . Напруга  $U_0$  стає рівною нулю і ОП перемикається в протилежний стан (рис. 2.2, а-в). Далі процеси в схемі протікають аналогічно.

Частоту проходження імпульсів симетричного мультівібратора можна визначити за формулою:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{u1} + t_{u2}} = \frac{1}{2t_u} \quad (2.1)$$

Час  $t_i$  можна визначити за тривалістю інтервалу  $t_{i1}$ , що характеризує перезарядку конденсатора С1 в колі з резистором R1 і напругою  $U_{вих\ max}^+$  від  $-xU_{вих\ max}^-$  до  $xU_{вих\ max}^+$  (рис. 2.3). Процес перезаряду описується рівнянням[22]:

$$U_c(t) = U_c(\infty) - [U_c(\infty) - U_c(0)]e^{-t/\tau} \quad (2.2)$$

де  $U_c(\infty) = U_{вих\ max}^+, U_c(0) = -xU_{вих\ max}^-, \tau = CR1.$  (2.3)

Звідси знаходимо

$$U_c(t) = U_{вих\ max}^+ - (U_{вих\ max}^+ + xU_{вих\ max}^-)e^{-t/\tau} \quad (2.4)$$

Після заміни у виразі (2.3)  $U_c(t_i) = U_{вих\ max}^+$  знайдемо:

$$t_i = \tau \ln \frac{xU_{вих\ max}^- + U_{вих\ max}^+}{U_{вих\ max}^- - xU_{вих\ max}^+} \quad (2.5)$$

і  $f = \frac{1}{2\pi\tau \ln \frac{xU_{вих\ max}^- + U_{вих\ max}^+}{U_{вих\ max}^- - xU_{вих\ max}^+}} \quad (2.6)$

Якщо прийняти для ОП  $U_{вих\ max}^- = U_{вих\ max}^+$ , то співвідношення (2.5), (2.6) приймуть вигляд

$$t_i = \tau \ln \left( 1 + 2 \frac{R1}{R2} \right) \quad (2.7)$$

$$f = \frac{1}{2\tau \ln \left( 1 + 2 \frac{R2}{R3} \right)} \quad (2.8)$$

або  $f = \frac{1}{2R_1 C_1 \tau \ln \left( 1 + 2 \frac{R_2}{R_3} \right)}.$  (2.9)

Із співвідношення знаходимо  $x = \frac{R2}{R1 + R2}$ , де  $x$  – коефіцієнт передачі кола

позитивного зворотного зв'язку.

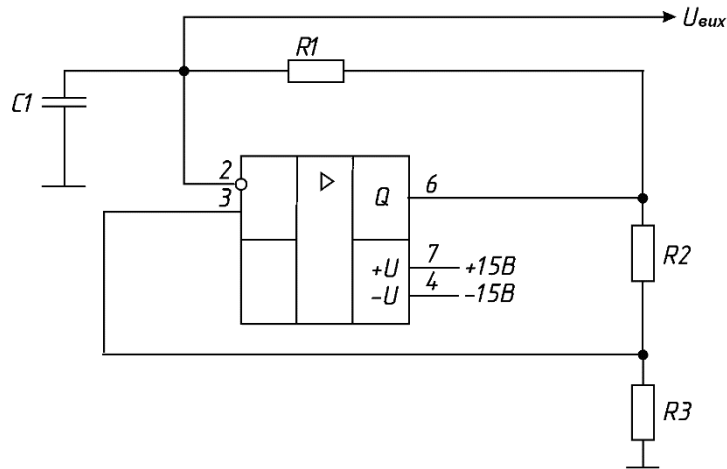


Рисунок 2.3 - Схема генератора пилкоподібних імпульсів на операційному підсилювачі

Прийmemo, що  $x=1/10$  і  $R2=2$  кОм та підставимо значення у вираз і отримаємо:

$$\frac{1}{10} = \frac{2000}{2000 + R3}$$

Звідси виразимо  $R3$  і отримаємо, що  $R3= 18$  кОм.

Таким чином, знаючи  $f=0,5$  кГц,  $R1= R2 = 2$  кОм,  $R3= 18$  кОм і приймаючи  $C= 480$  нФ, знайдемо  $R$  через підстановку у рівняння (2.9):

$$500 = \frac{1}{2 \cdot 480 \cdot 10^{-9} \cdot R1 \cdot \ln\left(1 + 2 \frac{2000}{18000}\right)},$$

$$1 = \frac{1}{0,00048 \cdot R1 \cdot \ln(1 + 0,22)},$$

$$R1 = \frac{1}{0,000095} = 10526 \text{ Ом.}$$

За отриманими розрахунковими даними виберемо:

R1: МЛТ - 0,125 – 2 кОм  $\pm 5\%$ ; R2: МЛТ - 0,125 – 2 кОм  $\pm 5\%$ ;

R3: МЛТ - 0,125 – 18 кОм  $\pm 5\%$ ; 3: КМ5 - Н90 – 6,3 В – 480 нФ.

Перетворення енергії джерела постійного струму в змінний струм потрібної частоти здійснюється за допомогою генераторів синусоїдних коливань, які побудовані на основі підсилювачів з ланкою позитивного зворотного зв'язку для забезпечення стабільного режиму самозбудження на заданій частоті [22]. На рис. 2.4 приведено структурну схему генератора синусоїдальних коливань. В цій схемі коефіцієнт підсилювача і коефіцієнт передачі ланки зворотного зв'язку є комплексними – беруть до уваги їх залежність від частоти. В схемі генератора вхідним сигналом для підсилювача служить частина його вихідної напруги, яка передається за допомогою ланки позитивного зворотного зв'язку ( $|x| < 1$ ).

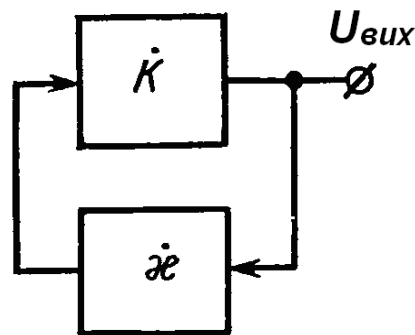


Рисунок 2.4 - Схема генератора синусоїдних коливань

Під час роботи схеми в режимі генерації потрібне дотримання двох умов:

- фазові зміщення сигналу, що створюються підсилювачем ( $\varphi_y$ ) і ланкою зворотного зв'язку ( $\varphi_x$ ), в сумі повинні бути кратними  $2\pi$ :

$$\varphi_y + \varphi_x = 2n\pi, \quad (2.12)$$

де  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

Формула (2.12) пояснює умову балансу фаз в підсилювачі з позитивним зворотним зв'язком;

- друга умова визначається нерівністю за формулою:

$$\left| \dot{K} \cdot \dot{x} \right| \geq 1. \quad (2.13)$$

Щоб на виході генератора отримати напругу синусоїдної форми необхідно, щоб формули (2.12), (2.13) виконувалися тільки при одній частоті. Генератори синусоїдних коливань будують з коливальним LC-контуром і частотно-залежними RC-колами. LC-генератори призначені для формування сигналів високої частоти, а RC-генератори працюють на низьких частотах.

У генераторних підсилювачах вихідний сигнал може знаходитися в протифазі з вхідним сигналом ( $\varphi_y = 180^\circ$ ) або ж співпадати з ним по фазі ( $\varphi_y = 0$ ). У першому випадку частотно-залежне RC-коло зворотного зв'язку на частоті генерації здійснює поворот фази робочого сигналу на  $180^\circ$  ( $\varphi_x = 180^\circ$ ), в другому випадку фазове зміщення робочого сигналу зазвичай відсутнє ( $\varphi_x=0$ ). Для вирішення цих завдань є достатні схемні можливості RC-кіл.

Найбільшого поширення з відомих RC-кіл, що не здійснюють зміщення по фазі робочого сигналу на квазірезонансній частоті, отримала схема моста Віна (рис. 2.5).

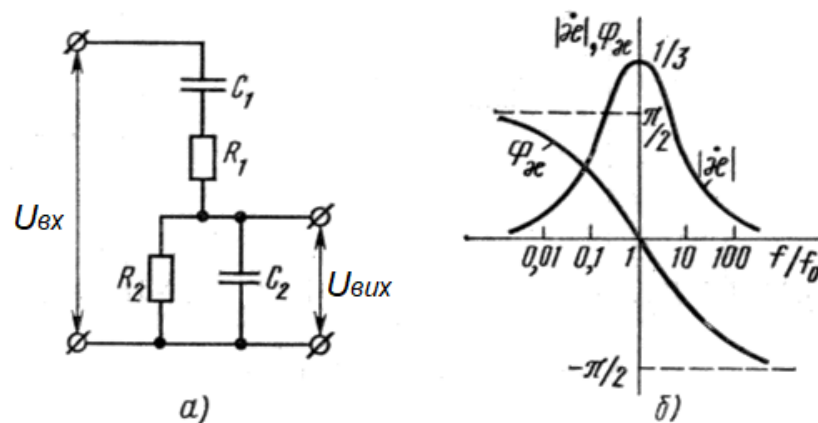


Рисунок 2.5 - Схема моста Віна (а) та залежність коефіцієнта передачі і кута фазового зміщення від частоти (б)

При побудові такого генератора на операційному підсилювачі ланку частотно-залежного зворотного зв'язку (рис. 2.5, а) включають між виходом і неінвертуючим входом ОП. Елементи R і  $R_{oc}$  призначені для отримання необхідного коефіцієнта підсилення підсилювальної ланки. Оскільки на частоті генерації  $f_0$  коефіцієнт передачі ланки частотно-залежного зворотного зв'язку моста Віна  $x = 1/3$  (рис. 2.5, б), самозбудження генератора буде при  $K_U > 3$ , що відповідає вибору відношення  $R_{oc}/R_0 \geq 2$ , де  $R_1=R_2= R$  і  $C_1=C_2=C$ . Необхідну амплітуду коливань можна отримати корекцією опору  $R_0$  або  $R_{oc}$  в

процесі налаштування схеми. Частота генерації в схемі рівна квазірезонансній частоті частотно-залежного кола, яка знаходиться за формулою [24]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.15)$$

Застосування ОП з негативним зворотним зв'язком забезпечує високу стабільність параметрів підсилювальної ланки в RC-генераторах. В результаті температурна нестабільність частоти генераторів на ОП залежить від температури характеристик елементів RC-ланки зворотного зв'язку.

Типова схема генератора синусоїдних коливань на операційному підсилювачі з мостом Віна приведена рис. 2.6. Для отримання коефіцієнта нелінійних спотворень, які менші 0,3%, приймемо попередньо відомі номінали всіх елементів для даних умов схеми:

$R_1=R_2=3,3 \text{ МОм}; R_3=7,5 \text{ кОм}; R_4=3,6 \text{ кОм}; C_1=C_2=1000 \text{ нф}.$

$R_1: C_2 - 29\text{В} - 0,125 - 3,3 \text{ МОм} \pm 5\%; R_2: C_2 - 29\text{В} - 0,125 - 3,3 \text{ МОм} \pm 5\%;$

$R_3: C_2 - 29\text{В} - 0,125 - 7,5 \text{ кОм} \pm 5\%; R_4: C_2 - 29 \text{ В} - 0,125 - 3,6 \text{ кОм} \pm 5\%;$

$C_1: \text{KM5} - \text{H90} - 16 \text{ В} - 1000 \text{ нФ}; C_2: \text{KM5} - \text{H90} - 16 \text{ В} - 1000 \text{ нФ}.$

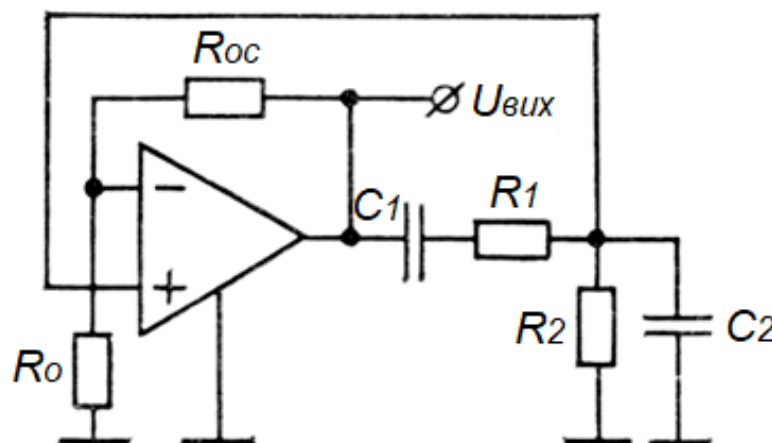


Рисунок 2.6 - Генератор синусоїдальних коливань на операційному підсилювачі з мостом Віна

## 2.2 Дослідження та розробка пристрою розподілу імпульсів управління

Генератор пилоподібної напруги формує імпульси з частотою 500 Гц ( $f_{\text{нес.}}$ ), а генератор напруги синусоїдної форми видає синусоїду з частотою 50 Гц ( $f_{\text{мод.}}$ ). Сума цих імпульсів дозволяє отримати широтно-імпульсний модульований двополярний сигнал з частотою 500 Гц (рис. 2.7) [25].

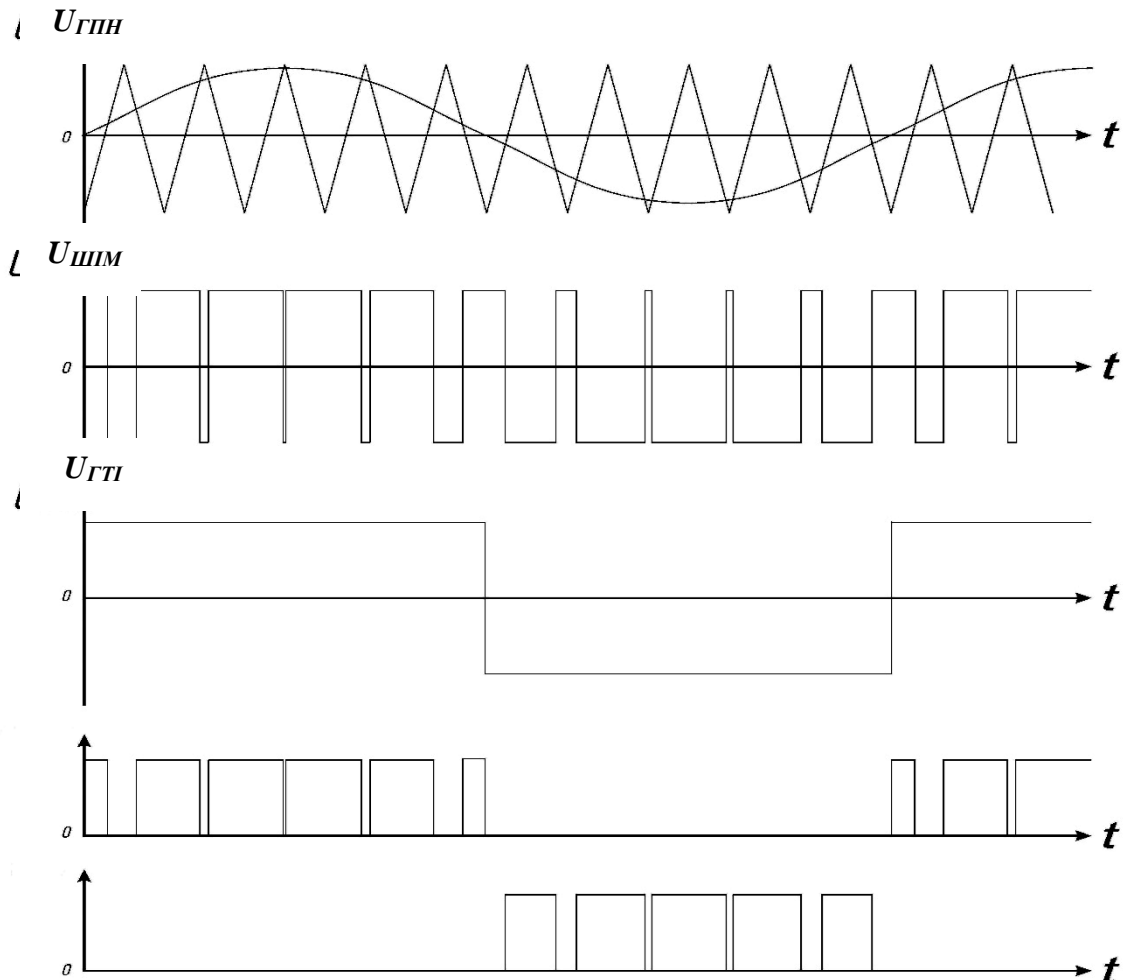


Рисунок 2.7 - Широтно-імпульсна модуляція управління 2-а силовими ключами

Для управління силовими ключами потрібно сформувати 2 послідовні імпульси частотою 50 Гц зі зміщеними фазами на  $180^\circ$  для керування транзисторами VT1 і VT2 двотактного перетворювача (рис. 2.8). Щоб позбутися наскрізних струмів перемикавання між ввімкненням одного ключа і вимкненням другого вводять "мертву зону", яка має 10% від тривалості періоду.

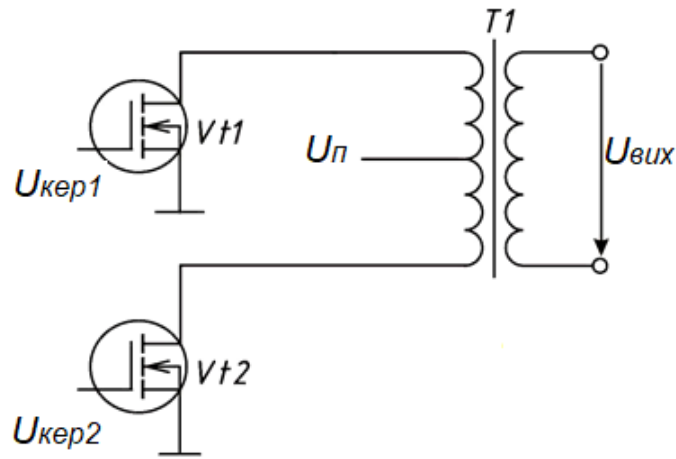


Рисунок 2.8 - Схема двотактного перетворювача

Отже, на кожен ключ потрібно подати серію ШІМ-імпульсів з частотою 50 Гц і для схемної реалізації поставленого завдання необхідно застосувати задаючий генератор П-подібних імпульсів з частотою 50 Гц. Імпульси з генератора поступають на вхід 3-входового логічного елемента І, а на інший вхід поступають імпульси з ШІМ: на один логічний елемент вихід з ШІМ підключено напряму, а на вхід іншого підключено інвертований сигнал з ШІМ. Інвертування сигналу здійснюють за допомогою інвертора на операційному підсилювачі (коефіцієнт підсилення  $k=-1$ ) для перетворення негативних ШІМ-сигналів в позитивні з метою подачі на логічний елемент.

На компараторі побудовано захист акумуляторної батареї від глибокого розряду і значення  $U_{оп}$  підбирається таким чином, щоб при  $U_{п}<10,5$  В компаратор виконав переключення, тоді на виході з'являється логічний «0» для подачі на вхід логічного елемента, що приводить до закриття транзисторів VT1 і VT2.

Для генерування синхроімпульсів з частотою 50 Гц було використано схему мультивібратора на операційному підсилювачі, яка приведена на рис. 2.9 [24].

Із приведених нижче формул

$$f = \frac{1}{2\tau \ln(1 + 2R1/R2)}, \quad (2.16)$$



$$\tau = CR, \quad (2.17)$$

знаходимо коефіцієнт передачі кола позитивного зворотного зв'язку

$$x = \frac{R1}{R1 + R2}. \quad (2.18)$$

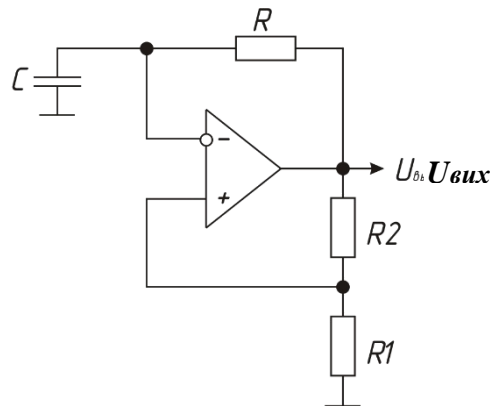


Рисунок 2.9 - Схема мультивібратора на операційному підсилювачі

Якщо прийняти  $x=1/10$  і  $R1=2$  кОм та підставити їх у формулу (2.18), то отримаємо:

$$\frac{1}{10} = \frac{2000}{2000 + R2},$$

звідси виразимо  $R2$  і отримаємо, що  $R2=18$  кОм.

При відомих значеннях  $f=50$  Гц,  $R1=2$  кОм,  $R2=18$  кОм і при  $C=4,8$  мкФ можна знайти  $R$ , підставивши ці значення у формули (2.16) і (2.17):

$$50 = \frac{1}{2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot R \cdot \ln\left(1 + 2 \frac{2000}{18000}\right)}, \quad (2.19)$$

$$1 = \frac{1}{9,6 \cdot 10^{-6} \cdot R \cdot \ln(1 + 0,22)}, \quad (2.20)$$

$$R = \frac{1}{4,8 \cdot 10^{-4}} = 2083 \text{ Ом}. \quad (2.21)$$

За даними, отриманими в процесі розрахунків, можна вибрати:

$R$ : С2 - 29 В - 0,125 – 2 кОм  $\pm 1\%$ ;  $R1$ : С2 - 29 В - 0,125 – 2 кОм  $\pm 1\%$ ;

$R2$ : С2 - 29 В - 0,125 – 18 кОм  $\pm 1\%$ ;  $C$ : КМ5 - Н90 - 6,3 В - 4,8 мкФ.

На рис. 2.10 приведено схему інвертуючого підсилювача, який служить для зміни знаку вихідного сигналу відносно вхідного. Такий підсилювач створюється подачею на інвертуючий вхід операційного підсилювача за допомогою резистора  $R_{oc}$  паралельного негативного зворотного зв'язку за напругою. Далі неінвертуючий вхід заземляється із загальною точкою входу і виходу схеми і вхідний сигнал подається через резистор  $R_1$  на інвертуючий вхід операційного підсилювача.

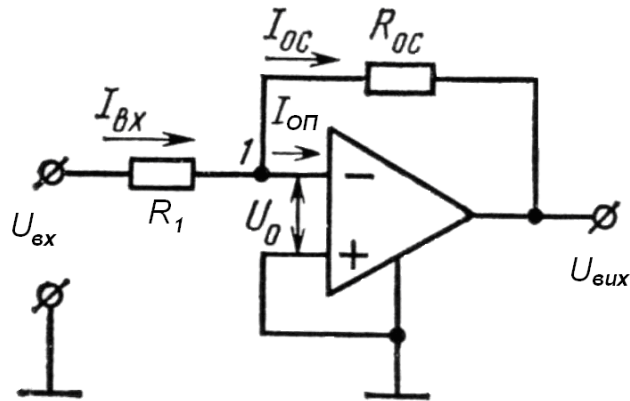


Рисунок 2.10 - Інвертуючий підсилювач

Використовуючи рівняння струмів для вузла 1, можна визначити параметри схеми. Якщо  $R_{BX\text{ оп}} = \infty$  і вхідний  $I_{оп} = 0$ , то  $I_{BX} = I_{oc}$ , то отримаємо:

$$\frac{U_{вих} - U_0}{R_1} = -\frac{U_{вих} - U_0}{R_{oc}}. \quad (2.22)$$

При  $K_{U\text{ ОП}} \rightarrow \infty$  напруга на вході операційного підсилювача

$U_0 = \frac{U_{вих}}{K_{U\text{ ОП}}} \rightarrow 0$ , то цей буде мати наступний вигляд:

$$U_{вх} / R_1 = -U_{вих} / R_{oc}. \quad (2.23)$$

Отже, можна зробити висновок, коефіцієнт підсилення за напругою інвертуючого підсилювача з паралельним зворотним зв'язком  $K_{U\text{ ОП}} = -U_{вих} / U_{вх}$  залежить тільки від параметрів пасивної частини схеми:

$$K_{Ui} = -R_{oc} / R_1. \quad (2.24)$$

Вибір  $R_{oc}=R_1$ , коли  $K_{ui}=-1$ , додає схемі інвертуючого підсилювача властивість інвертуючого повторювача напруги. Так як  $U_0 > 0$ , то вхідний опір схеми  $R_{вх} = R_1$ , а вихідний опір підсилювача можна визначити за формулою:

$$R_{вих} = \frac{R(1 + R_{oc}/R_1)}{K_{U\text{оп}}}, \quad (2.25)$$

при  $K_{u\text{оп}} > \infty$  близьке до нуля. Тому при  $R_1=R_{oc}=1$  кОм схема на рис. 2.10 буде інвертором. Вибираємо резистори  $R_1=R_{oc}$  ( $R_1$ : МЛТ-0,125 - 1 кОм  $\pm 5\%$ ). Враховуючи всі умови, отримаємо схему пристрою розподілу імпульсів (рис. 2.11).

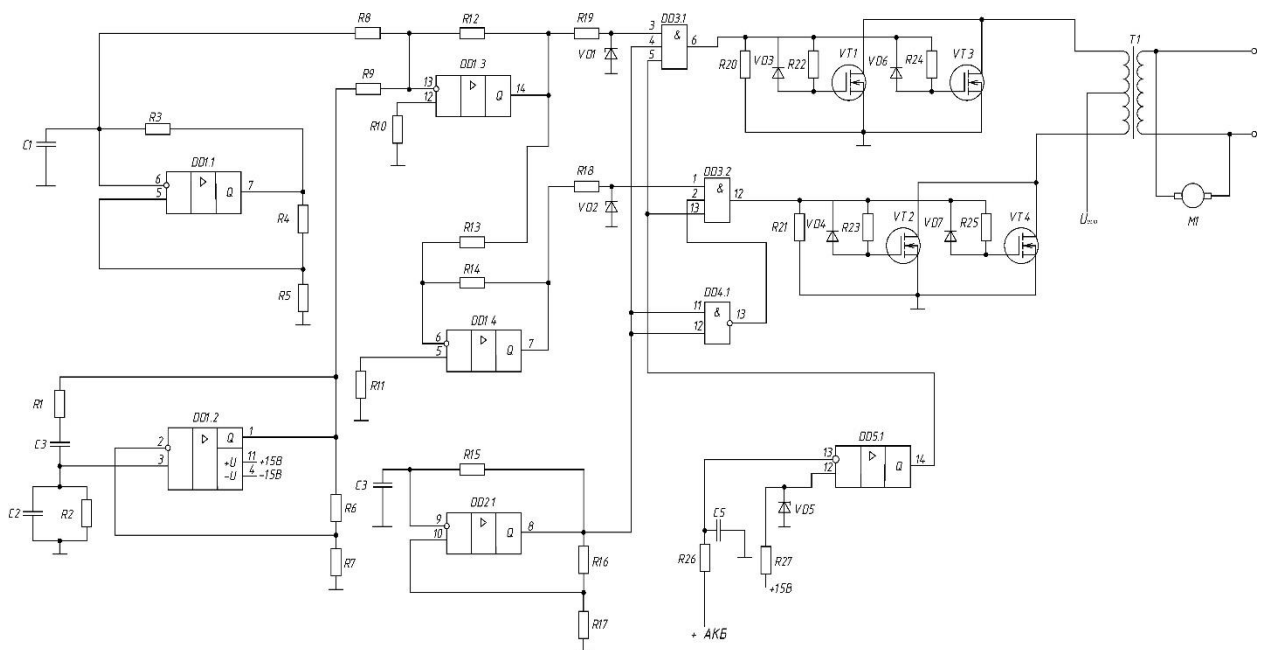


Рисунок 2.11 - Схема розподілу імпульсів управління

### 2.3 Дослідження схеми вибору і контролю джерел енергії

Для роботи інвертора в автономному режимі будемо використовувати два джерела енергії: вітрогенератор, який перетворює механічну енергію вітру в електричну, і акумуляторну станцію з чотирьох акумуляторних батарей, яка

накопичує електричну енергію в період сильних вітрів і віддає її в навантаження при дефіциті потужності вітрогенератора [27].

Інвертор служить для перетворення постійного струму, отриманого від акумуляторів і вітрогенератора, в змінний струм - для живлення споживачів. Для вибору джерела, під'єданого до інвертора, має бути пристрій контролю потужності джерел і перемикач між ними. На рис. 2.12 приведено структурну схему живлення інвертора від двох джерел.

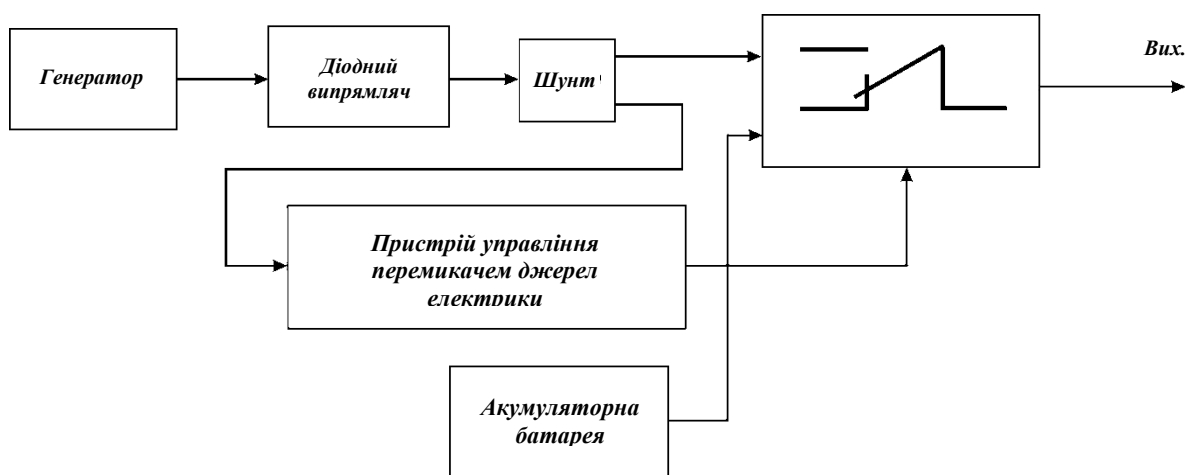


Рисунок 2.12 - Схема живлення інвертора від двох джерел

Контроль потужності джерел виконують за допомогою датчика струму, так як при напрузі  $\pm 12$  В із зміною потужності також змінюється струм. Наприклад, при потужності 1000 Вт сила буде становити  $I = 1000/12 = 83,33$  А, а при потужності 950 Вт -  $I = 950/12 = 79,17$  А. Отже, датчик струму найбільше підходить для контролю потужності. У якості датчика струму виберемо шунт і напруга, що з нього знімається, буде пропорційна силі струму.

**Вимірювання напруги силової частини схеми.** У даному пристрої необхідно забезпечити візуалізацію деяких параметрів перетворювача, тому до складу пристрою введемо блок індикації, який здійснює вимірювання напруги силової частини пристрою.

Реалізацію поставленого завдання можна досягнути декількома способами: за допомогою вольтметра (стрілочного або цифрового) і за допомогою світлодіодної шкали.

З перерахованих способів вимірювання напруги виберемо цифровий вольтметр, так як він є найбільш точним і інформаційним. Для реалізації використаємо мікросхему перетворення аналогового сигналу в цифровий (АЦП). Звичайна мікросхема АЦП не підходить, оскільки отриманий з мікросхеми код потрібно обробити і подати на індикатор, а це схематично ускладнює реалізацію завдання. Тому для спрощення задачі виберемо спеціалізоване АЦП, в якому передбачено підключення індикаторів до його виходів АЦП. Для цього підходять мікросхеми VT7106 і VT7107, які є високоякісними 3- і 5-розрядними аналого-цифровими перетворювачами з малим енергоспоживанням і прямим виходом на індикатор [28].

Таким чином для реалізації поставленого завдання для нашого пристрою підходять обидві мікросхеми, але з точки зору економії засобів на РК-індикаторах виберемо мікросхему VT7107 зі світлодіодною індикацією (рис. 2.13). Запропонована схема включення є типовою для даної мікросхеми, тому номінали всіх елементів заздалегідь відомі.

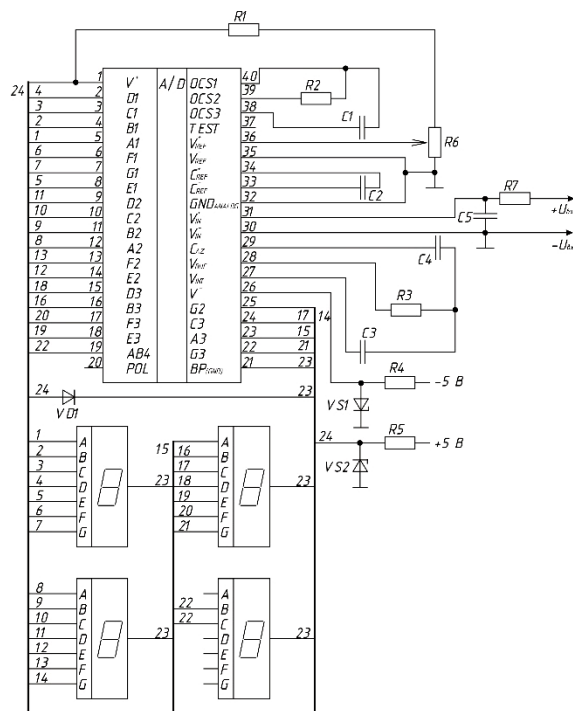


Рисунок 2.13 - Схема пристрою вимірювання напруги силового кола

## 2.4 Дослідження схеми блоку живлення перетворювача

Висока точність РЕА забезпечується стабільністю передавальних характеристик всіх ланок електричного обладнання, яка в першу чергу залежить від стабільності напруги живлення. Для фіксації напруги живлення блоків обладнання застосовуються інтегральні стабілізатори напруги.

Для реалізації напруги живлення +5 В в нашому пристрої застосуємо мікросхему стабілізації напруги акумуляторної батареї, заживленої від плюсової клеми (рис. 2.13).

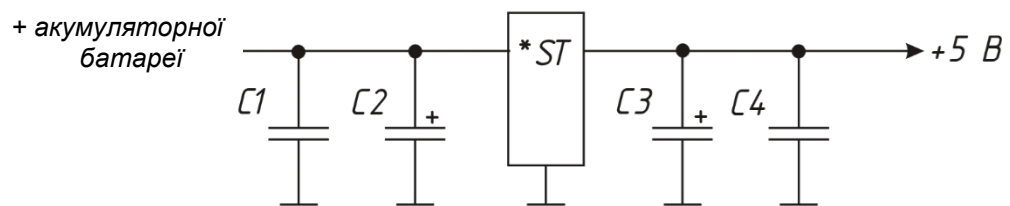


Рисунок 2.13 - Включення мікросхеми стабілізації напруги з вихідною напругою +5 В

Для стабілізації напруги +5 В застосуємо мікросхему стабілізації напруги К142ЕН5А і в кінцевому результаті підбираємо такі конденсатори:

C1: К50-35-25 В-470 мкф+20-50;

C2: К73-11-63 В-0,33 мкф+20%;

C3: К50-35-25 В-47 мкф+20-50;

C4: К73-11-63 В-1 мкф+20%.

Для реалізації напруги  $\pm 15$  В скористаємося пристроєм, що дозволяє забезпечити і підвищення напруги і її інверсію. На рис. 2.14 приведено запропоновану схему, що задовольняє вищевказаним вимогам і має в своєму значно менше елементів у порівнянні з аналогічними відомими пристроями завдяки одночасного виконання функції індуктивного підвищуючого перетворювача і інвертуючого перетворювача. В базовій схемі запропонованого перетворювача є джерело чотирифазних синхроімпульсів, котушка індуктивності і два перемикачі.

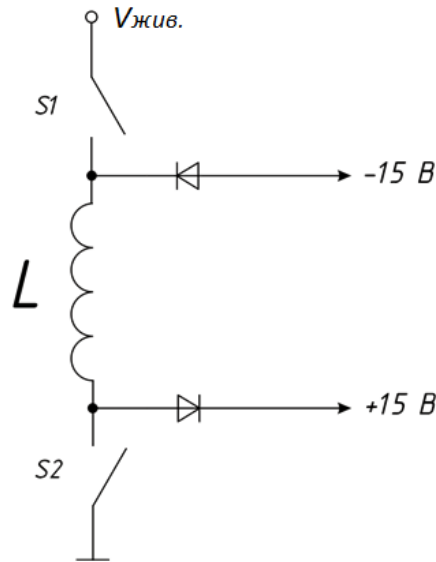


Рисунок 2.14 - Структурна схема перетворювача постійного струму на дві напруги

Протягом 1-ї фази синхроімпульсів котушка індуктивності  $L$  запасається енергією через перемикачі  $S1$  і  $S2$ , а під час 2-ї - перемикач  $S2$  розмикається і накопичена енергія йде у навантаження позитивної вихідної напруги. Під час 3-ї фази замикаються обидва перемикачі - котушка індуктивності починає знову накопичувати енергію. При розмиканні перемикача  $S1$  протягом 4-ї фази синхроімпульсів ця енергія передається на від'ємну шину живлення (рис. 2.15).

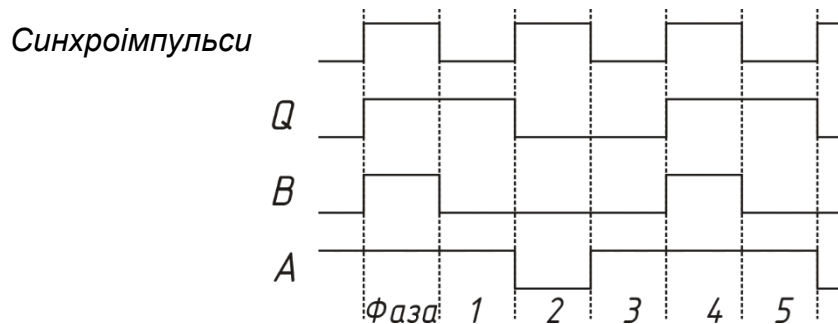


Рисунок 2.15 - Часова діаграма функціонування пристрою управління ключами

У реалізованій нами принциповій схемі  $D$ -тригер формує описані вище 4-фазні синхроімпульси, а транзистори  $VT1$  і  $VT2$  є перемикачами. При подачі на вхід синхроімпульсів з частотою 8 кГц схема формує постійну напругу  $\pm 15$  В для забезпечення лінійного живлення (рис. 2.16).

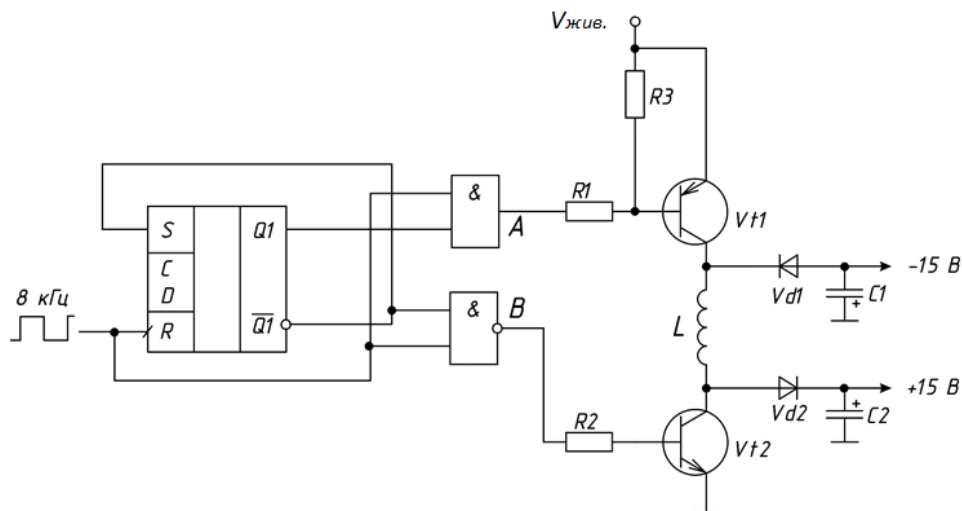


Рисунок 2.16 - Принципова схема перетворювача постійного струму на дві напруги

У цій схемі резистори R1, R2 і R3 є струмообмежувальними, тому їхні номінали беремо рівними  $R1=R2=R3=1$  кОм. Оскільки конденсатори C1 і C2 цієї схеми використовуються в якості джерела, то необхідно їх вибрати великої ємкості:  $C1=C2=10$  мкФ. Так як котушка індуктивності L акумулює енергію, то напруга на виході буде становити:

$$U_{ВИХ} = U_n + U_L. \quad (2.34)$$

При значенню  $U_{вих}=15$  В,  $U_n=10$  В значення  $U_L=15-10=5$  В.

$$U_L = I_L \cdot \omega L, \quad (2.35)$$

де  $I_L$  – струм, що протікає через котушку індуктивності  $I_L = 10$  мА;

$$\omega = 2\pi f; f = 8000 \text{ Гц}; \omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 8000 = 50240 \frac{1}{\text{с}}; \quad (2.36)$$

$$10 = 0,01 \cdot 50240 \cdot L; \quad (2.37)$$

$$L = \frac{10}{502,4} = 0,019 \text{ Гн}. \quad (2.38)$$

Таким чином вибираємо наступні номінали:

R1 = R2= R3: МЛТ - 0,25 – 1 кОм  $\pm 5\%$ ;

C1 = C2: КМ5 - Н90 – 16 В – 470 нФ.

Для генерування синхроімпульсів з частотою 8 кГц візьмемо за основу схему мультивібратора, виконаному на операційному підсилювачі (рис. 2.17) [24].



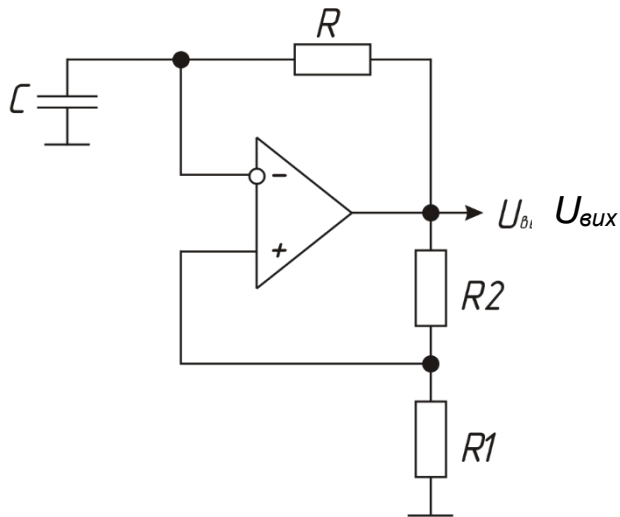


Рисунок 2.17 - Схема мультивібратора на операційному підсилювачі для генерації прямокутних імпульсів частотою 8 кГц

Прийmemo, що  $x = 1/10$  і  $R1 = 2$  кОм, тоді отримаємо [22]:

$$\frac{1}{10} = \frac{2000}{2000 + R2},$$

звідси виразимо  $R2$  і отримаємо, що  $R2 = 18$  кОм.

При відомих  $f = 8$  кГц,  $R1 = 2$  кОм,  $R2 = 18$  кОм та  $C = 480$  нФ, можна знайти значення  $R$ :

$$8000 = \frac{1}{2 \cdot 480 \cdot 10^{-9} \cdot R \cdot \ln\left(1 + 2 \frac{2000}{18000}\right)}, \quad (2.39)$$

$$1 = \frac{1}{0,00768 \cdot R \cdot \ln(1 + 0,22)}, \quad (2.40)$$

$$R = \frac{1}{0,001527} = 654 \text{ Ом}. \quad (2.41)$$

За даними, отриманим в результаті розрахунку, виберемо номінали компонентів для нашої схеми:

$R1$ : С2 - 29В - 0,125 – 2 кОм  $\pm 5\%$ ;  $R2$ : МЛТ - 0,125 – 18 кОм  $\pm 5\%$ ;

$R$ : МЛТ - 0,25 – 680 Ом  $\pm 5\%$ ;  $C$ : КМ5 - Н90 – 6,3В – 470 нФ.

Для отримання від'ємної напруги -5 В потрібно вибрати мікросхему стабілізації напруги для від'ємної полярності (рис. 2.18).

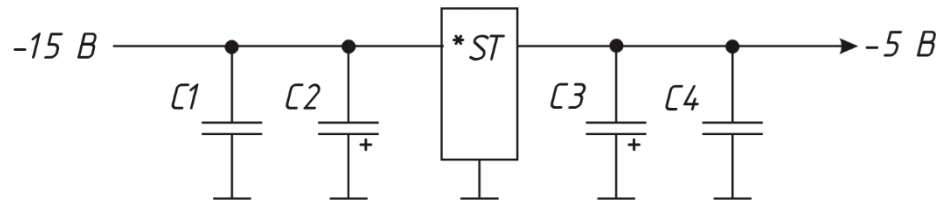


Рисунок 2.18 - Включення мікросхеми стабілізації напруги з вихідною від'ємною напругою -5 В

Використовуючи довідник [28] виберемо мікросхему KP1168EH5, яка має вихідну напругу -5В. Тоді можна вибирати наступні номінали конденсатори:

C1: K50-35-25В-470 мкф+20%; C2: K73-11-25В-0,33 мкф+20%;

C3: K50-35-25100 В-47 мкф+20%; C4: K73-11-25В-1 мкф+20%.

## 2.5 Алгоритм розробки друкованої плати перетворювача для вітро-енергетичної установки

Відповідно до технічного завдання в цій кваліфікаційній роботі необхідно розробити проект друкованої плати перетворювача енергії вітру в електричну. При конструюванні друкованих плат необхідно брати до уваги базові вимоги до процесу їх виготовлення. Основна мета цього процесу полягає у створенні комутаційного апарату для об'єднання групи електричних радіоелементів у функціональний вузол із забезпеченням необхідних механічних і електричних параметрів в заданій межі експлуатаційних характеристик при мінімальних витратах.

Оскільки ми розробляємо одиничний експериментальний зразок схеми перетворювача, то будемо виконувати неавтоматизовану розробку друкованої плати. Процес розробки одно- і двосторонніх друкованих плат складається з алгоритму, який включає ряд виконуваних послідовно операцій і рішень, що приймаються залежно від результатів, отриманих після виконання деяких операцій [29].

На рис. 2.19 приведено розроблений для нашого проекту неавтоматизований алгоритм розробки одно- і двосторонніх друкованих плат.

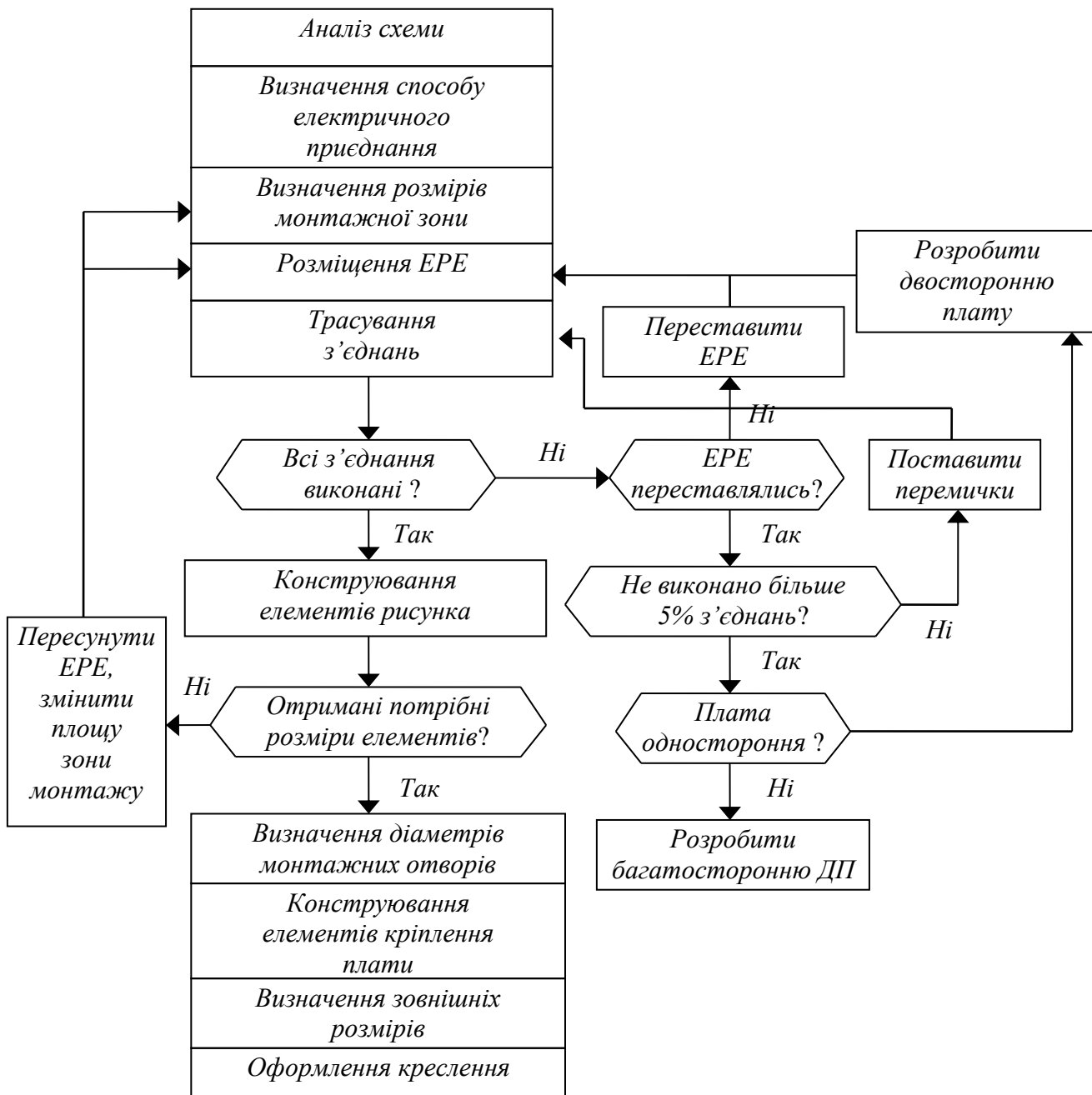


Рисунок 2.19 - Алгоритм розробки 1- і 2-сторонніх друкованих плат

Як видно із структурної схеми алгоритму при розробці простих електричних схем конструювання складається з послідовного виконання операцій і мета досягається найкоротшим шляхом. При розробці складних електричних схем, недостатньому досвіді конструктора, неякісно виконані деяких попередні операціях розробка може ускладнитись за рахунок повторення виконання деяких операцій, передбачених алгоритмом.

Запропонований алгоритм в компактній формі вказує шлях при розробці друкованої плати.

Навісні елементи на друкованій платі необхідно розмістити так, щоб центри монтажних отворів для їх виводів по можливості були б у вузлах координатної сітки, розташованих на одній з паралельних і взаємно перпендикулярних координатних ліній.

При встановленні на друковану плату потрібно сформувати гнучкі виводи електричних радіоелементів, тобто за допомогою спеціального оснащення зігнути їх таким чином, щоб форма виводів відповідала способу установки цих елементів. Відстань від корпусу елементів до місця вигину пайки зазначена в держстандарті або технічних умовах відповідного елементу. Якщо таких вказівок нема, то відстань від корпусу елементу до зігнутого виводу має становити не менше 2,0 мм, а до місця пайки має бути не менше 2,5 мм.

Застосування друкованих плат дозволяє полегшити налаштування обладнання та виключити появу помилок при монтажних роботах, так як розташування провідників і монтажних отворів є однаковими на всіх платах для даної схеми. При використанні друкованих плат зменшуються габаритні розміри обладнання, поліпшуються умови відведення тепла, знижується металоємність обладнання та забезпечуються конструктивно-технологічні переваги перед об'ємним монтажем.

Виготовляти друковані плати можна хімічним, електрохімічним, а також комбінованим способом. Але найбільшого поширення отримав адитивний спосіб виготовлення друкованих плат, суть якого полягає в створенні провідного рисунка за допомогою металізації товстим шаром хімічної міді, а це позбавляє застосування гальванічних операцій та витравлення, тобто суттєво зменшує ширину провідників і відстані між ними, забезпечуючи збільшення щільності монтажу на платах. Практичний досвід застосування цього методу фірмами США засвідчив зниження вартості плат на 20%, а також зменшення витрат хімікатів та скорочення виробничих площ і складів обладнання [30].

## 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Аналіз завдання і способи його реалізації

За допомогою вітрових електростанції можна зекономити паливо, але важко замінити на інші види джерел енергії, так вітер не є постійним фактором, а для споживача завжди потрібно мати стабільну електричну потужність. Незважаючи на ці причини, вітрогенераторні установки можуть використовуватися в якості додаткового джерела енергії і в якості основного в важкодоступних місцях та в місцях без обов'язкового постійного і регулярного споживання електроенергії [31].

Головним фактором потужності виступає швидкість повітряних потоків, зокрема енергія вітру дорівнює швидкості вітру в 3 степені. При розміщенні вітрового устаткування приділяють велику увагу коефіцієнту корисної дії. Наприклад, при розміщенні вітрової електростанції в місці з середньою швидкістю вітру  $6 \text{ м/с}$  (у 2 рази більшою за мінімальну), то можна отримати підвищення енергії у вісім раз. До головних параметрів при інсталяції вітрової електростанції можна віднести номінальну потужність генератора, величину периметра ротора, висоту щогли, характеристики ефективності аеродинамічного, механічного і електричного перетворення і інші додаткові силові характеристики [31].

Зазвичай вітрову енергію вітру перетворюють в поступальний, обертальний чи коливальний механічні рухи, а вже отримана механічна енергія безпосередньо використовується для перетворення в енергію електричну, теплову або акумуляції газів і рідин (рис. 3.1).

Основні вимоги при проектуванні вітрової електростанції:

- швидкість сили вітру в діапазоні від 3 до 25  $\text{м/с}$ ;
- річна середня швидкість вітру має становити 4.8  $\text{м/с}$ ;
- забезпечення власних витрат енергії або можливість її постачання до споживача;
- дотримання умов безпечної роботи (рівень шуму, електромагнітних перешкод).

Малопотужні вітроелектричні станції служать для заряджання акумуляторів напругою 12В або 24В. При з'єднанні з інвертором 12В /220В їх можна використовувати для живлення побутових споживачів. В залежності від типу акумуляторних батарей розраховують час живлення навантаження.



Рисунок 3.1 - Перетворення енергії вітру в інші види енергії

На рис. 3.2 приведено вітроенергетичну установку, яка приводить в рух генератор змінного струму, а вироблена електрична енергія розгалужується на дві гілки. Перша гілка здійснює перетворення через випрямляч 2 і стабілізатор 3 та поступає на інвертор, який перетворює постійну напругу 12В на змінну напругу 220В з частотою 50 Гц для живлення споживача. Інвертор в приведеній в схемі є досить досконалим, надійний і невеликого розміру. Потужність подібних пристроїв може сягати до декількох кіловат і цей контур має бути пріоритетним.

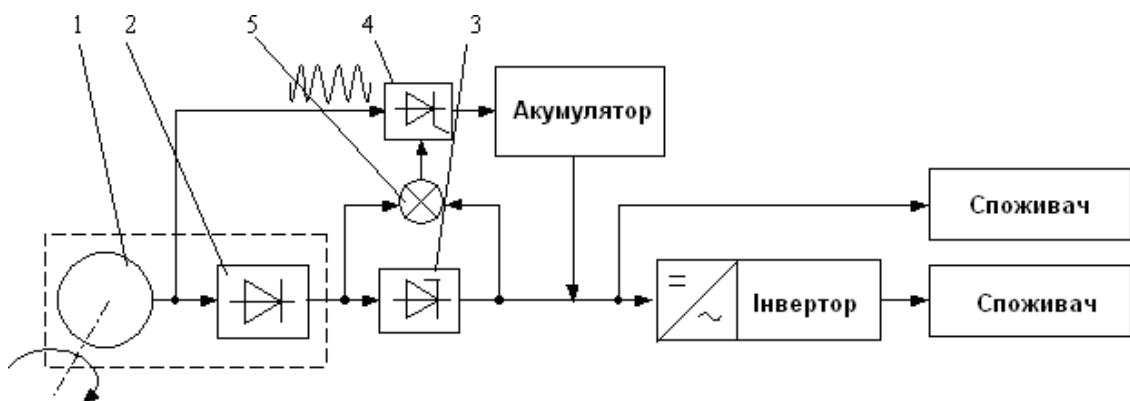


Рисунок 3.2 - Структурна схема перетворювача: 1 – генератор; 2 – випрямляч; 3 – стабілізатор; 4 – зарядний пристрій; 5 – суматор пристрою

Друга гілка є лінією буферного накопичувача електричної енергії і складається із пристрою зарядки акумуляторів 4, акумуляторної батареї і суматора 5. При достатній інтенсивності вітрового потоку потужність виробленої електроенергії є більшою за споживану каналом інвертора. В цьому випадку напруга перед стабілізатором є вищою ніж напруга за стабілізатором. Різниця цих напруг викликає спрацьовування зарядного пристрою. Величина зарядного струму є пропорційною різниці напруги. Зменшення інтенсивності вітрового потоку супроводжується зменшенням напруги перед стабілізатором. Зменшення величини сигналу з виходу суматора до встановленого значення викликає припинення зарядного струму акумулятора і у цьому випадку енергія вітрової установки витрачається тільки для потреб споживача через інверторний пристрій. У випадку припинення або малої потужності вітрового потоку, напруга на виході стабілізатора буде нижчою від напруги акумулятора і інверторний пристрій починає споживати електроенергію від акумулятора.

На рис. 3.3 представлено схему застосування генераторів змінного струму з вбудованим 3-фазним мостовим випрямлячем і стабілізатором в блоковому варіанті виконання. Регулятор напруги містить вимірювальний елемент, що порівнює елемент і регулятор. Вимірювальний елемент отримує напругу від генератора і перетворює її у вихідний сигнал, який в елементі порівняння порівнюється з еталонним значенням напруги.

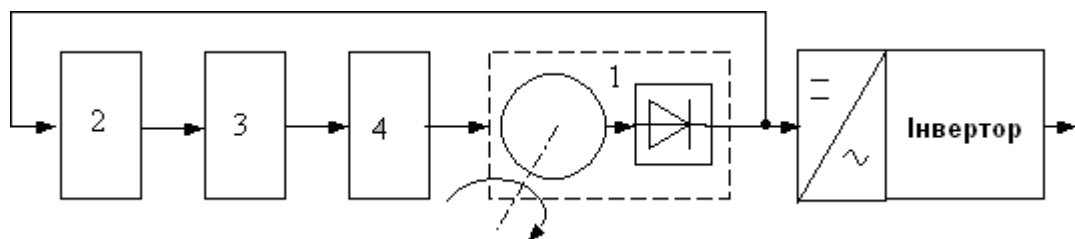


Рисунок 3.3 - Генератор змінного струму з 3-фазним мостовим випрямлячем і стабілізатором: 1 – генератор; 2 – випрямляч; 3 – стабілізатор; 4 – суматор

На рис. 3.4 наведено принципову електричну схему генератора з регулятором напруги, в якій напруга з вхідного ділянка поступає на елемент порівняння (в якості еталонної величини зазвичай є напруга стабілізації стабілітрона). Далі струм стабілітрона включає електронне реле для

комутації кола збудження таким чином, щоб струм в обмотці збудження проходив в потрібну сторону.

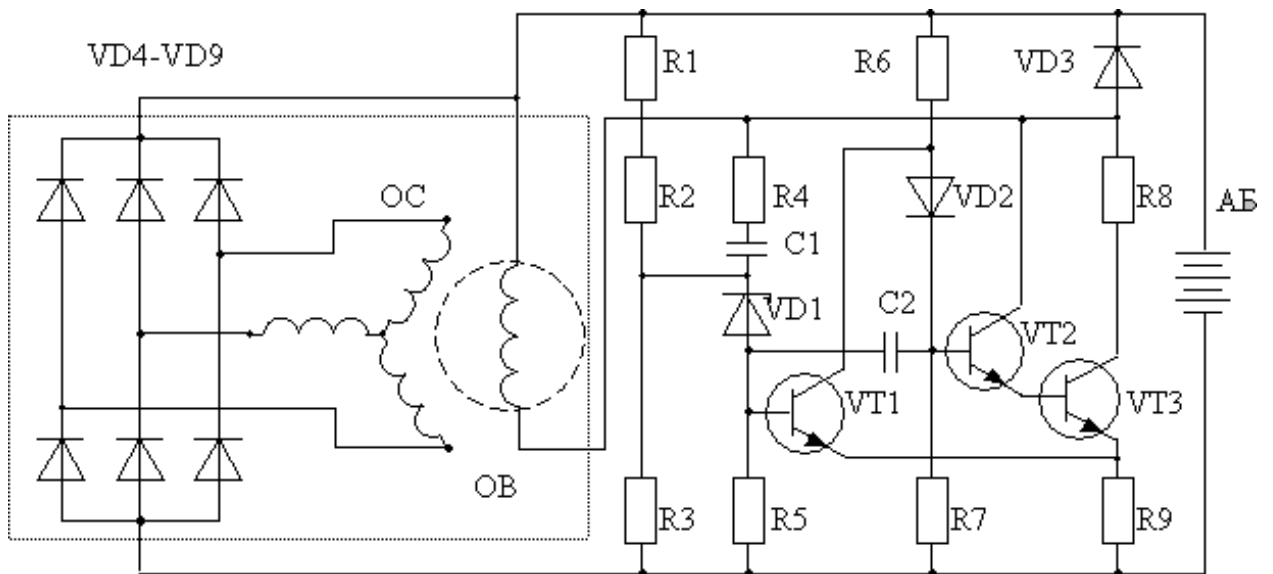


Рисунок 3.4 - Схема генератора з регулятором напруги

Таким чином завдання кваліфікаційної роботи полягає в розробці пристрою перетворення електричної енергії постійного струму з напругою 12 В в змінний струм 220 В промислової частоти 50 Гц. При розробці конструкції перетворювача 12/220 В було розроблено повністю автоматичний пристрій резервного живлення з використанням одного силового трансформатора для перетворювача. Розроблений пристрій має захист від випадкової зміни полюсів акумулятора як в режимі перетворення з 12 в 220 В, так і в режимі заряджання акумуляторної батареї.

Перед початком роботи навантаження споживача є підключеним до установки і живиться від вітрогенератора через інверторний пристрій. При відсутності вітрового потоку напруга на генераторі відсутня і навантаження споживача у цьому випадку живиться від перетворювача, який заживлений від акумуляторної батареї напругою 12 В. При відновленні вітрового потоку з'являється напруга на генераторі, інвертор перемикається знову на генератор, а акумуляторна батарея переходить в режим заряджання через зарядний пристрій від генератора.



Вбудований в схему зарядний пристрій в режимі заряду забезпечує подачу зарядного струму і слідкуючим пристроєм ступеня заряджання із захисною системою від надмірної перезарядки акумуляторної батареї.

### **3.2 Розробка структурної схеми перетворювача**

Для забезпечення автономного електропостачання споживачів умовного гаражного кооперативу «Колесо», при достатній кількості вітрових днів в поточному році потрібно розробити проект перетворювача (інвертора) для вітрогенератора з наступними можливостями:

- повинен перетворювати електричну енергію вітрогенератора в енергію, яка необхідна споживачу;
- має генерувати змінну напругу синусоїдної форми промислової частоти;
- пристрій має бути повністю автономним;
- має забезпечувати відслідковування та вибір джерел енергії;
- повинен заряджання акумуляторної батареї і контролювати ступінь її заряду.

Для того, щоб забезпечити виконання всіх перерахованих вище вимог, блок інвертора повинен мати у своїй комплектації наступні вузли:

- блок живлення пристрою для формування двох двополярних напруг величиною  $\pm 15\text{ В}$  і  $\pm 5\text{ В}$ ;
- блок управління силовими ключами з ШІМ-модуляцією;
- силові транзисторні ключі;
- трансформатор підвищення напруги;
- силовий блок індикації наявної напруги;
- пристрій контролю і заряджання акумуляторної батареї;
- пристрій контролю і перемикання джерел енергії.

З урахуванням перерахованих вище вимог розроблена узагальнена структурна схема інвертора буде матиме вигляд, приведений на рис. 3.5.

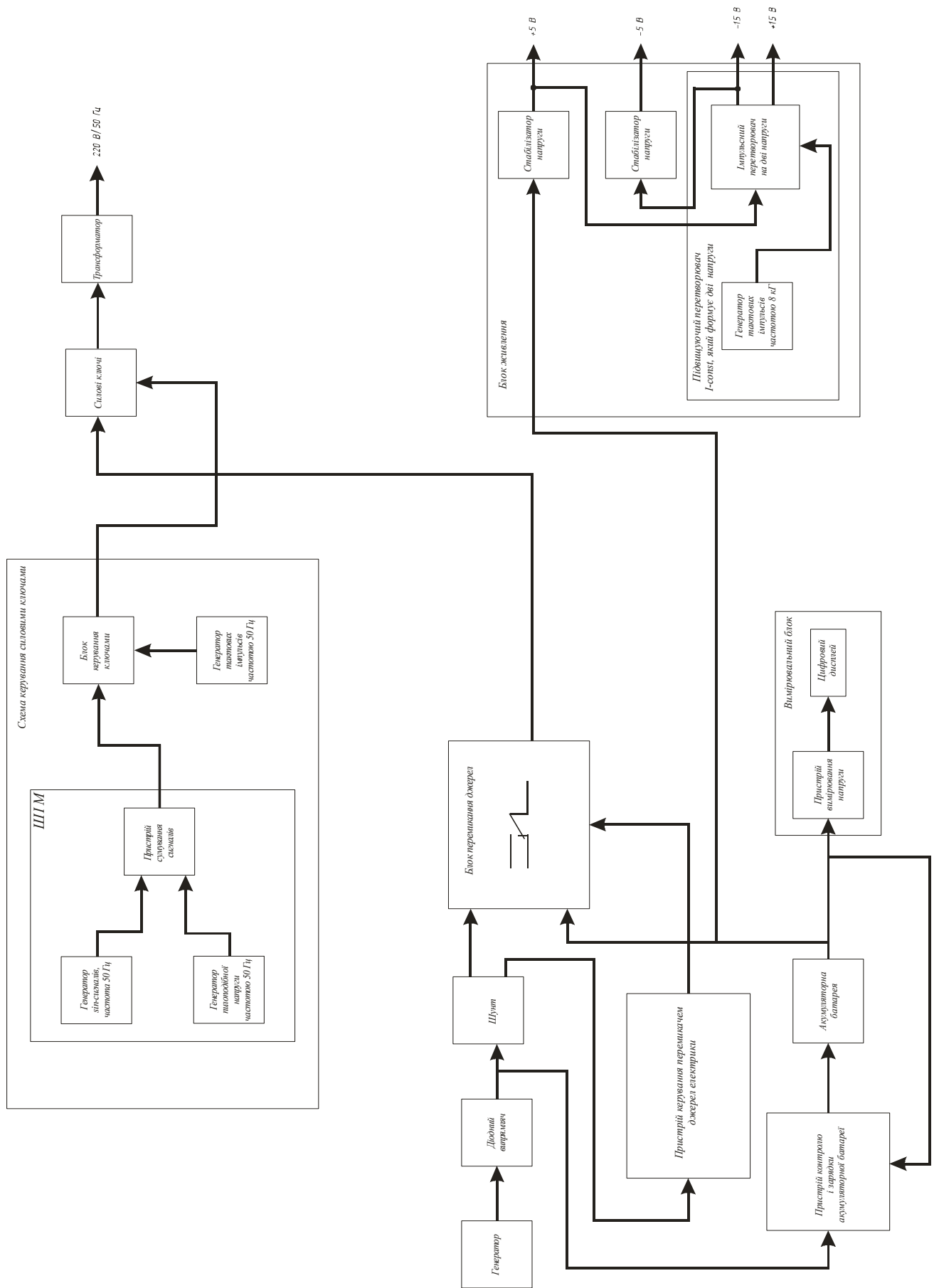


Рисунок 3.5 - Структурна схема перетворювача

Для отримання на виході пристрою синусоїдної напруги використовується блок управління силовими ключами з шоротно-імпульсною модуляцією, який здійснює формування керуючих імпульсів з шоротно-імпульсною модуляцією. Зазначена модуляція здійснюється за допомогою інверсного додавання двох сигналів - імпульсів пилоподібної форми і синусоїди.

Силовий блок індикації напруги виконує вимірювання напруги силового кола та її індикацію на світлодіодних індикаторах.

Для заряджання і контролю струму та ступеня зарядки акумуляторної батареї використовується пристрій контролю і зарядки акумуляторної батареї.

Для здійснення вибору і перемикання між джерелами живлення використовується пристрій контролю і перемикання джерел енергії, який контролює струм і потужність силового кола.

### **3.3 Розробка функціональної схеми перетворювача**

Проектований перетворювач електричної енергії є пристроєм, що функціонує в аналоговому режимі. Поставлене в кваліфікаційній роботі завдання можна реалізувати на аналогових і напівпровідникових компонентах, але з метою підвищення стабільності та зменшення габаритних розмірів було прийнято рішення скористатися інтегральними мікросхемами операційних підсилювачів і логічних елементів. Тому для забезпечення мінімального енергоспоживання схеми операційні підсилювачі та логічні елементи можна вибирати серії КМОП [21].

На базі розробленої структурної схеми пристрою і вибраної елементної бази можна побудувати функціональну схему перетворювача енергії, враховуючи виконувані функції тими або іншими блоками (рис. 3.6)

З вітрового генератора енергія через діодний випрямляч поступає на зарядний пристрій і силовий ключ. Сигнал з шунта поступає на операційний підсилювач, посилюється в 100 раз та подається на тригер Шмітта з цифровим виходом. Далі з тригера Шмітта сигнал поступає на двохходовий логічний елемент «2І» і з нього йде на відкриття транзистора. З цього ж тригера

інверсний сигнал подається на інший силовий ключ. Для захисту силових транзисторів в схемі передбачено компаратор, сигнал якого подається на логічний елемент «2І».

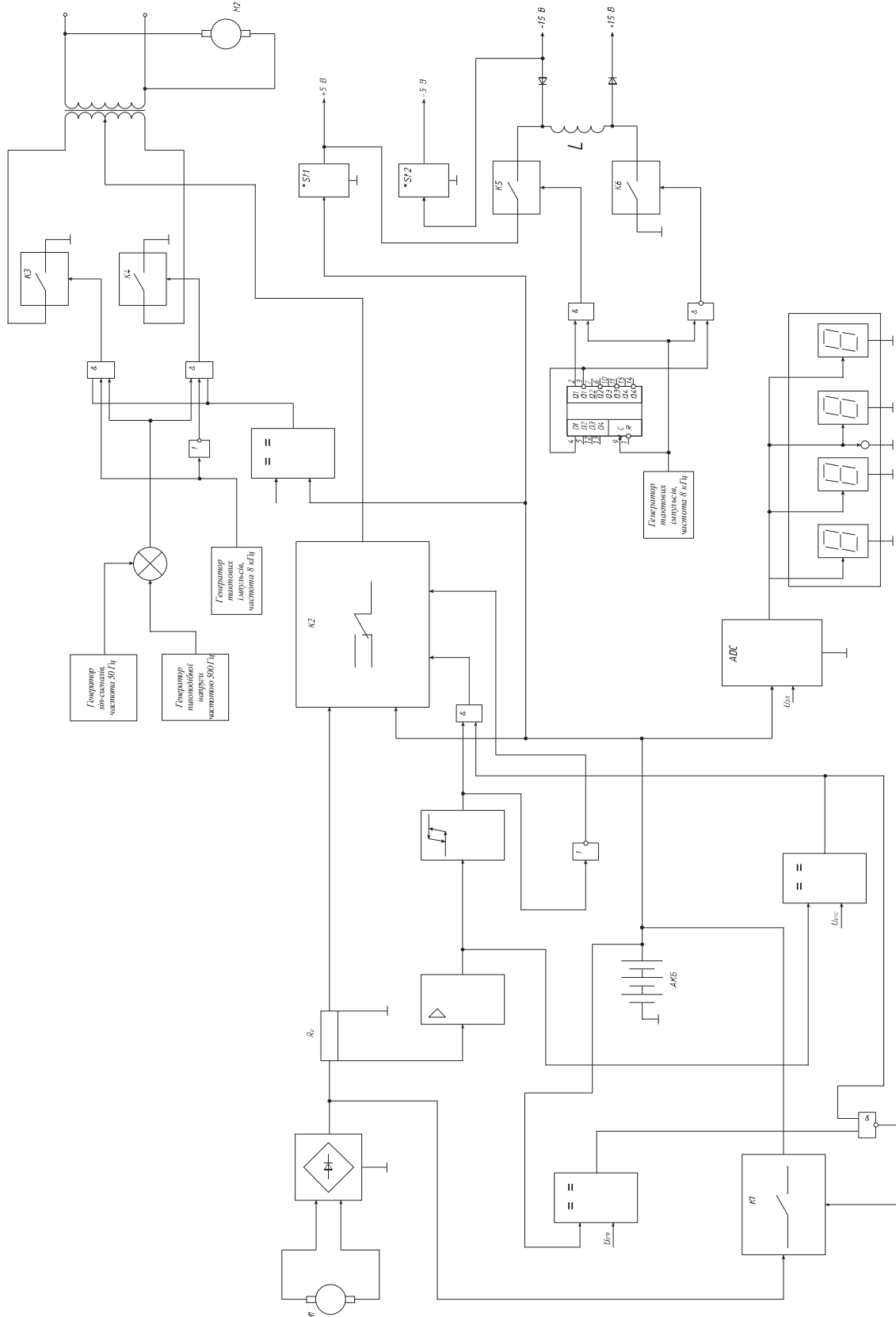


Рисунок 3.6 - Функціональна схема перетворювача енергії

Щоб забезпечити на виході трансформатора напругу синусоїдної форми, необхідно скористатися ШІ-модуляцією і для цього інверсно просумуємо імпульси пилоподібної напруги з сигналом форми синусоїди. Отриману ШІ-модуляцію потрібно розподілити на два силові ключі з частотою  $50 \text{ Гц}$ .

У блоці живлення інвертор одночасно виконує дві функції індуктивного перетворювача: підвищення і інвертування на  $\pm 15 \text{ В}$  з  $+5 \text{ В}$  за допомогою індуктивності та двох ключів системної шини. Додатково на нього подається керуючий сигнал з блоку інтерфейсу.

Для контролю за напругою на акумуляторній батареї в схемі використовуються світлодіодні індикатори, що отримують сигнал з аналого-цифрового перетворювача.

### **3.4 Розробка принципової схеми перетворення енергії вітру в електричну**

Коефіцієнт трансформації силового трансформатора має бути в межах від 21 до 22, він залежить від напруги насичення силових транзисторів і падіння напруги на емітерних резисторах. Діаметр дроту обмоток вибираємо по можливості більшим, а обмеженням є «вікно» трансформатора, тому П-подібний сердечник трансформатора буде зручнішим. Нагрівання трансформатора в схемі перетворювача повинно бути мінімальним у зв'язку з втратами напруги.

В якості силових транзисторів можна використовувати біполярні або польові транзистори, включивши їх блоками по декілька штук, залежно від необхідного струму первинної обмотки. Для схеми на біполярних транзисторах максимальний струм коливається від 160 до 200  $\text{А}$  і підбір транзисторів можна не проводити. Недоліком схеми є велике падіння напруги на транзисторах, тому їх потрібно встановлювати на радіатор.

Напруга  $+12 \text{ В}$  від акумулятора подається двома провідниками: провідник більшого перетину є силовим, меншого перетину - вимірником. Плюс на блок живлення подається через тумблер для відключення інвертора.

Силкові струмові кола мають бути короткими і відповідного перетину (до 6 мм<sup>2</sup>).

Застосування в імпульсних перетворювачах напруги потужних польових транзисторів замість біполярних дає ряд переваг. Найбільшого поширення в імпульсних перетворювачах напруги набули польові транзистори структури МДП з індукованим *n*-каналом. При нульовій напрузі на затворі транзистор закритий і відкривається плюсовою напругою з досить чітко вираженим порогом. Вхідний опір МДП-транзисторів - чисто ємнісний, але це не означає, що при подачі на затвор керуючого імпульсу він поводитиметься як звичайний конденсатор. На еквівалентній схемі транзистора розрізняють три основні ємності: вхідну - між затвором і витокком; прохідну - між стоком і затвором, вихідну - між стоком і витокком [25].

Для вивчення особливостей зарядної кривої був зібраний вузол, схема якого представлена на рис. 3.7.

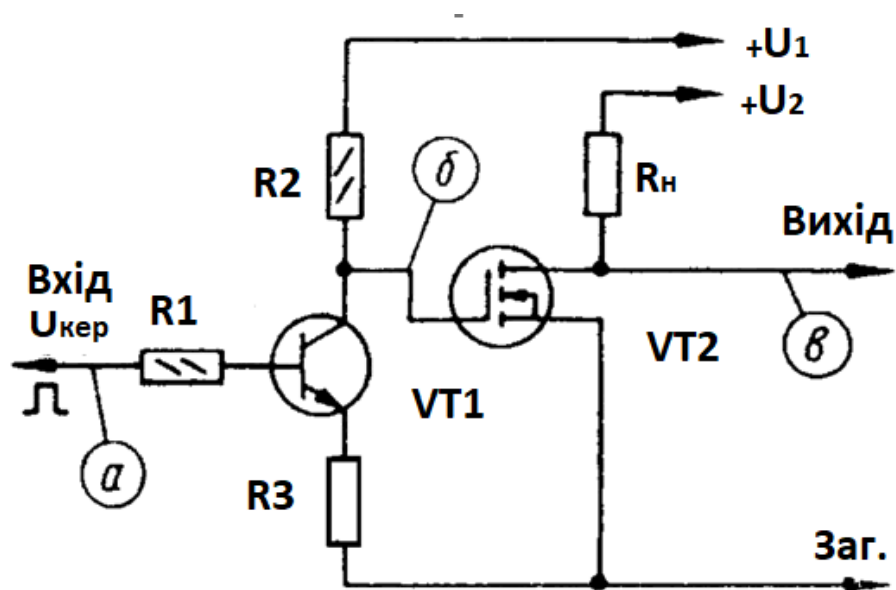


Рисунок 3.7 - Схема для вивчення особливостей зарядної кривої

Вузол живиться від двох джерел  $U_1$  і  $U_2$ , оскільки напруга на стоці сягає сотень вольт. Діаграми напруги в характерних точках вузла приведені на рис. 3.8 і зображені в довільному масштабі.

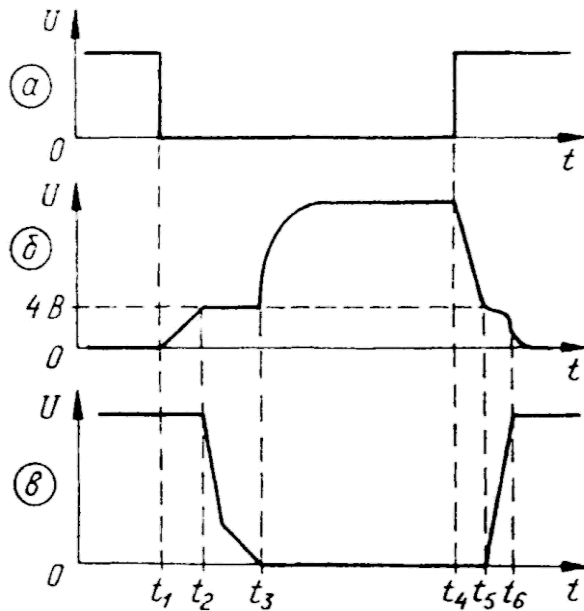


Рисунок 3.8 - Діаграми напруги в характерних точках вузла

До моменту  $t_1$  плюсову напругу на вході підтримує транзистор VT1 відкритою. Тривалість фронту і спаду запускаючих імпульсів не перевищує 20 нс, тому на діаграмі вони не відображені. На відрізку  $t_1-t_2$ , коли транзистор VT1 вже закритий, VT2 теж ще закритий і напруга на його затворі збільшується за експонентою з постійною часу. На екрані ця початкова ділянка має вигляд відрізка прямої лінії.

Транзистор VT2 відкривається у момент  $t_2$  з деякою затримкою ( $t_{\text{зад1}} = t_2 - t_1$ ) і з цього моменту  $t_2$  починає діяти негативний зворотній зв'язок між стоком і затвором через ємність. Напруга на затворі перестав збільшуватися і графік б на ділянці  $t_2...t_3$  є на екрані горизонтальною прямою. Зате напруга в точці в з моменту  $t_2$  починає зменшуватися із-за збільшення струму стоку.

У момент  $t_3$  транзистор VT2 відкривається повністю, напруга на його стоці майже досягає нуля і залишається постійною, негативний зворотній зв'язок через ємність вимикається (струм зворотного зв'язку рівний нулю). Напруга на затворі знову починає збільшуватися за експонентою до  $U_1$ . У момент  $t_4$  відкривається транзистор VT1 і починає розряджати ємність і постійна часу її розрядки набагато менша за зарядку, тому напруга на затворі транзистора VT2 зменшується дуже швидко: поки вона не досягне порогового значення (момент  $t_5$ ), транзистор VT2 залишається відкритим.

У момент  $t_5$  він починає закриватися, напруга на його стоці збільшується і знову вступає в дію негативний зворотній зв'язок. На графіку *б* (рис. 3.8) з'являється сходинка, але оскільки закривання відбувається дуже швидко, її тривалість дуже мала. Транзистор закривається раніше, ніж напруга на його затворі спадає до нуля. Інтервал часу  $t_4 \div t_5$  є часом затримки вимкнення  $t_{\text{зад}2} = t_5 - t_4$ .

Однією із важливих умов стабільної роботи імпульсних перетворювачів напруги є процес формування надійного режиму перемикання силових транзисторів. При відкритті транзистора струм стоку збільшується від нуля до максимуму, а напруга на ньому зменшується від максимуму і майже до нуля. При закритті транзистора відбувається зворотний процес. Тут потрібно, щоб струм, напруга і їх добуток на всій траєкторії робочої точки не перевищували допустимих значень, тобто мають бути виключені або зведені до мінімуму викиди струму і напруги в перехідних положеннях. Цього можна добитись примусовим сповільненням процесів перемикання транзисторів, але фронт і спад імпульсу повинні бути короткими для зменшення виділення тепла в транзисторі. Практика показала, що польові транзистори це завдання вирішують краще за біполярні. Тривалість фронту імпульсу струму стоку рівна тривалості горизонтальної ділянки  $t_2 \dots t_3$ , яка пропорційна опорі резистора  $R_2$  (рис. 3.8). Залежність тривалості фронту  $t_\phi$  від опору резистора  $R_2$  зображена на рис. 3.9, тобто при підборі цього резистора можна встановити потрібну швидкість наростання струму стоку [24].

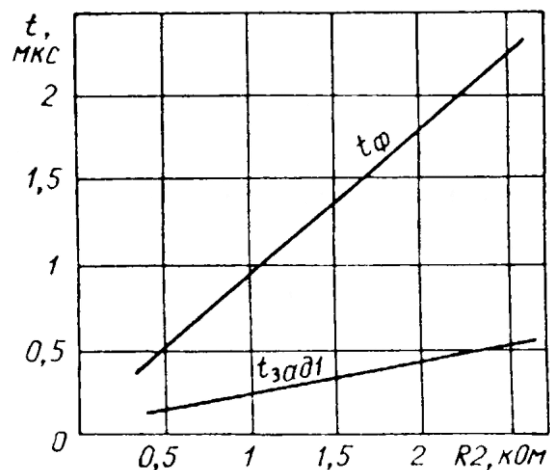


Рисунок 3.9 - Залежність тривалості фронту від опору резистора



Включення польового транзистора за схемою рис. 3.7 одну особливість, яка сприяє вирішенню поставленої задачі. Швидкість наростання струму стоку в початковій фазі імпульсу дещо знижується, наслідком чого є відсутність викиду на фронті імпульсу струму. Час відкриття польового транзистора приблизно рівне біполярному, включеного за тією ж схемою, а час закривання - в 10 раз менше.

Двотактні перетворювачі мають ще таку проблему як наскрізний струм. При відсутності накопичення заряду у польових транзисторів наскрізний струм може з'явитися тільки коли  $t_{зад2} > t_{зад1}$ . Якщо забезпечити закривання транзистора в одному плечі перетворювача раніше, ніж відкриється закритий в іншому плечі, цього струму не буде, тобто між закриванням одного транзистора і відкриттям іншого повинна бути пауза.

На рис 3.10 зображені в різних часових масштабах імпульси струму стоку транзисторів VT1 і VT2. Сигнал на екрані осцилографа виглядає як пряма лінія з вузькими зубцями (рис. 3.10, а). Зубці відображають короткі паузи між імпульсами струму стоку. Форма паузи в збільшеному часовому масштабі показано на рис. 3.10, б. Рисунок відображає копію екрану двоканального осцилографа в режимі «сума з інверсією» в одному з каналів.

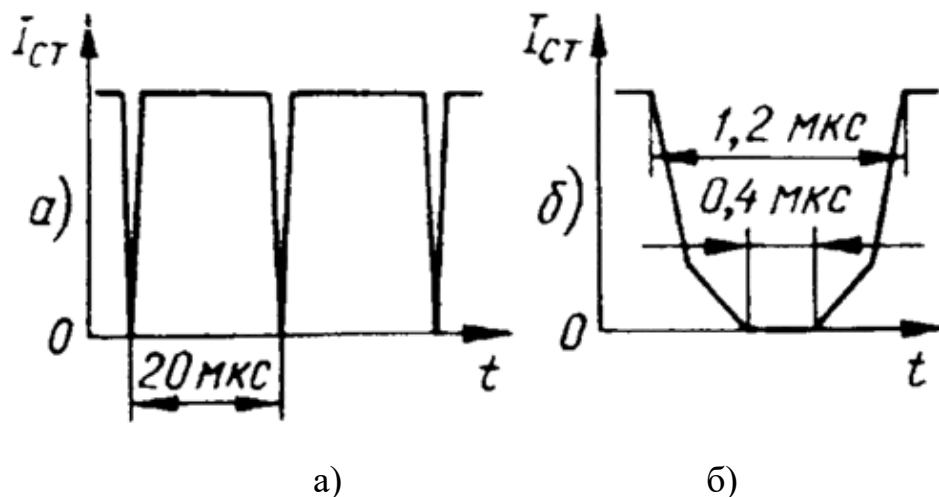


Рисунок 3.10 - Імпульси струму стоку транзисторів VT1 і VT2 в різних часових масштабах

### 3.5 Розробка способу регулювання напруги силових ключів

Вихідна напруга джерела електроживлення зазнає зміни під час роботи внаслідок зміни таких параметрів, як струм навантаження, вхідна напруга, температури навколишнього середовища, іонізуючі випромінювання, час безперервної роботи, вологості навколишнього повітря та механічного впливу [33].

Регулювання вихідної напруги може виконувати вручну або автоматично. Джерело називають стабілізуючим, якщо в ньому підтримується рівень напруги або струму незмінним із заданим ступенем точності. Залежно від виду регулювання стабілізуючі джерела підрозділяються на параметричні і компенсаційні.

Для параметричної стабілізації при постійному струмі використовують стабілітрони і переходи транзисторів, для параметричної стабілізації при змінному струмі використовують електромагнітні дроселі. У якості компенсаційних стабілізуючих джерел виступають пристрої автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком, у яких сигнал зворотного зв'язку з виходу джерела діє на регулюючий компонент. У стабілізаторах напруги сигнал зворотного зв'язку формується рівнем вихідної напруги, в стабілізаторах струму - рівнем вихідного струму.

Залежно від принципу регулювання є компенсаційні джерела безперервної дії і імпульсної дії. У перших регулюючий компонент включений послідовно з навантаженням або паралельно до нього, відповідно є послідовні або паралельні стабілізатори.

При регулюванні вихідної напруги джерела можна застосовувати амплітудну, частотну, фазоімпульсну, широтно-імпульсну, частотно-широтно-імпульсну та інтегральну широко-імпульсну види модуляції. В джерелах електроживлення електронних засобів найбільше розповсюдження отримала широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Перевагою ШІМ є відсутність статичних втрат і стабільність частоти сигналу і, відповідно параметрів зворотного зв'язку. Під час ШІМ здійснюється плавне регулювання моменту появи сигналу відкриття або закриття транзистора в залежності від величини сигналу зворотного зв'язку вихідного джерела електроживлення.

При імпульсах однієї полярності модулюючий сигнал переходить в послідовність періодично повторюваних однополярних широтно-модульованих імпульсів. Такий тип модуляції отримав назву *однотактної ШІМ*. Якщо потрібно використати двополярний модулюючий сигнал, то його попередньо перетворюють на однополярний сигнал за допомогою вводу постійної складової. Тривалість імпульсів визначається дискретними параметрами модулюючого сигналу.

На рис. 3.11 приведено пояснючі діаграми дії однотактної ШІМ:

$U=U_{упр.}+U_0\sin\omega t$  - модулюючий сигнал;

$U_{max}$  - максимальна амплітуда імпульсів;

$T_i$  - період проходження імпульсів;

$t_n$  - тактовий момент;

$\tau_n$  - тривалість імпульсу;

$t_{n1}$  і  $t_{n2}$  - моменти початку і закінчення  $n$ -го імпульсу.

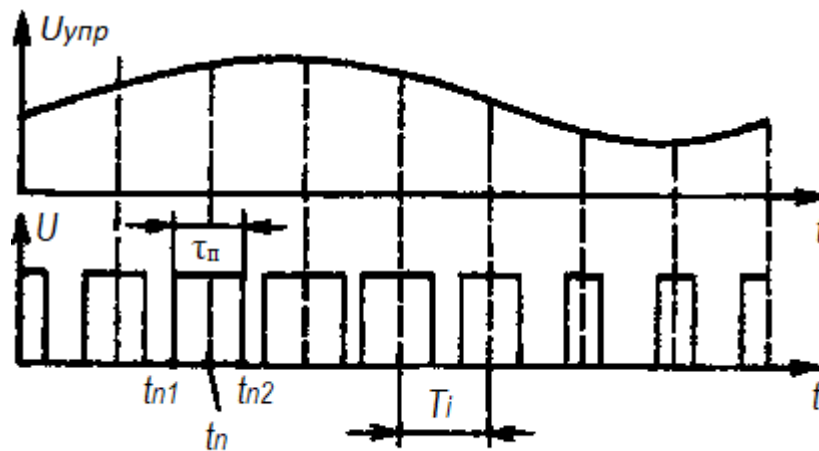


Рисунок 3.11 - Напряга при однотактній ШІМ

При двотактній широтно-імпульсній модуляції тривалість кожного імпульсу можна визначити за його абсолютною величиною у визначені моменти часу, а полярність імпульсу визначають за полярністю модулюючого сигналу  $U_{упр.}$ . На рис. 3.12 приведено пояснючі діаграми дії двотактної ШІМ.

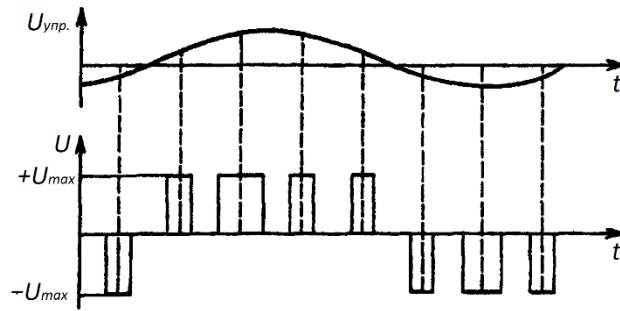


Рисунок 3.12 - Напряга при двотактній ШІМ

Використання ШІМ дозволяє реалізувати однокатну односторонню і двосторонню ШІМ з високими якісними параметрами та гарантує необхідну точність широтно-імпульсних пристроїв регулювання і стабілізації.

Дослідимо роботу однофазного інвертора з різними формами модулюючої напруги (рис. 3.13, а).

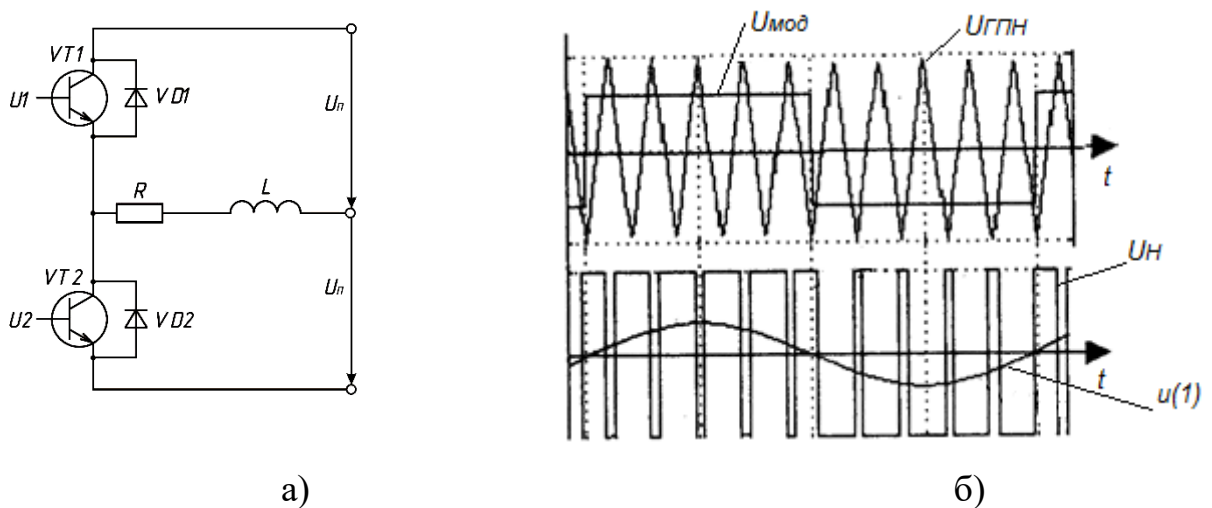


Рисунок 3.13 - Однофазний інвертор (а) і формування вихідної напруги (б)

Спочатку проаналізуємо закон з прямокутною модулюючою напругою, зокрема на рис. 3.13, б приведено алгоритм формування напруги на навантаженні і його 1-а гармоніка.

На рис. 3.14 приведено функціональну схему управління реалізації згаданого вище алгоритму, але при тут на вхід схеми управління потрібно подавати змінну напругу прямокутної форми.

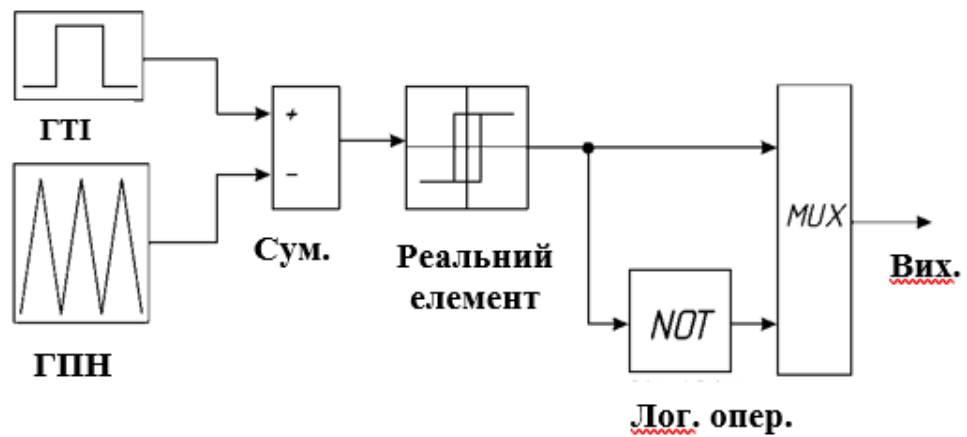


Рисунок 3.14 - Функціональна схема управління реалізації алгоритму прямокутної модуляції навантаженні

Такі схеми управління інверторами розробляються таким чином, щоб частота ГПН (рис. 3.13, б) була на порядок вищою і перевищувала максимальну частоту напруги на вході. За аналогією з радіопристроями частота ГПН називається несучою ( $f_{нес}$ ), частота вхідної напруги є модулюючою ( $f_{мод}$ ), а сама вхідна напруга буде називається, відповідно, модулюючою. На виході інвертора амплітуда і частота цієї напруги задає частоту і напругу основної гармоніки. 1-а гармоніка вихідної напруги є рівною частоті вхідного сигналу і її визначається відношенням амплітуди вхідного сигналу і амплітуди пилоподібної напруги ( $U_{вх}/U_{ГПН}$ ) та позначається через  $m$  (коефіцієнт модуляції).

Розглянута модуляція отримала назву широтно-імпульсного регулювання або ШІР-модуляції. Напруга на виході інвертора або напруга на навантаженні при такій модуляції може бути представлена у вигляді ряду Фур'є:

$$U_{вх} \approx \frac{4mU_{п}}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{k} \sin k\omega t). \quad (3.1)$$

Складові цього ряду є гармоніками і з рівняння (3.1) видно, що у складі вихідної напруги присутні тільки непарні (1, 3, 5 і т. д.) гармоніки (рис. 3.15).

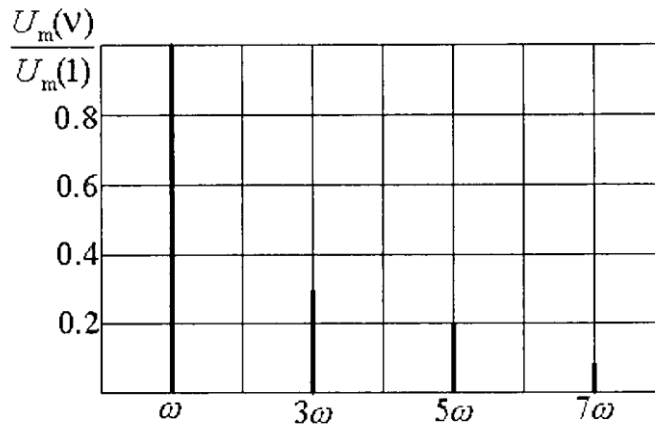


Рисунок 3.15 - Спектр вихідної напруги інвертора при ШІР-модуляції

Залежність відносних амплітуд гармонік від частоти є спектром, а струм навантаження має залежність від параметрів навантаження. При активному навантаженні струм відповідає гармонійному складу напруги, при індуктивно-активному - вищі гармоніки суттєво зменшені.

Оскільки останнім часом появилися потужні швидкодіючі транзистори (IGBT, MOSFET), то велике розповсюдження отримали інші способи широко-імпульсної модуляції, зокрема одним з них є спосіб з синусоїдною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ за синусоїдним законом). В цьому випадку модулюючою напругою є синусоїда, а формування вихідної напруги автономного інвертора при синусоїдальній ШІМ приведено на рис. 3.13.

При розрахунку спектру вихідної напруги інвертора з синусоїдною ШІМ застосовують методи спектрального аналізу, які базуються на дискретному перетворенні Фур'є. При роботі інвертора з активно-індуктивним навантаженням струм такої гармоніки буде на два порядки меншим за струм першої гармоніки, відповідно при синусоїдній широтно-імпульсній модуляції вищі гармоніки зазвичай не враховують, тобто інвертор є генератором синусоїдної напруги. Часто інвертор розробляють таким чином, щоб він мав властивості джерела струму і в цьому випадку можна застосувати замкнутий спосіб реалізації ШІМ.

Отже, для отримання синусоїди на виході інвертора можна скористатися принципом формування вихідної напруги синусоїдної ШІМ.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Заходи з охорони праці під час експлуатації вітрових турбін

Технічне обслуговування вітроенергетичних установок необхідно здійснюватися відповідно до ГКД 41.003.003.007 бригадою, яка складається не менше, ніж з двох осіб [34]. Така бригада створюється в залежності від кількості і потужності вітрогенераторів, має бути забезпечена спеціальним транспортом, набором спеціальних інструментів і пристосувань, а також комплектом запасних частин до приладів серійного виробництва. Робота бригад техобслуговування вітрових турбін виконується протягом дня. Організація роботи віротурбін повинна забезпечувати їх безперебійну роботу в допустимих режимах, надійне функціонування пристроїв управління, захисту та автоматики, в синхронних генераторах - системах збудження. У цьому випадку повинні бути виконані вимоги інструкції з експлуатації виробника. Інструкція з експлуатації вітрових турбін повинна відповідати вимогам пункту 5.8.11 цих Правил і ГКД 341.003.003.007. При експлуатації вітрових турбін необхідно дотримуватися таких умов:

- застосування заходів безпеки при роботі з даним типом вітрових турбін;
- технічне обслуговування вітрових турбін має здійснюватися тільки персоналом, який пройшов спеціальну підготовку;
- для кожної вітрової турбіни повинні бути складені форми або протоколи результатів профілактичного огляду і технічного обслуговування;
- допускається зняття ущільнень з обладнання, опломбованого виробником тільки з його згоди і в присутності його представника;
- протягом гарантійного терміну експлуатації в разі виходу з ладу елементів компоненти повинні бути відправлені виробникові.

Під час роботи вітрової турбіни потрібно строго дотримуватися всіх її режимів і параметрів, встановлених виробником, умови його прямого підключення до промислової мережі повинні бути виконані через трансформатор в складі вітроелектростанції. Такі установки, потужністю менше 20 кВт, підключаються до електричних мереж споживача та експлуатуються

відповідно до інструкції заводу-виробника. При наявності потенціалу вітру, достатнього для підвищення параметрів встановленого режиму роботи вітрових турбін, допустимість якого підтверджена виробником, може короткочасно перевищувати свою номінальну потужність не більше, ніж на ніж 5% [35]. Автоматична система управління вітровою турбіною повинна забезпечувати роботу в режимі управління власною автоматизацією, а також в режимі роботи в складі системи автоматизованого управління вітроелектростанцією. Після ремонту або модернізації системи управління вітротурбін перед їх підключенням до мережі потрібно виконати перевірку всіх систем управління вітровими турбінами. В процесі експлуатації система автоматичного управління і контролю вітротурбін повинна забезпечити виконання таких функцій:

- запуск вітрових турбін і включення їх в мережу;
- управління та діагностику приладів і обладнання;
- стабільна підтримка номінального навантаження при швидкості вітру у випадку перевищення номінальної;
- програмна і аварійна зупинка вітрових турбін;
- обмеження частоти обертання ротора в межах допустимих меж для перезапуску навантаження, пов'язані з відключенням вітрових турбін від мережі;
- орієнтація ротора в напрямку вітру;
- подача інформації на верхній рівень управління.

Огляд систем управління вітровими турбінами на предмет миттєвого скидання навантаження потрібно виконувати шляхом відключення від мережі в наступних випадках:

- при введенні в експлуатацію вітрових турбін після установки або капітального ремонту;
- після ремонту або модернізації системи управління вітровими турбінами.



Запуск вітрових турбін заборонено у наступних випадках:

- в разі несправності системи діагностики, технологічного та електричного захисту;
- в разі сейсмічних та інших природних впливів (обмерзання, град, снігопад), які перевищують допустимі значення, зазначені в заводській документації.

Вітрова турбіна повинна бути негайно вимкнена і зупинена для захисту штатного персоналу у випадку:

- перевищення допустимого рівня вібрації окремих вузлів;
- перевищення допустимої температури контрольованих вузлів;
- витік масла;
- збільшення частоти обертання ротора вітряної турбіни вище допустимого значення;
- перевищення швидкості вітру над встановленим значенням швидкості відключення;
- виникнення короткого замикання в системі генерації;
- перевантаження генератора по потужності вище допустимих значень;
- пожежа;
- виникнення ситуації, небезпечної для обслуговуючого персоналу;
- виникнення зовнішніх умов, зазначених в пункті 11.3.9 цих Правил.

Вітрова турбіна повинна бути відключена від мережі і зупинена за рішенням технічного керівника вітрового парку в таких випадках:

- виявлення несправності в його механізмах і системах;
- відмова окремих каналів захисту й діагностики;
- отримання повідомлення про прогнозовані сейсмічні дії;
- виникнення зовнішніх умов, небезпечних для експлуатації вітроустановки.

Необхідно регулярно перевіряти опорні конструкції, лопаті і електричні системи. Лопаті ротора дуже міцні, проте, якщо вони увійдуть в контакт з твердим предметом, то можуть зламатися. Щоб забезпечити безпечну роботу, при виборі місця для турбіни необхідно виключити подібні контакти. При

виконанні періодичних перевірок або в будь-який час, коли доведеться опинитися на шляху руху лопатей, проводи електроживлення від акумуляторів потрібно від'єднати і з'єднати один з одним вихідні проводи вітротурбіни з метою зупинки (гальмування) обертання лопатей. Для нових турбін потрібний короткочасний період обкатки. Підшипникам, які встановлені як в осі поворотного пристрою турбіни, так і в роторі турбіни, потрібно 60-100 годин експлуатації при нормальній швидкості вітру (приблизно 8-9 м/с), і лише після цього вони досягнуть повної ефективності. Під час експлуатації необхідно вживати заходів для захисту вітрогенератора від природних явищ, зокрема правильної установки фундаменту. Якщо фундамент вежі неправильно розрахований або неправильно влаштований дренаж фундаменту, щогла від сильного пориву вітру може впасти. При низьких температурах необхідно вжити заходів проти обмерзання, яке може збільшити масу лопатей і знизити ефективність роботи вітрогенератора. Для експлуатації при низьких температурах частини вітрогенератора повинні бути виготовлені зі спеціальних морозостійких матеріалів. Рідини, що використовуються в генераторі, не повинні замерзати, оскільки може замерзнути обладнання, яким заміряють швидкість вітру. В цьому випадку ефективність вітрогенератора може серйозно знизитися. Через обледеніння прилади можуть показувати низьку швидкість вітру, і ротор залишиться нерухомим. Від ударів блискавок в вітрогенераторі має бути передбачено грозвий захист - на гондолі вітрогенератора встановлюють спеціальний загострений штир-блискавковідвід, а також влаштовують згідно стандартів і нормативів заземлення. Необхідно стежити за станом заземлення. При порушеному заземленні удари блискавок можуть призвести до пожежі, яка виникає у випадку удару блискавки, тертя обертових частин всередині гондоли, витоку масла з гідравлічних систем, обриву кабелів і ін. Пожежі вітрогенераторів виникають рідко, але їх важко гасити через віддаленості вітрових електростанцій і великої висоти, на якій виникає пожежа. На сучасних вітрогенераторах встановлюються системи пожежогасіння.

## 4.2 Техніка безпеки при монтажі і експлуатації системи стабілізації

В вітроенергетичних установках необхідно передбачити [36]:

- ізоляцію струмопровідних частин;
- ізоляцію елементів для здійснення захисного заземлення металевих неструмоведучих частин установки, які можуть опинитися під напругою (при порушенні ізоляції, режиму роботи устаткування і т.п.);
- ізоляцію елементів, що відключають установку від мережі, коли доступні для дотику частини установки виявляються під напругою, в тому числі і грозових розрядів, оболонки для запобігання можливості випадкового дотику до струмоведучих, рухомих, нагріваних частин установки.

При необхідності установки повинні бути обладнані оглядовими вікнами, люками і засобами місцевого освітлення. До додаткових електрозахисних засобів в електроустановках до 1000 В відносяться [37]:

- діелектричні калоші;
- діелектричні килими;
- ізолюючі підставки і накладки;
- ізолюючі ковпаки.

Працівники, які виконують роботи в електроустановках, повинні мати професійну підготовку, що відповідає характеру роботи. Перевірка стану здоров'я працівника проводиться до прийому його на роботу, а також періодично, в порядку, передбаченому законодавством [38]. Електротехнічний персонал до допуску до самостійної роботи повинен бути навчений прийомам звільнення потерпілого від дії електричного струму, надання першої допомоги при нещасних випадках. Якщо потерпілий попав під дію струмопровідних частин, необхідно, перш за все, звільнити його від дії електричного струму. При цьому слід мати на увазі, що торкатися до людини, що знаходиться під струмом, без застосування належних запобіжних заходів небезпечно для життя особі, яка надає допомогу. Тому першою дією при наданні допомоги має бути швидке відключення тієї частини електроустановки, до якої торкається потерпілий.

### 4.3 Розрахунок блискавкозахисту об'єкта

Базову основу захисту обладнання електричних установок від атмосферних високих напруг, які можуть викликати ураження прямими ударами блискавки, складає облаштування блискавковідводів, тобто надійно заземлених провідників, що розташовані вище елементів захисту розробленої електроустановки: вертикальної осьової вітроенергетичної турбіни, фотоелектричних сонячних панелей і житлової будівлі, в якій розташоване побутове радіо- і електротехнічне обладнання [39].

Існує три категорії обладнання блискавкозахисту: I-а і II-а захищають від безпосередніх ударів електростатичної та електромагнітної індукції та попадання високих потенціалів, III-я захищає від безпосередніх ударів та попадання високих потенціалів. За зону захисту блискавкозахисту приймають частину навколишнього простору, всередині якого здійснюється захист об'єкта від попадання блискавки з певним ступенем надійності: зона А має 99,6% і більше, зона Б -95% і більше.

Наприклад, до першої категорії захисту і зони А відносяться вибухонебезпечні об'єкти за правилами техніки електробезпеки (клас ВІ і ВІІ, ІІ-ВІа і ВІІа) враховуючи, що в зоні захисту А можна очікувати кількість вражень на рік більше одного, а в зоні Б - менше одного.

Для поглинання електростатичного заряду блискавки і відводу її струмів в землю використовують стандартні частини блискавкозахисту - громовідводи, що мають у своєму складі несучу опору, приймач блискавки, струмовідвід та заземлювач [36].

За конструкцією громовідводи поділяються на:

- 1) стержневі одиночні;
- 2) стержневі подвійний, коли 2 стержневі блискавковідводи розташовані з різних сторін на об'єкті, що захищається;
- 3) тросові, коли між стержневими подвійними громовідводами натягнуто трос сталеві конструкції;
- 4) сітка блискавкоприймаюча – така конструкція монтується на неметалевий дах будівлі.

Основи блискавковідводів можуть бути виготовлені з дерева, сталі або залізобетону. Стрижневі блискавкоприймачі зазвичай виконують стальними перерізом 100 мм<sup>2</sup> і більше та довжиною більше 200 мм. В якості блискавкоприймача можуть служити частини металевих конструкції об'єктів захисту - труби, дефлектори, дах і ін.).

Блискавкоприймачі на базі тросових блискавковідводів виготовляють з багатопровідного оцинкованого сталевго троса перерізом 35 мм<sup>2</sup> і вище. Сітку блискавкоприймаюча виготовляють зі смугової сталі перетином 46 мм<sup>2</sup> і більше або сталевго дроту 6-8 мм<sup>2</sup> та укладають прямо на дах будівлі чи під шар пожежобезпечного утеплювача (гідроізоляції). За допомогою зварки з'єднують вузли сітки - розмір утворених комірок при цьому повинен становити приблизно 36 м<sup>2</sup> (6×6 м) для захисту об'єктів II-ї категорії і 150 м<sup>2</sup> (12×12) для об'єктів III-ї категорії.

Для захисту від ударів блискавок II-ї і III-ї категорії дозволяється в якості блискавкоприймача застосовувати металеве покриття будівлі. Всі металеві елементи об'єкта, які розташовані на покрівлі, необхідно з'єднати з металом даху або сітки, а неметалеві елементи, які розташовані над дахом, оснащуються додатковими блискавкоприймачами [40].

Струмовідводи, які з'єднують дах або сітку з заземлювачами, потрібно прокладати через кожні 25 м по периметру будівлі. Струмовідводи виготовляють у вигляді сталевих труб, смуг або тросів перетином 25-50 мм<sup>2</sup> і найкоротшим шляхом прокладають до заземлювачів.

Заземлювачі можна класифікувати як:

1) *поглиблені* - укладаються на дно котловану і виготовлені з круглої або смугової;

2) *вертикальні* - верхній кінець заземлювача укладається на глибину 0,5-0,8 м в землю і виготовляються зі сталевих з'єднувальних стержнів довжиною 2-5 м або кутникової сталі;

3) *горизонтальні* - укладаються вертикально чи горизонтально на глибину 0,5-0,8 м в землю у вигляді одного або декількох симетричних променів і виготовляються з круглої або смугової сталі перетином 160 мм<sup>2</sup>;

4) *комбіновані* – поєднання вертикальних і горизонтальних, причому перетин елементів заземлювачів повинен відповідати необхідному стандарту.

З'єднання блискавкоприймачів струмовідвідводів та заземлювачів виконується за допомогою зварювання. Середньорічна інтенсивність грозової активності в годинах приведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Середньорічна активність ударів блискавки на 1 км<sup>2</sup>

Інтенсивність грозової діяльності, год/рік	15-20	20-45	45-65	65-85	85 і більше
<i>n</i>	1	3	6	9	12

Очікувану число уражень блискавкою в рік можна обчислити за наступною формулою:

$$N = (S + 6 \cdot h) \cdot (L + 6 \cdot h) \cdot n \cdot 10000,$$

(4.1)

де  $S, L$  - ширина і довжина будівлі, яка захищається, м;

$h$  - найбільша висота будівлі, м;

$n$  - середньорічна кількість ударів блискавок на 1 км<sup>2</sup> площі.

Обчислити величину імпульсного опору заземлювача, яка пов'язана з гранично допустимим опором розтікання струму промислової частоти, можна за наступною формулою:

$$R_i = K,$$

(4.2)

де  $K$  - коефіцієнт імпульсу.

Імпульсний опір для кожного заземлювача має становити не більше 10 Ом (для об'єктів II-ї категорії - 20 Ом), а в землі з питомим опором 500 Ом·м<sup>2</sup> може бути і до 40 Ом.

При облаштуванні блискавкозахисту потрібно зазвичай враховувати і наступне: з метою дотримання безпеки людей і тварин заземлювачі блискавковідводів слід розміщувати в тих місцях, які нечасто відвідуються, на відстані

більше 5 від проїжджої та пішохідної частини. Для усунення попадання високих електричних потенціалів на об'єкти захисту по підземних комунікацій, рекомендується розміщувати заземлювачі і струмовідводи до них достатньо віддалено від цих комунікацій, а для запобігання перекриття розряду від блискавкоприймача - на значній віддалі від елементів об'єкта.

Висота житлової заміської будівлі розміром  $5 \times 5$  м становить  $h_x = 10$  м. Висота вітроенергетичної установки  $h_x = 20$  м. За правилами техніки електробезпеки даний об'єкт відноситься до зони захисту Б, тому приймаємо один блискавковідвід висотою  $h = 22$  м.

Знайдемо висоту твірної перелому конуса:

$$h_0 = 0,92 \cdot h.$$

(4.3)

$$h_0 = 0,92 \cdot 22 = 20,24 \text{ м.}$$

Обчислимо радіус зони захисту житлової будівлі і гібридної енергетичної установки:

$$r_0 = 1,5 \cdot h_0.$$

(4.4)

$$r_0 = 1,5 \cdot 20,24 = 30,36 \text{ м.}$$

Обчислимо радіус зони захисту енергетичної установки:

$$r_k = 1,5 \cdot \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right).$$

(4.5)

$$r_k = 1,5 \cdot \left( 22 - \frac{10}{0,92} \right) = 16,97 \text{ м.}$$

Властивості захисту стержневого блискавковідводу можна охарактеризувати зоною захисту, тобто розрахованим простором навколо громовідводу, де ураження об'єкта, що захищається, розрядами атмосферних явищ є малоймовірним. Отже, при розрахованій висоті блискавковідводів 22 м, дана гібридна енергетична установка буде знаходитися в безпечній зоні захисту.

Користуючись результатами розрахунку, формуємо необхідні елементи побудови обрисів захисної зони (рис. 4.1).

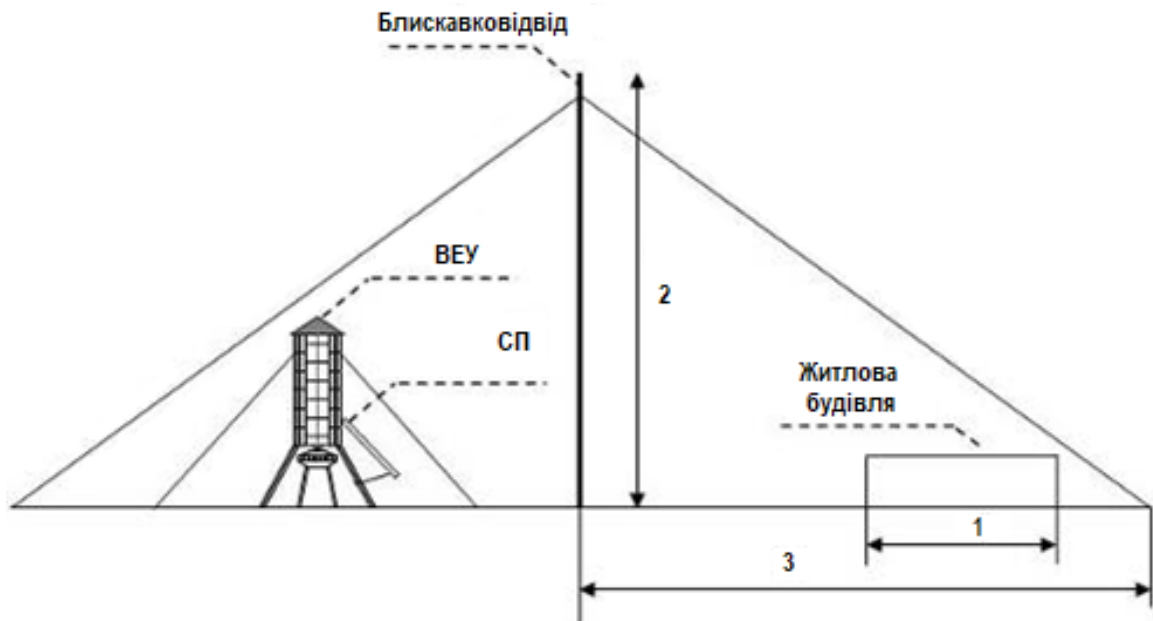


Рисунок 4.1 – Зона блискавкозахисту:

ВЕУ – вітроенергетична установка; СП – сонячні панелі;  
1 – житлова споруда; 2 – блискавковідвід; 3 – радіус зони захисту

З метою захисту підвищення надійності блискавкозахисту при монтажі блискавковідводів на порталах підстанції потрібно:

- біля стійок конструкцій з громовідводами встановити додатковий заземлювач з двох-трьох труб або металічних кутників довжиною 3-5 м;
- створити умови для розтікання струму блискавки від металічних конструкцій до блискавковідводу в 3-4 напрямках;
- на порталах підстанції подвоїти число ізоляторів в гірляндах;
- виконати приєднання заземлювача трансформаторів на відстані більше 15 метрів від заземлювача блискавковідводу.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі приведені результати теоретичних досліджень та вирішена науково-технічна задача, що полягає в розробці системи автономного електропостачання споживачів на базі вітрогенератора. У результаті проведених досліджень та розрахунків були отримані наступні результати.

1. Проведено аналіз вітрогенераторів з різними осями обертання та їх класифікацію.
2. Виконано аналіз методів розрахунку отриманої за допомогою вітрогенераторної установкою енергії та доцільність їх встановлення.
3. Виконано розробку структурної схеми вітрогенератора.
4. Виконано розробку функціональної схеми вітрогенератора;
5. Виконано розробку схеми електричної принципової перетворювача для вітрогенератора.
6. Запропоновано алгоритм розробки друкованої плати перетворювача вітрогенератора.
7. Отримано діаграми роботи вітрогенераторної установки.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вітроенергетика та енергетична стратегія / О. Ф. Оніпко, Б. П. Коробко, В. М. Мханюк. – К. : УАН, Фенікс, 2008. – 168 с.
2. Нікульшин В.Р. Використання відновлювальних джерел енергії: навч. посіб. / В.Р. Нікульшин, В.В. Височин. – Одеса: Наука і техніка, 2006. – 244 с.
3. Точений В.А. Моделі і методи розрахунку техніко-економічних характеристик вітрових електростанцій: дис. канд. техн. наук: 05.14.08: захищена 06.02.15; затв. 22.06.15 / Точений Вадим Анатолійович. – К., 2015. – 154 с.
4. Вітроенергетика // Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk/ae/windenergy>
5. Перспективи розвитку світової електроенергетики до 2035 року // Електроенергія, передача і розподіл. – 2011, № 2, С.103.
6. Вітроенергетика. Вітроенергетичні установки та вітроелектричні станції. Терміни та визначення понять. - Вид. офіц. - На заміну ДСТУ 3896-99; чинний від 2009-01-01. - К.: Держспоживстандарт України, 2008. - III, 23 с.
7. <https://hmarochos.kiev.ua/2022/01/18/vitrova-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti/>
8. Вітроенергетика. Станції електричні вітрові. Загальні технічні вимоги / розроб. М. Земін [та ін.]. - Чинний від 2002.04.01.- Офіц. вид. - К. : Держстандарт України, 2001. - III, 12с.; III, 12 с.: рис. - (Державний стандарт України)
9. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О. Нойбергер, Д. Циценков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN 978-966-350-526-8
10. Сидоров В.І. Технології гідро- та вітроенергетики. - Черкаси: Вертикаль, видавець Кандич С. Г., 2016. - 166 с.
11. Б. Оробчук, В. Герасимів, Б. Ліньов. Аналіз ефективності електропостачання при використанні автономних вітродизельних установок // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“. – Тернопіль, 2017.

12. Белей В. Ф. Вітроенергетичні установки: тенденції розвитку, проблеми підключення і експлуатації. Санкт-Петербург : ФТІ ім. Іоффе, 2005. 416 с.
13. ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій / Жовмір М.М., Симонов А.С. та інші. - Строк перевірки 2004 р. - Київ: Мінпаливноенерго України, 2001. - 52 с.
14. Васько П.Ф. Питомі характеристики енергетичного потенціалу вітру на території України // Енергетика і електрифікація. - 1997. - № 4. - С. 53-55.
15. Лисенко Ю.А. Порівняльний аналіз ефективності перетворення вітрової енергії у вітроенергетичних установках різних типів // Тр. Тавр. держ. Агротехн. акад. - Мелітополь. - 1998. - Вип. 1. - Т. 8. - С. 84-88.
16. Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, О.А. Жуков. До питання вибору вітрових двигунів і електричних генераторів вітрових електричних станцій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2007, № 6. - С. 52-62. ISSN 1997-9266.
17. Бриль А.О., Васько В.П., Васько П.Ф. Узагальнена модель забезпечення якості проектування і експлуатації вітроелектричних станцій // Винахідник і раціоналізатор. - 1999. - № 1-2. - С. 28-29
18. ГКД 3.003-2000. Вітроенергетика. Вітрові електричні установки. Порядок поставлення на серійне виробництво/ Бриль А.О., Васько В.П., Хілько В. А., Шульга В.Г. - Київ: Державний комітет промислової політики України, 2000
19. Жовмір М.М., Шульга С.В. До питання про доцільність будівництва вітрових електростанцій в Україні // Енергетика і електрифікація. - 2000. - № 4.
20. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник / В.І. Бойко, А.М. Гуржій, В.Я. Жуйков та ін. – К: Вища шк., 2004. – 366 с.
21. Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: навч. посіб. / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков. – К. : Каравела, 2004. – 432 с. – ISBN 966-8019-02-4.
22. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник / В.С. Маляр.–Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012.–312 с. ISBN 978-617-607-270-6

23. Медяний Л. П. Аналогова схемотехніка. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 177 с.
24. Седов С.О. Оброблення сигналів на базі операційних підсилювачів. Схемотехніка. Розрахунки: Навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
25. Щерба А.А., Петренко І.А., Кучеренко М.Є. Основи електроніки та схемотехніки. Дистанційний курс. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. [http://moodle.ipo.kpi.ua/moodle/mod/resource/view.php?id=12892#\\_top](http://moodle.ipo.kpi.ua/moodle/mod/resource/view.php?id=12892#_top)
26. Схемотехніка електронних систем: Кн. 2. Цифрова схемотехніка: Підручник / В. І. Бойко, А. М. Гурій, В. Я. Жуйкою та ін. – К. : Вища шк., 2004. – 423 с. – ISBN 966-642-200-X.
27. Вітроенергетичні установки малої потужності для безперебійного живлення автономних енергоспоживачів // Пропозиція. - 2001. - № 10. - 106 с
28. Довідник по цифровій схемотехніці. В.І. Зубчик, В.П. Сигорський, А.Н. Шкуро. – К.: Техніка, 2000.
29. Пирогова Є.В. Проектування і технологія друкованих плат: Підручник. – М.: ФОРУМ: ІНФРА-М, 2005. – 560 с.
30. Яцюк Л.А., Косогін О.В., Ущатовський Д.Ю., Лінючева О.В., Фатєєв Ю.Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів і виробництво плат друкованого монтажу : Посібник / НТУ України КПІ. Київ, 2017. С. 249–250
31. В. Коваль, Б. Оробчук, Я. Осадца, Л. Костик. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів. Вісник Хмельницького національного університету. – 2022
32. Вітроенергетика та енергетична стратегія / О.Ф. Оніпко, Б.П. Коробко, В.М. Мханюк. – К. : УАН, Фенікс, 2008. – 168 с.
33. В. Orobchuk, I. Sysak, S. Babiuk. Intellectual system of street lighting control in a city // Inzynier XXI Wieku Prozektujemy Przyszlosc. Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Bialejю. – 2016
34. Кучерявий В. Охорона праці: Навчальний посібник. Львів: Оріяна-Нова, 2007. 368 с.

35. Васько В.П. Керування нестационарними режимами роботи вітроустановок промислових вітроелектричних станцій: Дис. канд. тех. наук: 05.14.08./ Київ. - 2003. - 184 с.
36. Правила улаштування електроустановок, видання третє перероблене та доповнене. Київ, Мінпаливенерго України, 2012, 736 с.
37. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навчальних закладів // За ред. д.т.н., проф. М.П. Гандзюка - К.: Каравела, 2003. - 408 с.
38. Лут М.Т. Охорона праці в галузі. Методичні вказівки щодо виконання розділу у дипломних проектах студентів зі спеціальності 7.091901 «Енергетика сільськогосподарського виробництва». К.: НАУ, 2000 – 136 с.
39. Лапін В.М., Безпека життєдіяльності людини, - Львів: ЛБК НБУ; Київ: Знання, 2000.-188 с.
40. Закон України “Про захист людини від надзвичайних ситуацій техногенного та природного походження”, ВРУ, № 1809 – 111. – К., 2000.
41. Оробчук Б.Я., Буняк О.А., Бабюк С.М., Сисак І.М., Вакуленко О.О. Методичні вказівки щодо виконання та оформлення дипломної роботи за ступенем «магістр». Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017 р.