

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“ Дopusчено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Підвищення ефективності роботи системи
автоматичного керування вітроелектричної
установки ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Олексій ДЯЧЕНКО
« ____ » _____2023 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
« ____ » _____2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛІШКОВ.

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Дяченку Олексію Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Підвищення ефективності роботи системи

автоматичного керування вітроелектричної установки

Improving the efficiency of the automatic control system of a wind power
plant

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук., доц.

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 28.12.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є
підвищення енергетичної ефективності режимів роботи вітроелектричних
установок шляхом удосконалення процесу керування перетворювачем
частоти з керованим випрямлячем. Завдання роботи: 1. Виконати огляд
перспектив розвитку та актуальних проблем вітрової електроенергетики.
2. Визначити методи покращення показників якості електричної енергії за
рахунок схемних рішень електричної частини вітроелектричних установок.
3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель вітроенергетичної установки
з перетворювачем частоти на базі віденського випрямляча та провести на
ній моделювання режимів роботи вітрової електростанції. 4. Розробити
заходи з охорони праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>10.10.2023 р.</i>	
2	<i>Огляд перспектив розвитку та актуальних проблем вітрової електроенергетики</i>	<i>13.10.2023 р.</i>	
3	<i>Методи покращення показників якості електричної енергії за рахунок схемних рішень електричної частини вітроелектричних установок</i>	<i>25.10.2023 р.</i>	
4	<i>Моделювання роботи вітроенергетичної установки з перетворювачем частоти на базі віденського випрямляча</i>	<i>15.11.2023 р.</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>30.11.2023 р.</i>	
6	<i>Загальні висновки</i>	<i>07.12.2023 р.</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>11.12.2023 р.</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>15.12.2023 р.</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Дяченко О.В. Підвищення ефективності роботи системи автоматичного керування вітроелектричної установки.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2023р.

Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності режимів роботи вітроелектричних установок шляхом удосконалення процесу керування перетворювачем частоти з керованим випрямлячем.

У роботі розглядаються питання розвитку вітроенергетики як екологічного джерела енергії. Аналізуються переваги та обмеження вітрогенерації, технічні характеристики вітроелектростанцій.

Акцент в роботі зроблений на проблему впливу вітроенергетики на якість електроенергії та заходи для підтримання належних показників якості.

Запропоновано використання асинхронного генератора подвійного живлення, а також активних випрямлячів і фільтрів для підвищення якості виробленої електроенергії.

Розроблено систему керування вітроперетворювачем на основі релейного регулятора, яка дозволяє реалізувати енергоефективне керування режимами роботи вітроелектричної установки з активним.

Розроблена комп'ютерна імітаційна модель вітроелектричної установки з віденським випрямлячем в схемі напівпровідникового перетворювача та проведено імітаційне моделювання режимів її роботи.

Ключові слова: вітрова електрична установка, вітроенергетика, енергетично ефективне керування, перетворювач частоти, керований випрямляч, віденський випрямляч

THE SUMMARY

Diachenko O. Improving the efficiency of the automatic control system of a wind power plant.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2023

The aim of the work is to increase the energy efficiency of the operating modes of wind power plants by improving the control process of a frequency converter with a controlled rectifier.

The work deals with the development of wind energy as an ecological source of energy. Advantages and limitations of wind generation, technical characteristics of wind power plants are analyzed.

The emphasis in the work is on the problem of the impact of wind energy on the quality of electricity and measures to maintain proper quality indicators.

The use of an asynchronous dual-feed generator, as well as active rectifiers and filters to improve the quality of the generated electricity, is proposed.

A wind converter control system based on a relay regulator has been developed, which allows implementing energy-efficient control of wind power plant operating modes with active.

A computer simulation model of a wind power plant with a Viennese rectifier in a semiconductor converter circuit was developed, and a simulation of its operation modes was carried out.

Key words: wind power plant, wind energy, energy efficient control, frequency converter, controlled rectifier, Vienna rectifier

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ТА АКТУАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ.....	12
1.1 Еволюція використання енергії вітру від малопотужних вітряків до вітрових електростанцій	12
1.2 Проблематика стабільності енергопостачання при використанні відновлюваних джерел	17
1.3 Конструктивні особливості вітроенергетичних установок та їх вплив на ефективність режимів функціонування.....	20
1.4 Методи забезпечення належної якості електричної енергії вітрових електростанцій	28
1.5 Висновки до першого розділу.....	30
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА РАХУНОК СХЕМНИХ РІШЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК	32
2.1 Система генерації та накопичення енергії у вітровій електростанції.....	32
2.2 Машино-вентильні каскади на основі асинхронних двигунів	36
2.3 Схеми перетворювачів частоти та їх системи керування	39
2.4 Шляхи підвищення ефективності та надійності вітроенергетичних установок і поліпшення якості виробленої електроенергії.....	48
2.5 Застосування активних фільтрів для покращення показників якості електричної енергії виробленої вітроелектричними установками.....	51
2.6. Застосування активних випрямлячів для покращення показників якості електричної енергії виробленої вітроелектричними установками.....	55

2.7 Висновки до другого розділу	61
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ НА БАЗІ ВІДЕНСЬКОГО ВИПРЯМЛЯЧА	62
3.1 Асинхронний генератор подвійного живлення як ефективне технічне рішення у вітроенергетиці	63
3.2 Принцип роботи та особливості побудови схеми віденського випрямляча як елемента ефективних вітроенергетичних установок	66
3.3 Обґрунтування вибору системи керування віденського випрямляча для ефективної роботи вітроустановки	73
3.4 Комп'ютерне імітаційне моделювання роботи вітроелектричної установки з віденським випрямлячем в схемі напівпровідникового перетворювача.....	78
3.5 Висновки до третього розділу.....	87
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	89
4.1 Розробка заходів по охороні праці в процесі спорудження та використання обладнання вітрових електростанцій.....	89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	92
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	94

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АГ – асинхронний генератор
АД – асинхронний двигун
АІН – автономний інвертор напруги
АІС – автономний інвертор струму
АСМ – асинхронізована синхронна машина
ВДЕ – відновлювані джерела енергії
ВЕУ – вітроелектрична установка
ДПС – двигун постійногоструму
ПЧ – перетворювач частоти
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальним питанням для сучасного суспільства та його господарської діяльності є стрімке зростання рівня енергопотреб. Одночасно із збільшенням енергоспоживання зростає необхідність економного використання природних ресурсів та зменшення шкідливого впливу на довкілля. Це зумовлює підвищення зацікавленості у розробці, впровадженні та вдосконаленні енергоустановок на базі альтернативних джерел енергії, зокрема і вітрової енергії.

На стадії проектування вітрових електростанцій, варто враховувати, що швидкість обертання вітроколеса безпосередньо залежить від швидкості вітрового потоку. Водночас, для максимально ефективної роботи електричного генератора і задоволення вимог до показників якості електроенергії, потрібно забезпечувати постійну швидкість обертання ротора електричного генератора.

Тому залишається актуальним питання забезпечення належних показників якості електроенергії при роботі вітроелектростанцій за несталих умов вітрового навантаження.

Виділяють три основні підходи до стабілізації параметрів вихідної напруги вітроелектростанцій:

Перший підхід використовує механічне керування положення лопатей вітроколеса або застосування спеціальних механічних пристроїв для фіксації швидкості обертання ротора генератора. Проте такі системи мають суттєві недоліки: великі втрати енергії вітрового потоку, складність, дорожня конструкції та низька надійність.

Другий підхід передбачає електричне керування шляхом впливу на генератор чи перетворювач енергії. Цей підхід дозволяє ефективніше використовувати енергію вітру, оскільки лопаті працюють в оптимальному режимі максимального відбору потужності від потоку повітря. Крім того,

застосування сучасної електроніки робить систему дешевшою і надійнішою порівняно з механічним управлінням.

Третій підхід втілює комбіноване управління, що поєднує механічні та електричні методи регулювання. Такий підхід дозволяє досягти максимальної ефективності, проте потребує складніших алгоритмів керування.

Отже, найперспективнішим видається застосування електронних систем керування, можливо, в поєднанні з допоміжними механічними пристроями. Пріоритетним завданням є розробка ефективних алгоритмів управління вітроустановкою за складних і мінливих умов вітрового навантаження.

Справді, одним із ефективних рішень є застосування пристроїв перетворення частоти з активними випрямлячами. Такі пристрої дозволяють трансформувати змінний струм згенерований вітрогенератором у постійний, а потім знову перетворити його на змінний, але вже стабілізований за параметрами (частотою, напругою, формою кривої).

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є підвищення енергетичної ефективності режимів роботи вітроелектричних установок шляхом удосконалення процесу керування перетворювачем частоти з керованим випрямлячем.

Для досягнення мети в потрібно вирішити наступні задачі:

1. Виконати огляд перспектив розвитку та актуальних проблем вітрової електроенергетики.
2. Визначити методи покращення показників якості електричної енергії за рахунок схемних рішень електричної частини вітроелектричних установок.
3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель вітроенергетичної установки з перетворювачем частоти на базі віденського випрямляча та провести на ній моделювання режимів роботи вітрової електростанції.
4. Розробити заходи з охорони праці.

Об'єкт дослідження – енергетичні процеси в системі генерації електричної енергії вітроелектричної установки.

Предмет дослідження – напівпровідниковий перетворювач частоти з віденським випрямлячем в якості активного випрямляча.

Методи дослідження. Під час виконання досліджень були застосовані методи теорії електричних кіл, методи теорії електронних кіл, методи теорії електричних машин, методи теорії електропривода, метод комп'ютерного імітаційного моделювання.

Наукова цінність роботи полягає в подальшому розвитку теорії енергоефективного керування режимами роботи вітроелектричної установки з активним випрямлячем в складі перетворювача частоти машини подвійного живлення в якості електричного генератора вітроелектричної установки.

Практична цінність роботи полягає в розробці комп'ютерної імітаційної моделі вітроелектричної установки з віденським випрямлячем в схемі напівпровідникового перетворювача

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи складає 96 сторінок. Основна частина викладена на 85 сторінках друкованого тексту, містить 30 рисунків. Список використаних джерел містить 23 джерела та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ТА АКТУАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Еволюція використання енергії вітру від малопотужних вітряків до вітрових електростанцій

Всі енергетичні ресурси на Землі є продуктами випромінювання Сонця, гравітаційної енергії взаємодії космічних тіл (в першу чергу Сонця, Місяця та Землі), теплової енергії Землі, яка є результатом хімічних і ядерних реакцій, що протікають в її надрах.

Використання сили вітру є однією з найдавніших форм добування енергії, відомою людству. Енергія вітру спершу застосовувалася у судноплавстві задовго до появи парових двигунів. Навіть сьогодні мореплавці інколи звертаються до вітрильних суден.

Відомо про застосування вітряних млинів на території Єгипту та Китаю ще з давнини. Зокрема, на території сучасного Єгипту збереглися руїни давніх кам'яних споруд з вертикальними повітряними гвинтами у формі барабанів для помелу зерна. Наукові дані вказують, що ці млини функціонували в період II-I століттями до нашої ери.

З часом, в міру розвитку технологій та промисловості, котрі давали можливість виготовляти досконаліші конструкції та деталі, вітряні млини набули поширення на всій території Європи. На сьогодні вітряні млини широко використовуються, зокрема, в Нідерландах, Данії та деяких інших країнах для різноманітних господарських потреб. Окрім того, в низці регіонів вони входять до складу комплексних систем регулювання рівня води на прилеглих до вітряків ділянках.

З плином часу та вдосконаленням технологій людство перейшло від використання енергії вітру лише для механічних потреб до застосування її для

генерування електрики. Сучасні вітрові електростанції, устатковані потужними генераторами, є одним з ключових секторів альтернативної енергетики багатьох країн. Переваги вітрової енергії в її екологічності, відновлюваності та практично невичерпності. Україна також має значний потенціал для розвитку вітроенергетики.

Отже, людство застосовує енергію вітру протягом тисячоліть, перш за все використовуючи її механічну силу для обертання млинів та приведення в рух суден. Сьогодні на зміну механічним пристроям прийшли високотехнологічні вітрові електростанції, що дозволяють забезпечувати екологічно чистою електроенергією цілі міста та регіони. Тож перспективи вітроенергетики залишаються більш ніж оптимістичними.

Найбільшою перевагою відновлюваних джерел енергії є те, що вони практично невичерпні та екологічно чисті. На відміну від традиційних викопних палив, сонце, вітер, вода та інші відновлювані ресурси будуть доступні ще дуже тривалий час. Крім того, «зелена» енергетика не призводить до викидів шкідливих речовин, сприяє поліпшенню ситуації в екологічній галузі та не порушує природну рівновагу на планеті.

Водночас відновлювана енергетика має і певні недоліки. Зокрема, ресурси, такі як сонячне світло чи вітер, мають природну мінливість та переривчастість. Це ускладнює задоволення постійного попиту на електроенергію з боку споживачів. Однак сучасні технології, як-от акумуляторні батареї чи електричні потужності з функціоналом регулювання попиту на енергію, фактично нівелюють цей недолік.

Крім того, розвиток «зеленої» генерації має і суто економічні переваги. Адже відпадає потреба видобутку, транспортування та переробки органічного палива, а також проблема утилізації токсичних відходів традиційної енергетики. За прогнозами експертів, до 2050 року відновлювана енергетика забезпечуватиме до 90 % світового енергоспоживання. Отже, широкомасштабне впровадження «зелених» технологій виробництва електроенергії є не лише можливим, а й необхідним.

Наприкінці 19 століття була впроваджена ідея використання енергії вітру для генерування постійного струму. Такі рішення стали попередниками сучасних вітрогенераторів для виробництва електроенергії. Сьогодні вітрові турбіни все частіше використовують для «зеленого» виробництва електрики, адже вітер є поновлюваним ресурсом. На відміну від викопного палива, запаси вітрової енергії практично невичерпні.

Особливістю сучасних вітроустановок є можливість генерування змінного струму заданої частоти і напруги. Це дає змогу інтегрувати їх в існуючі мережі електропостачання та забезпечувати споживачів екологічно чистою електроенергією. Вітрова енергетика є одним з найбільш динамічних секторів відновлюваної енергії у світі. За прогнозними оцінками, до 2040 року частка вітру у світовому енергобалансі може скласти понад як п'яту частину.

Впровадження вітроустановки Браша стало важливим кроком на шляху розвитку вітроенергетики, незважаючи на певні недоліки пристрою. Зокрема, до мінусів відносяться значні габарити та наявність двоступеневої пасової передачі з малим передавальним відношенням 50:1, за якої генератор обертався зі швидкістю лише 500 об/хв. Водночас, перевагою була конструкція, подібна до традиційних вітряків. Експеримент підтвердив, що важкі багатолопатеві турбіни занадто повільні і не можуть ефективно застосовуватися для генерації електроенергії.

Наступний прорив у вітроенергетиці здійснив Поль Лакур, який розробив аеродинамічну трубу та отримав оптимальний аеропрофіль для крил вітроагрегатів. У той же період з'являються швидкохідні трилопатеві турбіни з лопатями аеродинамічної форми. Подібні турбіни обертали генератор потужністю 3 кВт та напругою 110 В. Експериментально було встановлено, що дволопатеві конструкції гірше протистоять значним коливанням при зміні напрямку вітру. Натомість трилопатеві моделі спокійно справляються з такими навантаженнями.

Отже, послідовне вдосконалення аеродинамічних і технічних характеристик дозволило створити ефективні швидкохідні вітротурбіни,

здатні виробляти електрику за нестабільних вітрових умов. Ці розробки лягли в основу сучасних вітроелектростанцій. Наразі вітрова енергетика є однією з провідних галузей відновлюваної енергії у світі, і її частка продовжує зростати.

Згадана вище турбіна приводила в рух генератор потужністю 3 кВт та напругою 110 В. Експериментально було встановлено, що дволопатеві системи гірше витримують різкі коливання при зміні напрямку вітру, на відміну від стійкіших трилопатевих моделей.

Важливим кроком став винахід ротора Савоніуса. Його конструкція мала ряд переваг, зокрема високий пусковий момент і здатність ефективно вловлювати вітер будь-якого напрямку. Проте цей ротор мав і істотні недоліки: невелику швидкість обертання, незадовільний коефіцієнт використання енергії вітру та значну власну вагу.

В кінці 1930-х років з'являється ще один тип вертикальних вітротурбін за проектом Ф. Дар'є. Однак масове застосування такі системи знайшли лише в 1970-х.

Наразі в енергетиці домінують горизонтальні вітротурбіни завдяки оптимальному поєднанню потужності, швидкохідності, надійності та вартості. Проте для невеликих установок в окремих випадках доцільно розглядати можливість застосування вертикальних систем. Отже, обидва принципи роботи вітроагрегатів залишаються актуальними і сьогодні.

Зовсім нещодавно з'явився вислів «нові відновлювані джерела енергії», що позначає використання відновлюваних ресурсів із застосуванням сучасних технологій. Це ускладнило точний підрахунок обсягів виробництва енергії за попередні роки. Адже статистика часто враховує як традиційні, так і новітні джерела разом. Наприклад, під «біомасою» можуть матися на увазі як звичайна деревина, так і біопаливо, отримане за допомогою передових біотехнологій. Крім того, різні країни по-різному підходять до визначення об'єктів, що належать до сфери відновлюваної енергетики. Зокрема, у більшості держав ЄС з таких схем виключені гідроелектростанції потужністю

понад 10 МВт. У той же час в Україні, відповідно до законодавства, малими ГЕС вважаються станції потужністю до 10 МВт.

Також існують розбіжності стосовно електроенергії зі спалювання промислових та побутових відходів. Деякі країни, як Німеччина чи Греція, не відносять її до відновлюваних джерел, в той час як Бельгія, Велика Британія та Нідерланди розглядають сміттєве паливо як важливий відновлюваний ресурс.

Отже, єдиного визначення того, що входить до «нових відновлюваних джерел енергії», поки не існує. Кожна країна підходить до цього питання з огляду на власні стратегічні цілі та можливості розвитку тих чи інших напрямів «зеленої» енергетики. Є потреба в узгодженні загальних стандартів на міжнародному рівні.

Розбудова відновлюваної енергетики є нагальним завданням для всіх країн будь-якого рівня промислового розвитку. Якщо для слаборозвинутих держав без власних традиційних джерел енергії головним є забезпечення енергетичної безпеки, то для розвинутих країн-експортерів органічного палива пріоритетами є питання екології та заощадження ресурсів.

Крім того, «зелена» енергетика відкриває нові економічні можливості. Зокрема, для розвинутих держав – це стимул до вдосконалення технологій відновлюваної енергетики та вихід з ними на світовий ринок. А країни, що розвиваються, отримують шанс застосувати новітні екологічно чисті технології для підвищення рівня життя населення та прискорення промислового зростання.

Таким чином «зелена» трансформація має стати пріоритетом усього світового співтовариства. Її реалізація сприятиме як охороні довкілля, так і подоланню бідності та нерозвиненості. Ключова роль у цьому процесі належить міжнародній співпраці та передачі передових екологічних технологій від розвинутих країн до країн, що розвиваються.

1.2 Проблематика стабільності енергопостачання при використанні відновлюваних джерел

Однією з перешкод широкому використанню відновлюваних джерел енергії донедавна була періодичність та мінливість їх енергетичного потенціалу. Це часто ускладнювало задоволення постійного попиту на електроенергію та не відповідало сучасним вимогам до стабільності енергопостачання. Крім того, у разі дефіциту «зеленої» енергії виникала потреба в додаткових потужностях традиційної генерації.

Проте наразі існує багато технічних рішень цієї проблеми у межах відновлюваної енергетики. Зокрема, застосування електричних і теплових акумуляторів дозволяє згладжувати графік видачі потужності відповідно до попиту. На рис. 1.1 показано приклад зміни потужності вітрової та сонячної станцій залежно від природних коливань вітру чи інсоляції.

Отже, проблему переривчастості відновлюваних джерел принципово можливо вирішити, що дає поштовх до їхнього активного розвитку та інтеграції в енергосистему нарівні з традиційною генерацією. Сучасні «зелені» технології цілком конкурентоздатні та сумісні з вимогами стабільного забезпечення споживачів електроенергією.

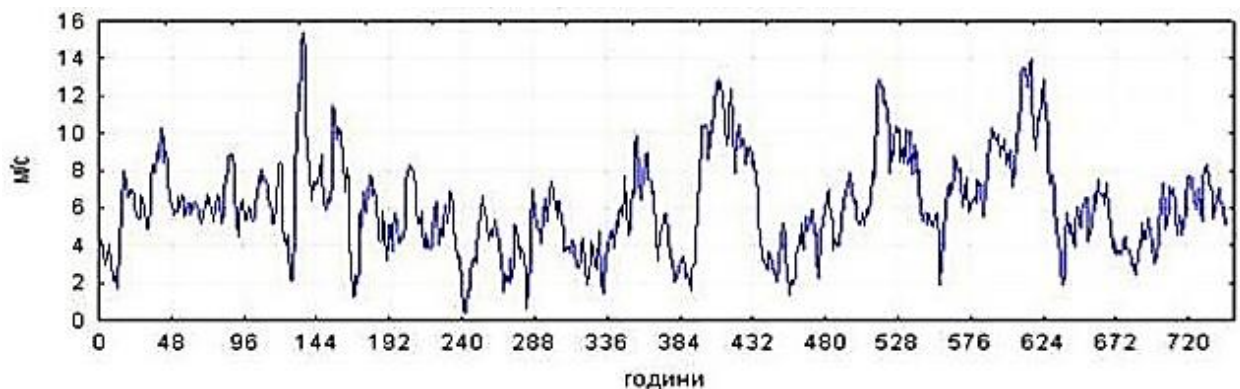


Рисунок.1.1 – Приклад діаграми зміни швидкості вітру в часі

Загалом несприятливою для енергосистеми є ситуація, коли зростання попиту на електроенергію збігається зі спадом генерації відновлюваних джерел. І навпаки, позитивний ефект спостерігається при одночасному збільшенні виробництва та споживання «зеленої» енергії, оскільки це розвантажує традиційні генеруючі потужності, як показано на рис. 1.2.

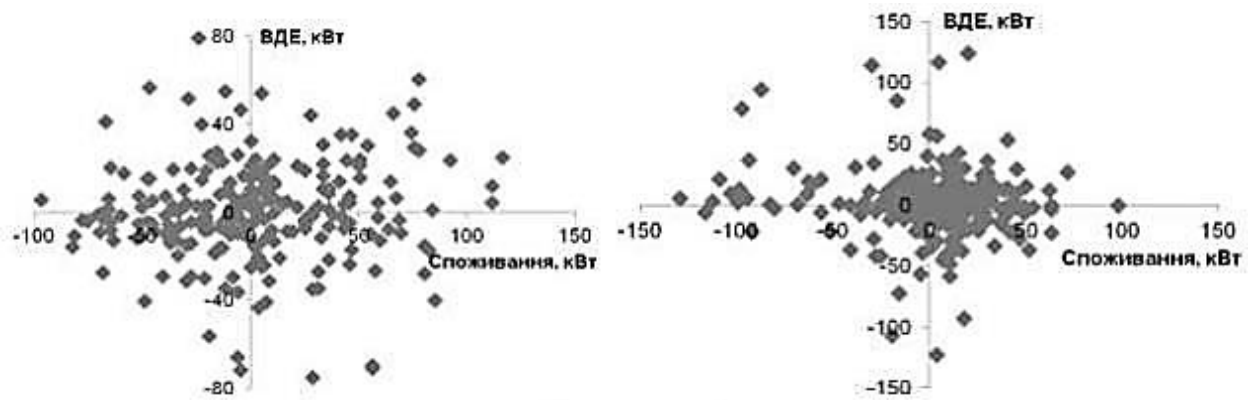


Рисунок 1.2 – Діаграма зміни потужності вітроелектричної станції та електроспоживання навантаженням

Отже, ключовим моментом для інтегрування значних обсягів установок генерації, що перетворюють відновлювані джерела енергії на електрику, в енергосистему є синхронізація графіків видачі потужності з профілями електричного навантаження. Для цього перспективними є рішення на кшталт інтелектуальних мереж, акумулювання енергії та управління попитом.

Вироблення енергії з поновлюваних ресурсів, таких як вітер, сонце чи біомаса, в масштабах, потрібних для заміни викопного палива з метою стримування глобальних кліматичних змін, також може мати несприятливий вплив на довкілля. Наприклад, беручи до уваги прогнози щодо економічного зростання та підвищення попиту на енергію, виробництво енергії за рахунок біомаси слід збільшити в сім разів для задоволення поточних енергетичних потреб та в 40 разів до 2100 року. Якщо проаналізувати перспективи зростання економіки та споживання енергії, можна побачити, що людство вже емітує 30-

40 % світового об'єму вуглецю, який зв'язується в процесі фотосинтезу. Це означає, що подальше нарощування збору біомаси може призвести до напруження екосистем та, в деяких випадках, втрати важливих джерел їжі для тварин, деградації середовищ існування та навіть зникнення видів.

Для того щоб задовольнити поточну потребу у енергії отриманій лише з біомаси, знадобиться використовувати понад 10 % суходолу планети. Це еквівалент площі, яка наразі використовується під сільське господарство у всьому світі. Таким чином, подальше збільшення масштабів застосування біомаси для виробництва енергії замість продуктів харчування буде важко досягти без етичних дилем, враховуючи статистику голоду у світі.

Таким чином перехід до 100 % відновлюваних джерел енергії вимагатиме зваженого та обережного підходу з огляду на обмеженість ресурсної бази та необхідність збереження біорізноманіття планети. Комплексне вирішення проблеми охоплює як розвиток «зеленої» енергетики, так і підвищення енергоефективності та зменшення витрат енергії.

Масштабне розгортання вітрової енергетики, необхідне для заміщення традиційних джерел, може наразитися на громадський опір. За підрахунками, щоб покрити 100 % попиту США на електроенергію за рахунок вітру, близько 80 млн га (понад 40 % придатних для сільського господарства земель) мають бути зайняті вітропарками з відстанню між турбінами 250-500 м. Тому основний негативний вплив вітроенергетики пов'язаний з використанням територій, а не загрозами для птахів чи кажанів. Проблема землекористування можна пом'якшити, якщо дозволити сільськогосподарську діяльність на території вітропарків. Якщо невелика частка енергії вироблятиметься віддаленими вітроелектростанціями, це менше турбуватиме населення з погляду шуму чи змін ландшафту.

Щоб визначити комплексний вплив «зеленої» енергетики на стійкість енергосистем, потрібне моделювання за різних умов:

- аналіз стійкості в існуючій системі;
- аналіз стійкості в майбутній системі без урахування ВДЕ;

- аналіз коливальної стійкості в майбутніх схемах з ВДЕ.

Таке дослідження дасть змогу оцінити вплив переходу на відновлювані джерела енергії та розробити заходи щодо запобігання проблем з енергобезпекою.

Вироблення сонячної електроенергії залежить від доступної кількості сонячного світла у конкретному місці. Вона варіюється залежно від пори дня, пори року, хмарності та географічної широти. Кліматичні фактори також можуть пошкоджувати поверхню сонячних панелей. Втім ці коливання є цілком прогнозованими, а деякі сонячні системи можуть акумулювати енергію для подальшого використання у періоди без сонячного світла.

Вітрова енергія також є мінливим ресурсом, і вироблення електрики конкретною турбіною залежить від швидкості вітру, густоти повітря та характеристик обладнання. За швидкості вітру менше 2,5 м/с вітрова турбіна не може генерувати енергію, а при швидкостях понад 25 м/с її необхідно гальмувати, аби уникнути пошкоджень. Хоча потужність окремої турбіни може суттєво змінюватися, для великої кількості турбін на значній території середня потужність є стабільнішою.

Коефіцієнт використання встановленої потужності для сонячної фотоенергетики дуже низький – в межах 10-20%. Для берегових вітрових електростанцій він становить 20-35%, тоді як у відкритому морі може сягати 45%. Це означає, що для забезпечення необхідної середньорічної потужності слід встановлювати у кілька разів більшу потужність обладнання.

1.3 Конструктивні особливості вітроенергетичних установок та їх вплив на ефективність режимів функціонування

Основний принцип роботи вітрових турбін полягає у перетворенні кінетичної енергії вітру в механічну енергію обертання ротора, а згодом – в електричну енергію за допомогою генератора. Повітряний потік приводить в

рух лопаті ротора, створюючи крутний момент, який через систему передачі передається на вал електрогенератора.

За способом створення обертального моменту вітрові турбіни поділяють на два типи:

- турбіни з ротором, де момент утворюється за рахунок різниці тиску повітря на лопаті. До них належать прості за конструкцією карусельні та барабанні турбіни. Вони дешеві та не вибагливі в експлуатації, однак мають низьку ефективність (коефіцієнт використання енергії вітру не перевищує значення 0,18) та низькі оберти;

- турбіни, що обертаються під дією аеродинамічної підйомної сили на лопатях. Сучасні вітроустановки належать саме до цього класу. Вони характеризуються високою ефективністю (коефіцієнт використання вітру не перевищує 0,48) та швидкістю обертання.

Дослідження показали, що максимальна потужність досягається, коли швидкість руху кінців лопатей становить приблизно третину від швидкості вітру. Саме на основі цього принципу розробляється аеродинаміка сучасних вітряних турбін для ефективного використання енергії вітру.

Сучасні вітрові турбіни мають лопатевий ротор, в якому обертальний момент утворюється аеродинамічною силою на лопатях. Такі турбіни широко застосовуються в більшості країн завдяки високому коефіцієнту використання енергії вітру (в діапазоні 0,45-0,48) та значній швидкості обертання.

За конструкцією вітроустановки поділяють на установки:

- з горизонтальною віссю обертання;
- з вертикальною віссю обертання.

Турбіни лопатевого типу з горизонтальним ротором найефективніші за умови перпендикулярного напрямку вітрового потоку до площини обертання. Для забезпечення цього використовують системи орієнтації ротора за вітром. Турбіни з вертикальною віссю можуть працювати за будь-якого напрямку вітру без зміни орієнтації.

Вибір типу ротора визначається конкретними умовами та вимогами до вітроустановки. Горизонтальні ротори ефективніші за оптимального напрямку вітру, вертикальні – більш універсальні за різних напрямків вітрових потоків.

Розглянемо поширені вітроустановки з трилопатеви́ми горизонтальними роторами, оскільки саме такі турбіни набули найбільшого застосування.

За потужністю вітрогенератори поділяють на великі електростанції та невеликі установки для автономного електропостачання.

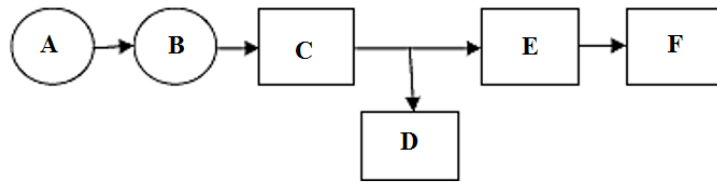
Порівняно вища енергоефективність великих вітротурбін пов'язана з більш високим та стабільним енергетичним потенціалом вітру на висоті башт до 100 м. Крім того, робота таких станцій в загальній енергосистемі полегшує узгодження обсягів виробленої електроенергії з потребами споживачів. Наявність енергосистеми також дає можливість відмовитися від акумулювання енергії та резервних енергетичних джерел для автономних вітроелектростанцій.

Отже, великі вітрові електростанції ефективніші завдяки стабільнішому вітровому потенціалу на значній висоті і можливості координувати виробництво енергії зі споживанням в рамках енергосистеми.

Мінливість вітрової енергії вимагає встановлення накопичувачів енергії на вітроелектростанціях. Цю функцію зазвичай виконують батареї акумуляторів. Величина напруги батарей кратна 12 В, генератор вітротурбіни має працювати при відповідній напрузі постійного струму.

Сучасним рішенням для генераторів малих вітроелектростанцій виступає багатополюсний синхронний генератор без редуктора з постійними магнітами та вихідним випрямлячем. З метою стабілізації напруги і оптимального режиму зарядки акумуляторів передбачено регулятор напруги.

Для отримання змінного струму використовують автономний інвертор з трансформатором. Структурна схема типової вітроелектростанції для автономного живлення споживачів має вигляд приведеної на рис. 1.3.



A – вітровий двигун; B – генератор електричної енергії; C – випрямляч та зарядний пристрій;
 D – батарея електричних акумуляторів; E – автономний напівпровідниковий інвертор;
 F – споживачі електричної енергії

Рисунок 1.3 – Узагальнена структурна схема автономної вітроелектричної установки

Використання високооберткових вітротурбін дозволяє виключити з конструкції додаткові редуктори, покращивши вагово-габаритні, вартісні та експлуатаційні параметри вітроустановки.

У цілому швидкохідність вітрових турбін характеризується коефіцієнтом швидкохідності. Цей показник являється відношенням лінійної швидкості кінців лопатей ротора до швидкості вітру. Чим вище цей коефіцієнт, тим швидше обертається ротор при певній швидкості вітру. Оптимальне значення коефіцієнта швидкохідності лежить в межах 6-8. Відповідно до нього і підбирають характеристики ротора та генератора вітроелектростанції. Коефіцієнт швидкохідності визначають наступним виразом:

$$Z = \frac{\omega R_{\text{БК}}}{V},$$

де ω – кутова частота обертання колеса вітрогенератора;

$R_{\text{БК}}$ – радіус вітроколеса вітрогенератора;

V – швидкість потоку вітру.

На рис. 1.4. зображено робочі характеристики для лопатевої вітрової турбіни моментів на її валу в функції швидкості вітру і частоти обертання.

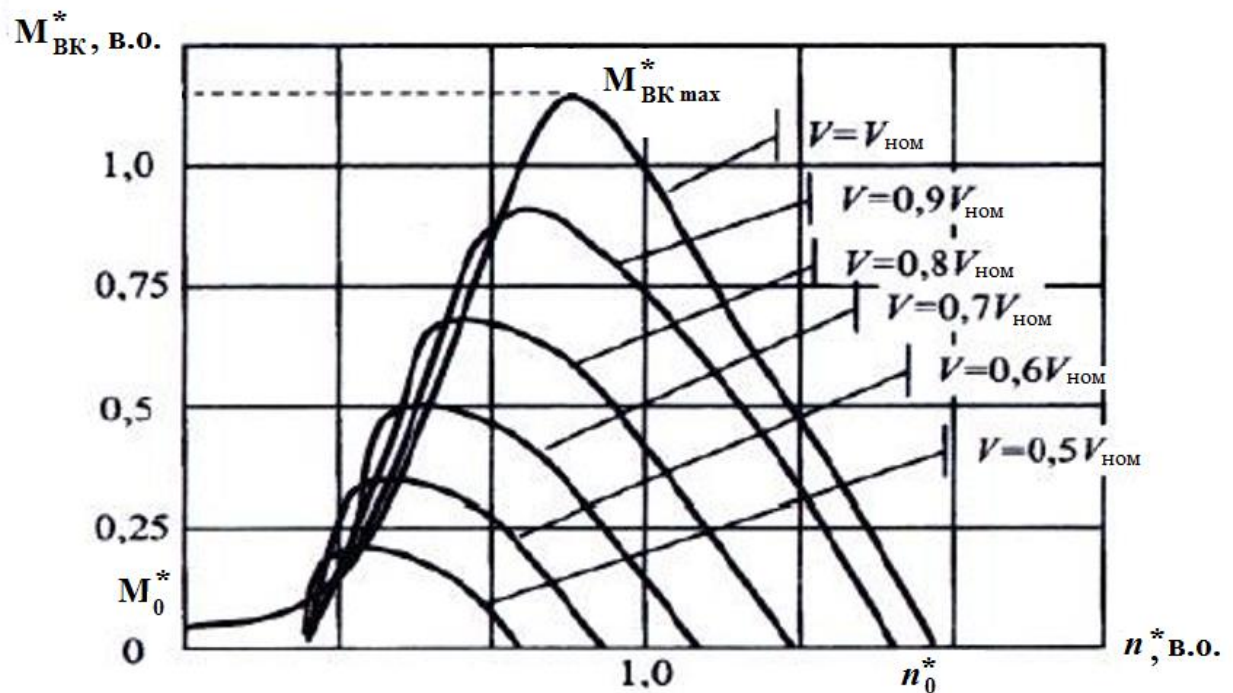


Рисунок 1.4 – Типові робочі характеристики лопатевої вітрової турбіни

Основним параметром робочої характеристики вітроелектричної установки при фіксованій швидкості вітру виступає відносне значення номінального крутного моменту на валу колеса вітрогенератора, який розвиває ротор при номінальному коефіцієнті швидкохідності $Z_{НОМ}$ і відповідній номінальній відносній частоті обертання $n^* = 1$.

$$M_{BK}^* = \frac{M_{BK}}{M_{BK\text{НОМ}}}$$

Важливими параметрами робочих характеристик також виступають:

M_0^* – відносне значення моменту вітроколеса під час старту обертального руху;

$M_{BK \max}^*$ – початковий відносний момент під час старту ротора вітроколеса;

n_0^* – максимальне відносне значення частоти обертання ротора вітроколеса і значення коефіцієнта швидкохідності Z_0 при якому вітроколесо розвиває нульовий момент на валу $M_{BK}^* = 0$;

Z_0 – значення коефіцієнта швидкохідності, за якого розвивається максимальний крутний момент $M_{BK \max}^*$.

За номінальними значеннями моменту на валу вітроколеса $M_{\text{ном}}$, частоти його обертання $n_{\text{ном}}$, номінальної швидкості вітру $V_{\text{ном}}$, номінального коефіцієнта швидкохідності $Z_{\text{ном}}$ обирається вітродвигун виходячи із тривалого режиму роботи.

Як можна побачити із характеристик на рис. 1.4 по мірі зменшення величини швидкості вітру максимальне значення відносного моменту для залежностей $M_{BK}^* = f(n^*)$ спадає і характеристики зміщуються в бік зменшення частоти.

Режим роботи вітроелектростанції під навантаженням визначається графічно-аналітичним методом шляхом накладення характеристик генератора та навантаження на характеристики вітрового агрегату.

Існують два основні режими роботи вітрової турбіни: з постійною частотою обертання; зі змінною частотою обертання.

Вітрова турбіна змінної частоти обертання більш ефективна, адже дозволяє підтримувати максимальну потужність за широкого діапазону швидкості вітру. Цей режим відповідає характеристиці генератора, що проходить через точки максимумів кривих потужності вітроагрегату $M_{BK}^* = f(n^*)$.

Режим постійних обертів не забезпечує настільки ефективну роботу вітрової електричної станції при змінній швидкості вітру. Це вимагає

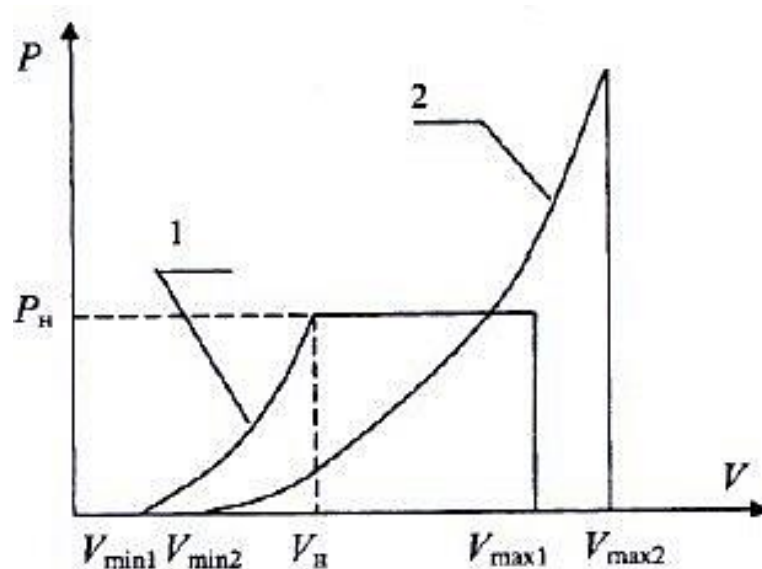
застосування інверторів в енергосистемах сучасних вітрових турбін, які переважно працюють у режимі змінної частоти обертання.

Сучасні конструкції вітрових турбін, особливо невеликої потужності, як правило, не мають систем регулювання швидкості обертання. Вони забезпечують обмеження потужності лише за умови перевищення розрахункової швидкості вітру деякого лімітованого значення.

Це положення не стосується аварійних систем виведення вітроагрегатів з експлуатації, коли швидкість обертання ротора перевищує гранично допустиме значення. Такі системи аварійного гальмування і відключення передбачено в конструкції вітрових турбін для запобігання руйнування при екстремальних швидкостях вітру.

Тому в нормальних умовах сучасні вітроустановки працюють без систем регулювання швидкості, а її обмеження необхідне лише в аварійних режимах.

Загальний вигляд характеристик потужності вітрової електростанції в функції значення швидкості вітру приведено на рис. 1.5.



1 – аеродинамічне регулювання наявне; 2 – аеродинамічне регулювання відсутнє

Рисунок 1.5 – Загальний вигляд характеристик потужності вітроелектростанції для варіантів аеродинамічного регулювання

На рис. 1.5 прийняті наступні позначення:

$V_{\min 1}$ та $V_{\min 2}$ – мінімальні значення швидкості вітру, при якій стартує обертальний рух вітроколеса;

$V_{\text{ном}}$ – номінальне значення швидкості вітру для вітроелектричної установки з аеродинамічним регулюванням;

$V_{\max 1}$ та $V_{\max 2}$ – максимальні значення швидкості вітру, після досягнення яких робота відповідної вітроустановки має бути припинена.

Контроль аеродинаміки вітрових турбін традиційно здійснюється за допомогою спеціального керуючого оперення гондоли або шляхом регулювання кута нахилу лопатей вітрового ротора. Такі методи дозволяють обмежувати генеровану потужність та підтримувати швидкість обертання турбіни в заданих межах від $V_{\min}$ до $V_{\max}$. Водночас, ефективність перетворення енергії вітру на електрику при цьому знижується.

Наразі набувають популярності вітроенергетичні установки без пневматичного регулювання, котрі максимізують використання енергії вітрового потоку в межах робочого діапазону швидкостей. У такому разі частота обертання генератора може суттєво змінюватися, що висуває підвищені вимоги до міцності та надійності всіх конструкційних елементів установки. Натомість коефіцієнт використання вітрової енергії та загальний коефіцієнт ефективності такої вітротурбіни максимізуються.

Розрахунки та реальні дані свідчать, що генерація електроенергії в режимі змінних обертів дає приріст виробітку електрики на 20-30 % порівняно з аеродинамічно стабілізованим рухом ротора вітроагрегату.

Додатково варто зазначити, що останнім часом активно розвиваються технології вітрових електростанцій з частковим використанням енергії вітру. В таких гібридних вітро-сонячних чи вітро-дизельних комплексах застосовуються вітроагрегати меншої одиничної потужності зі змінною швидкістю обертання. Це дозволяє підвищити загальну ефективність використання відновлюваних джерел енергії та знизити собівартість електроенергії таких генеруючих об'єктів.

1.4 Методи забезпечення належної якості електричної енергії вітрових електростанцій

Електрична енергія, як і будь-який інший товар, має певні якісні характеристики, котрі визначають її придатність та ефективність застосування в побуті й промисловості. Крім функціональності, електропостачання повинно відповідати низці вимог щодо надійності, безперервності, економічності та ергономічності споживання.

Зокрема, якість електричної енергії впливає на рівень втомлюваності персоналу, оскільки значно залежить від стабільності параметрів мережі освітлення. Крім того, саме електропостачання є джерелом шуму й вібрації роботи устаткування, а його параметри визначають комфортність виробничих приміщень за рахунок яскравості та кольорової гами освітлення. Нарешті, неякісна електроенергія в окремих випадках може спричинити погіршення санітарних умов і безпеки праці, а отже значно знизити продуктивність технологічних процесів.

Параметри якості електропостачання, як правило, погіршуються поза межами генеруючих підприємств – безпосередньо в мережах та у кінцевого споживача. Це пов'язано як з технічними втратами при транспортуванні електроенергії, так і з можливими недоліками в роботі електрообладнання самого споживача.

Отже, підтримка належних показників якості на всіх етапах – від виробництва до кінцевого використання електроенергії – є запорукою ефективного та безпечного функціонування як окремих технологічних процесів, так і економіки в цілому.

Формування системи величин, за допомогою яких оцінюють якість електроенергії має базуватися на таких загальних принципах:

- трифазна симетрична система напруги із синусоїдальною формою кривих та номінальними значеннями напруги і частоти є достатньою для

забезпечення необхідних енергетичних потреб (допускаються певні незначні відхилення);

- за умов несиметрії чи несинусоїдальності напруги істотні відхилення її параметрів та частоти чинять негативний вплив на споживачів, зокрема: зниження продуктивності, прискорене старіння ізоляції, ризик аварійних ситуацій в роботі комутаційних пристроїв, систем автоматики, освітлення, конденсаторних батарей та інше.

- показники якості електроенергії мають ймовірнісний характер, адже властивості мереж та навантаження споживачів змінюються за випадковими законами.

Таким чином нормування та підтримка параметрів якості електропостачання повинні базуватися на статистичному аналізі їх фактичних значень з врахуванням реальних режимів роботи системи виробництва, передачі та розподілу електроенергії. Лише за такого комплексного системного підходу можна адекватно оцінити поточний стан та прогнозувати майбутній рівень якості електропостачання.

Забезпечення належної якості електропостачання вимагає реалізації комплексу спеціальних заходів технічного та організаційного характеру, зокрема такі що описані нижче.

1. Стосовно контролю показників якості електроенергії:

- регулярна фіксація зміни рівнів напруги на затискачах вводів віддалених споживачів;

- періодичні вимірювання струмів і напруг за максимальних та мінімальних навантажень для оцінки несиметрії фаз (не рідше як двічі на рік).

2. Для запобігання відхилень напруги:

- своєчасна зміна положень відгалужень обмоток трансформаторів відповідно до сезону та навантаження;

- встановлення комплектних конденсаторних установок на шинах 0,4 кВ та вводах енергоємних об'єктів.

3. Для запобігання коливанням напруги:

- розміщення потужних електродвигунів зі змінним навантаженням поблизу трансформаторних підстанцій великої потужності або побудова для них спеціальних окремих підстанцій.

- застосування схем обмеження пускових струмів.

4. Для усунення несиметричності напруги:

- рівномірне розподілення навантаження у фазах в мережах 0,4 кВ населених пунктів;

- встановлення на трансформаторних підстанціях трансформаторів, обмотки яких сполучені по схемі «зірка-зигзаг».

5. Для запобігання пошкоджень устаткування внаслідок надмірного підвищення напруги вночі:

- використання обмежувачів напруги в системах освітлення.

Отже, лише системне впровадження таких цілеспрямованих технічних і організаційних рішень дозволяє ефективно підтримувати та підвищувати прийнятний рівень показників якості електроенергії.

1.5 Висновки до першого розділу

1. У першому розділі було розглянуто етапи становлення та розвитку вітроенергетики як одного з найбільш екологічних відновлюваних джерел енергії. Проаналізовано передумови застосування вітрогенерації, її переваги порівняно з традиційними способами виробництва електроенергії. Водночас враховується головний недолік вітроенергетики, а саме – залежність обсягів генерації від сезонних погодних чинників.

Таким чином галузь вітрової енергетики пройшла тривалий шлях розвитку – від використання сили вітру для приведення в рух вітряків до створення потужних вітрових електростанцій. Перспективи подальшого зростання частки вітроенергетики залишаються оптимістичними.

2. Було розглянуто технічні характеристики вітрових електростанцій, вплив різних факторів на режими їх роботи залежно від погодних умов.

Можна підсумувати, що існують різні типи вітрових турбін, які відрізняються за принципом створення обертового моменту, положенням осі обертання, конструкцією та іншими параметрами. Вибір конкретного типу турбіни залежить від умов експлуатації та вимог до вітроустановки.

3. Для забезпечення стабільності енергопостачання при значній частці вітрової генерації потрібні рішення щодо узгодження графіків виробництва і споживання електроенергії, накопичення енергії, регулювання попиту тощо.

4. Окрему увагу приділено впливу вітрогенерації на якість електроенергії в мережі. Розглядаються основні показники якості, методи їх контролю та підтримання згідно з вимогами до сучасного електроустаткування споживачів, як побутових, так і промислових об'єктів різного масштабу.

Комплексно аналізуються як переваги застосування вітроенергетики, так і виклики, пов'язані з її інтеграцією в енергосистему та впливом на якість електропостачання.

Дотримання належних показників якості електроенергії є важливим завданням для вітрової генерації і потребує реалізації комплексу спеціальних технічних та організаційних заходів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА РАХУНОК СХЕМНИХ РІШЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

2.1 Система генерації та накопичення енергії у вітрової електростанції

Вітроелектростанція являє собою комплекс технічних пристроїв для перетворення кінетичної енергії вітрових потоків на інші види енергії. До складу ВЕС входить безпосередньо вітроагрегат, накопичувальна або резервна система, а також автоматизований засіб керування та регулювання режимів роботи. У деяких випадках додатково застосовують резервні двигуни невітрового типу.

Вітрогенератор – це пристрій, котрий трансформує кінетичну енергію вітрового потоку в механічну енергію обертання ротора. За типом робочого органу та його розташуванням щодо напрямку вітру, розрізняють барабанні та лопатеві поворотні вітродвигуни.

Для накопичення енергії часто застосовують ємності з водою або електрохімічні акумулятори. Інерційні накопичувачі використовують для короткочасного балансування споживання за незначних змін швидкості вітру. В періоди безвітря чи за недостатньої потужності вітрогенераторів підключають резервні двигуни внутрішнього згоряння.

Отже, вітроелектростанція являє собою комплекс взаємопов'язаних систем, що забезпечують безперервне перетворення енергії вітру на електричну чи інші види енергії за будь-яких погодних умов. Ефективна робота ВЕС вимагає оптимального поєднання характеристик вітроагрегатів, накопичувальних систем та автоматизованих алгоритмів керування режимами роботи.

Ефективне функціонування вітроелектростанції забезпечується системами автоматичного керування та регулювання режимів роботи. Зокрема, вони контролюють увімкнення/вимкнення вітроагрегатів залежно від швидкості вітру, рівня навантаження, стану накопичувачів енергії тощо. Також виконують координацію спільної чи паралельної роботи вітродвигунів та резервних установок за різних режимів.

За функціональним призначенням розрізняють вітрові турбіни спеціалізовані та комплексного застосування. Спеціалізовані вітрові турбіни використовуються для перекачування води, підйому вантажів, зарядки акумуляторів, опріснення води тощо. Комплексні вітрові турбіни поєднують власне вітрогенерацію з іншими потребами в механічній чи електричній енергії.

За типом робочих механізмів та характеристик вітродвигунів вітрових турбіни поділяють на тихохідні, середньошвидкісні та високошвидкісні. Потужність вітроагрегату значною мірою визначається діаметром ротора та показниками швидкості вітру.

Оптимальне поєднання автоматизованих систем керування, ефективних вітродвигунів та відповідних робочих механізмів є запорукою надійної та продуктивної роботи вітроенергетичної установки.

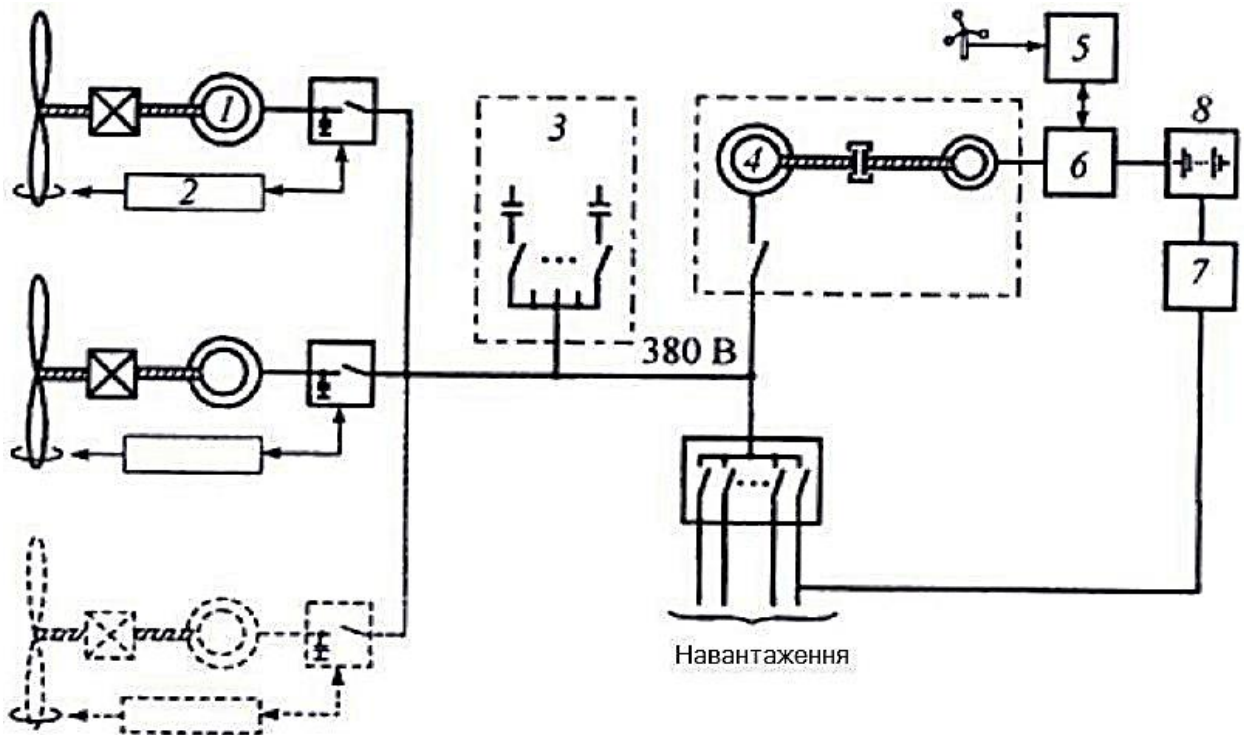
На рис. 2.1 в якості прикладу показаний загальний вигляд схеми автономної вітроенергетичної системи.

Від коректного підбору системи керування вітрогенератором значною мірою залежать його ефективність та вартість. За відсутності належного регулювання генератора його вихідна напруга та частота будуть нестабільними.

За напрямками використання вітроелектроустановки умовно класифікують так:

- мережеві, що працюють в енергосистемі загального користування;
- вітроагрегати в локальних (автономних) системах паралельно з іншими джерелами енергії;

- установки індивідуального чи сумісного електропостачання;
- вітроустановки для вироблення теплової енергії;
- вітроагрегати, що виробляють механічну енергію.



- 1 – асинхронний генератор; 2 – система контролю швидкісних та енергетичних параметрів вітроустановки;
 3 – батарея конденсаторів; 4 – синхронний генератор; 5 – автоматична система моніторингу вітрових умов;
 6 – пристрій моніторингу частоти; 7 – пристрій для заряджання; 8 – енергетичний накопичувач

Рисунок. 2.1 – Загальна схема вітроенергетичної системи
 для автономного застосування

Отже, вітрогенератори та вітроелектростанції можуть ефективно застосовуватися для живлення як великих енергосистем, так і автономних споживачів, а також для виробництва теплової чи механічної енергії. Проте в будь-якому випадку оптимальний підбір системи керування є важливою умовою продуктивної та надійної роботи вітроенергетичного обладнання.

При виборі схем перетворення енергії вітру на електричну необхідно враховувати такі основні фактори:

- тип генерованої електроенергії (змінного струму зі змінною чи постійною частотою або постійного струму);
- частота обертання вітроагрегата (постійна, майже постійна чи змінна);
- характер використання електроенергії (із застосуванням акумуляторів чи інших накопичувачів або для подачі в мережу змінного струму).

Пряма генерація постійного струму на вітроелектростанціях в даний час використовується переважно у невеликих установках (до 10-20 кВт). При цьому заходи з стабілізації частоти обертання ротора, як правило, не потрібні і застосовуються акумулятори.

Також енергію вітру можливо накопичувати у вигляді тепла з метою наступного локального застосування. Це досягається використанням вітрогенераторів змінного струму чи постійної напруги в комплексі з електроакумуляуючими системами.

У зв'язку зі значним зростанням потужностей вітроенергетики, актуальним завданням є адаптація роботи вітроелектростанцій до умов функціонування існуючих енергосистем. Зокрема, вітроагрегати мають формувати на виході електроенергію у вигляді змінної напруги заданої фіксованої частоти, що узгоджуються з характеристиками наявних мереж.

Перспективним напрямком вбачається концепція вітрових турбін зі змінною оптимальною швидкістю обертання ротора, що адаптується до поточних характеристик вітрового потоку. При цьому система генерування електроенергії має забезпечувати на виході сталість основних параметрів напруги для можливості інтеграції до наявних мереж.

Методи формування напруги змінної форми та постійної частоти за коливальності частоти обертання вітротурбіни умовно класифікують на:

- диференційні, що реалізуються в схемах із синхронними генераторами за допомогою спеціальних механічних чи електричних пристроїв стабілізації;
- недиференційні, які базуються на різних схемах електронних перетворювачів частоти.

Крім зазначених технічних рішень, актуальним напрямком є розвиток інтелектуальних мереж Smart Grid з двосторонніми потоками енергії. Це дозволить підвищити адаптивність і керованість процесів інтеграції потужностей відновлюваних джерел енергії, зокрема вітроелектростанцій.

Тож розв'язання проблем ефективного зв'язку вітрогенераторів з енергосистемою вимагає комплексу взаємопов'язаних технічних та інфраструктурних рішень.

2.2 Машино-вентильні каскади на основі асинхронних двигунів

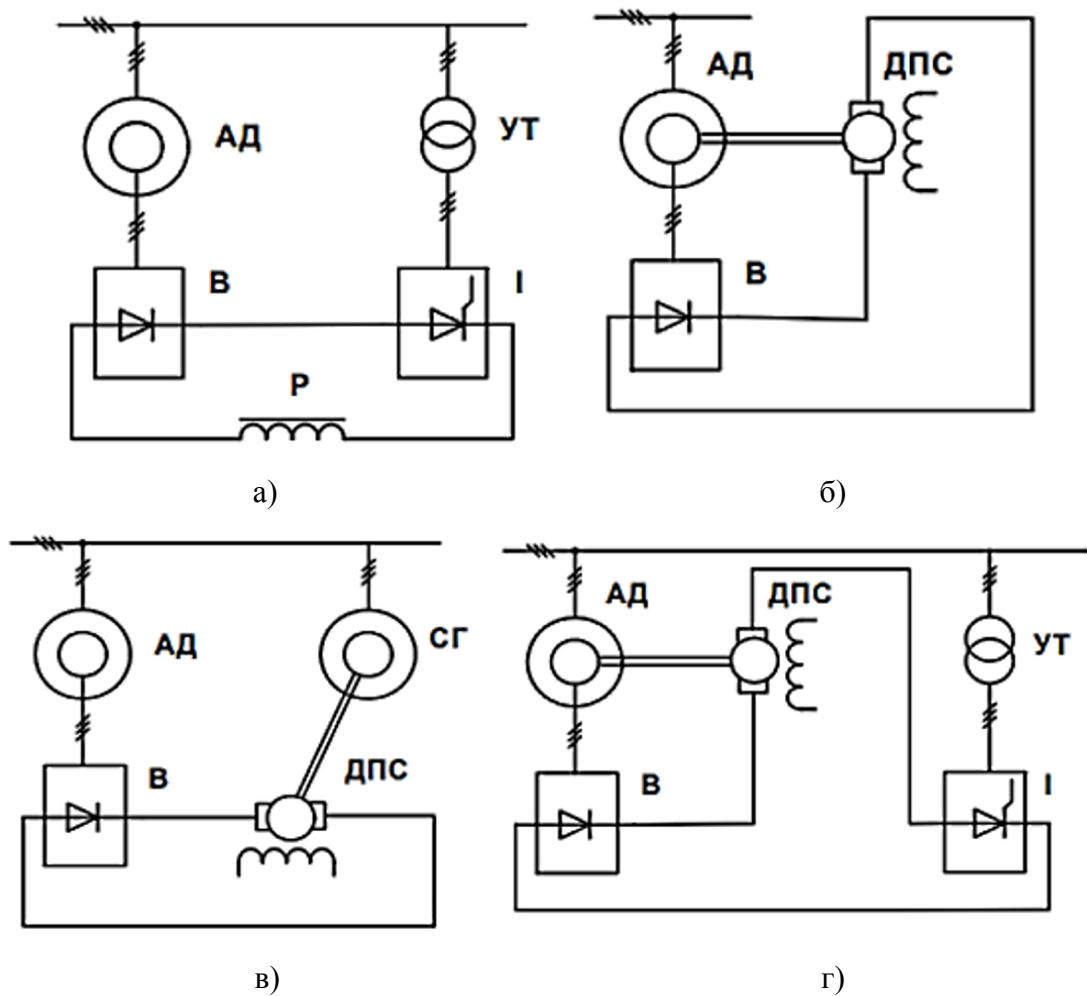
Зазвичай машини подвійного живлення в літературних джерелах позначаються різними термінами: асинхронізовані синхронні машини, асинхронізовані машини (АСМ) тощо. Ця назва безпосередньо пов'язана з удосконаленням каскадних схем на основі двигунів та перетворювачів.

Приклади машино-вентильних каскадів приведені на рис. 2.2. Обмотка ротора асинхронного двигуна АД під'єднана на вхід трифазного діодного випрямного моста В. Випрямлена напруга подається на інвертор І та реактор Р, або ж на якір двигуна постійного струму ДПС, який в свою чергу може бути розташований на одному валу з двигуном АД чи окремо.

Машини подвійного живлення являють собою різновид асинхронізованих електричних машин, що застосовуються в складі електромеханічних каскадів енергоперетворення. Їх особливістю є комбіноване живлення як від мережі змінного струму, так і від автономних джерел постійного струму.

Каскади Шербіуса та Кремера набули найбільшого поширення серед машино-вентильних схем.

У випадку каскада Шербіуса потужність постійного струму через посередництво інвертора подається у мережу змінного струму через узгоджувальний трансформатор (рис. 2.2, а).



Шербіуса (а), Кремера (б), з синхронним генератором та
двигуном постійного струму (в), гібридний (г)

Рисунок 2.2 – Приклади машино-вентильних каскадів

У каскаді Кремера електроенергія постійного струму спочатку перетворюється на механічну енергію обертання двигуна постійного струму (рис. 2.2, б). Недоліком цього варіанту є наявність додаткового двигуна з колекторним вузлом та обертовими масами. Тому частіше надають перевагу каскаду Шербіуса.

В схемі з синхронним генератором та двигуном постійного струму відповідно до рис. 2.2, в енергія з ротора асинхронного двигуна через випрямляч подається на обмотку збудження двигуна постійного струму, який

обертає синхронний генератор. Перевагою такої схеми є висока якість вихідної напруги, а недоліком – низька енергоефективність схеми.

У гібридному каскаді енергія ротора асинхронного двигуна частково перетворюється на механічну потужність за допомогою двигуна постійного струму, що підключений через випрямляч. Інша частина енергії ротора повертається в мережу змінного струму через керований інвертор. Регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна відбувається за рахунок зміни проти-ЕРС ланки постійного струму. Показники такого електропривода аналогічні характеристикам асинхронного двигуна з фазним ротором, в ланцюзі якого додатково увімкнено опір.

Тож гібридний каскад поєднує в собі можливості генерування як механічної, так і електричної потужності з використанням енергії ротора асинхронного двигуна. Керування швидкістю здійснюється регулюванням параметрів ланки постійного струму в силовому контурі схеми.

Підсумовуючи можна сказати, що каскад Шербіуса з інвертором є найбільш ефективним рішенням для передачі енергії від джерел постійного струму в мережу змінного. Інші схеми мають певні технічні обмеження.

Загальним недоліком машино-вентильних каскадів є несинусоїдальність струмів як в статорі, так і роторі асинхронного двигуна. Величина вищих складових гармонік у струмі статора може сягати 30 %. Спотворення форми струмів призводить до значних пульсацій електромагнітного моменту, що обмежує застосування мотор-клапанних схем.

Якщо в гібридному каскаді можливо змінювати напрямок передачі потужності з ротора до мережі або навпаки, то таку схему називають машиною подвійного живлення. Перевагою такого підходу є вища якість струмів статора і ротора, а відповідно цьому – менші пульсації моменту.

Найбільш поширеним прикладом є асинхронна машина подвійного живлення. В ній статор під'єднано до мережі змінного струму, а ротор – до регульованого автономного джерела з можливістю зміни амплітуди і частоти напруги.

Таким чином завдяки гнучкій топології двосторонніх енергетичних потоків двигун подвійного живлення дозволяє покращити якість струмів і зменшити пульсації моменту в порівнянні з традиційними каскадними схемами з вентильними перетворювачами.

Відповідно до одного з визначень повністю керованими асинхронними двигунами називають електромеханічні системи, в яких напруга живлення може змінюватися за амплітудою та частотою в технічно обґрунтованих межах. Для двигунів подвійного живлення під повним контролем мається на увазі можливість незалежного регулювання як активної, так і реактивної потужності.

Оскільки машина подвійного живлення поєднує властивості як синхронного, так і асинхронного двигунів, в літературі її також називають асинхронізованою синхронною машиною. При цьому термін «асинхронізована синхронна машина» поєднує в собі поняття «машини подвійного живлення», яке, в свою чергу, містить «асинхронний клапанний каскад». Зараз в літературі все частіше замість терміну «асинхронізована синхронна машина» використовується термін «асинхронна машина». Саме це позначення надалі використовуватиметься в даній роботі.

2.3 Схеми перетворювачів частоти та їх системи керування

Перетворювач частоти ПЧ в електроприводі являє собою силовий перетворювач, що здійснює трансформацію параметрів електричної енергії. На вхід перетворювача подається живлення від мережі з певними значеннями напруги U_1 та частоти f_1 . На виході перетворювача формуються регульовані значення напруги U_2 (або струму I_2) та їх частоти f_2 відповідно до заданих сигналів керування U_k . Загальна схема такого перетворювача частоти приведена на рис. 2.3.

Перетворювач частоти дозволяє трансформувати фіксовані параметри мережі живлення у регульовані параметри вихідної напруги згідно із заданим

алгоритмом керування електроприводом. За рахунок цього досягається можливість гнучкого регулювання швидкості обертання та обертового моменту двигуна в широких межах.

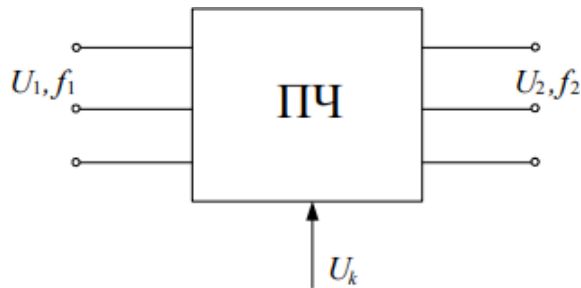


Рисунок 2.3 – Структурна схема перетворювача частоти електропривода

Будь-який перетворювач частоти складається з силової та керуючої частин. В якості ключових (комутаційних) елементів силової частини використовуються тиристори або транзистори, що працюють в режимі електронних ключів. В керуючій частині застосовується мікропроцесор, який забезпечує управління силовими ключами і вирішення додаткових задач, таких як контроль параметрів, діагностика, захист тощо.

Інвертори, що містяться в перетворювачах частоти, класифікують так:

- напівпровідникові (тиристорні і транзисторні);
- реверсивні та неревверсивні;
- автономні та системи інвертор-мережа.

Поєднання силового інвертора з системою цифрового керування дозволяє реалізувати різноманітні алгоритми контролю й регулювання параметрів живлення електроприводу відповідно до поставленої задачі.

Загальна класифікація перетворювачів частоти приведена на рис. 2.4.

За номінальною напругою перетворювачі частоти поділяють на пристрої низької напруги (до 1 кВ) та високої напруги (понад 1 кВ).

Існують два провідні принципи керування перетворювачами частоти: скалярне керування та векторне керування.



Рисунок 2.4 Класифікація пристроїв для перетворювання частоти

Скалярне керування ґрунтується на формуванні фазних напруг на підставі заданих параметрів амплітуди й частоти, які генеруються за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Цей підхід забезпечує постійну перевантажувальну здатність електропривода незалежно від частоти, проте двигун виробляє знижений обертовий момент на низьких робочих частотах ($n_f < 0,1f$). Електропривід при скалярному типі керуванням має максимальний регульований діапазон швидкості ротора в діапазоні відносних значень 1-10 за постійного моменту навантаження. Цей діапазон можна розширити за допомогою IR- або IZ-компенсації.

Цей принцип є найбільш простим способом здійснити регулювання швидкості перетворення частоти та застосовується в приводах механізмів, котрі не потребують високоякісного контролю обертів. Насамперед, це стосується електроприводів насосного, вентиляторного та компресорного устаткування. Такі механізми мають значний потенціал енергозбереження та ресурсозбереження, який успішно реалізується при використанні зазначеного типу перетворювача.

Проте скалярне керування без зворотного зв'язку (за законом $U/f = \text{const}$) має певні недоліки, як то низьку якість регулювання швидкості за наявності збурюючих дій, відсутність режиму плавної зупинки (тобто за

надмірного навантаження привід вимикається струмовим захистом) складно реалізувати контроль магнітного потоку зв'язку як функції крутного моменту двигуна.

Для реалізації складніших алгоритмів керування застосовують замкнені системи з різними типами зворотного зв'язку. Скалярне керування спрощується, якщо виконувати регулювання струму статора замість напруги. У порівнянні із частотним скалярним регулюванням напруги статора, така система електропривода має кращі динамічні та статичні характеристики, а також дозволяє обмежувати крутний момент двигуна заданим значенням незалежно від швидкості.

Водночас, скалярне частотно-струмове керування має певні недоліки:

- втрата контролю моменту двигуна в перехідних режимах через інерційність контуру регулювання;
- забезпечення сталості магнітного потоку лише в статичних режимах, оскільки струм статора формується як функція ковзання;
- усереднене відображення системи трифазних струмів внаслідок контролю струму статора випрямленим струмом.

Другим принципом систем керування є векторне керування, котре забезпечує характеристики електроприводу з використанням асинхронного двигуна такими, що наближаються до регульованого електроприводу з двигуном постійного струму. Такі властивості досягаються завдяки розділенню каналів регулювання магнітного потоку та частоти обертання, що неможливо реалізувати при скалярному підході.

Використання векторного керування має такі переваги:

- висока точність контролю швидкості;
- плавне обертання двигуна на низьких частотах;
- здатність забезпечити номінальний момент при нульовій швидкості за наявності відповідного датчика;
- швидка реакція на зміну навантаження без стрибків швидкості;

- зниження втрат та підвищення коефіцієнта корисної дії завдяки оптимізації режимів.

Отже, векторне керування значно розширює функціональні можливості та покращує характеристики асинхронного електроприводу.

Крім скалярного і векторного режимів, деякі перетворювачі підтримують змішане або каскадне керування. Такий гібридний підхід об'єднує переваги обох методів для оптимального керування двигуном.

Існують два основні типи перетворювачів частоти за структурою та принципом роботи силової частини:

- з явно вираженою ланкою на постійному струмові;
- з безпосереднім зв'язком.

Обидва типи мають свої переваги та недоліки, що визначають відповідну сферу їх застосування.

Перетворювач з прямим зв'язком представляє собою керований випрямляч на базі тиристорів. Система керування по черзі вмикає групи тиристорів і під'єднує статорні обмотки двигуна до джерела живлення.

Перетворювачі з проміжною ланкою сталого струму поділяються на автономні інвертори напруги та автономні інвертори струму. Перші формують на виході змінну напругу заданої форми, а другі – змінний струм заданої форми.

Такі перетворювачі можуть бути побудовані на тиристорах, IGBT-транзисторах та інших напівпровідникових елементах. Їх вибір впливає на характеристики та можливості пристрою.

Існують два види перетворювачів частоти з проміжною ланкою на постійному струмі: частотні перетворювачі з незалежними інверторами напруги та автономними інверторами струму. Перший різновид пристрою має властивості джерела напруги, створюючи на виході періодичну криву напруги заданої форми. При цьому форма вихідного струму залежить від параметрів підключеного навантаження. Інвертори другого типу забезпечують підтримку

певної форми струму на виході незалежно від навантаження, а напруга на виході визначається опором навантаження.

Інвертори напруги часто застосовують у системах з навантаженням, що має активний характер, наприклад двигуни. В той час як інвертори струму краще підходять для живлення пристроїв зі сталим опором, таких як лампи розжарювання.

Обидва типи інверторів можуть працювати як в автономному режимі, так і під керуванням зовнішніх сигналів управління. Сучасні мікропроцесорні системи дозволяють реалізувати складні алгоритми модуляції вихідних параметрів. Це дає змогу підвищити ефективність роботи перетворювачів та оптимізувати їх для конкретних задач.

Існуючі частотні перетворювачі з вбудованими автономними інверторами містять три основні ланки: вхідний випрямляч UZ1, який може бути як керованим, так і некерованим, фільтр згладжування Φ у ланці постійного струму на основі конденсаторів С або індуктивно-ємнісної LC-ланки та власне автономний інвертор напруги чи струму UZ2. Інвертори можуть реалізовуватися на базі одноопераційних тиристорів із ручною комутацією, GTO-тиристорах чи керованих силових транзисторах, найчастіше IGBT-модулях, що містять ізольований затвором транзистор та паралельно ввімкнений швидкодіючий діод.

Схема автономного інвертора напруги приведена на рис. 2.5 виступає джерелом напруги. За рахунок ємнісного елемента С в складі фільтра Φ а також зворотних діодів VD1-VD6, які під'єднані паралельно до силових ключів VT1-VT6, під час роботи автономного інвертора напруги на навантаженнях активно-індуктивного характеру (якими також являються асинхронні двигуни) комутація елементів забезпечує електричний зв'язок між двигуном та ланкою постійного струму. Вони забезпечують створення безперервного контуру для струму в обмотці двигуна М на проміжок часу відключення від джерела живлення в процесі комутації та пізніше віддають накопичену енергію конденсатору С фільтра Φ .

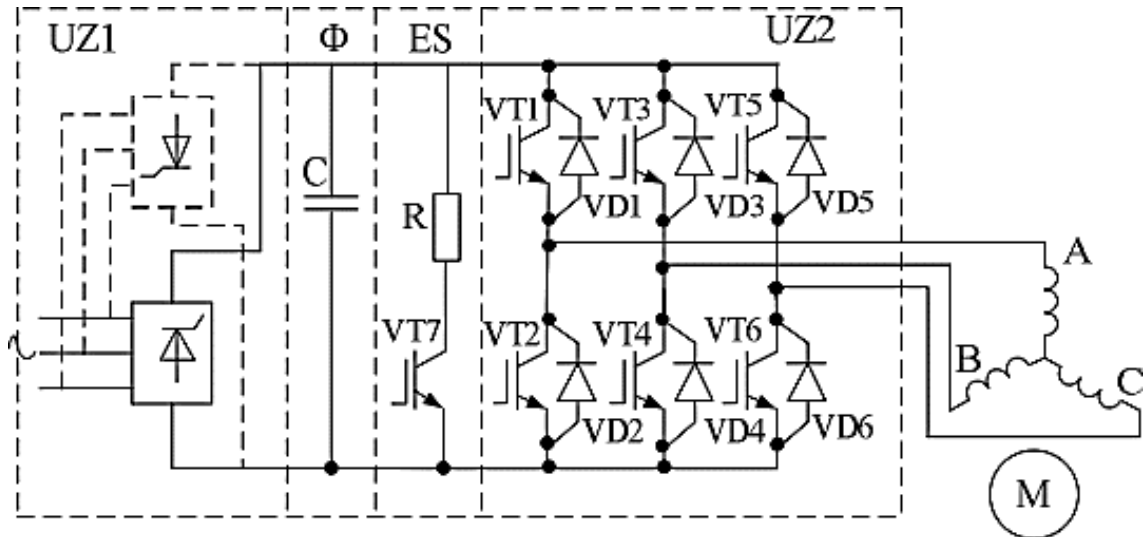
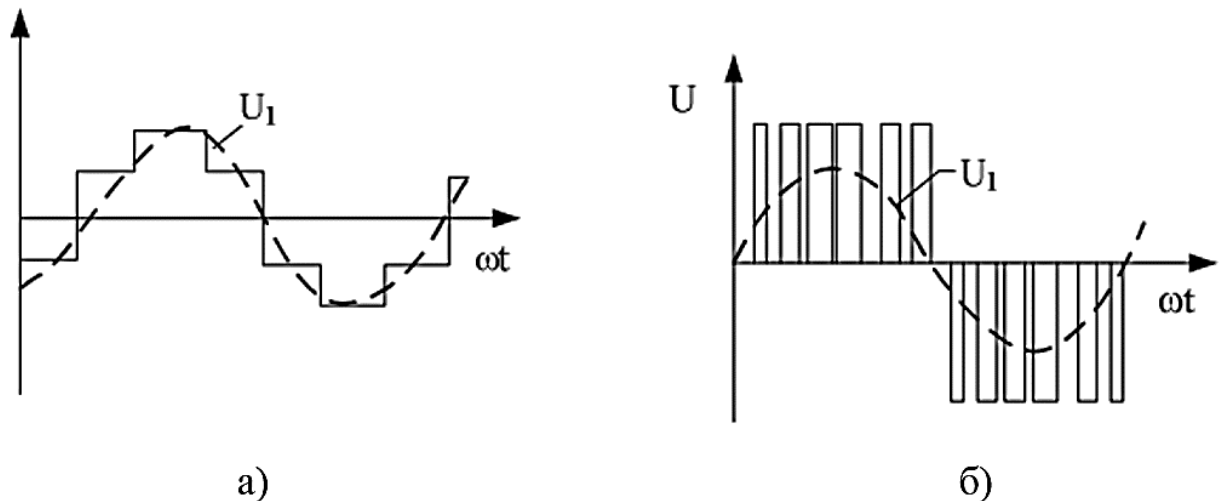


Рисунок. 2.5 – Принципова електрична схема силової частини автономного інвертора напруги

Існують два способи регулювання вихідної напруги автономного інвертора напруги.

За першого способу регулювання вихідної напруги відбувається за допомогою керованого входного випрямляча UZ1, змінюючи середнє значення випрямленої напруги в ділянці постійного струму. За цих умов інвертор виконує функції комутатора фаз, формуючи необхідну частоту вихідної напруги. Таким чином відбувається амплітдно-імпульсна модуляція, а відповідні часові діаграми приведені на рис. 2.6, а.

За другого способу, у разі якщо входний випрямляч не є керованим, то регулювання напруги виходу реалізується шляхом широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги інвертора. Відбувається це за рахунок зміни коефіцієнта заповнення імпульсів основної частоти, з якою відбувається комутація силових ключів за сигналом потрібної частоти регулюється діюче значення вихідної напруги. Цей метод є найбільш поширеним у сучасних перетворювачах частоти. Відповідні часові діаграми при широтно-імпульсній модуляції зображені на рис. 2.6, б.



а – модуляція амплітудно-імпульсна, б – модуляція широтно-імпульсна

Рисунок. 2.6 – Часові діаграми для пояснення принципу регулювання напруги на виході автономного інвертора напруги

Силова частина автономного інвертора струму складається з трьох гілок, кожна з яких містить транзисторний ключ (або тиристор) та шунтувальний резистор (рис. 2.7.).

Транзисторні ключі комутуються сигналами управління таким чином, щоб формувати на виході інвертора трирівневий струм заданої амплітуди та частоти. При цьому шунтувальні резистори слугують датчиками струму для системи керування.

На виході інвертора струму формується періодична крива вихідного струму змінної амплітуди. Регулюючи час увімкнення транзисторів можна змінювати амплітуду струму, а отже і діюче значення вихідного струму. Таким чином забезпечується стабілізація вихідних параметрів незалежно від навантаження. Часові діаграми струму на виході автономного інвертора струму приведені на рис. 2.8.

Окрім транзисторних ключів та шунтуючих резисторів, силова схема інвертора струму може включати фільтрувальні конденсатори на вході та виході для згладжування пульсацій.

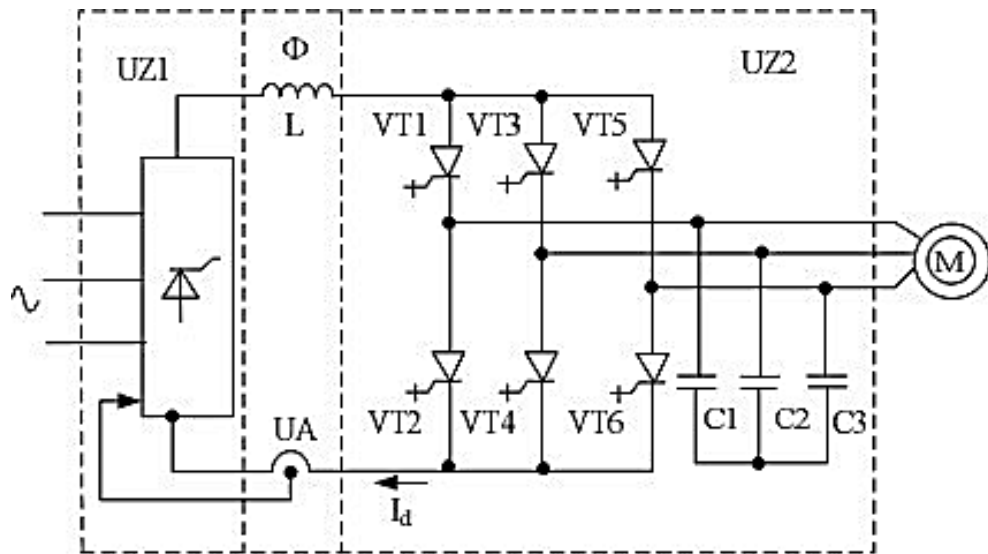


Рисунок 2.7 – Принципова електрична схема силової частини автономного інвертора струму

Система керування на основі мікроконтролера або спеціалізованої мікросхеми формує сигнали для відкриття / закриття транзисторних ключів з урахуванням зворотного зв'язку за струмом, що був виміряний за допомогою шунтуючих резисторів.

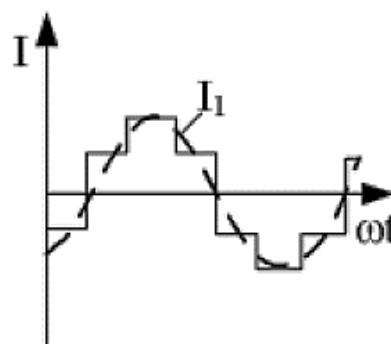


Рисунок 2.8 – Часова діаграма для пояснення принципу формування кривої струму на виході автономного інвертора струму

Також можлива реалізація різних алгоритмів широтно-імпульсної модуляції, що дозволяє регулювати параметри вихідного струму з високою точністю та ефективністю.

Загалом, інвертори струму забезпечують гнучке та надійне керування вихідним струмом незалежно від навантаження.

2.4 Шляхи підвищення ефективності та надійності вітроенергетичних установок і поліпшення якості виробленої електроенергії

Головними проблемними питаннями, з якими стикається сучасна вітроенергетика, є наступні:

- забезпечення тривалої, на протязі 20-25 років, безперебійної роботи вітроелектричних установок;
- ефективне використання енергії вітрового потоку;
- підвищення якості електричного струму, що виробляється вітроелектростанціями, зокрема стабілізація частоти.

Розв'язання даних питань неможливе без вивчення впливу турбулентності повітряних потоків вздовж площини обертання вітрового ротора на функціонування вітроелектрогенераторів. Водночас, для автономних вітроелектростанцій, що живлять ізольовані локальні електромережі, найгострішим є питання стабілізації частоти обертання вітрових роторів та результуючої частоти вихідного струму.

Аналіз систем керування кутом нахилу лопатей більшості турбін свідчить, що вони побудовані за принципом порівняння поточної частоти обертання ротора з еталонною частотою кварцового генератора контролера, який потім подає команду на зміну кута атаки лопаті пропорційно виміряній різниці частот. За такої схеми вимірювальним органом для визначення швидкості вітру виступає ротор вітроустановки.

Однак значні розміри і маса лопатей вітрових турбін великої потужності робить вимір частоти обертання ротора досить інертним. Проте можливим є забезпечити більш точне регулювання кута нахилу лопатей під будь-які зміни швидкості вітру. Тому схема з окремим пристроєм для вимірювання швидкості повітря (анемометром) є кращою і точнішою, ніж описана вище.

Водночас дослідження показують, що розташування анемометра якнайближче до осі обертання ротора дозволяє отримати найточніші виміри швидкості потоку вітру. Зазвичай анемометр встановлюється на верхній точці гондоли з горизонтальною віссю. Але в такому разі, коли вітряк розташований з навітряного боку, анемометр розміщений дещо далі від площини обертання лопатей, що створює додаткову турбулентність і викривлення даних.

Отже, оптимальне розміщення анемометра та підвищення точності вимірювання швидкості вітру є важливими факторами для поліпшення ефективності систем керування вітроенергетичними установками. Подальші дослідження у цьому напрямку дозволять підвищити загальну надійність та продуктивність роботи вітрогенераторів.

Крім оптимізації розташування анемометра, існують й інші шляхи підвищення ефективності вітроенергетичних установок. Зокрема актуальним є питання підвищення міцності та довговічності матеріалів, з яких виготовляються лопаті роторів. Адже саме матеріал лопатей зазнає найбільших навантажень та деформацій під час тривалої експлуатації.

Перспективним напрямком є застосування композитних матеріалів на основі вуглецевого волокна замість традиційного склопластику. Такі матеріали характеризуються підвищеною міцністю при значно меншій вазі. Це дозволяє будувати більш довгі та ефективні лопаті.

Ще однією актуальною задачею є розробка систем акумулювання та збереження енергії для вітроелектростанцій. Адже генерація електроенергії вітрогенераторами сильно залежить від погодних умов і швидкості вітру, які можуть різко змінюватися. Тому створення потужних систем акумулювання дозволить накопичувати енергію під час сприятливих умов та віддавати її в

мережу при нестачі генерації, значно підвищуючи ефективність вітрових електростанцій.

Основними характеристиками конструкції вітрогенераторів є наявність багатоступінчастої трансмісії, що регулює кут нахилу лопатей ротора (система змінного кроку), а також змінює швидкість обертання вітрової турбіни. Зазвичай використовується асинхронний генератор з двома синхронними швидкостями.

Останнім часом з'явилися моделі з генераторами змінної частоти обертання ротора на основі інверторно-сумісних постійних магнітів.

Відмінною рисою сучасних вітроагрегатів є низька швидкість обертання вітрової турбіни – 10-20 об/хв. Завдяки вдосконаленню силової трансмісії вдалося значно зменшити шумність роботи та ризик зіткнення птахів з лопатями.

Спостерігається тенденція до збільшення діаметра ротора вітроустановок, що дозволяє підвищити еквівалент потужності генератора та ефективність роботи при низьких швидкостях вітру.

Ще одним перспективним рішенням є підвищення висоти щогли вітрогенератора до показника 0,1-0,12 км, яке також може сприяти поліпшенню продуктивності.

Ефективність різних моделей вітрогенераторів зазвичай порівнюється за допомогою узагальненого показника – коефіцієнта використання встановленої потужності. На його величину впливає наявний вітровий потенціал, технічний стан обладнання, якість обслуговування, особливості рельєфу місцевості, взаємного вітрового затінення окремих вітроагрегатів тощо.

Отже, подальше вдосконалення конструкцій вітрогенераторів, підвищення їх надійності та оптимізація умов експлуатації є запорукою зростання ефективності вітроенергетики.

Стосовно покращення електричних показників якості електричної енергії, що виробляється вітроелектричними установками, то зважаючи на сучасний стан розвитку технологій напівпровідникових елементів це окрім

конструктивного вдосконалення елементів вітроустановок найзручніше зробити за допомогою використання напівпровідникових перетворювачів. Цьому питанню приділено увагу у подальших дослідженнях.

2.5. Застосування активних фільтрів для покращення показників якості електричної енергії виробленої вітроелектричними установками

Найбільш перспективним технічним засобом для зменшення вмісту вищих гармонік та підвищення якості електроенергії слугує активний фільтр гармонійних складових. Основними складовими активних фільтрів є: автономний інвертор (або струму або напруги), миттєвий накопичувач електричної енергії (ємність або індуктивність) та система керування.

Активні фільтри мають такі головні переваги:

- ефективна робота в режимі реального часу з адаптацією до змін в електричній мережі;
- можливість сумісної компенсації кількох вищих гармонік, що дає можливість оптимізувати масо-габаритні показники;
- повна компенсація гармонік напруги чи струму в широкому діапазоні початкових фаз та амплітуд;
- можливість масштабування потужності компенсації до необхідного рівня шляхом паралельного підключення фільтрів;
- відсутність резонансу на гармонійних частотах;
- відсутність потреби в підстроюванні параметрів фільтра.

Крім того, сучасні активні фільтри можуть поєднуватися з пасивними для підвищення надійності та ефективності фільтрації. А разом з системами накопичення енергії вони здатні вирішувати комплексні задачі якісного електропостачання об'єктів.

Отже, активні фільтри гармонік є найперспективнішим напрямком удосконалення сучасних енергосистем для підвищення якості електропостачання.

Активні фільтри здатні компенсувати практично весь спектр гармонійних складових та реактивну потужність, яка споживається з мережі електропостачання. Вони повертають цю потужність назад в мережу лише при необхідності, запобігаючи резонансним явищам та дисбалансам навантаження, а також зменшуючи флікер-ефект.

Активні фільтри мають значний потенціал для усунення недоліків пасивних фільтрів, тому вони є найперспективнішими та ефективними пристроями комплексної фільтрації і компенсації.

За схемою включення в електричну мережу активні фільтри класифікують на:

- послідовні;
- паралельні;
- послідовно-паралельні;
- гібридні з використанням пасивних елементів.

Конструктивно активні фільтри складаються з силових напівпровідникових транзисторів, що дозволяє їм компенсувати гармонійні складові споживаного струму, в тому числі зворотну послідовність.

За структурою активний фільтр має систему керування та силову частину. Система керування містить контролер, котрий виокремлює гармонійні струми та визначає необхідну реакцію на миттєві значення струму навантаження, формуючи сигнал для силової частини.

Таким чином, активні фільтри є ефективним технічним рішенням для поліпшення якості електропостачання та компенсації перешкод, створюваних нелінійними споживачами.

Силова частина активного фільтра за допомогою трансформатора зв'язку подає компенсуючий струм у протифазі зі складовими гармонійних струмів. В результаті рівень гармонік зменшується пропорційно до коефіцієнта підсилення системи керування.

Наступним елементом силової частини є перетворювач на основі потужної силової електроніки з широтно-імпульсною модуляцією. Він може

працювати як в режимі джерела струму, так і в режимі джерела напруги. Більш часто в активних фільтрах використовують схему джерела напруги з широтно-імпульсною модуляцією та конденсатором для накопичення електричної енергії як ланкою постійного струму. Така схема має переваги за габаритами, вартістю та коефіцієнтом корисної дії порівняно зі схемою джерела струму.

Активний фільтр при паралельному з'єднанні з навантаженням, що продукує гармоніки, є регульованим джерелом струму і застосовується з метою компенсації складових гармонік струму навантаження. Він формує на виході інвертора компенсуючий струм, який дорівнює за амплітудою та фазою гармонійним складовим струму нелінійного навантаження, але має протилежну фазу.

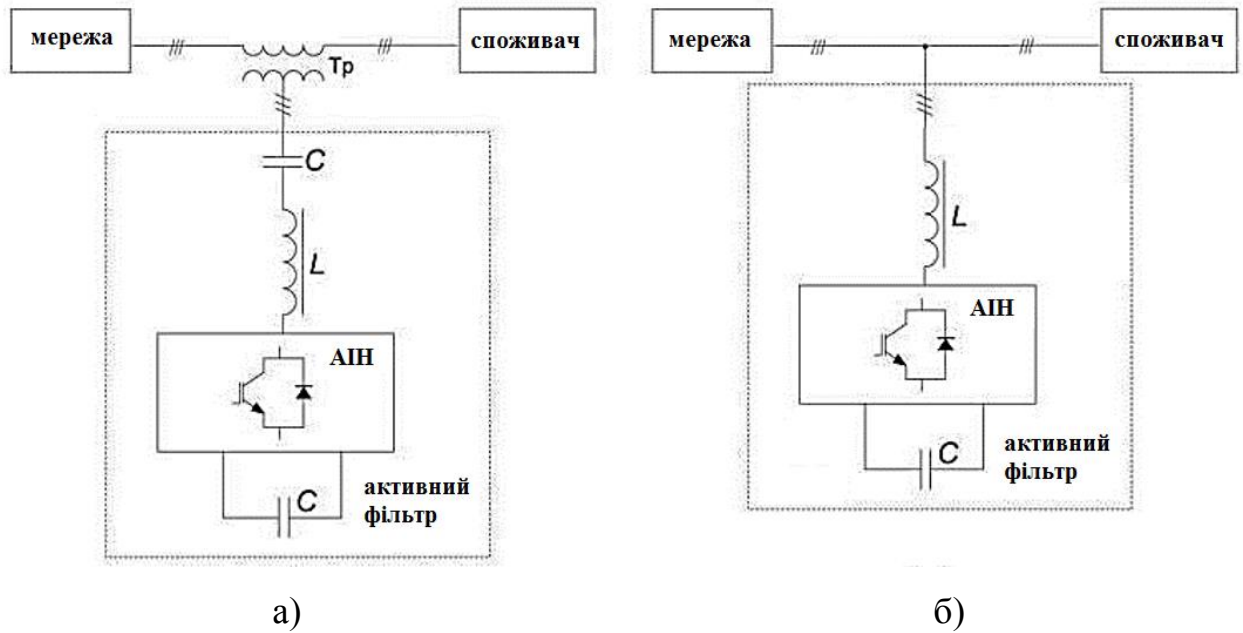
Активний фільтр при паралельному підключенні в процесі роботи практично повністю поглинає гармонійні складові струму споживаного з мережі електропостачання по всьому спектру. В результаті загальний струм, що споживається блоком «паралельний активний фільтр – нелінійне навантаження», наближається за формою до косинусоїди.

Паралельний активний фільтр не лише компенсує струмові гармоніки, але також здійснює компенсацію реактивної потужності нелінійного навантаження. Таким чином він істотно покращує показники якості електроенергії в точці підключення.

До того ж, на відміну від пасивних фільтрів, активний фільтр з паралельним включенням може адаптуватись до змін параметрів навантаження, підтримуючи необхідний рівень компенсації в широкому діапазоні режимів роботи системи. Це робить його гнучким та ефективним технічним рішенням.

Схема підключення активного фільтра в мережу навантаження у випадку послідовного та паралельного з'єднання приведена на рис. 2.9.

Таким чином, паралельний активний фільтр виконує функцію протектора мережі електропостачання від шкідливого впливу нелінійних споживачів електроенергії.



а – послідовна схема, б – паралельна схема

Рисунок 2.9 – Ілюстрація схем під'єднання активного фільтра до електричної мережі живлення навантаження

На відміну від нього, послідовний активний фільтр є джерелом регульованої напруги та здійснює компенсацію гармонійних спотворень, провалів, стрибків, флікерів та несиметрії напруги на вході електроприймачів.

Він підключається послідовно зі споживачем електроенергії та формує на виході інвертора компенсуючу напругу, рівну за амплітудою вхідним спотворенням, але в протифазі до неї. Ця напруга через узгоджувальний трансформатор впливає на вхідну напругу споживача та компенсує її спотворення.

В результаті на вході споживача з'являється напруга близької до синусоїдальної форми. Таким чином послідовний активний фільтр захищає споживачів від напруги незадовільної якості мережі електропостачання незалежно від природи виникнення спотворень.

Отже, активні фільтри є ефективними технічними засобами підвищення якості електроенергії як в точці підключення нелінійних навантажень, так і безпосередньо на вході споживачів.

2.6. Застосування активних випрямлячів для покращення показників якості електричної енергії виробленої вітроелектричними установками

Для трансформації енергії змінного струму у енергію постійного струму використовуються спеціальні електротехнічні установки, що носять назву випрямляча.

За принципом дії випрямлячі поділяються на пасивні (напівпровідникові) та активні (з використанням силової електроніки).

Активні випрямлячі мають низку переваг порівняно з пасивними, зокрема: вищу надійність, можливість плавного регулювання вихідної напруги, реверсивність перетворення енергії.

Активний випрямляч складається з таких основних вузлів:

- вхідний LC-фільтр для згладжування пульсацій вхідного струму;
- керований перетворювач постійної напруги з широтно-імпульсною модуляцією;
- вихідний LC-фільтр для згладжування пульсацій вихідної напруги;
- система керування на основі мікроконтролера.

Завдяки використанню сучасної елементної бази та мікропроцесорних систем керування, активні випрямлячі є високоефективним та гнучким технічним рішенням для перетворення електричної енергії.

Орієнтовний склад випрямляча продемонстровано на узагальненій структурній схемі рис. 2.10.

Зазвичай випрямлячі підключаються до розподільної напруги електричної мережі через трансформатори змінного струму TV. Трансформатори призначені для зниження напруги мережі до необхідного для

випрямляча рівня. Вони також забезпечують електричну (гальванічну) розв'язку мережі живлення та навантаження.

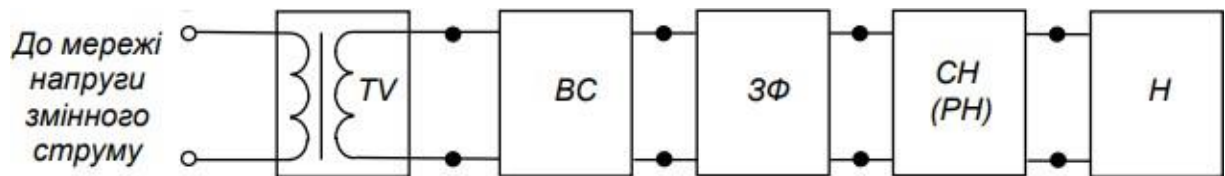


Рисунок 2.10 – Структурна схема елементів випрямляча

Вентильна схема ВС на основі напівпровідникових ключів виконує функцію випрямлення змінної напруги в пульсуючу уніполярну.

Згладжувальний фільтр ЗФ перетворює пульсуючу випрямлену напругу в постійну. Такі фільтри виконують на реактивних елементах – конденсаторах та дроселях, які здатні накопичувати електромагнітну енергію. Тому їх називають пасивними фільтрами.

Сучасні активні випрямлячі реалізують вищенаведені функції перетворення енергії із застосуванням швидкодіючих напівпровідникових ключів та мікропроцесорних систем керування. Це забезпечує високу надійність, енергетичну ефективність та можливості регулювання вихідних параметрів.

Для живлення електронних пристроїв зазвичай застосовують активні стабілізатори напруги на основі транзисторів, операційних підсилювачів та реактивних елементів.

При зміні вхідної напруги мережі або навантаження в заданих межах, стабілізатор підтримує стале значення напруги на виході, що живить навантаження.

Для автоматичної стабілізації напруги на навантаженні згідно заданих алгоритмів регулювання та в певному діапазоні значень використовується саме регулятор напруги як складова стабілізатора напруги.

Крім того, стабілізатори (регулятори) напруги СН (РН) можуть вмикатися як з боку постійного, так і з боку змінного струму (до трансформатора) – залежно від топології та параметрів системи.

Застосування активних стабілізаторів напруги дозволяє забезпечити якісне електроживлення чутливих електронних пристроїв за різних режимів роботи системи.

Параметри випрямного каскаду та його складових, а також режими їх роботи, мають відповідати заданим умовам живлення навантаження.

Фільтри для згладжування, стабілізатори (регулятори) напруги і в деяких випадках трансформатори можуть бути відсутні у складі випрямляча, якщо в них немає потреби.

Окрім зазначених функціональних блоків, випрямлячі можуть містити додаткові вузли та складники захисту для запобігання аварійних режимів роботи. Зокрема, передбачаються захист від коротких замикань, перевантажень, зниження напруги живлення (за допомогою запобіжників, автоматичних вимикачів, електронних захисних пристроїв).

Також можлива наявність блоків індикації параметрів (значення напруги, струму), діагностики та контролю працездатності випрямляча.

Класифікують випрямлячі за кількістю фаз на однофазні та трифазні, а за потужністю на: малої потужності – до 0,1 кВт, середньої потужності – до 10 кВт, великої потужності – понад 10 кВт.

Виокремлюють некеровані випрямлячі на основі діодів та керовані випрямлячі з тиристорами чи іншими керованими вентилями.

За способом перетворення енергії випрямлячі бувають однокітні та двокітні. В однокітних випрямлячах струм через вторинну обмотку трансформатора протікає один раз за період мережевої напруги тільки в одному напрямку.

Важливою характеристикою є кратність пульсувань випрямленої напруги m . Величина m – це відношення частоти пульсацій до частоти мережі. В однокітних схемах цей параметр дорівнює кількості фаз мережі живлення.

У двотактних (двопівперіодних) випрямлячах струм через трансформатор проходить двічі за період при зміні напрямку. Їх кратність пульсацій дорівнює подвійній кількості фаз.

Принцип роботи випрямляча полягає у підключенні навантаження до мережі змінного струму за допомогою вентилів так, що струм протікав в одному напрямку незалежно від полярності напруги джерела.

Схема керованих вентилів або вентильна схема, яка забезпечує саме функцію випрямлення змінного струму є найважливішим вузлом випрямляча.

Існують два основних схемних рішення для побудови мережевих перетворювачів з активним коректуванням коефіцієнта потужності у трифазному виконанні.

Перше – це двотактний активний випрямляч на базі мостового інвертора напруги у трифазному виконанні, який зображений на рис. 2.11.

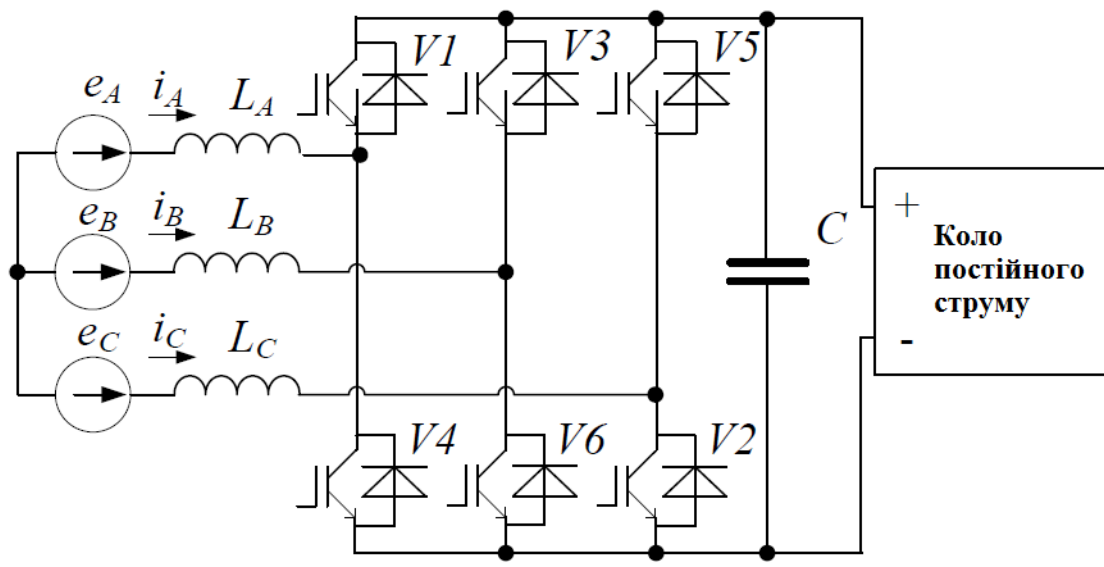


Рисунок 2.11 – Типова схема двотактного активного випрямляча з трифазним мостовим інвертором напруги

Друге – одноперіодний перетворювач типу віденського випрямляча з транзисторними ключами двосторонньої провідності, відповідна схема приведена на рис. 2.12.

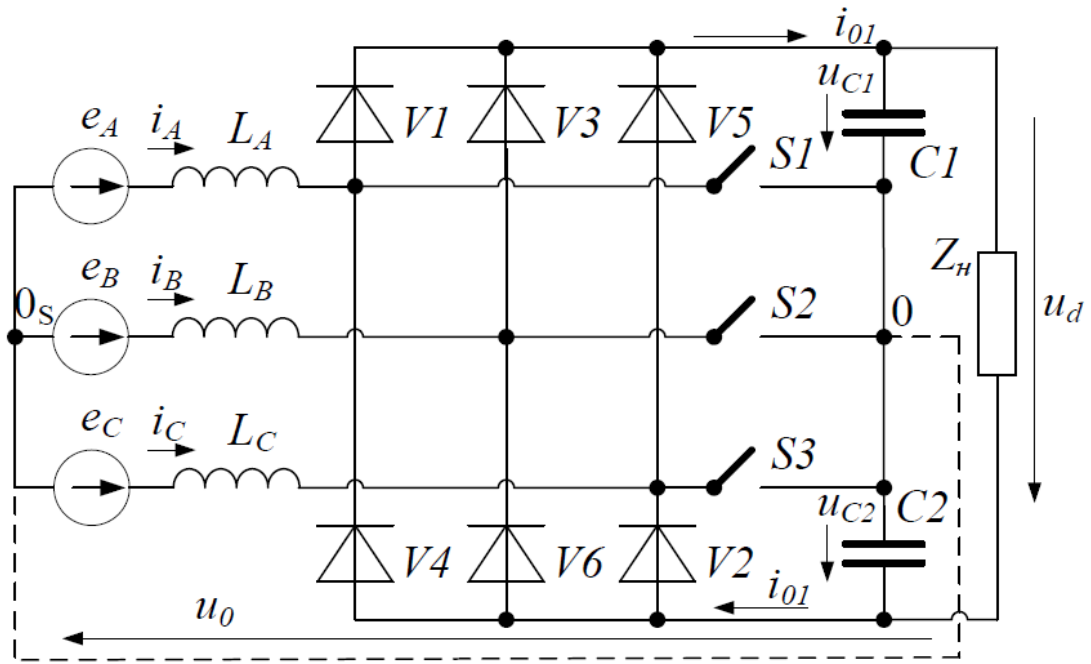


Рисунок 2.12 – Типова схема одноперіодного перетворювача типу віденського випрямляча

Принцип роботи віденського випрямляча аналогічний дії активного випрямляча на основі підвищувального регулятора (стабілізатора).

Перевагою схеми віденського випрямляча є те, що рівень напруга на керованих ключах у два рази нижча порівняно із активним випрямлячем. Це дозволяє використовувати МДН-транзистори та підвищити частоту комутації, зменшивши номінали фазних дроселів L .

Отже, залежно від вимог до перетворювача, можливе застосування як двотактної схеми активного випрямляча, так і однотоктного віденського випрямляча для ефективної корекції коефіцієнта потужності в трифазних мережах.

Активні випрямлячі можуть функціонувати як із постійною частотою комутації (це називають синхронне керування), так і зі змінною частотою комутації (це називають асинхронне керування).

Синхронні системи керування, побудовані за програмним принципом, формують ШІМ-послідовність, синхронізовану з мережевою напругою за амплітудою та фазою. Вони є параметричними.

При цьому показники якості форми струму мережі погіршуються зі зменшенням коефіцієнта регулювання k_p , що являє собою частку від ділення значення основної гармоніки напруги на дроселі та величини фазної напруги.

Водночас, для зменшення індуктивності фазних дроселів L проектувальники прагнуть підвищити частоту комутації, що призводить до зниження значення коефіцієнта k_p .

Через це в однофазних активних випрямлячах застосовують системи керування із замкненим контуром регулювання мережного струму для підтримки його якісних показників.

Застосування систем керування активних випрямлячів у трифазному виконанні, під'єднаних до мережі без нульового проводу, має певні обмеження, пов'язані з наступними факторами. Лише два фазні струми з трьох будуть незалежними, тому використання зворотного зв'язку за всіма трьома каналами може викликати збої в роботі системи керування. Крім того виникає ефект втрати керованості – комутація ключа однієї фази не призводить до зміни похідної струму цієї фази через взаємний вплив фаз. Це також загрожувє збоями системи керування.

Для вирішення цих проблем використовують різноманітні підходи. Наприклад, застосовують системи керування з двома контурами зворотного зв'язку лише за двома незалежними струмами або використовують комбіновані сигнали зворотного зв'язку за струмами і напругами фаз.

Ще одним методом є введення додаткових коригувальних ланок в систему керування, які компенсують ефект взаємного впливу фаз і дозволяють уникнути втрати керованості. Наприклад, застосовують ланки попередньої компенсації е.р.с. взаємної індукції фаз або ланки компенсації взаємних індуктивних опорів.

2.7 Висновки до другого розділу

1. Таким чином очевидно, що для ефективної роботи вітрової електростанції необхідне оптимальне поєднання характеристик вітроагрегатів, накопичувальних систем та систем керування за будь-яких погодних умов, причому ключовою умовою є правильний підбір системи керування. Актуальним завданням є адаптація роботи вітроелектростанцій до умов функціонування наявних енергосистем шляхом формування на виході електроенергії необхідних параметрів, для чого потрібен комплекс технічних та інфраструктурних рішень для ефективної інтеграції вітрогенераторів в існуючі енергосистеми.

2. Вироблення електричної енергії у сучасних вітроустановках реалізується за допомогою машино-вентильних каскадів, що являють собою електромеханічні систем перетворення енергії. Недоліком найбільш поширених каскадів Шербіуса та Кремера є несинусоїдальність струмів та великі пульсації моменту на валу, що обмежує їх застосування. Альтернативою є машини подвійного живлення, де статор живиться від мережі, а ротор – від регульованого автономного джерела, що дозволяє покращити показники якості струмів і зменшити пульсації моменту.

3. Для поліпшення якості електроенергії, що виробляється вітроелектроустановками, найефективнішим є застосування активних фільтрів гармонік та активних випрямлячів на основі сучасної силової електроніки. Активні фільтри дозволяють компенсувати гармонійні спотворення струму та напруги, а активні випрямлячі – забезпечити високу якість випрямленої напруги.

4. Подальший розвиток вітроенергетики потребує комплексного вирішення питань надійності, ефективності та якості виробленої електричної енергії на основі новітніх технологій.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ НА БАЗІ ВІДЕНСЬКОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Ключовою проблемою, з якою стикаються при проектуванні вітроелектрогенераторів, є забезпечення виробництва електроенергії належної якості за умови мінливого характеру вітрового навантаження.

Існують два можливі технічні рішення для стабілізації частоти вихідної напруги. Перший підхід полягає у безпосередньому механічному впливі на швидкість обертання вітроколеса, наприклад, шляхом зміни кута атаки лопаті. Зазначений метод відомий як пітч-регулювання. Другий підхід передбачає електричне перетворення електричної енергії з нестандартними параметрами на електричну енергію зі стандартними параметрами за допомогою електронних систем керування збудженням генераторів та стабілізації вихідної енергії. Проте варто розуміти, що на склад і будову таких електронних систем впливає тип генеруючого пристрою, вбудованого у вітроенергетичну установку. Відповідно, найважливішим аспектом під час проектування вітроенергетичних установок є вибір типу генератора.

Традиційно з усього спектру електричних машин для застосування у вітроенергетичних системах виділяють такі типи генераторів: постійного струму, асинхронні, синхронні, синхронні генератори з постійними магнітами.

Генератори постійного струму відрізняються простотою конструкції та надійністю, але мають обмеження щодо потужності. Асинхронні генератори дешевші за інші типи, але потребують додаткових пристроїв збудження. Синхронні генератори з постійними магнітами демонструють високу ефективність перетворення енергії, але є дорогими за інші альтернативи.

Під час вибору конкретного типу генератора для вітроелектричної установки необхідно враховувати низку чинників: очікувану потужність

установки, наявний бюджет на обладнання, вимоги до якості та стабільності виробленої електроенергії, умови експлуатації, вартість технічного обслуговування тощо. Компроміс між цими факторами дозволить прийняти оптимальне конструктивне рішення для конкретного проекту вітроенергетичної установки.

3.1 Асинхронний генератор подвійного живлення як ефективне технічне рішення у вітроенергетиці

Сучасним технічним рішенням у вітроенергетиці є система з асинхронною машиною подвійного живлення. Загальний вигляд такої системи приведений на рис. 3.1. В неї входить асинхронна машина з фазним ротором АГ та окремим джерелом живлення обмоток статора та ротора.

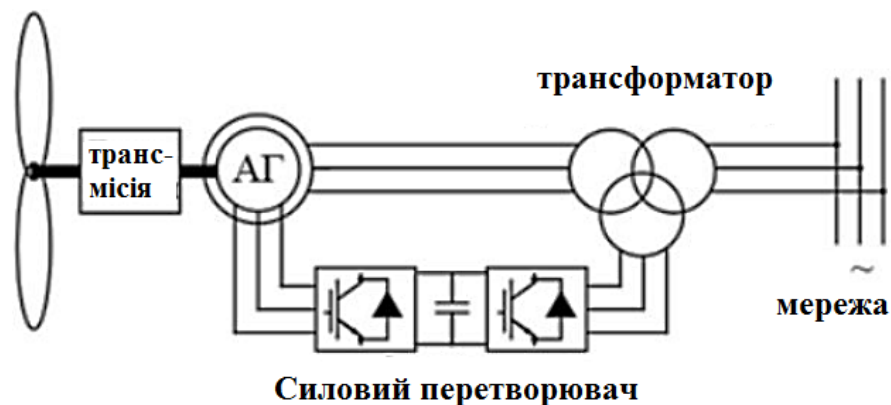


Рисунок 3.1 – Ілюстрація підключення вітроелектричної установки з асинхронною машиною подвійного живлення в електричну мережу

Принцип роботи такий: механічна енергія від вітрового колеса через трансмісію передається на вал ротора генератора АГ. Статор генератора приєднується безпосередньо до збірних шин електричної системи вітроустановки через силовий трансформатор, а ротор під'єднується до напівпровідникового перетворювача – інвертора напруги. Сам інвертор

живить обмотку трифазного знижуючого трансформатора. За допомогою інвертора енергія перетворюється у мережеву та передається споживачам.

Номінальна потужність ротора у такій схемі становить 25-30 % потужності номінального режиму генератора. Це дозволяє зменшити габарити та вагу вітрогенератора, втрати при комутації силових ключів, теплові втрати завдяки зниженню загальної потужності пристрою.

Окрім компактних розмірів, система з асинхронним генератором подвійного живлення має ще низку переваг. Зокрема, конструкція такого генератора простіша та дешевша порівняно із синхронним генератором. Крім того, відсутність постійних магнітів у роторі підвищує надійність та зменшує витрати на обслуговування.

До потенційних недоліків слід віднести більш складну систему керування через наявність двох контурів живлення. Однак сучасна елементна база та методи керування дозволяють ефективно вирішувати цю проблему.

Застосування асинхронного генератора з подвійним живлення ротора є перспективним технічним рішенням для створення компактних та надійних вітроенергетичних установок.

У системах з асинхронним генератором подвійного живлення активна та реактивна потужності регулюються незалежно завдяки окремим контурам збудження статора і ротора.

Однак така схема має певні недоліки, зокрема:

- необхідність контактних кілець для передачі струму до ротора, що знижує надійність машини;
- «хитання ротора», тобто коливання його швидкості обертання через зміну моменту, як і в інших асинхронних машин.

Асинхронний генератор подвійного живлення може працювати в трьох режимах залежно від швидкості обертання ротора, які описані нижче.

Перший режим реалізується при досинхронній швидкості. Електроенергія подається з зовнішньої мережі на обмотку ротора, створюючи

магнітний потік, який індукує ЕРС у статорі. Вироблена потужність передається в мережу.

Другий режим реалізується при синхронній швидкості. При цьому на ротор подається стала напруга і він функціонує аналогічно звичайному синхронному генератору.

Третій режим реалізується при надсинхронній швидкості. Живлення ротора і напрям його обертального магнітного поля протилежні, ніж у першому випадку.

Завдяки гнучкості режимів роботи, асинхронний генератор подвійного живлення може ефективно використовуватися у широкому діапазоні швидкостей обертання вітрового колеса.

Запропонований перетворювач складається з двох основних ланок.

Першу ланку утворює вхідний AC/DC перетворювач на базі активного випрямляча. Він забезпечує випрямлення змінної напруги з кола ротора генератора та регулювання швидкості обертання ротора для оптимальної передачі енергії від вітроустановки.

Другу ланку утворює вихідний DC/AC перетворювач на основі автономного інвертора напруги з ШІМ. Він формує на виході трифазну синусоїдальну напругу потрібної частоти та забезпечує електромагнітну сумісність з мережею.

Між вхідним та вихідним перетворювачами розташована ланка постійної напруги у вигляді конденсатора великої ємності для згладжування пульсацій.

На виході перетворювача необхідно встановити вихідні LC-фільтри з дроселями для формування струмів заданої форми та підвищення якості електроенергії, що віддається до мережі.

Така структура дозволяє якісно перетворити нестабільну за параметрами енергію вітру в стабілізовані струми промислової частоти 50 Гц з високим коефіцієнтом потужності.

3.2 Принцип роботи та особливості побудови схеми віденського випрямляча як елемента ефективних вітроенергетичних установок

Віденський випрямляч по суті являє собою три однофазних мостових підвищувальних випрямляча, з'єднаних за спеціальною схемою, яка була спроектована у Віденському технологічному університеті.

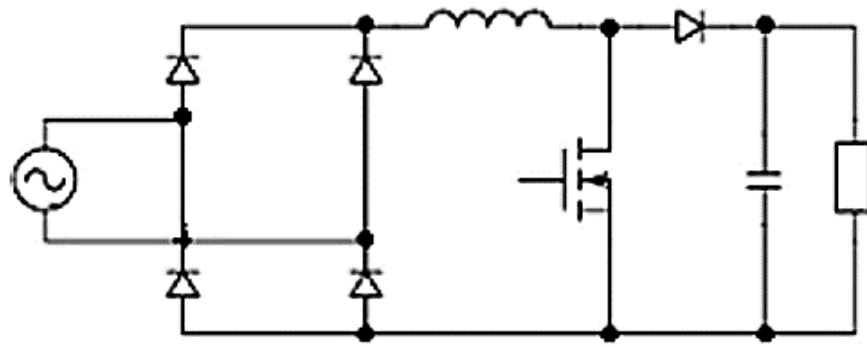
Перетворення схеми звичайного однофазного мостового випрямляча для використання його як окремого вузла у трифазній структурі віденського випрямляча показано на рис. 3.2. Перевагами даної топології є відносна простота, відсутність додаткових елементів реактивності (дроселів чи трансформаторів) та високий коефіцієнт потужності.

У вихідній схемі однофазного підвищувального перетворювача (рис. 3.2, а) виконано дві модифікації: дросель перенесено з ланцюга постійного струму у ланцюг змінного струму джерела живлення, що дає можливість зменшити габарити магнітопроводу та покращити характеристики пристрою; додано другий розв'язуючий діод за для отримання більш точної форми струму та напруги на виході (рис. 3.2, б). У результаті цих модифікацій однофазна схема набула вигляду, показаного на рис. 3.2, в. В цій топології при роботі на кожній півхвилі струму працює тільки один транзистор.

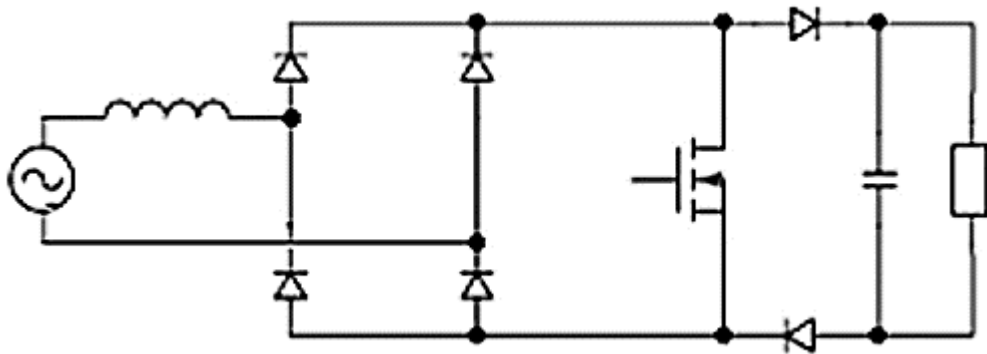
Таке спрощення силової частини дозволяє зменшити число ключів, кількість каскадів виходу для живлення, складність системи керування. При такій системі керування відсутні такі недоліки як, необхідність створення «мертвого часу» і небезпека короткого замикання конденсатора при аварії.

При ввімкненому транзисторі до дроселя, що накопичує енергію, прикладається повна лінійна напруга мережі (за винятком падінь напруги на паразитних опорах). Завдяки цьому можна використовувати дросель меншої індуктивності.

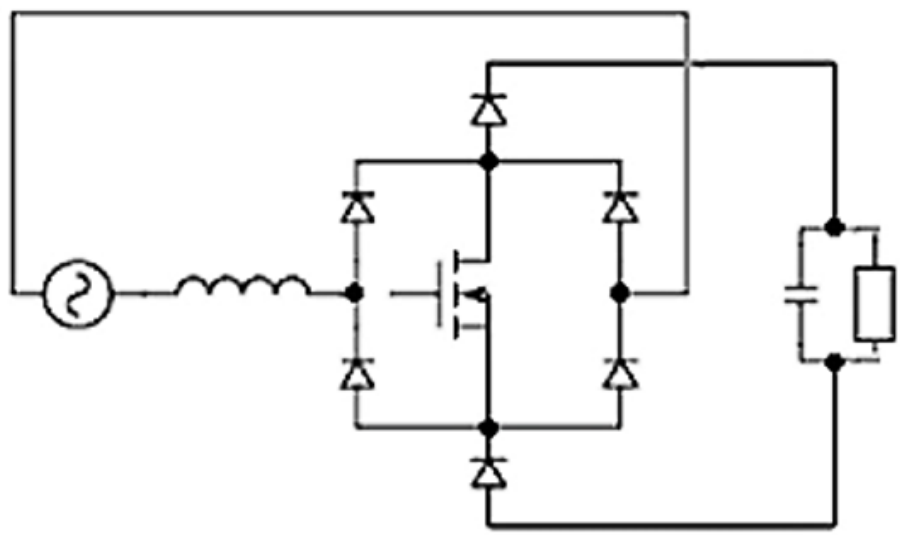
У вимкненому стані до транзистора також прикладається фазна напруга мережі, а не подвоєна лінійна, як у дворівневій схемі. Це дозволяє застосовувати транзистори з меншим класом напруги.



а)



б)



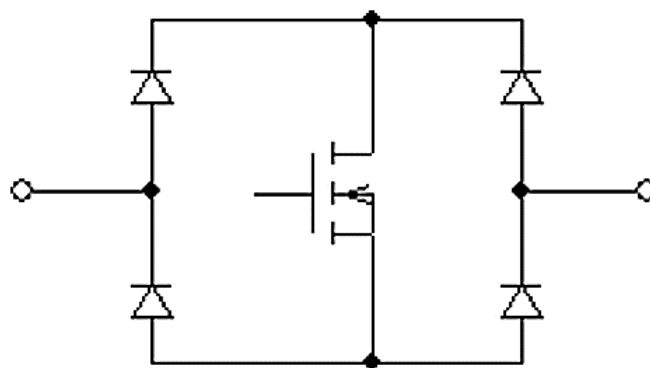
в)

а – однофазний підвищувальний перетворювач, б – перетворювач з котушкою в колі змінного струму, в – робоча фаза віденського випрямляча

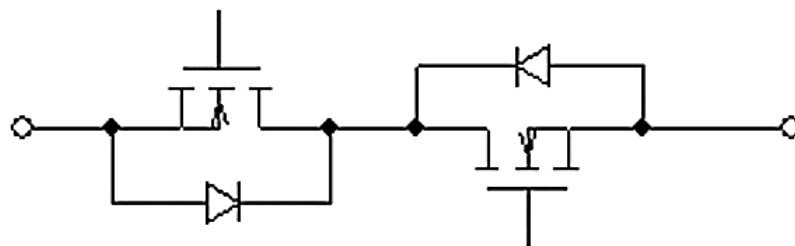
Рисунок 3.2 – Пояснювальна схема отримання однієї фази віденського випрямляча із схеми однофазного підвищувального перетворювача

Існують різні схемотехнічні рішення реалізації двонаправленого ключа, які мають свої переваги та недоліки.

У розглянутому вище варіанті схеми віденського випрямляча схема ключа приведена на рис. 3.3, а. В ній використовується трирівнева схема на основі шести діодів в кожній фазі: чотирьох низькочастотних та двох високочастотних блокувальних. Таке технічне рішення має високу надійність та енергетичну ефективність, але вимагає значної кількості напівпровідникових компонентів.



а)



б)

а – один транзистор, б) два транзистора

Рисунок 3.3 – Пояснювальна схема виконання двонаправленого силового ключа

Альтернативний підхід полягає у застосуванні двох транзисторно-діодних модулів, включених зустрічно, як показано на рис. 3.3, б. Її перевагою

є простота та менша вартість, проте це призводить до додаткових втрат при реверсі струму.

Тож при використанні схеми віденського випрямляча необхідний компроміс між складністю та ефективністю силового ключа залежно від вимог та обмежень конкретного застосування.

Застосування великої кількості напівпровідникових діодів у схемі віденського випрямляча істотно ускладнює не лише монтаж окремих компонентів, а й проектування та виготовлення силової плати та ошиновки. Це створює окреме складне науково-технічне завдання. Необхідно розробляти шини у вигляді широких плоских провідників, спираючись на теорію та практичний досвід створення шинних систем (busbar).

Для полегшення проектування та монтажу трифазних схем віденського випрямляча компанія IXYS у співпраці з розробниками створила готові напівпровідникові модулі розраховані на потужність 10 кВт (модуль VUM 25-05) та потужність 30 кВт (модуль VUM 85-05A).

Кожен модуль являє собою інтегральну схему однієї фази перетворювача, що містить силовий транзистор та шість діодів. З метою забезпечення плавного пуску у модулі VUM 85-05A замінено тиристором один із напівпровідникових діодів.

Для побудови повної трифазної системи випрямлення струму по схемі віденського випрямляча потрібно три аналогічні модулі.

Перевагами інтегрального виконання, окрім спрощення збірки та налагодження, є покращення електротехнічних характеристик через оптимізацію внутрішніх зв'язків.

Такі модулі дозволяють реалізувати віденські випрямлячі середньої потужності для живлення електротехнологічного обладнання, забезпечуючи при цьому покращену електромагнітну сумісність.

На рис. 3.4 представлена трифазна топологічна схема віденського випрямляча, виконана за трирівневою схемою.

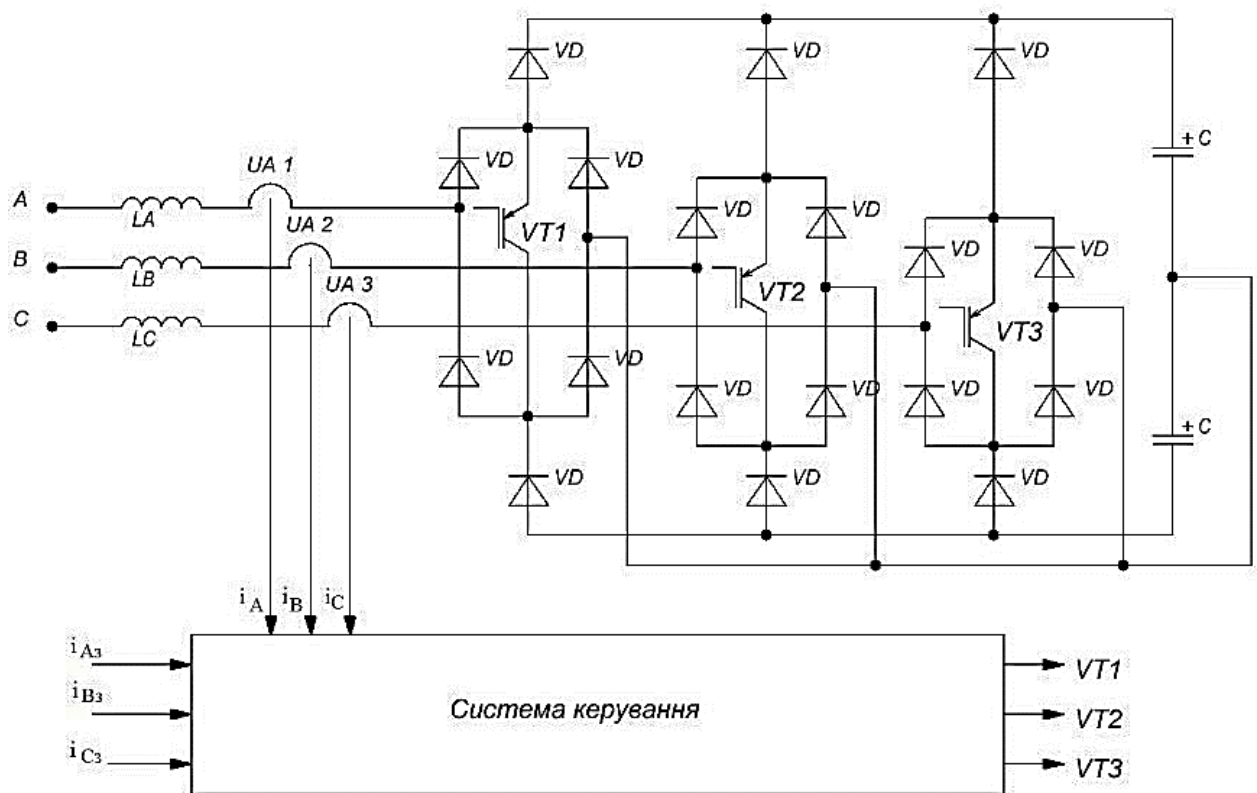


Рисунок 3.4 – Принципова узагальнена схема віденського випрямляча

Кожна фаза (A, B, C) містить силовий транзистор (відповідно VT1, VT2, VT3) та шість діодів.

Наприклад, фаза A включає: транзистор VT1 та діоди VD1-VD6. Аналогічно для двох інших фаз.

В схемі використано біполярні транзистори з ізольованими затворами (IGBT). Однак можливе застосування і польових МДН транзисторів (MOSFET) – це дозволить підвищити частоту комутації.

Трирівнева топологія дає можливість реалізувати такі переваги:

- знизити втрати при комутації транзисторів;
- покращити гармонійний склад струму;
- забезпечити реверс потужності без додаткових ключів.

Тому така схема є ефективним рішенням для побудови віденського випрямляча в складі системи з асинхронним генератором подвійного живлення.

В схемі рис. 3.4 елементи VD1-VD2, VD5-VD8, VD11-VD14 та VD17-VD18 – це низькочастотні силові діоди, згруповані по чотири штуки у однофазні мости (міст Греца) для кожної фази. Вони забезпечують випрямлення вхідної напруги.

Елементи VD3-VD4, VD9-VD10, VD15-VD16 – високочастотні блокувальні діоди. Їх функція – запобігти протіканню зворотних струмів від конденсаторів C1, C2 до транзисторів VT1-VT3 під час комутації. Це забезпечує захист транзисторів.

Така структура діодів дозволяє реалізувати ефективне випрямлення вхідної напруги і захист силових транзисторів, що є важливим для надійної та стабільної роботи віденського випрямляча.

Конденсатори C1 і C2 виконують дві основні функції:

- ємнісне фільтрування, тобто згладжування пульсацій випрямленої напруги на частоті роботи силових транзисторів для отримання стабільної напруги на виході;
- створення віртуальної нульової точки, що дозволяє реалізувати трирівневу топологію без додаткового нульового проводу.

Конденсатори C1 і C2 утворюють ділник напруги живлення навіпіл.

Конденсатори виконують важливу роль у забезпеченні якості вихідної напруги та можливості побудови трирівневої схеми віденського випрямляча без додаткових елементів. Це спрощує конструкцію і підвищує надійність системи.

При підключенні перетворювача до мережі конденсатори C1 і C2 заряджаються до напруги більшої за амплітуду фазної напруги мережі (через діоди VD1-VD18).

Напруга заряду конденсаторів C1 і C2 визначається виразом:

$$U_{C1} = U_{C2} = 0,5 \cdot U_{\text{ном}} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{\text{фазн}}. \quad (3.1)$$

Важливо, щоб ця напруга заряду максимально наближалася до випрямленої напруги мережі. З урахуванням можливих втрат, наприклад, через активний опір шин або паразитну індуктивність, ємнісний дільник може бути замінений на RC-ланцюг для коригування напруги. Для цього в розрядний ланцюг вводиться резистор паралельно конденсаторам C_1 і C_2 .

Коли транзистор VT1 замкнений, то до індуктивності L_A прикладена додатня напруга $u_A - u_0 > 0$ (де $u_A = U_{\text{фази}} \cdot \sin(2\pi f_{\text{мер}} t)$ – фазна напруга мережі, u_0 – напруга між середньою точкою мережі та середньою точкою конденсаторів C_1 та C_2). Під дією цієї напруги струм i_A в ланцюзі наростає, енергія накопичується в індуктивності L_A .

Після вимкнення транзистора VT1 струм індуктивності L_A продовжує протікати через діод VD3. Тепер до індуктивності прикладена від’ємна напруга $u_A - u_0 - u_{C1} < 0$, де u_{C1} – напруга на конденсаторі C_1 . Під дією цієї напруги струм дроселя i_A зменшується.

На другій півхвилі вхідної напруги ($u_A < 0$), коли VT1 замкнений, до індуктивності L_A прикладена теж від’ємна напруга $u_A - u_0 < 0$. Струм індуктивності знову зменшується, віддаючи енергію в коло.

Таким чином, струм у колі індуктивності L_A періодично наростає і зменшується, виконуючи випрямлення та фільтрацію вхідної напруги. Конденсатор C_1 в свою чергу згладжує ці пульсації струму.

Здійснюючи вмикання та вимикання транзистора VT1 із значною частотою комутації (кратністю рівною q) $f_{\text{ком}} = q \cdot f_{\text{мер}}$, можна сформулювати необхідну форму вхідного струму i_A .

Основна гармоніка струму i_A матиме ту саму фазу, що і напруга u_A , завдяки синхронізації з частотою живлення. Це забезпечує високий коефіцієнт потужності.

Аналогічно формуються струми в інших фазах i_B та i_C . Так реалізується активне випрямлення з боку мережі.

Для оцінки якості форми струму використовується коефіцієнт гармонічних спотворень THD. Його значення залежить від алгоритму керування та параметрів схеми, а величина розраховується за виразом:

$$THD = \frac{1}{I_1} \cdot \sqrt{\sum_{hmin}^{hmax} (I_h)^2}, \quad (3.3)$$

де I_1 – несуча гармоніка в струмовому спектрі;

h – номер гармоніки;

h_{max} – максимальне значення гармоніки для врахування;

I_h – h -та гармонійна складова струму.

Таким чином керуючи транзисторами VT1-VT3 можна реалізувати активне випрямлення з необхідними показниками якості вихідного струму.

3.3 Обґрунтування вибору системи керування віденського випрямляча для ефективної роботи вітроустановки

Система керування є критично важливим компонентом сучасних перетворювачів електроенергії, зокрема і віденського випрямляча, адже саме вона забезпечує ефективність та стабільність роботи.

Основні функції системи керування наступні:

- регулювання коефіцієнта потужності шляхом корекції фази струмів споживання;
- автоматичне перемикання між режимами випрямлення та інвертора з максимальним $\cos(\varphi)$;
- регулювання і стабілізація вихідної напруги з заданою точністю за статичними та динамічними показниками;
- захист силових елементів в аварійних режимах роботи;
- моніторинг параметрів роботи та діагностика несправностей.

Тому правильний вибір або розробка системи управління є запорукою ефективної роботи віденського випрямляча.

Теорія автоматичного керування стверджує, що найвищу точність та оптимальні динамічні характеристики мають замкнені системи управління. Тому для стабілізації вихідних параметрів та підтримки коефіцієнта потужності на рівні, максимально наближеному до одиниці, в системах керування застосовують зворотні зв'язки. Проте у випрямлячах відсутня можливість прямим чином здійснювати безпосередній вплив на регульовані величини. Керуюча система фізично подає сигнали керування до силових ключів та може впливати лише на такі параметри як тривалість та частота імпульсів напруги. Для регулювання величин потрібна система давачів та регуляторів.

Існують дві основні систем керування: ШІМ-керування; релейне управління.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) є найпоширенішим методом керування випрямлячами. Суть ШІМ полягає в тому, що різниця між задаючим та реальним сигналами надходить на регулятор. Вихідний сигнал з регулятора надходить на порівняльний елемент, де він порівнюється з опорним сигналом. На виході порівняльного елемента формуються прямокутні імпульси, які подаються далі на транзистори. Частота проходження імпульсів залишається незмінною, а їхня тривалість може змінюватися. Структурна схема ШІМ системи керування приведена на рис. 3.5.

Налаштування параметрів регуляторів ШІМ є досить складним процесом, що ускладнює всю систему керування. Для спрощення налаштування використовують спеціальні інтегральні схеми або мікроконтролери з вбудованими ШІМ-модулями. Вони дозволяють програмно керувати параметрами ШІМ за допомогою цифрових сигналів.

Перевагами ШІМ є висока точність регулювання, гнучкість та можливість цифрового керування. Недоліками ж є складність аналогової

реалізації та вищий рівень електромагнітних завад через наявність імпульсів високої частоти.

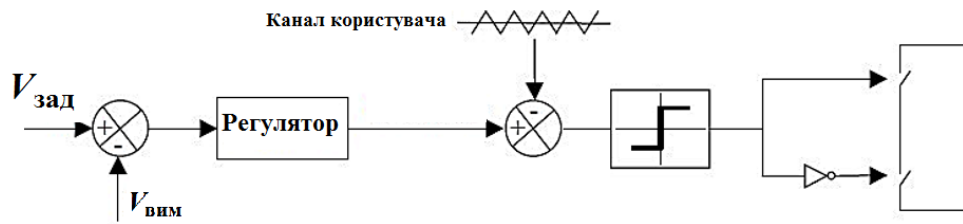


Рисунок 3.5 – Структурна схема широтно-імпульсної модуляції системи керування

Метод ШІМ дозволяє ефективно керувати випрямлячами, але потребує ретельного налаштування всіх компонентів системи, щоб забезпечити оптимальну роботу. Сучасні цифрові методи керування дещо спрощують цей процес.

У випадку релейної системи управління регулювання параметрів здійснюється шляхом порівняння поточних значень фазних струмів із заданими значеннями. За наявності розбіжності між цими значеннями формується сигнал розузгодження, який надходить на гістерезисний модулятор. Він, у свою чергу, керує перемиканням силових вентилів випрямляча. Частота перемикання вентилів при цьому є змінною, що забезпечує високу швидкодію системи. Структурна схема релейної системи керування приведена на рис. 3.6.

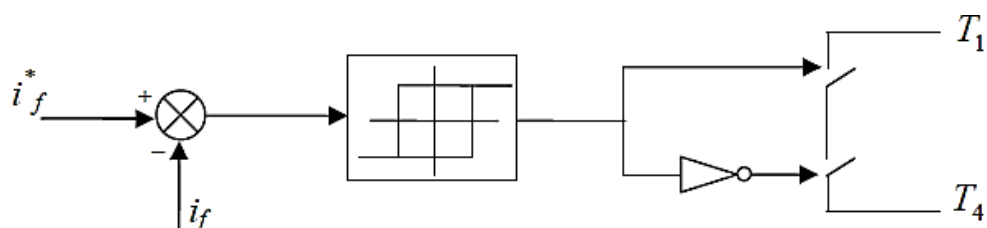


Рисунок 3.6 – Структурна схема релейної системи керування

Перевагами релейного управління є простота реалізації, надійність та стійкість до перешкод. Однак воно має гіршу точність регулювання порівняно з ШІМ через обмежену кількість фіксованих рівнів вихідної напруги. Також цей метод схильний до виникнення електромагнітних перешкод через наявність комутацій в силовому колі.

Для підвищення якості релейного керування до його складу можуть вводитися додаткові ланки – фільтри, компенсатори, стабілізатори тощо. Це дозволяє покращити динамічні та статичні характеристики системи.

Незважаючи на простоту, релейне управління дозволяє ефективно керувати випрямлячем. А за рахунок введення додаткових ланок можна компенсувати недоліки цього методу.

Окрім згаданих базових методів, існують також модифіковані системи керування з векторним регулюванням. Вони базуються на концепції узагальненого вектора стану керованого об'єкта.

Векторне керування дозволяє покращити динамічні показники системи та точніше регулювати основні параметри випрямляча. Однак цей метод є більш складним у реалізації та налаштуванні, ніж базові ШІМ чи релейне керування.

В даній роботі для керування випрямлячем обрано більш простий та надійний метод – релейне керування. Незважаючи на певні недоліки у порівнянні з векторним, воно дозволяє отримати задовільні показники регулювання при мінімальних витратах на розробку та впровадження системи.

Якщо буде потреба в подальшому підвищенні якості керування даним випрямлячем, можна розглядати можливість модернізації системи шляхом переходу на векторне або комбіноване керування.

Сформовані фазні струми на виході з активного випрямляча мають верхній та нижній граничні рівні. Вони дещо відрізняються від заданої синусоїдальної форми струму на величину Δi . Ця величина задає допустимі межі, в яких може змінюватися вихідний струм автономного інвертора.

Коли різниця між фактичним та заданим значенням струму в певний момент часу перевищує пороговий рівень, спрацьовує релейно-гістерезисний регулятор. Він формує керуючий сигнал для інвертора, який ініціює переключення його внутрішніх транзисторних ключів. Це в свою чергу зменшує неузгодженість та повертає вихідний струм в межі допустимої зони відхилень Δ . На рис. 3.7 побудована структурна схема регулятора струму релейного типу активного випрямляча.

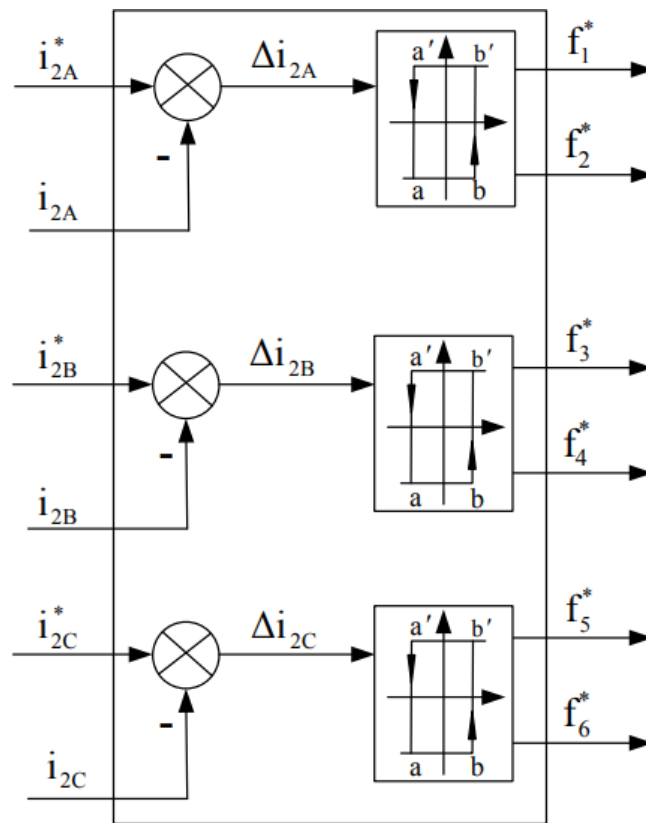


Рисунок 3.7 – Структурна схема регулятора струму релейного типу
активного випрямляча

Такий механізм регулювання дозволяє підтримувати синусоїдальну форму струму з прийнятною точністю, незважаючи на недоліки релейного методу. Граничні рівні та гістерезис можна налаштувати під конкретні вимоги до точності та динамічності за рахунок зміни порогів спрацювання.

3.4 Комп'ютерне імітаційне моделювання роботи вітроелектричної установки з віденським випрямлячем в схемі напівпровідникового перетворювача

Дослідження роботи перетворювача частоти здійснимо за допомогою цифрового моделювання.

Як середовище моделювання обрано пакет MatLab, адже це потужний засіб для математичних обчислень та аналізу даних на основі матричних структур.

Переваги MatLab для моделювання такі:

- широкий набір функцій та інструментів аналізу;
- наявність спеціалізованих наборів інструментів для різних предметних областей;
- можливість як чисельного, так і візуального моделювання систем;
- зручне графічне відображення та візуалізація результатів.

Зокрема, для аналізу електротехнічних систем існує спеціальна бібліотека SimPowerSystems. Вона містить моделі типових елементів і дозволяє досліджувати їх параметри та характеристики.

На рис. 3.7 представлена модель активного віденського випрямляча, побудована за допомогою засобів MatLab, зокрема набору інструментів SimPowerSystems. Ця модель і буде використана для аналізу роботи та параметрів досліджуваного перетворювача частоти.

У моделі використовувалися блоки з джерелами змінної напруги, параметри яких фіксуються. Їх розрахункові значення визначалися виходячи із заданої швидкості обертання вала та потужності навантаження генератора.

Оскільки застосована комп'ютерна імітаційна модель передбачає імітацію роботи електродвигуна, то для коректного розрахунку амплітуди напруги необхідно застосовувати коефіцієнт трансформації.

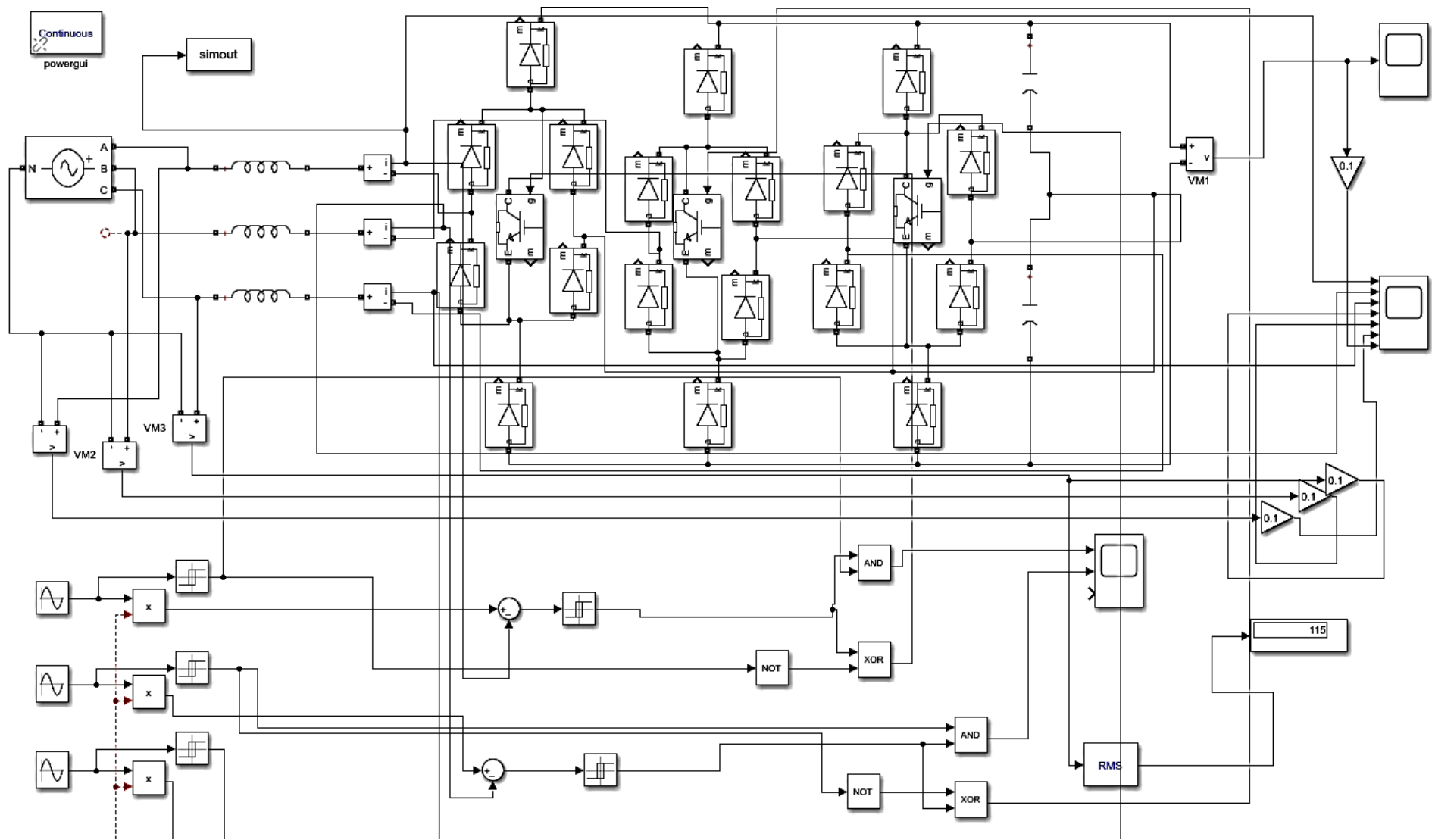


Рисунок 3.7 – Комп’ютерна імітаційна модель вітроелектричної установки з віденським випрямлячем в складі напівпровідникового перетворювача

З метою контролю різниці фаз між струмами і напругами в статорі передбачено трифазний вимірювач. Для його роботи потрібен додатковий блок опорів, що забезпечує потенціал нульової точки при з'єднанні обмоток за схемою «зірка».

При моделюванні швидкостей вище синхронних зміна порядку чергування фаз досягалася шляхом перемикання підключень зі сторони живлення двигуна.

Зняття залежності напруги в колі ротора від швидкості обертання проводилось за умов номінального навантаження та лінійної напруги статора 380 В на частоті 50 Гц.

Підтримання постійного рівня напруги в комп'ютерній імітаційній моделі забезпечувалася коригуванням значень амплітуди та частоти напруги в колі ротора залежно від поточних значень швидкості обертання вала та величини навантаження машини.

В результаті моделювання отримано осцилограми роботи активного випрямляча як складової перетворювача частоти. На рис. 3.8 зображені результати моделювання роботи віденського випрямляча, а саме осцилограми струмів та напруг фазних обмоток ротора і напруги в колі постійного струму. Як видно з осцилограм рис. 3.8, струм має синусоїдальну форму та перебуває в фазі з напругою мережі живлення. Це відповідає нормальним умовам роботи системи.

Отримані характеристики підтверджують адекватність розробленої математичної та цифрової моделі досліджуваного перетворювача частоти.

Таким чином було досліджено систему вітроенергетичної установки з вбудованим перетворювачем частоти на базі активного випрямляча віденського типу.

Зазвичай діапазон зміни швидкості обертання вітроенергетичної установки становить близько $\pm 30\%$ відносно синхронної. Такий робочий діапазон є достатнім для компенсації природних коливань швидкості вітру.

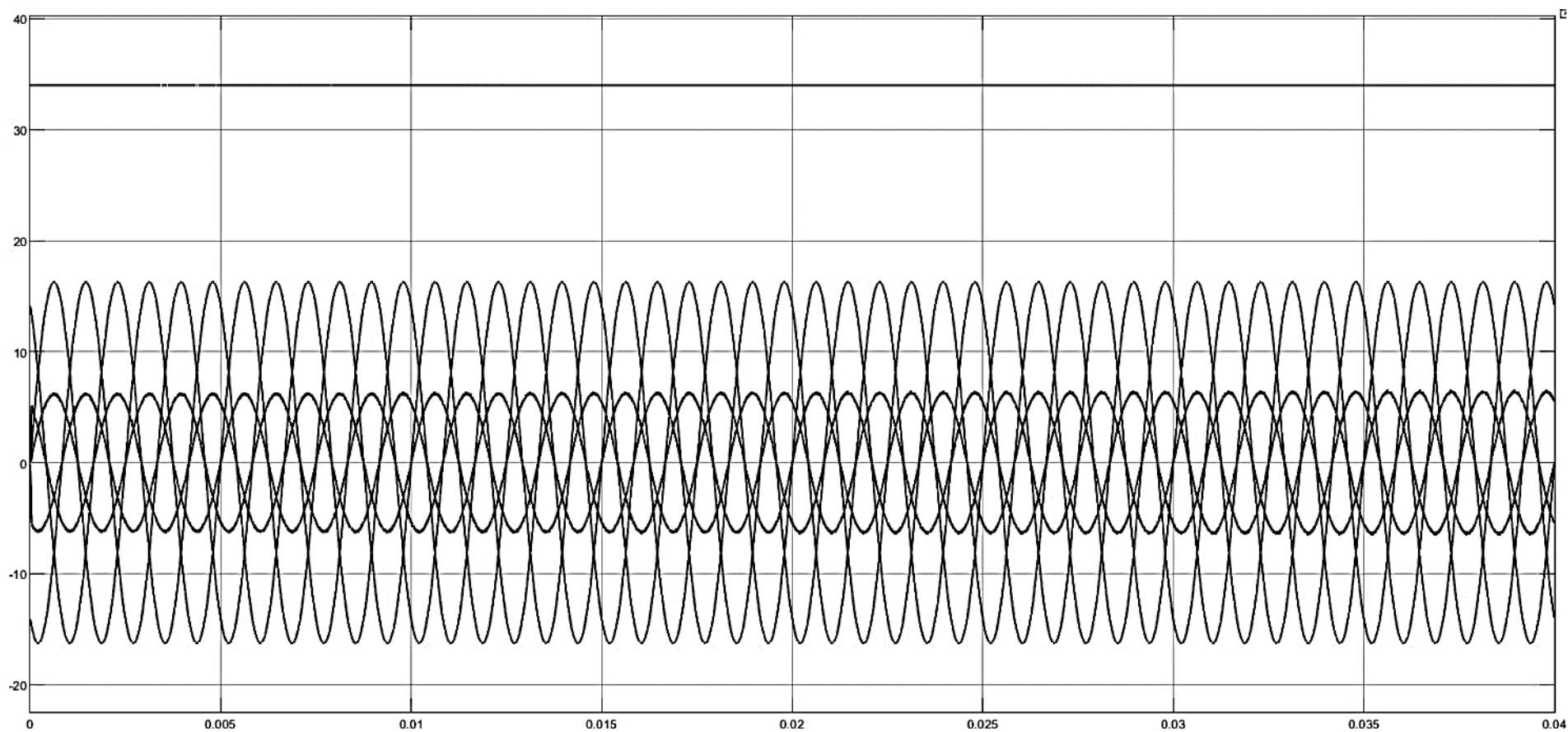


Рисунок 3.8 – Осцилограми напруги і струму фазних обмоток в ланцюгах віденського випрямляча та напруги в колі ланки постійного струму

Потужність перетворювача частоти приймається виходячи з максимального ковзання $s = \pm 0,3$ та номінальної потужності статорних обмоток генератора. Використання перетворювача частоти меншої потужності дозволяє знизити вартість, масу та габарити вітроенергетичної установки.

Порівняно з системами з фіксованою швидкістю, запропонована схема з імпульсним перетворювачем значно підвищує ефективність перетворення енергії вітрової турбіни.

В результаті моделювання роботи системи на комп'ютерній імітаційній моделі були отримані осцилограми робочих параметрів вітроелектричної установки, що приведені на рис. 3.9.

На верхній діаграмі рис. 3.9 показано зміну швидкості обертання ротора асинхронного генератора. Також продемонстровано формування трифазного струму в роторі, частота якого зростає відповідно до збільшення швидкості.

Струм, що віддається в мережу, має синусоїдальну форму з постійною частотою 50 Гц. Це досягається за рахунок використання активного випрямляча та ШІМ-інвертора в складі системи керування.

Отримані характеристики підтверджують працездатність та адекватність розробленої математичної і цифрової моделі системи вітроенергетичної установки з перетворювачем частоти.

З допомогою комп'ютерної імітаційної моделі було проведено аналіз гармонійного складу струму статора генератора за 5 періодів роботи системи. Отриманий струм має синусоїдальну форму, а коефіцієнт спотворення форми струму (THD) становить 2,63 %, що задовольняє вимоги стандарту на якість електроенергії. Дослідження гармонік проводилось до 40-ї гармонічної складової включно. Результати моделювання проілюстровані на рис. 3.10.

Таким чином, на основі аналізу гармонійного складу та форми струму, який віддається в мережу, можна зробити висновок про високу якість електроенергії, що забезпечується запропонованою системою вітрового електропостачання з перетворювачем частоти.

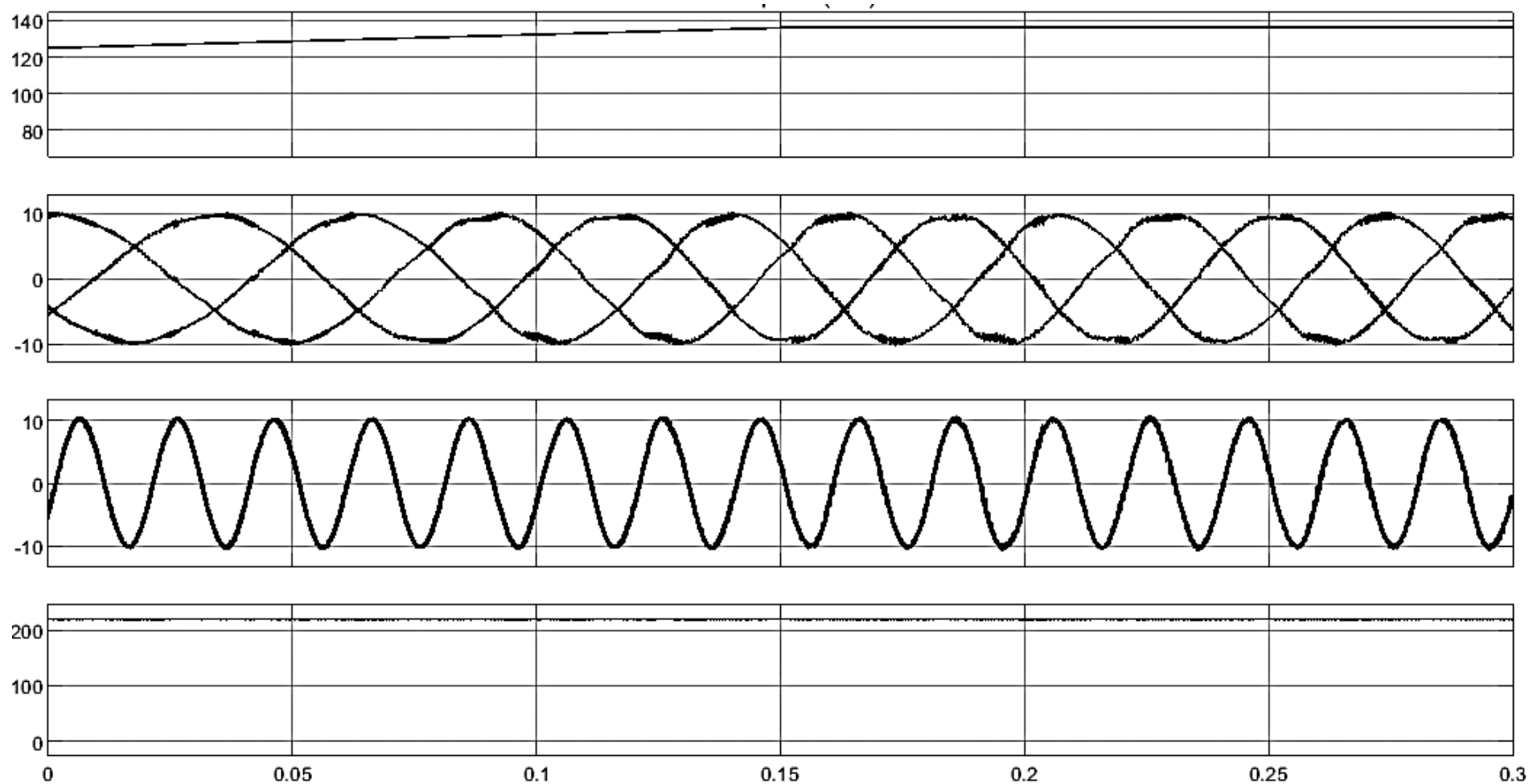
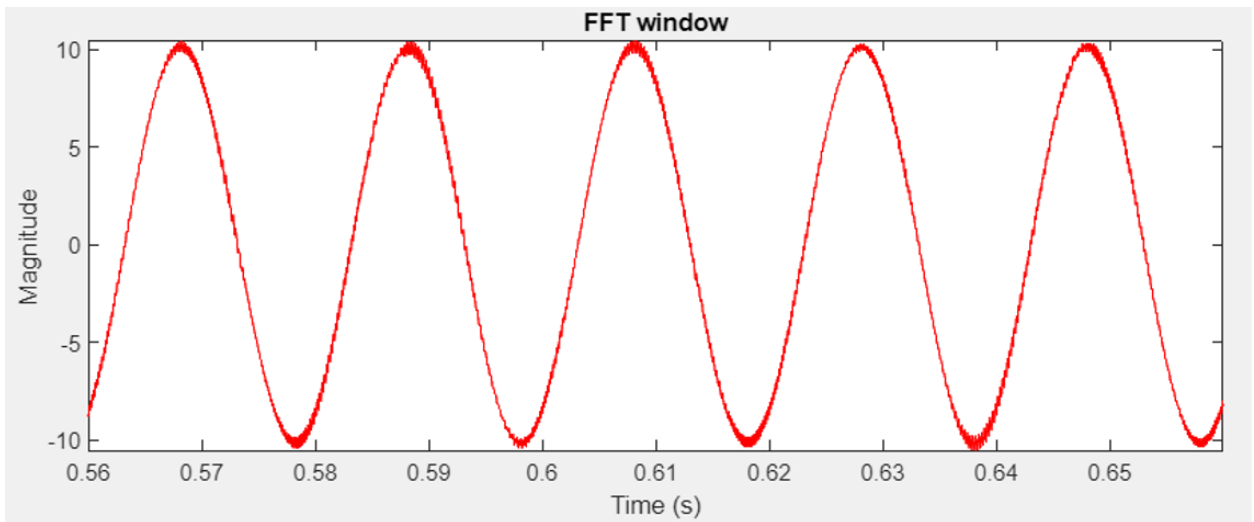
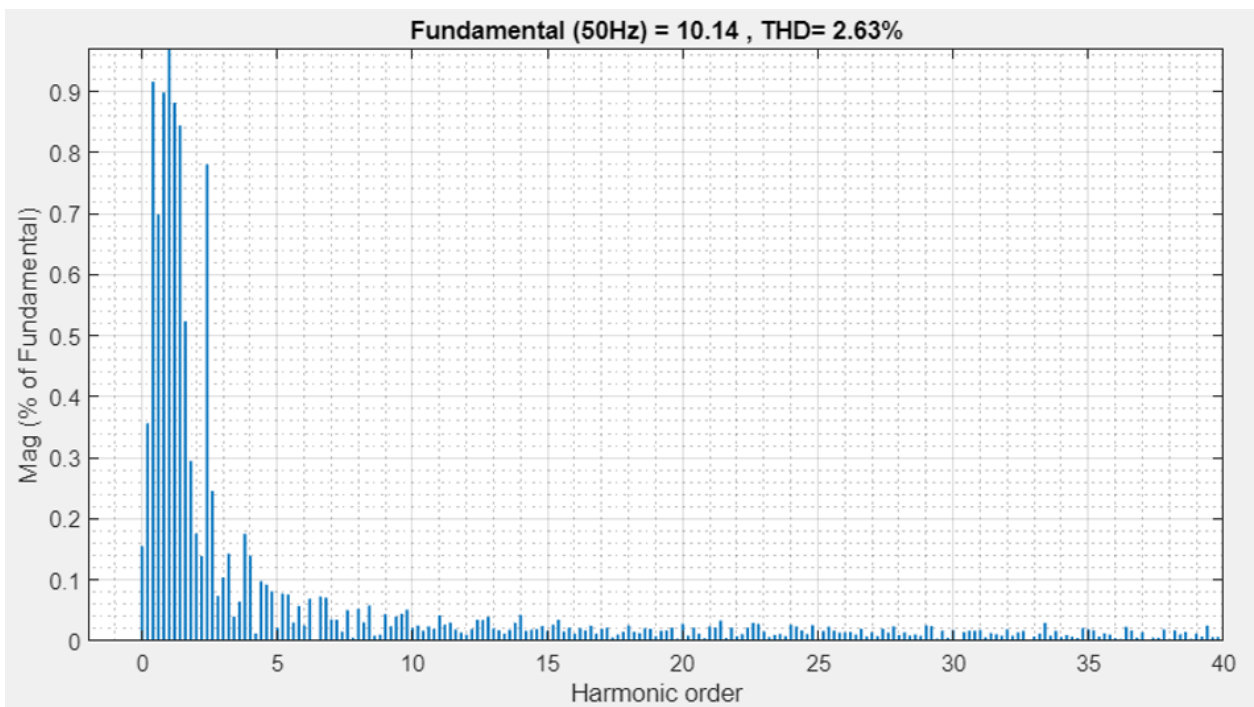


Рисунок 3.9 – Осцилограми робочих параметрів вітроелектричної установки



a)

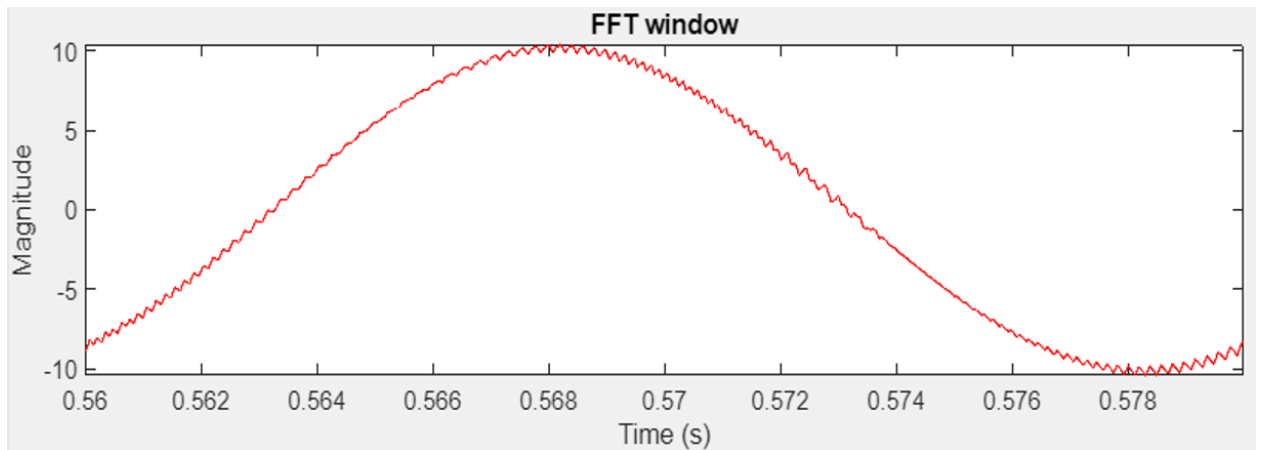


б)

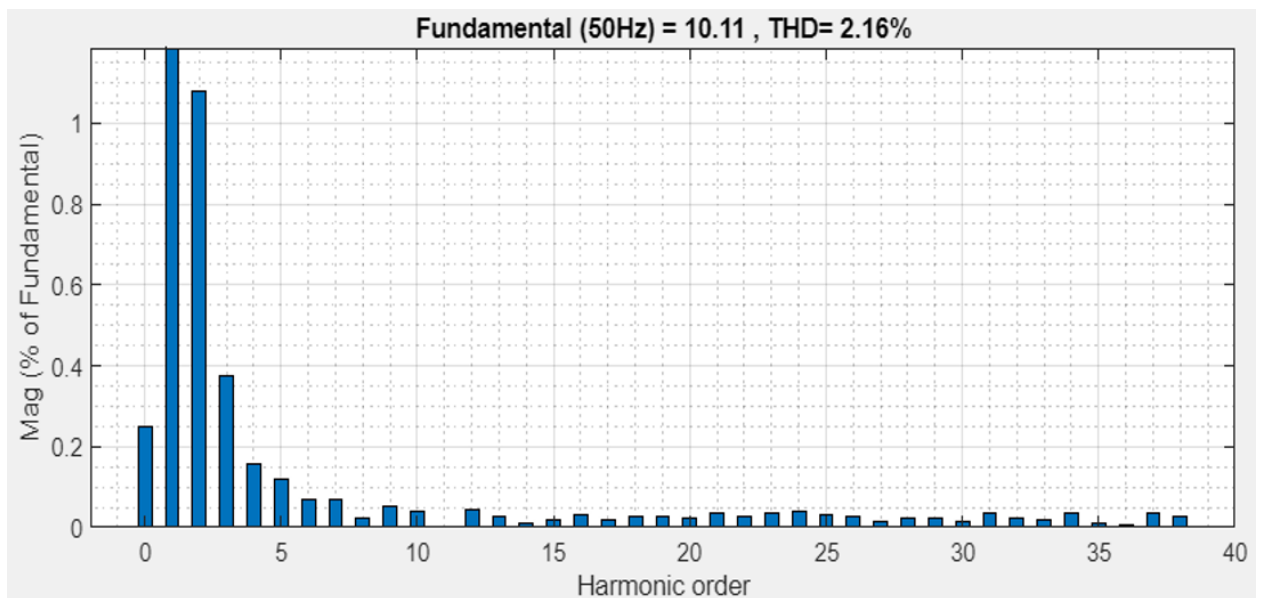
а – часова діаграма; б – спектральна діаграма

Рисунок 3.10 – Результати моделювання струму статора за п'ять періодів

На рис. 3.11 представлено осцилограму струму ротора за один період та результати аналізу його гармонійного складу.



а)

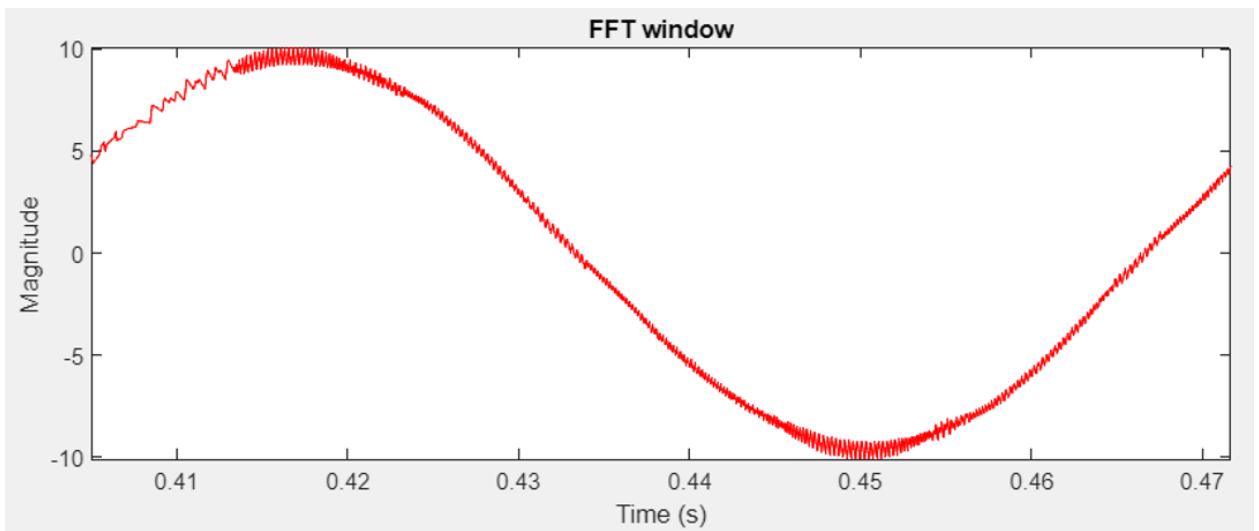


б)

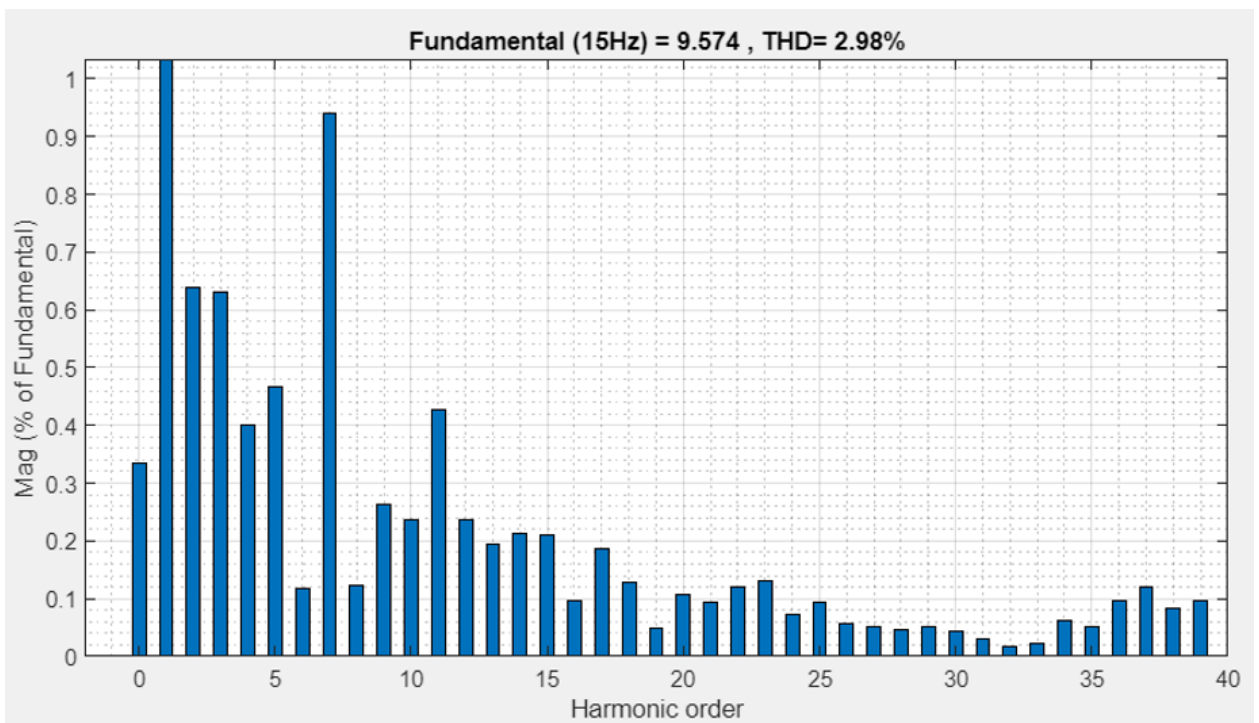
а – часова діаграма, б – спектральна діаграма

Рисунок 3.11 – Результати моделювання струму ротора

На рис. 3.12 зображено отриману за допомогою комп'ютерної імітаційної моделі осцилограму струму ротора асинхронного генератора та відповідний спектр гармонік. Видно, що при зміні швидкості обертання ротора відбувається зсув частоти струму відносно основної гармоніки.



a)



б)

а – часова діаграма; б – спектральна діаграма

Рисунок 3.12 – Результати моделювання струму статора за один період

Отже, на підставі дослідження форми струмів та їх гармонійного складу можна оцінити вплив зміни швидкості обертання на характеристики електричних процесів в системі та підтвердити адекватність розробленої моделі.

Якби активна складова роторного струму асинхронного двигуна була повністю домінуючою, його робота майже не відрізнялася б від машини постійного струму із незалежним збудженням. Єдина відмінність полягає в тому, що у машини постійного струму магнітне поле нерухоме у просторі, в той час як в асинхронного двигуна воно обертається з фіксованою швидкістю.

Якщо використати розроблений перетворювач частоти, що дає змогу формувати струми синхронізовані з електрорушійною силою роторних обмоток, для живлення роторних ланцюгів асинхронної машини, можна отримати електропривід з характеристиками, типовими для систем на основі двигунів постійного струму.

Згідно теорії електричних машин, конструкція асинхронного двигуна дозволяє реалізувати векторне керування за рахунок формування додаткового магнітного потоку в роторі. Це досягається подачею напруги живлення на додаткову обмотку ротора через ковзні кільця. Такий підхід дозволяє незалежно керувати магнітними потоками ротора і статора. В результаті можна отримати гнучку механічну характеристику, подібну до характеристики двигуна постійного струму.

Отже, застосування векторного керування надає асинхронному двигунові властивості, типові для машини постійного струму незалежного збудження. Це пояснюється можливістю регулювання магнітного потоку в роторі незалежно від магнітного потоку статора.

3.5 Висновки до третього розділу

1. Система з асинхронним генератором подвійного живлення є ефективним технічним рішенням для вітроенергетики, що дозволяє створити компактну та надійну конструкцію, перевагами якої є простота і низька вартість конструкції генератора, відсутність постійних магнітів у роторі, можливість незалежного регулювання активної та реактивної потужностей, зменшення потужності перетворювача частоти, що позитивно впливає на

масогабаритні показники. Асинхронний генератор подвійного живлення може працювати в трьох режимах залежно від швидкості обертання ротора, що забезпечує гнучкість його застосування.

2. З метою підвищення показників якості електричної енергії отримуваної від вітроелектричної установки доцільно використовувати у складі системи живлення машини перетворювач частоти на основі активного віденського випрямляча та автономного інвертора напруги. Трирівнева топологія схеми віденського випрямляча дає можливість знизити втрати при комутації транзисторів, покращити гармонійний склад струму та реалізувати реверс передачі потужності без додаткових напівпровідникових ключів. Схема віденського випрямляча є ефективним технічним рішенням для побудови активних випрямлячів та систем з подвійним живленням.

3. Ключовими функціями системи керування напівпровідниковим перетворювачем вітроенергетичної установки є регулювання вихідних параметрів, захист силових елементів, підтримка високого коефіцієнта потужності та моніторинг роботи системи. Для розглянутої задачі було обрано релейне керування через його надійність та простоту, а за допомогою регулятора струму релейного типу можна підтримувати необхідну форму вихідного струму випрямляча.

4. Застосування запропонованої системи керування дозволяє підвищити ефективність вітроустановки за рахунок оптимізації генерованої потужності при змінній швидкості вітру. Крім того, використання активних випрямлячів дає можливість підтримувати заданий коефіцієнт потужності та забезпечувати рекуперацію енергії в мережу.

5. Для подальшого підвищення ефективності доцільно розглянути можливість застосування векторного керування з використанням швидкодіючих цифрових систем на мікроконтролерах або ПЛІС. Це дозволить реалізувати складні алгоритми керування з урахуванням миттєвого значення швидкості вітру для оптимальної стабілізації вихідних параметрів.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Розробка заходів по охороні праці в процесі спорудження та використання обладнання вітрових електростанцій

Актуальність питання охорони праці та пожежної безпеки при будівництві та експлуатації вітрових електростанцій зумовлена кількома чинниками.

В першу чергу технічною складністю та унікальністю цих об'єктів. Вітрові турбіни розташовуються на значній висоті і часто працюють в складних погодних та вітрових умовах. Це вимагає особливих методів монтажу та суворого дотримання заходів безпеки під час будівництва та експлуатації.

По-друге, вітрові установки в процесі роботи мають рухомі механічні вузли великої потужності та електрообладнання високої напруги, що потребує особливих заходів безпеки, заземлення та ізоляції. Це мінімізує ризики ураження електричним струмом та пожежі.

По-третє, розвиток вітрової енергетики потребує спорудження великих вітрових парків на значних територіях. Це вимагає врахування питань безпеки не лише для працівників, але і для місцевих мешканців, довкілля, інших об'єктів та інфраструктури.

Таким чином, впровадження ефективних стандартів і нормативів з охорони праці, пожежної безпеки та технічного регулювання в цій сфері має важливе значення для успішного та безпечного розвитку вітрової енергетики.

Нижче перелічені заходи з охорони праці при спорудженні вітроелектричних установок:

- проведення інструктажів з охорони праці для всіх працівників;

- використання спеціального захисного одягу та обладнання (каска, захисні окуляри, запобіжні страхувальні пояси тощо);
- регулярна перевірка вантажопідйомного обладнання та механізмів на справність перед його використанням;
- встановлення захисних огорож та тимчасових переходів у небезпечних зонах;
- забезпечення належного освітлення робочих місць;
- дотримання правил безпеки під час роботи на висоті та при використанні драбин і риштувань;
- встановлення попереджувальних знаків та написів в місцях виконання робіт;
- забезпечення безперешкодного доступу до засобів пожежогасіння;
- проведення інструктажів з правил електробезпеки при монтажних роботах

Актуальність питання електробезпеки під час експлуатації перетворювачів частоти на вітрових електростанціях зумовлена тим, що інвертори та випрямлячі вітроустановок працюють з високими напругами та сильними електричними струмами. Це створює підвищений рівень небезпеки ураження персоналу електричним струмом. Можливі несправності та перепади напруги в роботі перетворювачів можуть викликати короткі замикання та займання електрообладнання, а також поширення пожежі. Силове електричне обладнання, яке працює на значній висоті вітрової турбіни важкодоступне для технічного обслуговування та ремонту, що збільшує зазначені ризики. Відсутність досвіду або неуважність персоналу під час монтажних та ремонтних робіт також може призвести до травмування чи летальних випадків.

Тому розробка чітких правил, процедур та інструкцій з електробезпеки, а також постійний контроль їх дотримання є вкрай необхідними для запобігання нещасним випадкам та аваріям на вітрових електростанціях. Це вимагає постійної уваги і є актуальним завданням.

З метою виконання вимог з електробезпеки було розроблено основні заходи, які можна запропонувати для експлуатації перетворювачів частоти на вітрових електростанціях:

- регулярне технічне обслуговування електрообладнання і перевірка стану ізоляції;
- встановлення захисного заземлення та захисних огорожень навколо електроустановок з метою забезпечення недоступності струмоведучих частин для обслуговуючого персоналу;
- використання попереджувальних знаків, плакатів для позначення небезпечних зон;
- застосування засобів індивідуального захисту - діелектричних рукавичок, ізолюючих підставок, інструментів з ізольованими ручками;
- проведення інструктажів та навчання персоналу з питань електробезпеки;
- використання автоматичних вимикачів, запобіжників, релейних захистів та блокувань у електричних мережах;
- забезпечення безперешкодного доступу до засобів пожежогасіння.

Дотримання цих та інших норм і правил дозволить підвищити рівень електробезпеки та знизити ризики травматизму при експлуатації електрообладнання вітроустановок.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Здійснено аналітичний огляд вітроенергетичних комплексів, зокрема генераторів електричної енергії та їхніх властивостей, а також перетворювачів частоти для узгодження показників генератора з електромережею.

2. При виборі електричної частини вітроенергетичного комплексу було обрано електропривід на базі асинхронного двигуна подвійного живлення. Такий вибір зумовлений наступними перевагами: номінальна потужність перетворювача частоти становить 25-30% від величини номінальної потужності генератора, що оптимізує масогабаритні характеристики всієї вітроенергетичної системи, зменшує витрати енергії на перемикання силових ключів в перетворювачі, а також знижує теплові втрати завдяки зменшенню загальної потужності перетворювача.

Застосування асинхронного електродвигуна з подвійним живленням дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії вітрової установки та забезпечити широкий діапазон регулювання швидкості обертання вітрової турбіни. Крім цього, така конструкція має підвищену надійність та не потребує системи щіткового контакту, на відміну від електромашин постійного струму. Все це суттєво спрощує експлуатацію вітроагрегату та здешевлює витрати на обслуговування.

3. З метою підвищення енергоефективності була розроблена система керування перетворювачем частоти на основі віденського випрямляча. Таке керування дозволяє здійснювати незалежне регулювання активної та реактивної потужності.

В даній роботі для керування випрямлячем обрано більш простий та надійний метод – релейне керування. Незважаючи на певні недоліки у порівнянні з векторним, воно дозволяє отримати задовільні показники регулювання при мінімальних витратах на розробку та впровадження системи.

Керування на базі віденського випрямляча має вищу точність та швидкодію в порівнянні з традиційними схемами. Крім цього, така система дозволяє компенсувати реактивну потужність навантаження як ємнісного, так і індуктивного характеру, розширюючи функціональні можливості всього вітроенергетичного комплексу.

4. Шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання було досліджено основні режими функціонування розробленої системи керування та отримано спектри струмів електромережі та роторної обмотки. Також був визначений коефіцієнт несинусоїдальності струму, що склав 2,46%. Таким чином, комп'ютерне моделювання надало цінну інформацію для оптимізації параметрів та алгоритмів керування з метою підвищення якості та надійності генерованої електроенергії.

5. Запропонована трифазна схема активного випрямляча на основі конфігурації віденського випрямляча відповідає усім вимогам та може бути ефективно використана у вітроенергетичних системах для забезпечення якісної передачі електроенергії в мережу.

Проведене моделювання підтвердило, що даний випрямляч здатний підтримувати високий коефіцієнт потужності та низький рівень вищих гармонік. Зокрема, сумарний коефіцієнт гармонік вхідного струму (THD) не перевищує 5%, що задовольняє нормативним вимогам якості електроенергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков; Міністерство освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
2. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
3. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина I / Уклад.: О.П. Голик, Р.В. Жесан, І.В. Волков [та ін.]. – Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2020 – 192 с.
4. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: Підручник / С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
5. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії: Курс лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М.П. Кузнецов, О.А. Мельник – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 304 с.
6. Оніпко О.Ф. Вітроенергетика та енергетична стратегія / О.Ф. Оніпко, Б.П. Коробко, В.М. Миханюк. – К.: УАН, Фенікс, 2008. – 168 с.
7. Сиротюк С.В. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру: Навч. посіб. / С.В. Сиротюк, В.М. Боярчук, В.П. Гальчак. – Львів: «Магнолія 2006», 2018. – 182 с.
8. СОУ НЕК 341.001:2019 Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України. НПЦР ОЕС України, 2019.
9. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-68:2012 «Стійкість енергосистем. Керівні вказівки». Міненерго України, 2112.
10. СОУ-Н ЯЕК 04.156:2009 Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України. Настанова. Чинний від 2009.
11. ДСТУ 3896:2007 Вітроенергетичні установки та вітроелектричні

станції. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 2008. – 24 с

12. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.

13. Комплекси генерування електроенергії з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації на базі машини подвійного живлення. Монографія / Шаповал І.А., Михальський В.М., Артеменко М.Ю., Поліщук С.Й., Чопик В.В. Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2020, 241 с. ISBN 978-966-02-9402-8

14. Схемотехніка: Пристрої цифрової електроніки [Електронний ресурс]: в 2 т.: підручник для студентів, що навчаються за спеціальності «Електроніка» / В.М. Рябенський, В.Я. Жуйков, Ю.С. Ямненко, А.В. Заграничний; НТУУ «КПІ». – Київ, 2016. – 757 с.

15. Johnson G. Wind Energy Systems. New York, NY: Prentice Hall, 1985.

16. Murray A. Sensorless Motor Control Simplifies Washer Drives// Power Electronics Technology, June2006. – P.14-21.

17. Pat. No. US 2006/0210406 A1 USA: F04B 17/02. Wind Turbine with hydraulic transmission. Harvey A., MacConnell D. Pub. date: sep. 21, 2006.

18. Sathyajith M. Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics Ю. М. Sathyajith. Springer, 2006, 246 p. ISBN-10: 3540309055

19. Contemporary frequency converters in electric drive systems: tutorial / M.V. Zagirnyak, T.V. Korenkova, A.P. Kalinov, A. I. Gladyr, V.G. Kovalchuk. – 2nd edition, revised and corrected – Kharkiv : Publisher “Tochka”, 2017. – 206 p

20. De Battista H. Dynamical variable structure controller for power regulation of wind energy conversion systems/ De Battista H., R.J .Mantz // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2004. – №19(4). – p. 756–763.

21. Isidori A. Nonlinear control systems/ A. Isidori //Springer-Verlag, Berlin, 1989. 35. Lee D.C. DC-bus voltage control of three-phase AC/DC PWM converters using feedback linearization/ D.C. Lee, G.M. Lee, K.D. Lee // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2000. – №36(3). – p.826 – 833.

22. Akhrif O. Application of a multivariable feedback linearization scheme

for rotor angle stability and voltage regulation of power systems/ O. Akhrif, F.A. Okou, 180 F.A. Dessaint, R. Champagne// IEEE Transactions on Power Systems. – 1999. – №14(2). – p. 620–628.

23. Datta R. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system/ R. Datta, V.T. Ranganathan // IEEE Transactions on Energy Conversion.– 2003. – № 18(1). – p. 163–168.