

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
Олександр Дідик
«___» _____ 20__ р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕГУЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ»**

Виконав здобувач вищої освіти
4 курсу, групи АК-19
ОПП «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
_____ Шаврунов О.І.
«___» _____ 20__ р.

Керівник роботи
професор, к.т.н.
_____ Віктор Каліч
«___» _____ 20__ р.

Рецензент
доцент, к.т.н. кафедри ЕТСтАЕМ
_____ Василь Зінзура
«___» _____ 20__ р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“__” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
СТУДЕНТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ
ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Шаврунова Олега Ігоровича

1. ТЕМА РОБОТИ «Автоматизація регулювання перетворювачами електричної енергії»

2. КЕРІВНИК РОБОТИ

Каліч Віктор Михайлович, к.т.н., професор

3. СТРОК ПОДАННЯ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ 26.06.2023 року

4. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Підвищення енергоефективності процесу керування електропостачанням з вітроелектричними установками, шляхом покращення та удосконалення роботи системи за рахунок розробки частотного перетворювача напруги.

5. Перелік графічного матеріалу структурні схеми ВЕУ; автономний інвертор функціональна схема; частотний перетворювач напруги схема електрична структурна; частотний перетворювач напруги схема електрична принципова.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ З/П	НАЗВА ЕТАПІВ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	СТРОК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ РОБОТИ	ПРИМІТКА
1	Обґрунтування до розв'язання задачі частотного перетворення та стабілізації параметрів електричної енергії	11.04.2023	
2	Огляд технічних рішень побудови частотного перетворювача напруги	28.04.2023	
3	Опис обраних технічних рішень та конструкцій	15.05.2023	
4	Розробка апаратної частини частотного перетворювача	02.06.2023	
5	Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність роботи частотного перетворювача напруги та опис організації робіт пов'язаних із застосуванням приладу	16.06.2023	
6	Оформлення пояснювальної записки бакалаврської роботи та графічної частини	26.06.2023	

Дата видачі завдання

«___» _____ 20__р.

Підпис керівника

_____ (прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 20__р.

Підпис здобувача

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота присвячена розробці частотного перетворювача напруги для системи електропостачання з вітроелектричними установками. Актуальність даної теми полягає в тому, що використовуючи асинхронні двигуни в приладах, необхідно використовувати підлагоджений струм та напругу, яку не видають лінії електропередач.

В даній роботі розроблений пристрій для перетворення напруги з частотою, що можна регулювати шляхом широтно-імпульсної модуляції. Основу приладу складає мікроконтролер, що виконує всі основні функції: сприйняття сигналу, що подається, управління перетвореннями, відображення на індикаторах стану приладу.

ABSTRACT

The bachelor thesis is devoted to the development of a voltage frequency converter for the power supply system with wind power plants. The relevance of this topic lies in the fact that when using asynchronous motors in devices, it is necessary to use adjusted current and voltage that are not provided by power lines.

In this work, a device was developed for voltage conversion with a frequency that can be adjusted by pulse-width modulation. The basis of the device is a microcontroller that performs all the main functions: reception of the supplied signal, control of transformations, display on the indicators of the device status.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ	5
1.1. Обґрунтування до розв'язання задачі частотного перетворення та стабілізації параметрів електричної енергії	5
1.1.1. Основні принципи перетворення та стабілізації електричної енергії	5
1.1.2. Огляд існуючих технічних рішень використання частотних перетворювачів напруги	10
1.2. Етапи розв'язання задачі розробки частотного перетворювача напруги для систем електропостачання з вітроелектричними установками	15
1.3. Висновки до розділу	16
2. ОБґРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ ПОБУДОВИ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ	17
2.1. Принцип роботи частотного перетворювача та критерії його вибору	17
2.2. Огляд технічних рішень побудови частотного перетворювача напруги	22
2.3. Висновки до розділу	28
3. ОПИС ОБРАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА КОНСТРУКЦІЙ	29
3.1. Підвищення ефективності роботи частотного перетворювача напруги	29

3.2. Вибір мікроконтролера	34
3.3. Висновки до розділу	40
4. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	41
4.1. Розробка структурної схеми пристрою	41
4.2. Розробка принципової схеми приладу	42
4.3. Розробка друкованої плати	48
4.4. Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність роботи частотного перетворювача напруги	51
4.4.1. Розрахунки надійності роботи частотного перетворювача напруги	51
4.4.2. Розрахунок однофазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром	54
4.5. Опис організації робіт пов'язаних із застосуванням приладу	64
4.6. Висновки до розділу	68
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ВСТУП

Актуальність теми. Задачі енергозбереження і ефективного використання електроенергії є дуже важливими і вирішуються різними методами, частина з яких заснована на виборі режимів роботи, які б забезпечували мінімізацію споживання електроенергії електротехнічним обладнанням. Одним з основних шляхів реалізації таких режимів є оптимальне керування перетворювачами електричної енергії, які б забезпечували роботу електротехнічних пристроїв у відповідному режимі.

Окремою задачею в цьому напрямку є ефективне використання і розподіл енергії в локальному об'єкті – замкненій системі джерел енергії, до яких відносяться відновлювальні, резервні джерела і накопичувачі енергії, для живлення великої кількості різнорідних електротехнічних навантажень.

Незважаючи на велику кількість досліджень способів керування перетворювачами електричної енергії з метою забезпечення оптимальних режимів роботи електротехнічних навантажень, актуальною залишається задача створення практичних методів керування, які б забезпечували задану якість вхідних і вихідних характеристик системи електроживлення. Останнє перешкоджає широкому запровадженню і ефективному використанню існуючих систем електропостачання на базі відновлюваних джерел енергії.

Тому робота, спрямована на підвищення показників енергоефективності систем електропостачання, шляхом розробки частотного перетворювача напруги є актуальною.

Мета і завдання дослідження. Метою бакалаврської роботи є підвищення енергоефективності процесу керування електропостачанням з вітроелектричними установками, шляхом покращення та удосконалення роботи системи за рахунок розробки частотного перетворювача напруги.

Для досягнення мети сформульовано такі завдання:

1. Обґрунтувати принцип роботи частотного перетворювача напруги та критерії його вибору;
2. Розробити схеми роботи частотного перетворювача напруги, згідно обраного принципу побудови приладу.

Об'єкт дослідження – процеси перерозподілу електричної енергії.

Предмет дослідження – система електропостачання з вітроелектричними установками.

Методи досліджень ґрунтуються на основних положеннях математичного моделювання, теорії ймовірності та надійності роботи.

Практичне значення одержаних результатів. Застосування запропонованих рішень перетворювачів і стабілізаторів, дозволить значно поліпшити технічні характеристик ВЕУ.

Апробація бакалаврської роботи. Було прийнято участь в LVII науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти університету до «Дня науки-2023». Секція автоматизації виробничих процесів (20 квітня 2023 року, м. Кропивницький). Тема доповіді: "Структурна схема вітроустановки з штучною комутацією силових електронних приладів".

Структура та обсяг бакалаврської роботи. Бакалаврська робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Основна частина викладена на 71 сторінці друкованого тексту, містить 20 рисунків та 3 таблиці.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ

1.1. Обґрунтування до розв'язання задачі частотного перетворення та стабілізації параметрів електричної енергії

1.1.1. Основні принципи перетворення та стабілізації електричної енергії

Перетворювачі частоти є єдиним різновидом перетворювачів енергії для електроприводів змінного струму, за допомогою яких можна реалізувати глибоке та економічне регулювання швидкості. Саме ці перетворювачі внаслідок бурхливого прогресу у виробництві цілком керованих напівпровідникових ключів набули останніми роками найбільш динамічного розвитку, зробивши асинхронні та синхронні електроприводи конкурентноспроможними порівняно з електроприводами постійного струму.

Перетворювач частоти (автоматичний регулятор частоти або інвертор) - це пристрій, що перетворює вхідну синусоїдну напругу фіксованої частоти та амплітуди у вихідну імпульсну напругу змінної частоти та амплітуди за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), яка формує в обмотках двигуна синусоїдний струм. Таким чином, плавно збільшуючи частоту і амплітуду напруги, що подається на статорні обмотки асинхронного електродвигуна, можна забезпечити плавне регулювання швидкості обертання валу електродвигуна [1, 2, 8, 9, 19].

Перетворювач частоти забезпечує плавний пуск і зупинку двигуна, а також дозволяє змінювати напрям обертання двигуна. Перетворювач частоти відображає на цифровому дисплеї основні параметри системи: задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність,

момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача тощо.

Керування перетворювачем частоти можна здійснювати з вбудованої виносної цифрової панелі керування, або за допомогою зовнішніх сигналів. У другому випадку швидкість обертання задається аналоговим сигналом 0-10 В або 4-20 мА, а команди пуску, зупинки й зміни режимів обертання подаються дискретними сигналами. Можна відображати параметри системи у вигляді графіків на виносній графічній панелі керування [1].

Існує можливість управління перетворювачем частоти через послідовний інтерфейс (RS-232, RS-422 або RS-485) або від зовнішнього програмованого логічного контролера (ПЛК) з використанням спеціального протоколу (Profibus, Interbus, Device-net, Modbus тощо). В даний час, асинхронний електродвигун став основним пристроєм в більшості електроприводів.

Все частіше для управління ним використовується частотний перетворювач - інвертор з ШІМ регулюванням. Таке управління дає масу переваг, але і створює деякі проблеми вибору тих чи інших технічних рішень.

Для отримання максимальних показників роботи електроприводу, таких як: коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії, перевантажувальна здатність, плавність регулювання, довговічність, потрібно правильно вибирати співвідношення між зміною робочої частоти й напруги на виході частотного перетворювача.

Функція зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження. При постійному моменті, напруга на статорі електродвигуна повинна регулюватися пропорційно частоті (скалярне регулювання $U/F = \text{Const}$). Для вентилятора, наприклад, інше співвідношення - $U/F \cdot F = \text{Const}$. Якщо збільшуємо частоту в 2 рази, то напругу потрібно збільшити в 4 (векторне регулювання). Є приводи і з більш складними функціями регулювання [1, 19].

Функціонально перетворювач частоти включає в себе три складові

частини - гетеродин, змішувач і вихідний смуговий фільтр. Гетеродин являє собою генератор сигналу синусоїдальної форми, що настроюється, або з фіксованою частотою. Змішувач - основна частина перетворювача, нелінійний електронний пристрій, в якому відбувається утворення потрібного спектру.

Принцип дії змішувача полягає в тому, в результаті нелінійних процесів утворюються комбінаційні гармоніки, частоти яких дорівнюють різницям або сумах частот гармонік вхідних сигналів, або частот кратних частотам вхідних гармонік. Амплітуди отриманих комбінаційних гармонік пропорційні амплітудам вхідних, таким чином, кожен з наборів комбінаційних гармонік (різницевих, сумарних, різницевих і сумарних кратним) еквівалентний спектру вхідного сигналу, зрушеному по частоті [1].

Смуговий фільтр призначений для селекції потрібного набору гармонік, звичайно виконаний за стандартною схемою смугового фільтра на LC-елементах.

Конструктивно перетворювач частоти може бути виконаний у вигляді єдиного пристрою, в тому числі на інтегральній мікросхемі з додатковими елементами, у вигляді двох блоків (блок гетеродина і блок змішувача з фільтром) або, в деяких випадках, в іншому вигляді, наприклад, в установках для вимірювання послаблень змішувач і фільтр являють собою відокремлені пристрої, а в якості гетеродина використовується сторонній вимірювальний генератор, який не входить в комплект установки.

Трифазна система обмоток статора двигуна створює магнітне поле, що обертається з кутовою частотою $\omega = 2\pi f/p$, де F - частота живлячої напруги, Гц; p - число пар полюсів статора [1, 2, 8, 9, 19].

Щоб ефективно регулювати частоту обертання ротора, потрібно змінювати частоту обертання поля статора. Щоб при цьому зберегти момент, одночасно з частотою необхідно змінювати і амплітуду напруги. Тут частота - незалежна змінна, а напругу при даній частоті встановлюють виходячи з

того, як повинна змінюватися механічна характеристика двигуна, залежно від частоти. Такий спосіб регулювання швидкості електроприводу з асинхронним двигуном називається частотним, а залежність напруги від частоти - законом частотного регулювання.

Зокрема, щоб забезпечити незалежності моменту від частоти, необхідно витримувати умову $U/F = \text{Const}$. Але справедливо воно лише при нехтуванні активним опором обмотки статора і прийнятно тільки для двигунів великої потужності. У двигунів малої або середньої потужності нехтування активним опором обмотки статора призводить до того, що при зміні частоти сталість моменту не витримується [1, 2, 8, 9, 19].

Для підтримки моменту близьким до номінального, в усьому інтервалі зміни частоти обертання застосовують компенсацію - завищують напругу щодо закону $U/F = \text{Const}$. Компенсація носить таку назву, тому що добавка напруги пропорційна активному опору обмотки статора і струму.

Коректуючи залежності напруги від частоти, можна забезпечити бажану залежність двигуна від частоти напруги живлення. Підвищення жорсткості механічної характеристики в області малих значень частоти може бути досягнуто збільшенням напруги відносно лінійного закону зображеного на рис. 1.1 [2, 8, 9]. При частоті вище номінальної подальше збільшення напруги припиняють.

Складається з некерованого випрямляча мережевої напруги, згладжуючого фільтра, інвертора постійної напруги в трифазне і системи управління. Фільтр на виході випрямляча не тільки згладжує пульсації, але й забезпечує повернення реактивної енергії двигуна під час перехідних процесів. Інвертор найчастіше виконують за схемою трифазного моста, що складається з шести електронних ключів S1-S6. Регулювання частоти і амплітуди надходить на двигун трифазної напруги здійснюється шляхом зміни частоти і шпаруватості, керуючих ключами імпульсів, що генеруються системою управління.

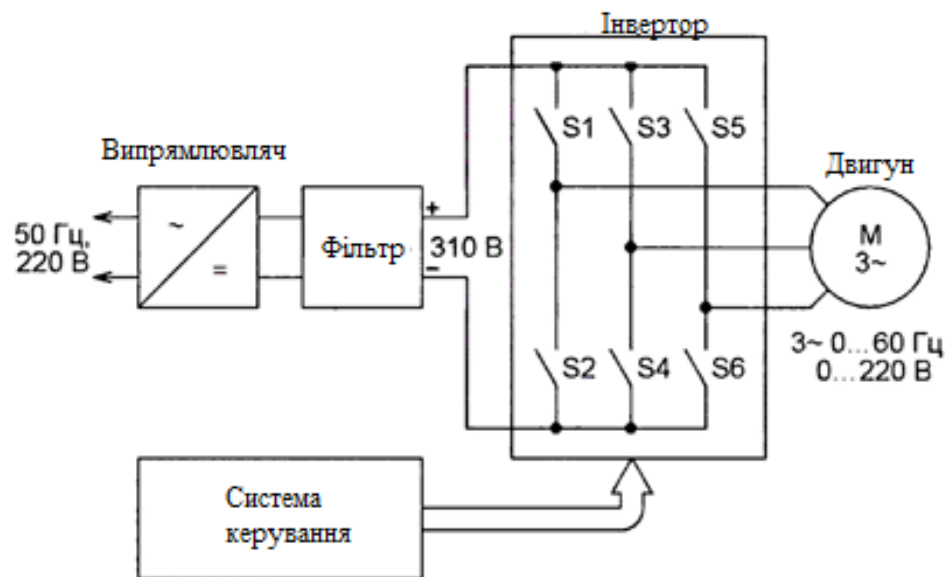


Рисунок 1.1 - Схема перетворювача однофазної напруги в трифазну

Широтно-імпульсні перетворювачі (ШІП) (переривники постійної напруги) призначені для регулювання напруги споживачів постійного струму (найчастіше - електричних двигунів). Використовуються в електроприводах верстатів з програмним керуванням, промислових роботів, у магістральному та міському електротранспорті. Живлення вони отримують від джерела нерегульованої постійної напруги (некерованих випрямлячів, мережі постійного струму або акумуляторних батарей) [2, 8, 9].

У ШІП постійної напруги використовується принцип імпульсного регулювання вихідної напруги. При імпульсному регулюванні за допомогою керованого ключа навантаження періодично відокремлюється від джерела постійної напруги. Схема найпростішого послідовного ШІП зображена на рис. 1.2 [2].

Оскільки знак напруги живлення не змінюється, то природна комутація ключів за допомогою цієї напруги неможлива. Тому в ШІП постійної напруги використовують цілком керовані ключі (транзистори, двоопераційні тиристори) або одноопераційні тиристори з спеціальними схемами штучної комутації. ШІП постійної напруги є автономними

перетворювачами енергії, оскільки моменти комутації ключів не залежать від рівня та форми напруги живлення.

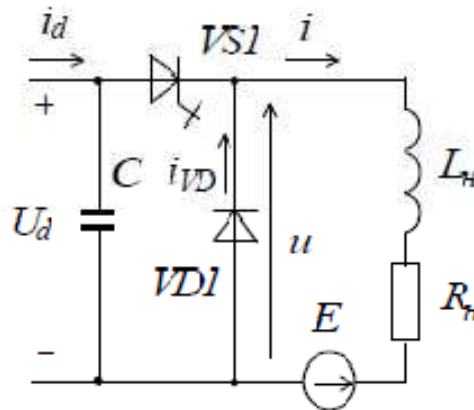


Рисунок 1.2 – Послідовний ШП

1.1.2. Огляд існуючих технічних рішень використання частотних перетворювачів напруги

В роботі [3] розглянуто структурно-схемні рішення та особливості роботи перетворювачів і стабілізаторів параметрів електроенергії вітроелектричних установок (ВЕУ) та сонячних батарей (СБ). На рис. 1.3 наведена функціональна схема пристрою стабілізації напруги та частоти струму синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ), що входить до складу ВЕУ [3, 5, 15].

Стабілізація напруги генератора здійснюється за рахунок зміни величини струму в обмотці підмагнічування СГПМ шляхом зміни часу відкриття транзистора VT1. Магнітний потік, створюваний обмоткою ОП, спрямований зустрічно робочому магнітного потоку, створюваному

статорними обмотками СГПМ, змінюючи ступінь насичення його магнітопроводу.

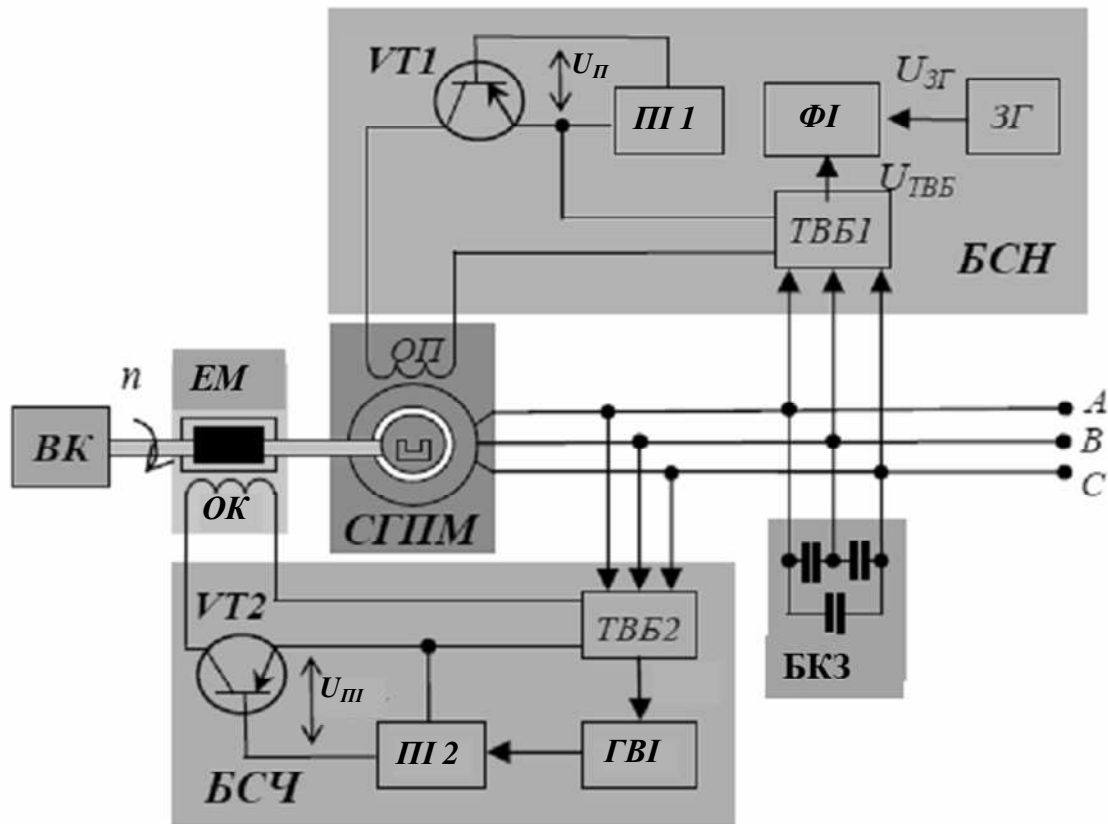


Рисунок 1.3 – Функціональна схема пристрою стабілізації напруги та частоти струму синхронного генератора з постійними магнітами:

ВК – вітроколесо; ЕМ – електромагнітна муфта;

ОК – обмотка керування ЕМ; ПІ - підсилювач імпульсів;

СГПМ - синхронний генератор з постійними магнітами;

ФІ - формувач імпульсів; ЗГ - задаючий генератор;

ТВБ - трансформаторно-випрямляючий блок;

ГВІ - генератор випряючих імпульсів; БСЧ – блок стабілізації частоти; БСН – блок стабілізації напруги;

ОП – обмотки підмагнічування; БКЗ – блок конденсаторів збудження

При підвищенні величини напруги на висновках А, В і С генератора блок стабілізації напруги БСН збільшує час відкритого стану транзистора VT1, а при зменшенні - зменшує час його відкритого стану, змінюючи величину магнітного потоку в обмотці ОП, забезпечуючи стабілізацію напруги на висновках А, В і С генератора.

Стабілізація частоти струму СГПМ здійснюється за рахунок зміни величини струму в обмотці управління електромагнітною муфтою, розміщеної на одному валу з вітроколеса ВЕУ. При підвищенні частоти струму СГПМ блок стабілізації частоти БСЧ збільшує час відкритого стану транзистора VT2, а при зменшенні - зменшує час відкритого його стану. Це призведе до збільшення або зменшення струму в обмотці управління ОУ електромагнітної муфти ЕМ, і, відповідно, до збільшення або зменшення крутного моменту на валу ротора генератора, забезпечуючи стабілізацію частоти обертання валу вітроколеса і стабілізації частоти струму відповідно.

В роботі [4] автором було розроблено методику ідентифікації параметрів силових кіл вентильних перетворювачів і вироблення керуючого впливу, яка полягає у переведенні основних обчислювальних операцій у мікропроцесорній системі до спектральної області, обчисленні та обробці спектрів дискретних функцій і дозволяє здійснювати аналіз процесів та керування вентильними перетворювачами. Створені на базі розробленої методики мікропроцесорні алгоритми керування з ідентифікацією характеризується підвищеною швидкістю.

В роботі [5] наведено особливості використання асинхронних генераторів на малих гідроелектростанціях в електричних мережах енергосистем. Показано, що застосування асинхронних генераторів для відновлення малих ГЕС забезпечує спрощення проекту електричної частини малої ГЕС, а також зниження вартості її реалізації. Аналіз математичного представлення експлуатаційних видатків для малих ГЕС з різними типами генераторів дозволив встановити діапазон номінальних потужностей

асинхронних генераторів, що відповідає їх ефективному використанню – 0,1–2,0 МВт.

Частотний перетворювач розроблено в роботі [6]. Частотний перетворювач належить до електротехніки і може бути використаний при виробництві інверторів з симетричними IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) модулями з відповідними драйверами керування, які призначені для асинхронних або синхронних електроприводів. Частотний перетворювач містить IGBT-модулі, що включають щонайменше два півмости, які містять верхні та нижні IGBT-транзистори зі зворотною провідністю і драйвера керування цими транзисторами. Верхні IGBT-транзистори виконані з прямою провідністю. При цьому драйвера, які керують верхніми IGBT-транзисторами, виконані зі зворотною структурою побудови і підключені до одного джерела живлення зі зворотною полярністю по відношенню до структури побудови та джерела живлення драйверів, які керують нижніми IGBT-транзисторами. Технічним результатом є спрощення схеми керування за мінімальною кількістю джерел живлення в ланцюгах керування.

В роботі [7] розроблено частотний перетворювач оптичної потужності з фотодіодним чутливим елементом. Частотний перетворювач оптичної потужності з фотодіодним чутливим елементом, що містить джерело постійної напруги, індуктивний елемент, в подальшому індуктивність, перший двозатворний МДН-транзистор, перший і другий конденсатори, резистор, загальну шину, перший і другий фотодіоди, причому катод першого фотодіода підключено до першого виводу першого конденсатора, другий вивід другого конденсатора, катод першого фотодіода і другий полюс джерела постійної напруги підключено до загальної шини. Додатково введено другий і третій двозатворні МДН-транзистори, причому перший затвор другого двозатворного МДН- транзистора з'єднано з другим виводом першого конденсатора і з першим виводом резистора, а витік другого двозатворного МДН-транзистора з'єднано з другим затвором і стоком

першого двозатворного МДН-транзистора, другий затвор другого двозатворного МДН-транзистора з'єднано із стоком другого двозатворного МДН-транзистора, із стоком і другим затвором третього двозатворного МДН-транзистора, перший затвор третього двозатворного МДН- транзистора з'єднано із катодом другого фотодіода, причому анод першого фотодіода з'єднано з першим затвором першого двозатворного МДН-транзистора, а витік першого двозатворного МДН-транзистора підключено до анода другого фотодіода і до першого виводу індуктивності, який утворює першу вихідну клему, при цьому другий вивід індуктивності підключено до першого виводу другого конденсатора, до другого виводу резистора і до першого МДН-транзистора і другого полюсу першого джерела постійної напруги, які утворюють загальну шину, до якої підключена друга вихідна клема.

Розглянуті принцип дії, режими роботи та основні характеристики переривників постійного струму, автономних інверторів напруги та струму, двоступеневих та безпосередніх перетворювачів частоти, способи керування ними та їх захисту. Особливу увагу приділено специфіці використання перетворювачів у складі електропривода (роботі на проти-ЕРС та в режимі рекуперації), регульовальним та зовнішнім характеристикам, інверторам з ШІМ та безпосереднім перетворювачам частоти, поліпшенню форми вихідної напруги та енергетичних показників перетворювачів [8].

Як видно, існують розробки з роботи частотних перетворювачів, стабілізаторів роботи та автономних інверторів для систем енергопостачання. Однак, дослідженню роботи саме частотних перетворювачів напруги для систем енергопостачання з вітровими установками приділено мало уваги.

Таким чином, доцільним та актуальним є питання розробки частотного перетворювача для систем енергопостачання з вітровими установками.

1.2. Етапи розв'язання задачі розробки частотного перетворювача напруги для систем електропостачання з вітроелектричними установками

Задачу розробки та дослідження роботи частотного перетворювача напруги для систем енергопостачання з вітровими установками запропоновано розв'язувати у декілька етапів, які наведені на рис. 1.4.

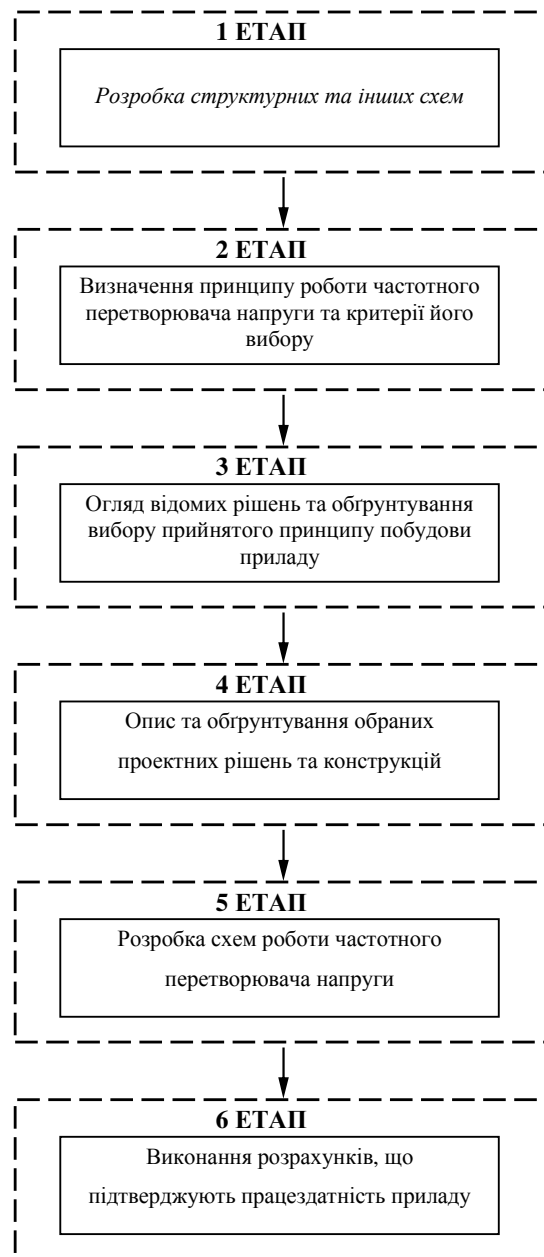


Рисунок 1.4 – Етапи розробки частотного перетворювача напруги

У промисловості перетворювач частоти повністю виправдовується в застосуванні. Даний інвертор допомагає знизити виробничий шум від роботи двигунів, звести нанівець пікові навантаження на загальну електромережу будівлі, захистити двигун від коротких замикань, які нерідко можуть виникати при стрибках напруги, перевантажень, перегрівів і подібних проблем, знизити споживання електроенергії, а також плавно управляти частотою обертання двигуна і багато іншого.

На практиці, наприклад, встановивши перетворювач частоти струму на електродвигун системи кондиціонування, можна без зайвих проблем підтримувати в приміщеннях постійну температуру і вологість. А ось якщо він буде працювати на моторі ліфта або електropідйомника, то можна розраховувати на плавний набір швидкості і зупинку підйомника. Плюси очевидні - це дозволяє значно знизити механічні навантаження на агрегати ліфта, а також заощадити до 40% електроенергії, зазвичай їм споживаної.

1.3. Висновки до розділу

Виходячи з наведеного у даному розділі можна зробити наступні висновки:

1. Існують розробки з роботи частотних перетворювачів, стабілізаторів роботи та автономних інверторів для систем електропостачання. Однак, дослідженню роботи саме частотних перетворювачів напруги для систем електропостачання з вітроелектричними установками приділено мало уваги.

2. Наведено етапи розробки частотного перетворювача напруги для систем електропостачання з вітроелектричними установками.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ ПОБУДОВИ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ

2.1. Принцип роботи частотного перетворювача та критерії його вибору

Частотний перетворювач електронного типу - це пристрій, що складається з випрямляча (моста постійного струму), що перетворює змінний струм промислової частоти в постійний, і інвертора (іноді з ШІМ), що перетворює постійний струм в змінний необхідних частоти і амплітуди. Вихідні тиристори (GTO) або транзистори (IGBT) забезпечують необхідний струм для живлення електродвигуна [2].

Електронний перетворювач частоти складається з схем, до складу яких входять тиристор або транзистор, які працюють в режимі електронних ключів. В основі керуючої частини знаходиться мікропроцесор, який забезпечує управління силовими електронними ключами, а також рішення великої кількості допоміжних завдань (контроль, діагностика, захист).

Залежно від структури та принципу роботи електричного приводу виділяють два класи перетворювачів частоти [2, 8-12]:

- 1) з безпосереднім зв'язком;
- 2) з явно вираженою проміжною ланкою постійного струму.

Кожен з існуючих класів перетворювачів має свої переваги і недоліки, які визначають область раціонального застосування кожного з них.

У перетворювачах з безпосереднім зв'язком електричний модуль являє собою керований випрямляч. Система управління по черзі відмикає групи тиристорів і підключає обмотки двигуна до мережі живлення.

Таким чином, вихідна напруга перетворювача формується з «вирізаних» ділянок синусоїд вхідної напруги. Частота вихідної напруги у таких перетворювачів не може дорівнювати або бути вище частоти

живильної мережі. Вона знаходиться в діапазоні від 0 до 30 Гц, і як наслідок - малий діапазон управління частотою обертання двигуна (не більше 1/10). Це обмеження не дозволяє застосовувати такі перетворювачі в сучасних частотно регульованих приводах із широким діапазоном регулювання технологічних параметрів [19].

Використання незапираємих тиристорів вимагає відносно складних систем управління, які збільшують вартість перетворювача. «Різана» синусоїда на виході перетворювача з безпосереднім зв'язком є джерелом вищих гармонік, які викликають додаткові втрати в електричному двигуні, перегрів електричної машини, зниження моменту, дуже сильні перешкоди в живильній мережі. Застосування компенсуючих пристроїв призводить до підвищення вартості, маси, габаритів, зниженню ККД системи в цілому [9].

Найбільш широке застосування в сучасних частотно-регульованих модулях знаходять перетворювачі з явно вираженою ланкою постійного струму. У перетворювачах цього класу використовується подвійне перетворення електричної енергії: вхідна синусоїдальна напруга з постійною амплітудою і частотою випрямляється у випрямлячі, фільтрується фільтром, згладжується, а потім знову перетворюється інвертором в змінну напругу змінюваної частоти і амплітуди. Подвійне перетворення енергії приводить до зниження ККД і до деякого погіршення масо-габаритних показників по відношенню до перетворювачів з безпосереднім зв'язком.

Для формування синусоїдального змінного напруги використовують автономний інвертор, який формує електричну напругу заданої форми на обмотках електродвигуна (як правило, методом широтно-імпульсної модуляції).

Головною перевагою тиристорних перетворювачів частоти, як і в схемі з безпосереднім зв'язком, є здатність працювати з великими струмами і напругами, витримуючи при цьому тривале навантаження й імпульсні впливи. Вони мають більш високий ККД (до 98%) по відношенню до

перетворювачів на IGBT транзисторах [9-11].

Перетворювачі частоти є нелінійним навантаженням, що створює струми вищих гармонік в мережі живлення, що призводить до погіршення якості електроенергії.

Для поліпшення форми вихідної напруги між перетворювачем і двигуном іноді ставлять дросель, а для зменшення електромагнітних перешкод - фільтр.

Частотний перетворювач з ШІМ являє собою інвертор з подвійним перетворенням напруги. Спочатку мережеве напруга 220 В або 380 В випрямляється вхідним доданим мостом, потім згладжується і фільтрується за допомогою конденсаторів. Це перший етап перетворення. На другому етапі з постійної напруги, за допомогою мікросхем управління і вихідних мостових IGBT ключів, формується ШІМ послідовність певної частоти і шпаруватості. На виході частотного перетворювача видаються пачки прямокутних імпульсів, але за рахунок індуктивності обмоток статора асинхронного двигуна, вони інтегруються і перетворюються нарешті в напругу близьке до синусоїди [9-11].

Критерії вибору частотного перетворювача напруги показані на рис. 2.1 [9, 13]:

1) за функціями. Кожен виробник намагається забезпечити собі конкурентну перевагу на ринку. Перше правило для забезпечення максимуму продажів - це низька ціна. Тому виробник прагне включити в свій виріб тільки необхідні функції. А решта пропонує в якості опції. Перш ніж купити частотний перетворювач треба визначити, які функції потрібні. Варто вибирати той прилад, який має більшість необхідних функцій в базовому варіанті;

2) за способом управління - більшість сучасних частотних перетворювачів реалізують векторне управління, але такі частотні перетворювачі дорожче, ніж частотні перетворювачі зі скалярним

керуванням. Векторне управління дає можливість більш точного управління, знижуючи статичну помилку. Скалярний режим тільки підтримує постійне співвідношення між вихідною напругою і вихідною частотою, але наприклад, для вентиляторів це цілком достатньо;



Рисунок 2.1 – Критерії вибору частотного перетворювача напруги

3) за потужністю. Якщо потужності устаткування приблизно однакові, то необхідно вибирати перетворювачі однієї фірми з потужністю по потужності максимального навантаження. Так можна забезпечити взаємозамінність і спростити обслуговування обладнання;

4) по мережевій напрузі. Завжди обирають перетворювач з максимально широким діапазоном напруг як вниз, так і вгору. Якщо знижена напруга призведе, швидше за все, до відключення частотного перетворювача, то підвищена може викликати вибух мережових електролітичних конденсаторів і виходу приладу з ладу;

5) за діапазоном регулювання частоти. Верхня межа регулювання частоти - важливий фактор при використанні двигунів з високими

номінальними робочими частотами, наприклад для шліфувальних машин (1000 Гц і більше). Треба переконатись, що діапазон частот відповідає потребам. Нижня межа визначає діапазон регулювання швидкості приводу. Стандарт - це 1/10. Якщо потрібен більш широкий діапазон, то обирають тільки векторне управління. Навіть заявлена межа від 0 Гц, не гарантує стійку роботу приводу;

б) за кількістю входів управління. Дискретні входи потрібні для введення команд управління (пуск, стоп, реверс, гальмування і т.д.). Аналогові входи необхідні для введення сигналів зворотного зв'язку (регулювання і налаштування приводу в процесі роботи). Цифрові входи потрібні для введення високочастотних сигналів від цифрових датчиків швидкості та положення (енкодерів). Чим більше входів, тим складнішу систему можна побудувати, і тим вона дорожча;

7) за кількістю вихідних сигналів. Дискретні виходи використовуються для виходу сигналів про різні події (аварія, перегрів, вхідна напруга вище або нижче рівня, сигнал помилки і т.д.). Аналогові виходи використовуються для побудови складних систем із зворотними зв'язками. Рекомендації по вибору аналогічні попередньому пункту;

8) по шині управління. Обладнання, що буде керуватись частотним перетворювачем повинно мати ту ж шину і кількість входів виходів що і обраний частотний перетворювач;

9) термін гарантії побічно дозволяє оцінити надійність частотного перетворювача;

10) за перевантажувальними здатностями. У першому наближенні, потужність частотного перетворювача потрібно вибирати на 10-15% більше потужності двигуна. Струм перетворювача повинен бути більше номінального струму двигуна і трохи більше струму можливих перевантажень [9].

2.2. Огляд технічних рішень побудови частотного перетворювача напруги

Інвертор напруги (перетворювач напруги) - це пристрій, який перетворює напругу постійного струму (наприклад 12 В від акумулятора) в напругу змінного струму (220 В, 50 Гц) [10].

Інвертори бувають наступних типів [9-13]:

1) із ступінчастою (модифікованою) синусоїдою (мають певні обмеження в експлуатації);

2) з правильною (чистою) синусоїдою, підходять для живлення навіть дуже чутливого обладнання.

Існує безліч різних фірм та марок перетворювачів напруги. Деякі з них наведені нижче.

Інвертор напруги Luxeon IPS-600S зображений на рисунку 2.2 [16].



Рисунок 2.2 – Інвертор LUXEON IPS-600S

Перетворювач напруги Luxeon IPS-600S використовують для забезпечення необхідного живлення 220 В 50 Гц в автомобілі, на природі, там де немає стандартної мережевої розетки живлення, а потрібно підключити електрообладнання. Великою перевагою є те, що вихідна напруга є синусоїдальної форми, тому він немає обмежень у використанні.

Технічні характеристики [10]:

- потужність 300 Вт (600 Вт короткочасно);
- вихідна напруга - $220 \pm 5\%$ В (правильна синусоїда);
- частота 50 Гц;
- напруга зовнішньої акумуляторної батареї - 12 В;
- мікропроцесорне керування;
- ККД - 85-90%;
- світлодіодний індикатор режиму роботи - перетворення;
- вентилятор примусового охолодження;
- попередження про розряд акумуляторної батареї - $10,5 \pm 0,5$ В (звуковий сигнал);
- захист від розряду акумуляторної батареї - $10 \pm 0,5$ В (відключення);
- захист від перегріву - 65 ± 5 °С (відключення);
- захист від короткого замикання - запобіжник;
- підключення до акумулятора;
- підключення навантаження - одна розетка.

Продукція компанії Luxeon має великий попит і займає лідируючі позиції за обсягами продажів на ринку електротехніки. Про що свідчать численні позитивні відгуки покупців, які вже користуються даною продукцією [14].

Перетворювач напруги Power Jack 5000W, зображений на рисунку 2.3, це автоматичний синусоїдальний інвертор напруги з можливістю заряду акумуляторних батарей. Пристрій особливо доцільно використовувати в системах альтернативної енергетики, оскільки він розрахований на робочу потужність до 4 кВт, зарядний струм в даному пристрої складає 80А, а струм власного споживання дорівнює 1,2 А (28 Вт) [11].

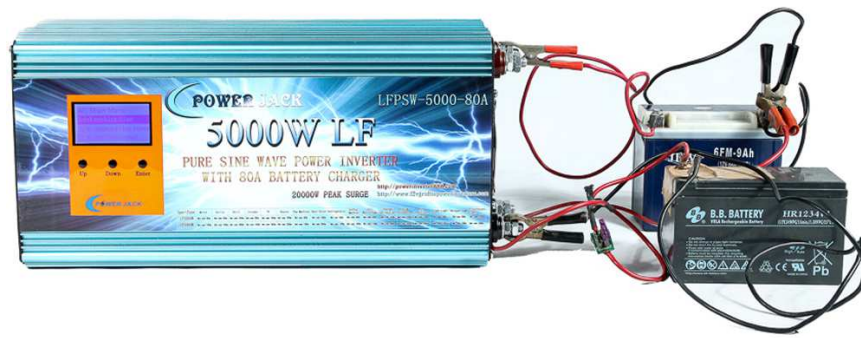


Рисунок 2.3 – Інвертор напруги Power Jack 5000W-80A

Інвертор містить вісім режимів заряду акумуляторних батарей, таким чином перетворювач забезпечує гнучке налаштування під акумулятор забезпечуючи максимально ефективний заряд. На боковій панелі пристрою розташований перемикач який запускає сам інвертор. Даний перемикач містить три режими запуску.

Характеристика [11]:

- форма вихідного сигналу – правильна синусоїда;
- номінальна напруга акумулятора – 24 В;
- потужність до – 5000 Вт;
- максимальна короточасна потужність – 20000 Вт;
- вихідна напруга - 220 В, 50 Гц $\pm 0,3$ Гц;
- захист від короткого замикання;
- захисне відключення при низькій напрузі акумулятора - 21 В;
- захисне відключення при високій напрузі акумулятора -32 В;
- струм заряду - 80 А;
- нижня межа заряду акумулятора при – 20 В;
- верхня межа заряду акумулятора при – 31,4 В;
- коефіцієнт корисної дії – 95 %;
- чотирьох ступінчатий зарядний інтелектуальний пристрій;
- вага - 9,5 кг.

Область застосування:

- альтернативна енергетика;
- системи резервного живлення.

Stark Country 5000 inv (рис. 2.4) - це синусоїдальний перетворювач напруги, який розрахований на робочу потужність 4000 Вт. [12].

Пристрій працює за of-line технологією. Головна особливість такого перетворювача полягає у додатковому сонячному контролеру заряду. Контролер заряду сонячних панелей працює по ШІМ технології та дозволяє здійснювати заряд акумуляторів до 60 А. Stark country 5000 inv містить пристрій пріоритету заряду, тому з легкістю можна вибирати основний тип заряду акумулятора (сонячні панелі або електромережа).



Рисунок 2.4 – Перетворювач напруги Stark Country 5000 inv

За допомогою великого рідкокристалічного дисплею можна здійснювати візуальний аналіз основних параметрів системи. Для повноцінної роботи такого пристрою необхідно послідовно підключити чотири зовнішні акумуляторні батареї по 12 В. Даний пристрій стає особливо актуальним в потужних системах альтернативної енергетики, оскільки з використанням додаткової схеми з'єднання систему можна нарощувати та збільшувати загальну потужність установки.

Сфера застосування:

- альтернативна енергетика;
- автономне живлення котеджів, будинків, офісів тощо.

Характеристики [12]:

- максимальна потужність - 5000 Вт;
- робоча потужність - 4000 Вт;
- технологія заряду - ШІМ;
- максимальний струм заряду акумулятора - 60 А;
- контролер заряду сонячних панелей;
- напруга акумулятора - 48 В;
- форма вихідної напруги - правильна синусоїда;
- діапазон вхідної напруги електромережі - 90-280 В;
- вихідна змінна напруга - 230 В, 50 Гц;
- максимальна ємність акумулятора - 1200 А;
- можливість вибору зарядного струму;
- рідкокристалічний дисплей;
- комплексний захист від - перезаряду/недозаряду, високої/низької

напруги, короткого замикання, перенавантаження, високої/низької частоти.

Sinamics V20 тип 6SL3210-5BB17-5UV0 (зображений на рис. 2.5) [12]

- компактний, простий перетворювач частоти потужністю 0.75 кВт, призначений для застосувань, де не потрібно точну підтримку швидкості асинхронних двигунів.

Завдяки наявності вбудованих, спеціальних функцій, Sinamics V20 досить просто адаптується до таких застосувань як [12]:

- управління електродвигунами насосів;
- управління електродвигунами вентиляторів;
- управління електродвигунами транспортерів і конвеєрів.
- SINAMICS V20 ПЕРЕТВОРЮВАЧ змінного струму однофазне

живлення 200-240В -10 10%;

- без вбудованого фільтра;
- без вентилятора;
- частота живляться напругою 47-63 Гц;

- вихідна потужність 0,75 кВт;
- номінальний вихідний струм 3,9 А;
- ступінь захисту IP20.



Рисунок 2.5 – Перетворювач Sinamics V20

Пристрій, що розробляється в бакалаврській роботі, повинен мати наступні технічні характеристики:

- вхідна однофазна напруга, В - 220;
- максимальна трифазна напруга, В - 220;
- частота трифазної напруги, Гц - 1 - 60;
- час розгону/гальмування двигуна, с - 5 - 99;
- напрямок обертання - пряме/зворотне;
- потужність двигуна (два режими), кВт - 0,5 - 1;
- максимальний струм фази, А - 5;
- частота ШІМ, кГц - 2,5.

Важливим моментом є те, що даний прилад буде більш компактним та зрозумілішим у використанні, що дозволить швидко виконувати завдання користувачеві.

2.3. Висновки до розділу

1. Для подальшої роботи було обрано принцип роботи частотного перетворювача напруги полягає у забезпеченні оптимального інтервалу регулювання частоти обертів, шляхом регулювання вихідної напруги.

2. Визначено основні технічні характеристики, якими повинен володіти частотний перетворювач напруги для систем електропостачання з вітроелектричними установками.

3 ОПИС ОБРАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА КОНСТРУКЦІЙ

3.1. Підвищення ефективності роботи частотного перетворювача напруги

Для підвищення ефективності безпосередніх перетворювачів частоти (БПЧ), що застосовуються в складі ВЕУ, необхідно, щоб генератор генерував напругу частотою від 150 Гц (чим вище частота, тим краще якість вихідної напруги БПЧ). Це може бути досягнуто за рахунок збільшення числа пар полюсів або частоти обертання ротора електричних машини. Застосування БПЧ дозволить, відмовившись від автоматичної системи стабілізації частоти обертання вітроколеса, спростити конструкцію механічного редуктора і систему стабілізації параметрів електроенергії (напруги і частоти струму) ВЕУ [4].

Силові електронні схеми БПЧ можуть бути виконані на біполярних транзисторах (IGBT) або керованих тиристорах. Схеми БПЧ на біполярних транзисторах значно ускладнюють алгоритм роботи і конструкцію системи управління і захисту перетворювача, крім того, вартість транзисторів з ізолюваним затвором в 4-5 разів перевищує вартість тиристорів [5].

Як стабілізатори параметрів електроенергії асинхронні генератори (АГ) можуть використовуватися два типи БПЧ - з природною комутацією силових електронних приладів (БПЧП) і зі штучною комутацією, що забезпечує регулювання кута зсуву фаз на вході перетворювача (БПЧШ).

Структурна схема ВЕУ, виконана з використанням БПЧП, приведена на рис. 3.1. АГ нормально працює в діапазоні частоти обертання 750 - 1500 об/хв, видає потужність на перетворювач в діапазоні частот 200 - 400 Гц. Вихідний фільтр Ф, забезпечує безперервність і, відповідно, синусоїдальність вихідної напруги [2-5, 15].

Особливість роботи БПЧШ полягає в його здатності змінювати

реактивну складову вхідного струму і її знак. Тому БПЧШ можна використовувати в двох цілях: по-перше, для перетворення потужності з підвищеною і частотою, що змінюється, що генерується АГ, в вихідну потужність постійної більш низької частоти і, по-друге, для живлення АГ регульованою реактивною потужністю, тобто для регулювання її порушення.

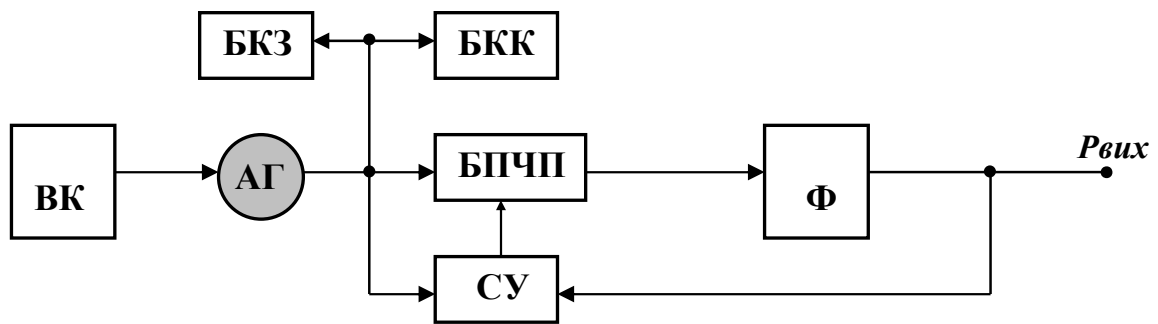


Рисунок 3.1 – Структурна схема ВЕУ з БПЧП:

ВК – вітроколесо; АГ – асинхронний генератор;

БКЗ – блок конденсаторів збудження реактивної потужності навантаження; БКК – блок конденсаторів компенсації реактивної потужності навантаження; БПЧП – безпосередній перетворювач частоти з природною комутацією силових електронних приладів; СУ – система управління; Ф – вихідний фільтр; Рвих – вихідна потужність

Структурна схема ВЕУ, виконана на базі системи АГ – БПЧШ приведена на рис. 3.2.

Основною перевагою системи АГ БПЧП є відносно нескладна силова схема і система управління, а основним недоліком стабілізатора, виконаного на БПЧП, є те, що на вході перетворювача кут зсуву фаз постійно відстає, тобто БПЧП для АГ є активно-індуктивним навантаженням, що вимагає застосування підвищеної ємності конденсаторів, що забезпечують збудження і компенсацію реактивної потужності навантаження.

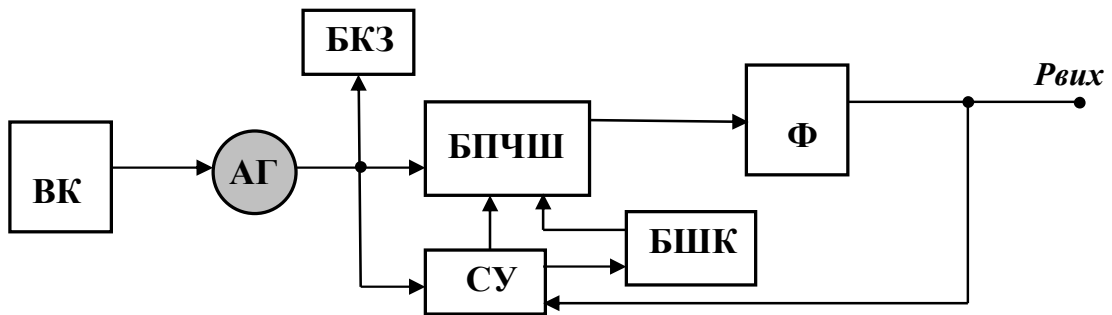


Рисунок 3.2 – Структурна схема ВЕУ з БПЧШ:

ВК – вітроколесо; АГ – асинхронний генератор;

**БКЗ – блок конденсаторів збудження; БШК – блок штучної комутації;
БПЧШ – безпосередній перетворювач частоти зі штучною комутацією
силових електронних приладів; СУ – система управління;
Ф – вихідний фільтр; Рвих – вихідна потужність**

Основною перевагою системи АГ БПЧШ є те, що на його вході струм випереджає напругу, а, значить, перетворювач для АГ є активно-ємнісний навантаженням, що дозволяє значно зменшити масу конденсаторів, що застосовуються для збудження генератора, і практично виключити зі схеми блок конденсаторів компенсації БКК (рис. 3.1 і 3.2).

Основними недоліками БПЧШ як стабілізатора параметрів електроенергії є складна силова частина через застосування блоку штучної комутації БШК (рис. 3.2), до складу якого входить блок реактивних елементів і силові напівпровідникові ключі, і, відповідно, ускладнена система управління, що забезпечує не тільки стабілізацію параметрів електроенергії, але і штучну комутацію силових напівпровідникових приладів.

Перспективним є напрямок застосування в складі статичних перетворювачів електроенергії трансформаторів з обертовим магнітним полем (ТОМП). Важливою перевагою конструкції ТОМП є те, що вони дозволяють з однофазного напруги змінного струму отримувати багатofазну

симетричну систему напруг. А це призведе до виключення трифазних статичних перетворювачів і застосування однофазних, а трифазну систему напруг отримувати за допомогою однофазно-трифазних ТОМП. Зменшення в складі АІ силових напівпровідникових приладів дозволяє спростити силову схему і систему управління і підвищити показники надійності і ККД автономних інверторів СП.

В даний час розроблені АІ потужністю від сотень ватів до сотень кіловат. Як відомо, при частоті струму 50 Гц в залежності від потужності від 60 до 80% маси доводиться на трансформатори, при цьому їх питома маса перевищує 8 кг/кВт. ККД автономних інверторів знаходиться в межах 0,7 - 0,8. Один із способів поліпшення електротехнічної характеристики (ЕТХ) АІ є застосування в структурі інверторів ланки з підвищеною частотою струму [2-6, 15].

На рис. 3.3 приведена функціональна схема АІ на реверсивному випрямлячі.

Надійність роботи АІ на реверсивному випрямлячі підвищується за рахунок застосування в трансформаторі Т первинної обмотки з середньою точкою за рахунок зменшення кількості силових електронних ключів.

АІ на реверсивному випрямлячі працює наступним чином.

Напруга постійного струму від джерела надходить до входу АІ, на виході якого формується напруга змінного струму підвищеної частоти. У трансформаторі напруга перетвориться до рівня, необхідного для навантаження. На виході реверсивного випрямляча РВ з ділянок високочастотного напруги формується низькочастотний сигнал, фільтр Ф забезпечує необхідну якість вихідної напруги синусоїдального струму.

Стабілізація напруги здійснюється за рахунок зміни часу відкритого стану транзисторів VT1 і VT2 інвертора. Якщо використовувати замість тиристорів в реверсивному випрямлячі транзистори, то також покращаться показники надійності АІ.

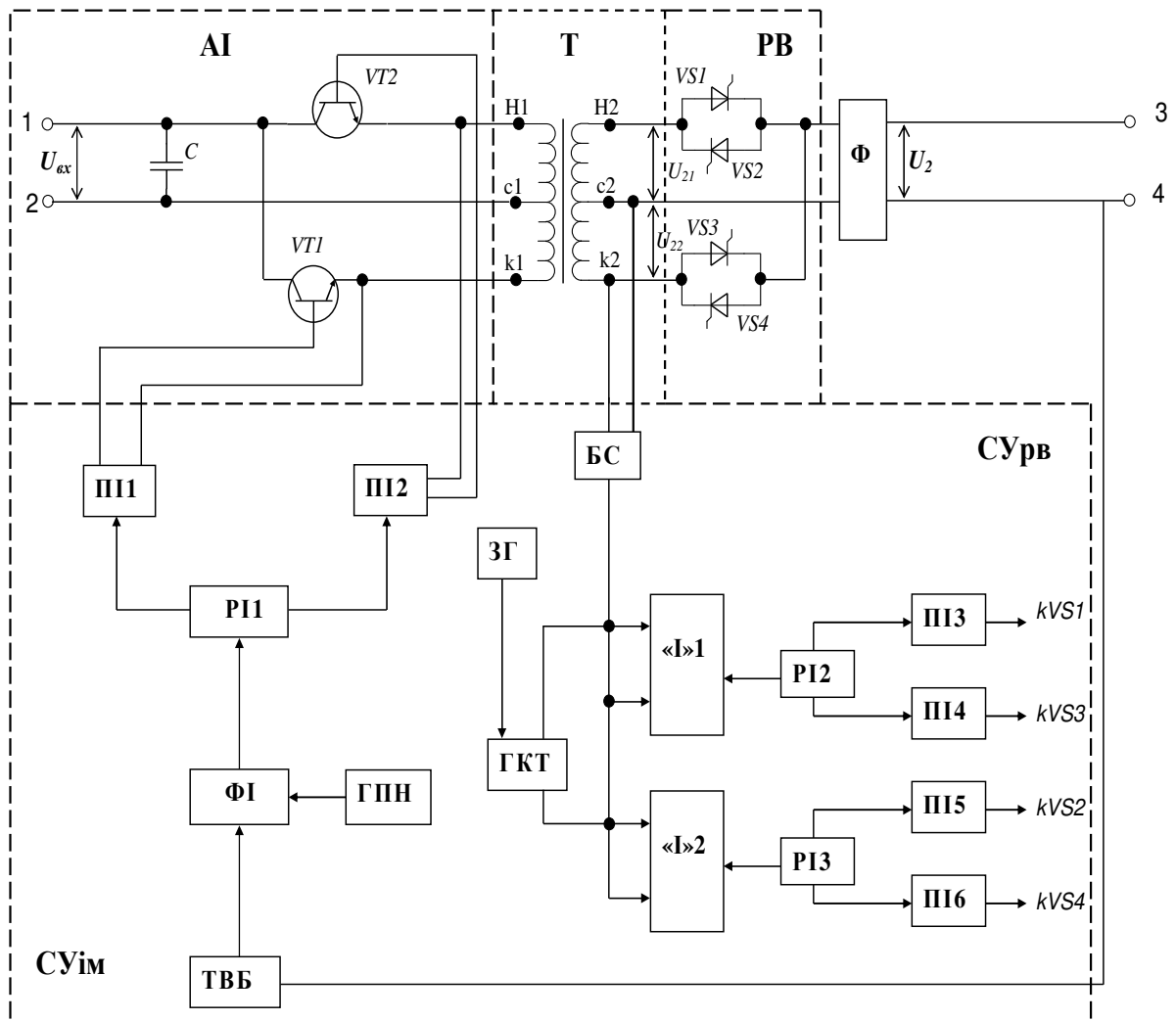


Рисунок 3.3 – Функціональна схема автономного інвертора з реверсивним випрямлячем:

АІ – автономний інвертор; Т – трансформатор; РВ – реверсивний випрямляч; ГПН – генератор пилоподібної напруги;
СУім – система управління інверсним мостом (містить ГПН);
БС – блок синхронізації; СУрв – система управління реверсивним випрямлячем (містить БС); С – вхідний фільтр; Φ – вихідний фільтр;
ФІ – формувач імпульсів; ТВБ – трансформаторно-випрямний блок;
РІ1, РІ2, РІ3 – розподільник імпульсів; ПІ1, ПІ2, ПІ3, ПІ4, ПІ5, ПІ6 – підсилювачі імпульсів; ЗГ – задаючий генератор;
ГКТ – генератор типу кривої; «І»1, «І»2 – логічні елементи «І»

Застосування в складі АІ проміжного високочастотного перетворення і силових транзисторів дозволяє значно зменшити їх масу. Так для АІ потужністю від 10 до 20 кВт і при проміжній частоті перетворення, що знаходиться в межах 16 - 20 кГц, їх питома маса становить 0,1 - 0,2 кг / кВт [2-6, 15].

Таким чином, застосування запропонованих технічних рішень перетворювачів і стабілізаторів, дозволить значно поліпшити технічні характеристик ВЕУ.

3.2. Вибір мікроконтролера

Інвертор складається з двох модулів - модуля керування, та модуля інвертора.

РІС - мікроконтролери Гарвардської архітектури, вироблені американською компанією Microchip Technology Inc. Назва РІС є скороченням від Peripheral Interface Controller, що означає «контролер інтерфейсу периферії». Назва пояснюється тим, що спочатку РІС призначалися для розширення можливостей введення-виведення 16-бітних мікропроцесорів CP1600 [16-19].

У номенклатурі Microchip Technology Inc. представлений широкий спектр 8-й, 16-й і 32-бітних мікроконтролерів і цифрових сигнальних контролерів під маркою РІС. Відмінною особливістю РІС-контролерів є спадкоємність різних сімейств. Це і програмна сумісність, і сумісність за виводами, по периферії, по напруженням, за коштами розробки, по бібліотеках і стеком найбільш популярних комунікаційних протоколів. Номенклатура налічує більше 500 різних контролерів з усілякими варіаціями периферії, пам'яті, кількістю виводів, продуктивністю, діапазонами живлення і температури.

Модуль керування, в проектуємому приладі побудуємо на двох мікроконтролерах DD1 - PIC16F873-20/P та DD3 - PIC16F628. Було прийнято рішення використати два мікроконтролера, так як необхідно шість керуючих сигналів.

Особливості мікроконтролера PIC16F873-20/P [14, 16-19]:

- високопродуктивний RISC-процесор;
- всі інструкції виконуються за один такт, крім інструкцій переходу, виконуваних за два такти;
- швидкість роботи: тактова частота до 20 МГц;
- мінімальна тривалість такту 200 нс;
- FLASH пам'ять програм до 8К x 14 слів;
- пам'ять даних (ОЗП) до 368 x 8 байт;
- ЕСППЗП пам'ять даних до 256 x 8 байт;
- сумісність цоколівки з PIC16C73/74/76/77;
- механізм переривань (до 14 внутрішніх/зовнішніх джерел переривань);
- восьмирівневий апаратний стек;
- прямий, непрямий і відносний режими адресації;
- скидання при включенні живлення (POR);
- таймер включення (PWRT) і таймер запуску генератора (OSC);
- сторожовий таймер (WDT) з власним вбудованим RC-генератором для підвищення надійності роботи;
- програмований захист коду;
- режим економії енергії (SLEEP);
- можливі режими тактового генератора;
- економічна, високошвидкісна технологія КМОН FLASH/ЕСППЗП;
- повністю статична архітектура;
- програмування на платі через послідовний порт з використанням двох виводів;

- для програмування потрібно тільки єдине джерело живлення 5В;
- налагодження на платі з використанням двох виводів;
- доступ процесора на читання/запис пам'яті програм;
- широкий діапазон робочих напруг живлення: від 2,0 В до 5,5В;
- потужнострумові лінії введення/виводу: 25 мА;
- комерційний і промисловий температурні діапазони;
- низьке споживання енергії.

Периферія:

- Timer0: 8-розрядний таймер/лічильник з 8-розрядним попередніми дільником;
- Timer1: 16-розрядний таймер/лічильник з попередніми дільником, може вести під час сплячого режиму від зовнішнього генератора;
- Timer2: 8-розрядний таймер/лічильник з 8-розрядним регістром періоду, попереднім і вихідним дільником;
- 2 модуля захоплення;
- 10-бітний багатоканальний аналого-цифровий перетворювач;
- синхронний послідовний порт (SSP) з інтерфейсами SPI (з Master-режимом) і I2C (з режимами Master/Slave);
- універсальний синхронно-асинхронний приймач (USART/SCI) з виявленням 9-розрядної адреси;
- вбудований генератор опорної напруги;
- паралельний 8-бітний Slave-порт (PSP) зі зовнішніми сигналами управління RD, WR і CS (тільки в 40/44-вивідних корпусах);
- програмована схема скидання при падінні напруги живлення (BOR) [16].

Структурна схема показана на рис. 3.4.

В регістрах зберігається і додаткова інформація, потрібна процесору для функціонування (зокрема, поточний контекст процесора, адреса наступної команди тощо).

Арифметико-логічний пристрій (АЛП) (ALU) представляє собою паралельний восьмирозрядний пристрій, що забезпечує виконання арифметичних і логічних операцій.

АЛП складається з [19]:

- регістрів акумулятора, регістрів тимчасового зберігання TMP1 і TMP2;
- ПЗП констант;
- суматора;
- додаткового регістра (регістру В);
- акумулятора (ACC);
- регістра стану програм (PSW).

Мультиплексор дозволяє передавати сигнал з одного з входів на вихід; при цьому вибір бажаного входу здійснюється подачею відповідної комбінації керуючих сигналів [19].

У лічильнику команд адресу черговий команди формується шляхом додавання 1 до числа, код якого зберігається в лічильнику команд. При пуску і перезавантаженні мікроконтролера в лічильник команд заноситься код числа 0 і перша команда вибирається з FlashROM за адресою 0 [19].

Постійний запам'ятовуючий пристрій FlashROM призначений для зберігання кодів команд програми та констант. Комірка пам'яті містить 16 розрядів. У ній можуть зберігатися код команди формату "слово", половина коду команди формату "два слова" або коди двох констант. Ємність FlashROM. При читанні кодів команд адреса в FlashROM надходить з лічильника команд. При читанні констант адресу надходить з пари Z регістрів загального призначення [19].

WatchDog Timer призначений для запобігання катастрофічних наслідків від випадкових збоїв програми. Він має свій власний RC-генератор, що працює на частоті 1 МГц [14, 16-19].

Як і для основного внутрішнього RC-генератора, значення 1 МГц є наближеним і залежить насамперед від величини напруги живлення мікроконтролера і від температури.

Універсальний асинхронний або універсальний синхронно/асинхронний приймач (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter - UART або USART) - зручний і простий послідовний інтерфейс для організації інформаційного каналу обміну мікроконтролера. Здатний працювати в дуплексному режимі (одночасна передача і прийом даних). Він підтримує протокол стандарту RS-232, що забезпечує можливість організації зв'язку з ПК.

Тактовий генератор виробляє імпульси для синхронізації роботи всіх вузлів мікроконтролера. Внутрішній тактовий генератор AVR може запускатися від декількох джерел опорної частоти (зовнішній генератор, зовнішній кварцовий резонатор, внутрішня чи зовнішня RC-ланцюжок). Мінімальна допустима частота нічим не обмежена [14, 16-19].

Показник стека (SP) представляє собою восьмирозрядний регістр, призначений для організації особливої області пам'яті даних (стека), в якій можна тимчасово зберегти будь-яку комірку пам'яті.

Другий мікроконтролер, що було обрано - PIC16F628. Мікроконтролер має наступні характеристики [17, 18]:

- 5 ліній вводу/виводу;
- універсальний синхронно-асинхронний датчик (USART/ SCI);
- 16 байт загальної пам'яті;
- модуль захоплення/компаратора/ШІМ.

Особливості ядра [17, 18]:

- скидання при включенні живлення (POR);
- таймер включення живлення (PWRT);
- таймер запуску генератора (OST);
- скидання з падіння напруги живлення (BOD);

- WatchDog Timer з власним вбудованим RC-генератором для підвищення надійності роботи;
- режим економії енергії (SLEEP);
- програмування на платі через послідовний порт;
- чотири програмованих ідентифікатора;
- низька напруга програмування;
- Multiplexed MCLR-pin;
- Programmable weak pull-ups on PORTB;
- пробудження з режиму SLEEP по зміні стану виводів;
- внутрішні резистори до шини живлення на лініях вводу/виводу;
- внутрішній резистор на лінії MCLR;
- *можливі режими тактового генератора:*
- FLASH конфігураційні біти для установки режимів генератора;
- двочастотний INTRC з низьким енергоспоживанням;
- EXTRC: зовнішній недорогий RC-генератор;
- XT: стандартний генератор на кварцовому резонаторі;
- LP: економічний, низькочастотний генератор на кварцовому резонаторі;
- HS: високочастотний генератор на кварцовому резонаторі;
- EC: вхід для підключення зовнішнього генератора [18].

3.3. Висновки до розділу

1. Розроблено структурні схеми БЕУ з природною та штучною комутацією силових електронних приладів.
2. Розроблено функціональну схему АІ з реверсивним випрямлячем, що дозволить значно підвищити технічні характеристики БЕУ.

4 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

4.1. Розробка структурної схеми пристрою

Структурна схема приладу, що розробляється наведена на рис. 4.1.

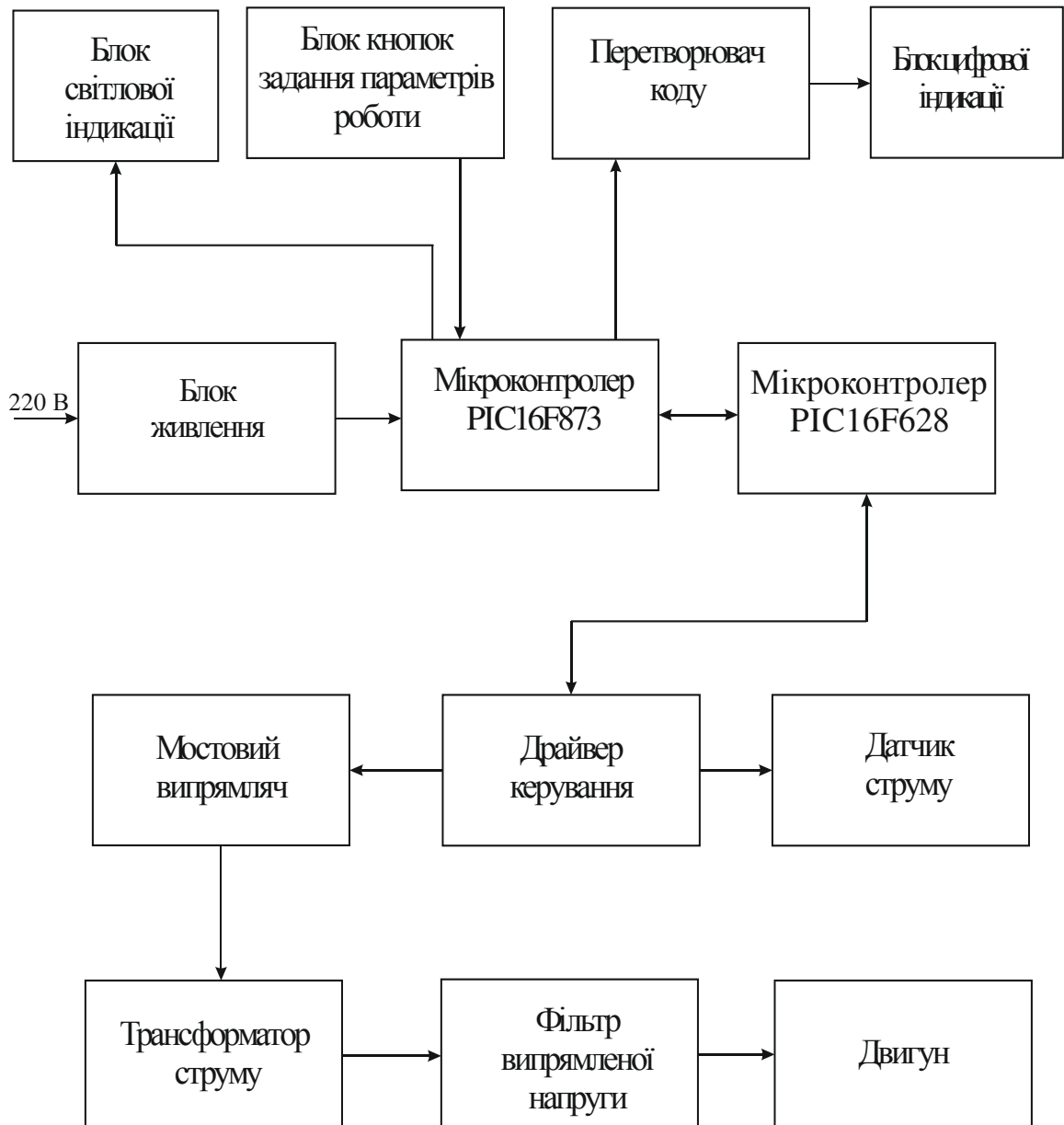


Рисунок 4.1 - Частотний перетворювач напруги.

Схема електрична структурна

Даний прилад працює від напруги живлення 220 В, що надходить на блок живлення, який в свою чергу надає потрібну напругу - 24 В на мікроконтролер PIC16F873, який в свою чергу відповідає, та обробляє сигнали з блоку кнопок. PIC16F873 також формує сигнали, що надходять на блок світлової індикації та перетворювач коду, який потім надсилає сигнал на блок цифрової індикації.

Мікроконтролер PIC16F628 реалізує необхідний порядок перемикання IGBT в інверторі, та реагує на сигнал поданий від драйверу керування. Даний мікроконтролер як надсилає імпульси, так і приймає імпульси. Таким чином діє прямий та зворотний зв'язок між модулем керування та модулем інвертора.

До модуля інвертора входять такі елементи як мостовий випрямляч, з якого напруга надходить до трансформатора струму, і до фільтру випрямленої напруги, і двигун є останнім, виконуючим елементом.

Також не менш важливим елементом є датчик струму, що не дасть вийти з ладу приладу, при перевантаженні.

4.2. Розробка принципової схеми приладу

Для побудови приладу було обрано рішення використати мікросхему-драйвер. Мікросхема DA1 представляє свого роду обмежувач в напрузі, який може зупинити роботу, через велику, або недостатню напругу. Для цих цілей підходить IR2131.

Характеристики мікросхеми IR2131 [18]:

- вихідні канали розроблені для навантаженого функціонування;
- працює в додатках з вихідною напругою до + 600В;
- допускається від'ємна перехідна напруга;
- стійкість до швидкості зміни напруги;

- керуюча напруга на затворах від 10 до 20 В;
- блокування всіх каналів при зниженні напруги;
- вимкнення всіх 6 драйверів при струмовому перевантаженні;
- роздільні драйвери 3 ключів нижнього рівня і 3 ключів верхнього рівня;
- узгоджений час поширення сигналів по всіх каналах;
- виходи працюють в протифазі з входами;
- максимальна напруга зсуву VOFFSET 600В;
- вихідний струм ± 200 мА/420 мА;
- напруга живлення VOUT 10 - 20В;
- час вмикання/вимикання 1,3/0,6 мкс.

Принципова схема частотного перетворювача зображена на рис. 4.2.

Мікросхема DA1 являє собою драйвер шести польових транзисторів з ізольованим затвором або IGBT. У ній є три канали, на кожному з яких є вузли управління "нижнім" і "верхнім" транзисторами напівмоста. Вузол керування "верхнім" транзистором відрізняється тим, що формує на його вихід сигнал на фоні плаваючого щодо мінуса джерела живлення, потенціалу витоку або емітера, значення якого може досягати 600 В. Канали управляються логічними сигналами, які надходять з роз'єму XS1 на входи HIN1-HIN3, LIN1-LIN3 відповідно для "верхніх" і "нижніх" ключів.

При перевищенні струму і напруги порогового значення (близько 0,5 В на вході ITRIP) мікросхема DA1 негайно закриває всі IGBT VT1-VT6 і встановлює низький рівень на свій вихід FAULT і з'єднаному з ним контакті 8. З цього стану інвертор можна вивести лише логічним сигналом низького рівня, поданим на вхід CLR мікросхеми DA1.

Діоди VD22 VD25-утворюють мостовий випрямляч, що живить силову частину перетворювача. Конденсатори C16 C17 і резистор R27 - фільтр випрямленої напруги. Цей резистор обмежує стрибки зарядного струму конденсаторів.

Трансформатор струму Т1 являє собою кільце типорозміру К25х14х10 з фериту 2000 НМ, надіте на один з проводів, що з'єднують інвертор з двигуном. Вторинна обмотка трансформатора - 300 витків дроту ПЕВ-2 діаметром 0,2 мм, намотаних на це кільце.

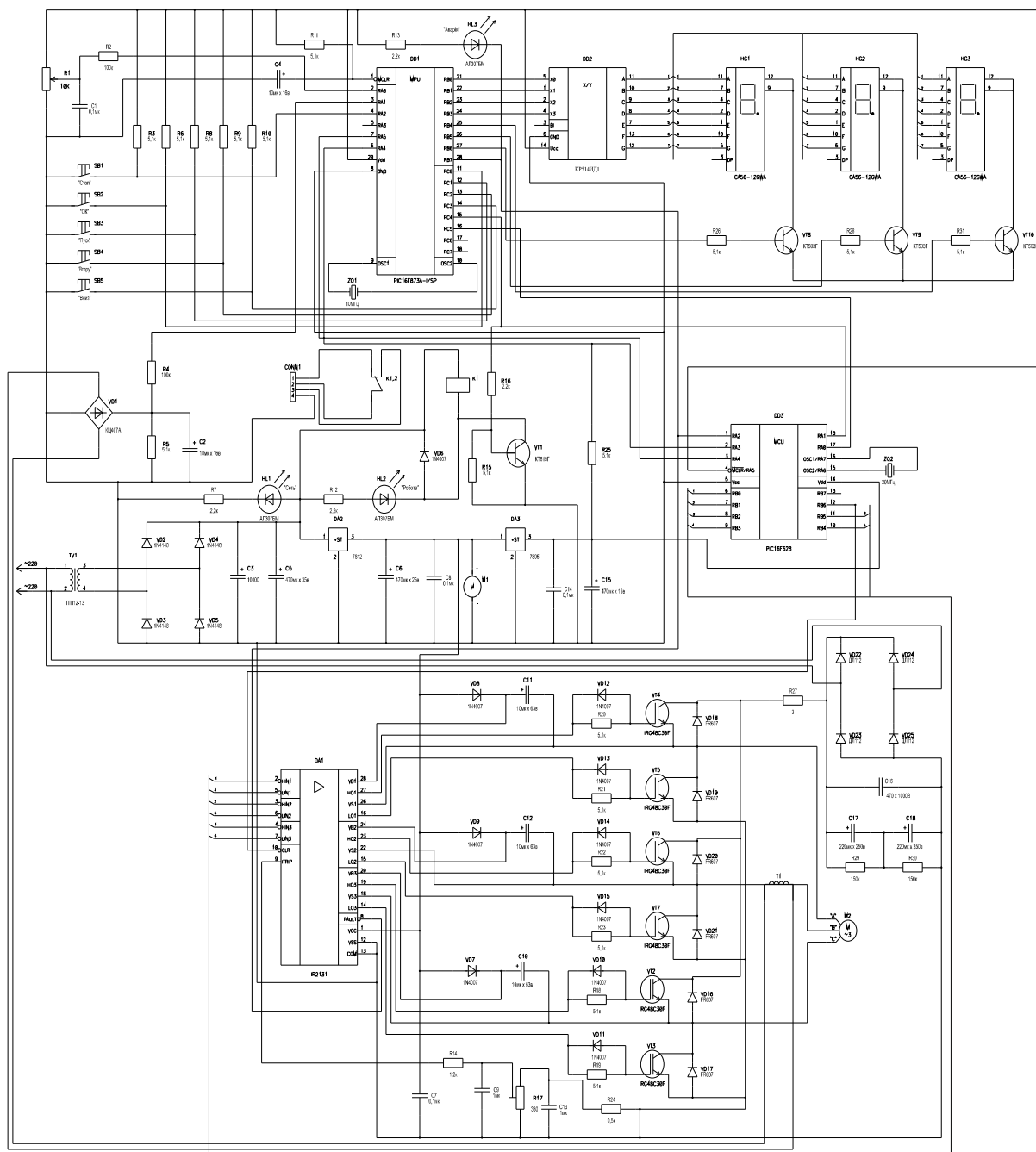


Рисунок 4.2 - Частотний перетворювач напруги.

Схема електрична принципова

Перелік елементів електричної схеми наведений в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. - Частотний перетворювач напруги. Перелік елементів.

Позиційне позначення	Найменування	Кіл- ть
Конденсатори		
<i>C1, C7, C8, C14, C9, C13</i>	<i>ПКГТ-П 0,1 мкФ</i>	<i>6</i>
<i>C2, C4</i>	<i>K42-19 10мкФ х 16В</i>	<i>2</i>
<i>C3</i>	<i>K50-18 100000мкФ</i>	<i>1</i>
<i>C5</i>	<i>105С 470мкФ х 35В</i>	<i>1</i>
<i>C6</i>	<i>PHE83 470мкФ х 25В</i>	<i>1</i>
<i>C10-C12</i>	<i>МБГО-2 10мкФ х 63В</i>	<i>3</i>
<i>C15</i>	<i>105С 470мкФ х 16В</i>	<i>1</i>
<i>C16-C18</i>	<i>K50-27 220мкФ х 250В</i>	<i>3</i>
Роз'єм		
<i>CONN1</i>	<i>XFG312</i>	<i>1</i>
Мікросхеми		
<i>DA1</i>	<i>IR2131</i>	<i>1</i>
<i>DA2</i>	<i>7812</i>	<i>1</i>
<i>DA3</i>	<i>7805</i>	<i>1</i>
<i>DD1</i>	<i>PIC16F873</i>	<i>1</i>
<i>DD2</i>	<i>KP514D1</i>	<i>1</i>
<i>DD3</i>	<i>PIC16F628</i>	<i>1</i>
Цифрова індикація		
<i>HG1-HG3</i>	<i>CA5612GWA</i>	<i>3</i>
Світлодіоди		
<i>HL1-HL3</i>	<i>АЛ307БМ</i>	<i>3</i>
Реле		
<i>K1</i>	<i>RM63</i>	<i>1</i>
Двигуни		
<i>M1</i>	<i>DK200</i>	<i>1</i>

Позиційне позначення	Найменування	Кіл- ть
M2	DK210	1
Резистори		
R1	СПЗ-10 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	1
R2, R4	МЛТ-0.125-100 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	1
R3	МЛТ-0.125-5.1 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	1
R5, R6, R8-R11	МЛТ-0.5-5.1 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	1
R7, R12	МЛТ-0.125-2.2 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	2
R13, R16	МЛТ-0.5-2.2 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	4
R14	МЛТ-0.125-1.2 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	1
R15, R26	МЛТ-0.51 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	2
R17	СПЗ-330 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	1
R18-R24	1N4007- 5.1 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	7
R25	МЛТ-0.5-0.5 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	1
R27	МЛТ-0.125-3 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	1
R29, R30	МЛТ-2-150 кОм+5% ДСТУ 7953:2015	2
Перемикачі кнопочні		
SB1-SB5	2P3N	5
Трансформатори		
T1	FX50z	1
TV-1	E360	1
Діодний міст		
VD1	KЦ407A	
Діоди		
VD2-VD5	D244A	4
VD6-VD15	1N4007	10
VD16-VD21	PR607	6
VD22-VD25	ДЛ112	4
Транзистори		
VT1	КТ815-Г	1
VT2-VT7	IRG48C30F	6
VT8-VT10	КТ504-Г	3

Кварцові резонатори		
<i>ZQ1</i>	<i>ABS07, 10 МГц</i>	<i>1</i>
<i>ZQ2</i>	<i>CM2132, 20 МГц</i>	<i>1</i>

Діоди випрямного моста встановлені на платі модуля без тепловідводів, а шість IGBT - на загальному тепловідводі через ізолюючі прокладки. Модуль управління, побудований на двох мікроконтролерах (DD1 і DD3).

Хоча в кожному з цих мікроконтролерів є апаратні широтно-імпульсні модулятори, але їх числа недостатньо для формування необхідних для інвертора шести керуючих сигналів. Тому потрібні імпульси формує програмно мікроконтролер DD3 (PIC16F628). Він же реалізує необхідний порядок перемикання IGBT в інвертор, реагує на сигнал аварії (несправності), що формується знаходиться в модулі інвертора мікросхемою IR2131. Тут формується меню користувача, перетворюються в цифрові коди і обробляються аналогові сигнали, установка частоти, і контроль струму. Крім того, мікроконтролер DD1 стежить за станом кнопок SB1 - SB5, виконуючи команди, виводить необхідну інформацію на світлодіодні індикатори HG1 - HG3 (через перетворювач коду DD2), генерує сигнали управління мікроконтролером DD3.

До модуля керування підключений трансформатор струму. Випрямлений доданими мостом VD1 струм його вторинної обмотки створює на резисторі R3 падіння напруги, пропорційне струму однієї з фаз питомого від перетворювача двигуна. Через резистор R10 струм надходить на вхід RA1 мікроконтролера DD1, де його значення перетворюється в цифрову форму. У таку ж форму мікроконтролер перетворює і використовує для установки заданої частоти напруга, що надходить на його вході PAB з змінного резистора R1.

Модуль управління живиться від мережі 220 В через понижуючий трансформатор T1 і мостовий випрямляч на діодах VD2-VD5. Випрямлена

напруга близько 24 В використовується безпосередньо лише для сигнального світлодіода HL1 "Мережа" і для живлення вузла на транзисторі VT1. За сигналом мікроконтролера DD1, дозволяє роботу інвертору, в цьому вузлі спрацьовує реле K1. Замикання його контактів може використовуватися будь-яким зовнішнім пристроєм як сигнал про те, що підключений до інвертору двигун - включений. Одночасно включається світлодіод HL2 "Робота". Включення світлодіода HL3 "Аварія" свідчить про те, що в модулі інвертора сформований сигнал FAULT.

За допомогою інтегрального стабілізатора DA1 надходить напруга +12 В для живлення мікросхеми IR2131 в модулі інвертора. Цією ж напругою живиться двигун M1. Інтегральний стабілізатор DA2 знижує напругу до 5 В. Він живить цифрові вузли модуля управління.

Змінний резистор установки частоти R1 і кнопки SB1-SB5 винесені з плати модуля на окремий пульт.

4.3. Розробка друкованої плати

Для розводки друкованої плати була використана програма P-CAD.

P- CAD Library Executive дозволяє створювати списки відповідностей виводів символів і вентилів (секцій) компонентів, і має можливості перегляду параметрів компонентів. В електронних таблицях параметрів забезпечена можливість одночасної зміни змісту декількох вибраних комірок. У всі електронні таблиці параметрів (Pins , Pattern і Symbol) включені стовпці із зазначенням номерів виводів (Pad Number). Програма має засоби перегляду бібліотечних файлів і пошуку компонентів по всіх можливих атрибутах.

P-CAD Schematic являється модулем для створення електричних принципових схем. В даній програмі є можливість для з'єднання раніше створених елементів.

Інший модуль програми P-CAD - PCB. Дана програма відповідає за розміщення радіоелементів на платі (рис. 4.3).

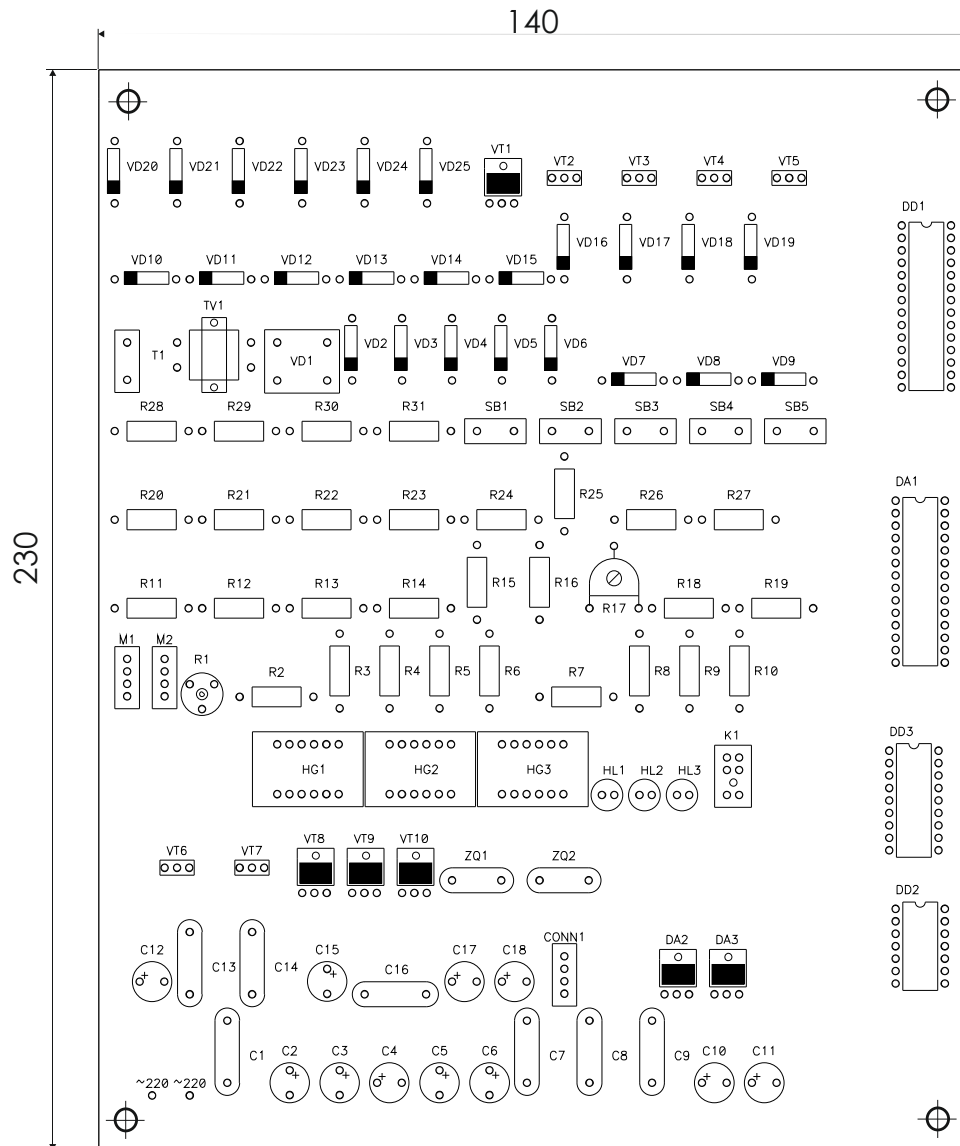


Рисунок 4.3 - Частотний перетворювач напруги.

Розташування елементів на платі

Етап розміщення радіоелементів проводиться в автоматичному або напіваавтоматичному режимі. На заготовці друкованої плати, яка містить її контури та області заборони для розміщення, встановлюються радіоелементи, якість розміщення оцінюється за інтегральним критерієм оцінки, який враховує загальну довжину електричних зв'язків та щільність електричних зв'язків на друкованій платі.

Розводка друкованої плати є завершальним етапом. Та може проводитись в автоматичному, або напівавтоматичному режимі. На даному етапі можна побачити вже вигляд плати, яку розробляли в попередніх етапах, розводка друкованої плати приладу зображена на рис. 4.4.

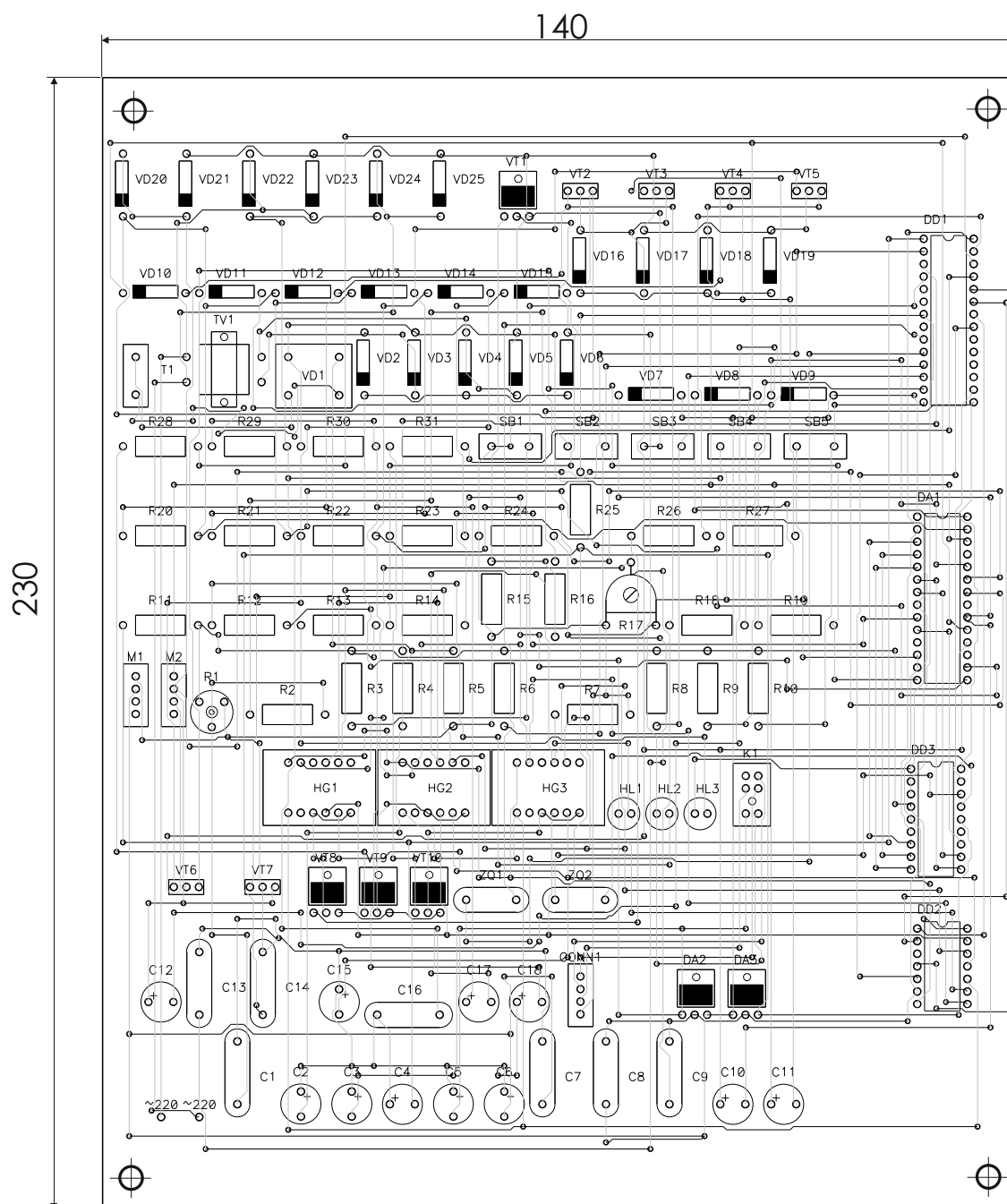


Рисунок 4.4 - Частотний перетворювач напруги.

Розводка друкованої плати

4.4. Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність роботи частотного перетворювача напруги

4.4.1. Розрахунки надійності роботи частотного перетворювача напруги

Дослідження поведінки апаратури під час експлуатації та оцінку її якості визначає надійність. Для кількісного виразу надійності об'єкту і для налаштування експлуатації використовуються спеціальні характеристики - показники надійності.

Надійність - це комплексна величина, яка поєднує в собі поняття працездатності, безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності. Подія, що порушує працездатність об'єкту і потребує ремонтних робіт називається - відмовою. Відмова, що самоусувається називається - збоєм.

Основні показники надійності.

До них відносять ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов та інші.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ - вірогідність того, що в межах вказаного періоду часу (t) відмова об'єкту не виникне, визначається відношенням числа елементів працездатних в початковий момент.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ - це відношення числа відмов $n(t)$ елементів об'єкту в одиницях часу, до середнього числа елементів N працездатних до моменту часу Δt .

$$\lambda = \frac{n(t)}{N\Delta t}, \quad (4.1)$$

Показники інтенсивності відмов беруться на підставі довідникових даних.

Було проведено розрахунок ймовірності безвідмовної роботи пристрою, схема електрична принципова якого наведена на рис. 4.2.

Для кожного типу елемента за таблицями знаходимо інтенсивність відмов.

Таблиця 4.1 - Значення відповідності відмов для кожного типу елементів

Найменування різних елементів	Число однотипних елементів n	Інтенсивність відмов λ і*10 ⁻⁶ 1/год	Результат інтенсивності $\lambda_{рез}$ і*10 ⁻⁶ 1/год
Резистор змінного опору	29	0,03	0,87
Мікросхема	9	0,8	7,2
Конденсатор	18	0,2	3,6
Перемикач	1	0,25	0,25
Транзистор	10	0,3	3
Діод	25	0,2	5
Світлодіод	3	0,45	1,35
Кнопки	5	0,15	0,75
Реле	1	0,25	0,25
Кварцовий резонатор	2	0,1	0,2
Трансформатор	2	3,5	7
Резистор змінного опору	2	0,02	0,04
Двигун	2	2	4
Роз'єм	1	0,3	0,3
Діодний міст	1	0,9	0,9

Отже,

$$\lambda_{рез} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15} =$$

$$= (0,87 + 7,2 + 3,6 + 0,25 + 3 + 5 + 1,35 + 0,75 + 0,25 + 0,2 + 7 + 0,04 + 4 + 0,3 + 0,9) * 10^{-6}$$

$$= 34,71 * 10^{-6} \text{ 1/год}$$

Оскільки в системі відсутні резервні елементи, то вихід із ладу хоча б одного елемента призводить до відмови всієї системи.

Застосовуючи теорему з теорії ймовірностей про множення ймовірностей можна стверджувати, що

$$P_{\text{сист}}(t) = P_1(t) * P_2(t) \dots P_n(t), \quad (4.2)$$

$P_{\text{сист}}(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи системи.

$P_1(t) \dots P_n(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи окремих елементів.

Для отримання періоду роботи:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}; P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}; \dots, P_n(t) = e^{-\lambda_n t}, \quad (4.3)$$

$$P_{\text{сист}}(t) = e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)} = e^{-\lambda_{\text{рез}} t}, \quad (4.4)$$

Обрано безвідмовний термін роботи $t=1000$ год.

Відповідно до формули (4.4) отримаємо:

$$P_{\text{сист}}(t) = e^{-0,03471} = 0,965$$

$$P_{\text{сист}}(t) = e^{-0,06942} = 0,93$$

$$P_{\text{сист}}(t) = e^{-0,10413} = 0,90$$

$$P_{\text{сист}}(t) = e^{-0,13884} = 0,87$$

$$P_{\text{сист}}(t) = e^{-0,17355} = 0,84$$

$$T_{\text{сист}} = \frac{1}{25,23 \cdot 10^{-6}} = 28810,1412 \text{ (Год)}$$

Таблиця 4.2 - Дані для побудови залежності безвідмовної роботи пристрою від часу

$t_{\text{год}}$	1000	2000	3000	4000	5000
$P_{\text{сист}}(t)$	0,965	0,93	0,90	0,87	0,84

На рис. 4.5 зображений графік залежності безвідмовної роботи пристрою від часу.

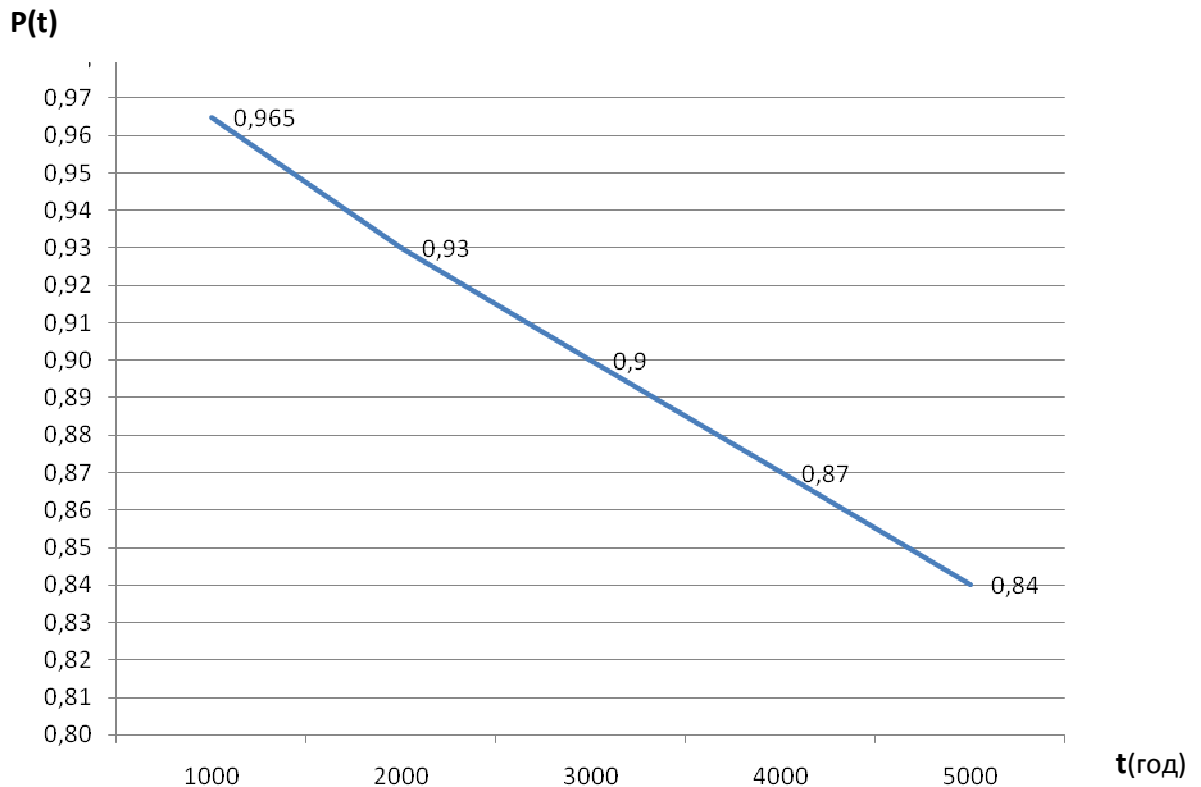


Рисунок 4.5 – Залежність безвідмовної роботи пристрою від часу

З отриманих даних, зроблено висновок, що пристрій працездатний, і безвідмовна робота гарантована протягом тривалого часу.

4.4.2. Розрахунок однофазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром

Для даного пристрою було розраховано блок живлення.

Вхідні данні:

1) середнє значення випрямленої напруги за номінального опору навантаження $U_d = 24 \text{ В}$;

2) струм навантаження $I_d = 5 \text{ A}$;

3) коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги $K_n = 1,2 \%$;

4) напруга мережі живлення $U_m = 220 \text{ В}$;

5) частота мережі живлення $f_m = 50 \text{ Гц}$.

Необхідно визначити:

1) тип і параметри вентилів;

2) режим роботи схеми (значення струмів в елементах та напруг на них);

3) к.к.д. випрямляча;

4) ємність та тип конденсатора фільтра.

Визначимо орієнтовні значення параметрів вентилів та габаритну потужність трансформатора.

Для цього необхідно задати значення допоміжних коефіцієнтів. Для мостової схеми їх вибирають у інтервалах:

$B = 0,95 \dots 1,1$; $D = 2,1 \dots 2,2$; $F = 6,8 \dots 7,2$.

Нехай $B = 1$; $D = 2,1$; $F = 7$.

Тоді амплітуда зворотної напруги на вентилі становитиме:

$$U_{bm} = 1,5U_d \quad (4.5)$$

$$U_{bm} = 24 \cdot 9 = 36 \text{ В.}$$

Середнє та амплітудне значення струму через вентиль відповідно:

$$I_a = \frac{I_d}{2} \quad (4.6)$$

$$I_{am} = I_d \cdot 0,5F \quad (4.7)$$

Отже,

$$I_a = 2,5 \text{ А};$$

$$I_{am} = 5 \cdot 0,5 \cdot 7 = 17,5 \text{ А.}$$

Габаритну потужність трансформатора визначимо як:

$$S_T = U_d I_d 0,707 B D \quad (4.8)$$

$$S_T = 24 * 5 * 0,707 * 1 * 2,15 = 252 \text{ ВТ}$$

Знаходимо максимальне значення індукції B_m , забезпечуючи виконання умови $S_T > 252$:

$$B_m = 1,43 \text{ Тл для } S_T = 400.$$

Вибираємо тип вентилів. При цьому необхідно забезпечити виконання умов:

$$U_{зв \max} > U_{вм}$$

$$I_{a \max} > I_a$$

$$I_{am} = \pi I_a > I_{am \max}$$

У якості вентилів вибираємо кремнієві діоди типу Д244А, що мають такі параметри:

$$U_{зв \max} = 50 \text{ В} > 36 \text{ В}$$

$$I_{amax} = 10 \text{ А} > 05 \text{ А}$$

$$I_{am \max} = 31,4 > 17,5 \text{ А}$$

$$U_{пр} = 1 \text{ В.}$$

Знаходимо опір діода у провідному стані:

$$r_{пр} = \quad (4.9)$$

$$r_{пр} = 0,1 \text{ Ом.}$$

Знайдемо величину активного опору обмоток трансформатора:

$$r_T = \frac{k_r U_d}{I_d f_m B_m} \sqrt{\frac{S f_m B_m}{U_d I_d}} \quad (4.10)$$

де k_r - коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення: для мостової схеми $k_r = 3,5$;

B_m - амплітуда магнітної індукції у магнітопроводі трансформатора;

S - число стержнів трансформатора, на яких розміщено обмотки: для броньового трансформатора із Ш-подібними пластинами магнітопроводу;

$S = 1$;

$$r_T = \frac{3,5 * 24}{5 * 50 * 1,43} * \sqrt{\frac{1 * 50 * 1,43}{24 * 5}} = 0,2 \text{ Ом}$$

Знаходимо індуктивність розсіювання обмоток трансформатора:

$$L_S = k_L S \frac{U_d}{I_a f_m B_m} * \frac{1}{\sqrt{\frac{S f_m B_m}{U_d I_a}}} \quad (4.11)$$

де k_L - коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення: для мостової схеми $k_L = 5 * 10^{-3}$;

$$L_S = 5 * 10^{-3} \frac{24}{5 * 50 * 1,43} * \frac{1}{\sqrt{\frac{1 * 50 * 1,43}{24 * 5}}} = 0,00038 * 10^{-3} \text{ Гн}$$

Визначаємо кут, що характеризує співвідношення між індуктивними і активними опорами випрямляча:

$$\varphi = \arctg \frac{2\pi f_m L_S}{r} \quad (4.12)$$

де r - активний опір випрямляча.

У загальному випадку:

$$r=r_T+n_q r_{np} \quad (4.13)$$

де n_q - кількість послідовно увімкнених і одночасно працюючих вентилів, для мостової схеми $n_q=2$.

$$r = 0,10 + 2 * 0,1 = 0,4 \text{ Ом};$$

$$\varphi = \arctg \frac{2 * 3,14 * 50 * 0,00038 * 10^{-3}}{0,4} = 0^{\circ}$$

Знаходимо величину основного розрахункового коефіцієнта:

$$A_0 = \frac{I_d r}{m U_d} \quad (4.14)$$

де m - число фаз випрямляча (для мостової схеми $m=2$).

$$A_0 = \frac{5 * 0,4}{2 * 24} = 0,04$$

За знайденими значеннями A_0 і кута φ знаходимо величини допоміжних коефіцієнтів:

$$B = 0,9; D = 2,4; F = 7; H = 9 * 10^3$$

Знаючи величини коефіцієнтів B , D , F і H , можна знайти уточнені параметри трансформатора і вентиля, за якими перевіримо правильність їх вибору.

Діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора становить:

$$U_2 = BU_d \quad (4.15)$$

$$U_2 = 0,9 \cdot 24 = 21,6 \text{ В.}$$

Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора:

$$I_2 = 0,707 DI_d \quad (4.16)$$

$$I_2 = 0,707 \cdot 2,4 \cdot 5 = 8,48 \text{ А.}$$

Повна потужність вторинної обмотки трансформатора:

$$S_2 = 0,707 BDI_d U_d \quad (4.17)$$

$$S_2 = 0,707 \cdot 0,9 \cdot 2,4 \cdot 5 \cdot 24 = 183,25 \text{ Вт.}$$

Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора:

$$I_1 = I_2 n \quad (4.18)$$

де $n = U_2 / U_1$ - коефіцієнт трансформації трансформатора ($U_1 = U_m$).

$$n = \frac{21,6}{220} = 0,1,$$

$$I_1 = 8,48 \cdot 0,1 = 0,848 \text{ А.}$$

Повна потужність первинної обмотки трансформатора:

$$S_1 = 0,707 BDI_d U_d = U_1 I_1 \quad (4.19)$$

$$S_1 = 220 \cdot 0,848 = 186,56 \text{ Вт.}$$

Уточнимо повну (габаритну) потужність трансформатора:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} \quad (4.20)$$

$$S_T = \frac{186,56 + 183,25}{2} = 184,95$$

Уточнимо значення параметрів діода:

$$U_{BT} = 1,41BU_d \quad (4.21)$$

$$U_{BT} = 1,41 * 0,9 * 24 = 40,45 < 50 \text{ В}$$

$$I_a = I_d / 2 \quad (4.22)$$

$$I_a = 5 / 2 = 2,5 \text{ А} < 10 \text{ А};$$

$$I_{am} = 0,5FI_d \quad (4.23)$$

$$I_{am} = 0,5 * 7 * 5 = 17,5 \text{ А} < 31,4 \text{ А}.$$

Отже, тип діода вибрано правильно.

Знаходимо величину ємності конденсатора фільтра:

$$C > \frac{100H}{rK_n f_m} \quad (4.24)$$

$$C = \frac{100 * 9 * 10^{-3}}{0,4 * 1,2 * 50} = 37500 \text{ мкФ}$$

Вибираємо конденсатор типу К50-18 ємністю 100000 мкФ на напругу

$$U = 50 > \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} * 21,6 = 30,456 \text{ В}.$$

Будуємо зовнішню(навантажувальну) характеристику випрямляча. За допомогою цієї характеристики можна визначити відхилення випрямленої напруги від заданого значення при різних величинах струму навантаження у тому числі напругу холостого ходу, струм короткого замикання та величину внутрішнього опору випрямляча.

Для розрахунку зовнішньої характеристики будемо задавати значення від 0 до номінального значення та знаходити відповідні їм значення допоміжного коефіцієнта:

$$\gamma_0 = \frac{I_d r}{m U_2} \quad (4.25)$$

$$\gamma_0 = \frac{0,4}{2 * 21,6} = 0,01 * I_d$$

Знаходимо відповідні значення величини залежно від γ_0 та φ де θ – кут відтинання.

Тоді відповідні їм значення вихідної напруги випрямляча можна розрахувати за формулою:

$$U_d = U_2 \sqrt{2} \cos \theta \quad (4.26)$$

$$U_d = 21,6 \sqrt{2} \cos \theta$$

Результати розрахунку зведені у табл.4.3.

Таблиця 4.3 Результати розрахунку навантажувальної характеристики випрямляча за $U_d = 24$ В та $I_d = 5$ А

I_d , А	γ_0 для $\varphi = 0^0$	$\sqrt{2} \cos$	U_d , В
0	0	1,4	30,25
1	0,01	1,3	28,08
2	0,02	1,2	25,92
3	0,03	1,16	25,056
4	0,04	1,15	24,084
5	0,05	1,08	23,17

Величина струму короткого замикання становить:

$$I_{dK.3} = \frac{\sqrt{2} U_2}{r} \quad (4.28)$$

$$I_{dK.3} = \frac{\sqrt{2} * 21,6}{0,4} = 76,36 \text{ А}$$

Із них можна зробити висновок: параметри розрахованого випрямляча відповідають завданню, бо за $I_d = 1$ А маємо $U_d = 28,08$ В.

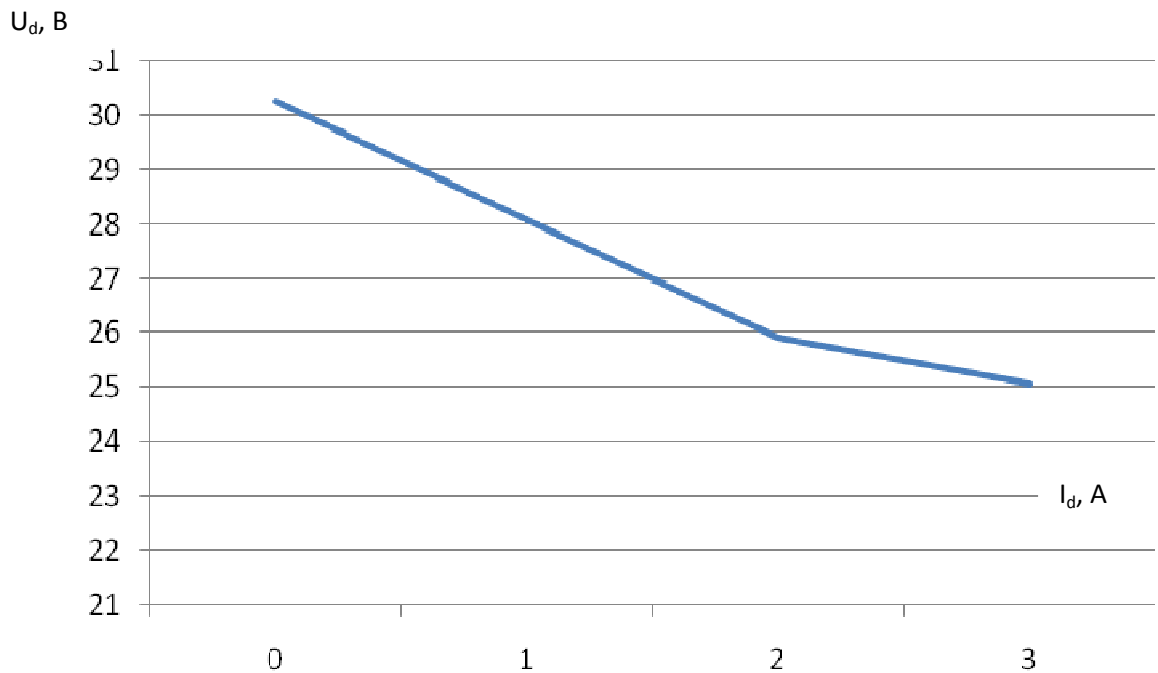


Рисунок 4.6 – Навантажувальна характеристика випрямляча за $U_d=24$ В та $I_d=5$ А

Величина внутрішнього опору випрямляча складає:

$$r_0 = \frac{U_{d_{xx}} - U_d}{I_d}; \quad (4.29)$$

$$r_0 = \frac{30,45 - 24}{5} = 1,29 \text{ Ом}$$

Знайдемо величину к.к.д випрямляча:

$$\eta = \frac{U_d \cdot I_d}{U_d \cdot I_d + P_t + P_B} \quad (4.30)$$

де P_T - втрати потужності в трансформаторі з к.к.д. $\eta_T = 0,86$;

P_B - втрати потужності у одночасно працюючих діодах: $n_q = 2$.

Втрати потужності у трансформаторі

$$P_T = 184,95 \cdot (1 - 0,86) = 25,88$$

Втрати потужності в діодах

$$P_B = 2,5 \cdot 1 \cdot 2 = 5$$

Тоді

$$\eta = \frac{24 \cdot 5}{24 \cdot 5 + 25,88 + 5} = 0,88$$

Електричну принципову схему розрахованого випрямляча наведено на рис. 4.7 [14].

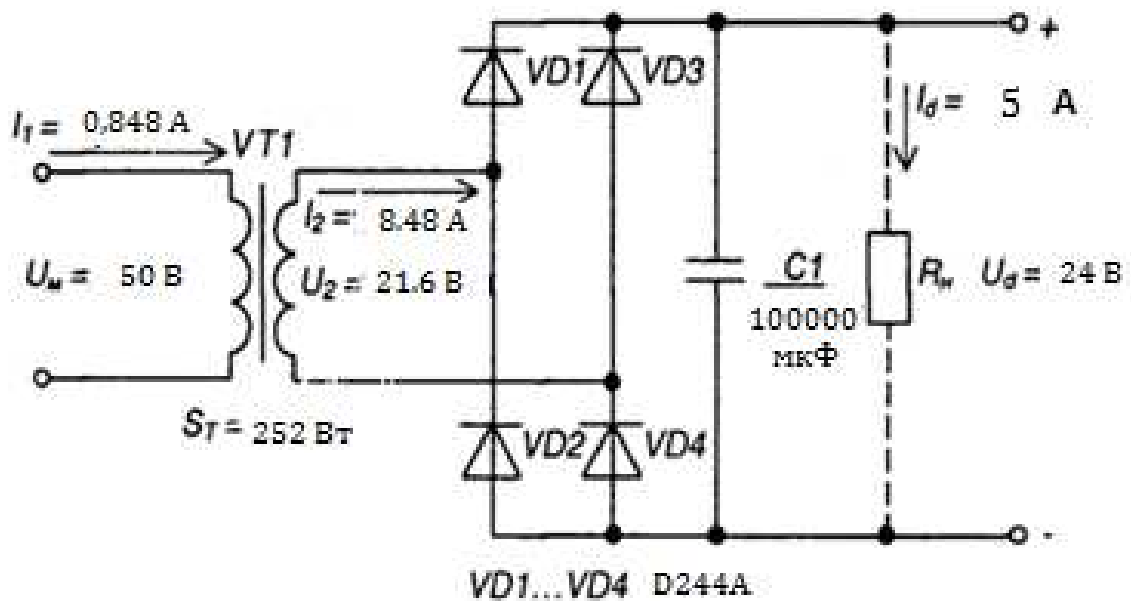


Рисунок 4.7 – Однофазний мостовий випрямляч з ємнісним фільтром. Схема електрична принципова.

4.5. Опис організації робіт пов'язаних із застосуванням приладу

Натиснувши на кнопку SB3 "Пуск", запускається живлення трифазного електродвигуна від інвертора. За встановлений користувачем час, частота генерованої трифазної напруги плавно наростає від нуля до заданого значення. Якщо включено управління частотою за допомогою змінного резистора R1, то при зміні положення, під час розгону відповідно, зміниться і кінцеве значення частоти, до якої відбуватиметься розгін.

При натисканні на кнопку SB1 "Стоп" відбувається зворотне - плавне зниження частоти генерованої трифазної напруги до нульової, потім з двигуна знімається напруга. Під час гальмування змінний резистор R1 не діє.

Натисканнями на кнопку SB2 "ОК" перемикаються сторінки меню користувача. Натискаючи на SB4 "Вгору" і SB5 "Вниз", відбувається переміщення по пунктах обраної сторінки. Перебуваючи на сторінці "Налаштування", можна короткочасним натисканням на кнопку SB4 включити режим перегляду параметрів. Номери пунктів меню на індикаторі HG1 і їх значення на індикаторах HG2, HG3 стануть змінюватися з інтервалом 1- 2 с. Дочекавшись пункту з параметром, який потрібно змінити, слід натиснути на кнопку SB1. Значення встановлюють натисканнями на SB4 і SB5. Для збереження нового значення в незалежній пам'яті мікроконтролера і виходу з режиму установки необхідно натиснути і утримувати протягом 3секунд кнопку SB2.

Після складання і перевірки монтажу перетворювача, підключають модуль управління до мережі 220 В, не подаючи мережевої напруги на модуль інвертора.

Перевіряється наявність напруг живлення +5, +12 В на відповідних виходах мікросхем. За допомогою осцилографа необхідно переконатися в наявності керуючих імпульсів на комірках IGBT.

Щоб встановити поріг спрацювання струмового захисту, передбаченого в мікросхемі IR2131, встановлюють двигун підключений до резистора в нижній стан і від будь-якого достатньо потужного джерела постійного струму, пропускають через резистор струм, рівний бажаному порогу спрацювання струмового захисту. Переміщуючи двигун налаштування резистора, відбувається спрацювання цього захисту - про це сигналізує працюючий світлодіод HL3.

Потім підключається навантаження на 220 В, 40 ... 60 Вт, з'єднаних "зіркою", а на випрямний міст подається через трансформатор мережева напруга, знижена до 40 ... 50 В.

Спостерігаючи осцилограми напруги на затискачах щодо середньої точки "зірки", можна перевірити роботу кнопок "Пуск" і "Стоп". При пуску шпаруватість вихідних імпульсів спочатку повинна бути високою, а із зростанням частоти зменшуватися. При зупинці, шпаруватість поступово збільшується. Якщо робота програми управління не викликає сумнівів, можна підвищити напругу живлення інвертора до номінальних 220 В.

Ефективне значення лінійної напруги повинно змінюватися залежно від частоти. Виміри проводяться цифровим мультиметром APPA 82R. Саме такі закони регулювання, закладені в програму. При частоті вище 46 ... 47 Гц відбувається відключення ШІМ для підвищення ККД приводу при великій частоті обертання.

Завершальний етап налагодження перетворювача - калібрування каналу вимірювання струму фази. Її виробляють з реальним навантаженням (трифазним електродвигуном). В той же провід, на якому встановлено кільце трансформатора струму Т1, включають амперметр змінного струму.

Установка, налагодження та обслуговування перетворювача повинне проводитися тільки кваліфікованим технічним персоналом. Недбале поводження може призвести до пошкодження перетворювача. Забороняється кидати перетворювач, піддавати його ударам і трясці при перенесенні.

Дотик до струмоведучих частин може призвести до смертельного результату, навіть якщо обладнання відключено від мережі. При роботі з струмоведучими частинами необхідно переконатись, що відключені входи напруги: як мережевого живлення, так і будь-які інші (підключення проміжної ланцюга постійного струму), від'єднаний кабель електродвигуна (якщо двигун обертається).

Необхідно мати на увазі, що висока напруга в колі постійного струму може зберігатися, навіть якщо світлодіоди погасли. Перш ніж торкатися до потенційно небезпечних струмоведучих частин приводів потужністю до 7,5 кВт включно, треба зачекати не менше 4 хвилин. Треба зачекати не менше 15 хвилин, перш ніж почати роботу з приводами потужністю понад 7,5 кВт.

Кнопка [Стоп] не виконує функції захисного вимикача. Вона не відключає перетворювач частоти від мережі і не гарантує зникнення напруги між перетворювачем і двигуном.

Важливо переконатись, що вхідна напруга на перетворювачі частоти, збігається з напругою мережі живлення, до якої планується підключення. У випадку, якщо напруга живильної мережі нижче вхідної напруги перетворювача частоти, то пристрій буде працювати зі зниженими характеристиками, або буде працювати з помилкою. Підключення пристрою до мережі живлення з напругою, що перевищує вхідну напругу перетворювача.

Пересвідчитися, що номінальна напруга електродвигуна не перевищує значення вихідної напруги перетворювача частоти. Номінальна напруга електродвигуна в більшості випадків визначається схемою з'єднання, треба впевнитись чи підключений двигун «зіркою» або «трикутником», і які значення напруги відповідають даній схемі підключення.

Номінальний струм двигуна в більшості випадків не повинен перевищувати номінальний вихідний струм перетворювача частоти, в іншому випадку привід не зможе розвинути номінальний момент.

Перевірка умов встановлення частотного перетворювача:

- переконайтеся, що біля вентиляторів чисто, немає пилу і бруду;
- місце встановлення повинно бути сухим (максимальна відносна вологість повітря 95%, при відсутності конденсації);
- робоча температура навколишнього середовища 0-40 °С. При температурі від -10 до 0 °С і понад +40 °С робота буде відбуватися зі зниженими характеристиками. Не рекомендується експлуатувати перетворювач частоти при температурах нижче -10 і понад +50 °С, так як це може призвести до скорочення терміну служби пристрою;
- максимальна висота установки пристрою над рівнем моря для роботи без зниження характеристик 1000 м;
- перевірити можливість здійснювати вентиляцію перетворювача частоти. Допускається монтаж перетворювачів «стінка до стінки», проте обов'язково має бути передбачено повітряний простір 100 мм зверху/знизу пристрою для перетворювача частоти потужністю до 30 кВт, 200мм для перетворювача частоти потужністю від 30 до 90 кВт і 225 мм для потужності 90 кВт;
- при роботі перетворювач нагрівається, тому вільний простір навколо перетворювача має становити не менше 10 см і гарантувати циркуляцію повітря і охолодження. Поверхня, на яку встановлюється перетворювач, повинна бути з незаймистого матеріалу і мати достатню механічну міцність, щоб витримати вагу перетворювача;
- при установці перетворювача в шафі необхідно звернути увагу на ефективність охолодження. Необхідно стежити, щоб потік повітря від вентилятора шафи проходив якомога ближче до перетворювача;
- перетворювач повинен бути розміщений так, щоб не потрапляти в потік повітря від інших перетворювачів і тепловиділяючих елементів іншого обладнання, у тому числі від гальмівних резисторів. Бажано уникати

розміщення одного перетворювача над іншим або витримувати при цьому мінімальна відстань між блоками 300 мм.

До перетворювача частоти можна підключати кабелі мережі/двигуна з максимальним перетином.

4.6. Висновки до розділу

1. Розроблено структурну і принципову схеми електричні частотного перетворювача напруги.

2. Проведені розрахунки надійності роботи частотного перетворювача напруги підтвердили його працездатність протягом тривалого періоду роботи.

ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській роботі розроблений пристрій для перетворення напруги з частотою, що можна регулювати шляхом широтно-імпульсної модуляції. Основу приладу складає мікроконтролер, що виконує всі основні функції: сприйняття сигналу, що подається, управління перетвореннями, відображення на індикаторах стану приладу.

Крім того, отримано такі результати.

1. Наведено етапи розробки частотного перетворювача напруги для систем електропостачання з вітровими установками.
2. Принцип роботи частотного перетворювача напруги полягає у забезпеченні оптимального інтервалу регулювання частоти обертів, шляхом регулювання вихідної напруги.
3. Визначено основні технічні характеристики, якими повинен володіти частотний перетворювач напруги для систем електропостачання з вітроелектричними установками.
4. Розроблено структурні схеми ВЕУ з природною та штучною комутацією силових електронних приладів.
5. Здійснено вибір мікроконтролеру та розроблено структурну і принципову схеми електричні частотного перетворювача напруги.
6. Проведені розрахунки надійності роботи частотного перетворювача напруги підтвердили його працездатність протягом тривалого періоду роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матвієнко М. Промислова електроніка : підручник. Ліра-К, 2019. 424 с.
2. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навчальний посібник / М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 197 С.
3. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина I.: навч. посіб. для здобувачів освіти за спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та / О.Голик та ін. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2020. 192 с.
4. Керування вентильними перетворювачами з ідентифікацією параметрів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12 / Ю. С. Петергеря ; НАН України Інститут електродинаміки. - Київ, 1999. - 22 с.
5. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах : монографія / Н. В. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця : Вінниця : ВНТУ, 2014. — 204 с.
6. Пат. 102195 Україна, МПК⁵¹. Частотний перетворювач / Н. В. Жуйкова, В. І. Литвинов, Т. С. Литвинова, В. В. Голиков; заявник(и) і власник(и) Н. В. Жуйкова, В. І. Литвинов, Т. С. Литвинова, В. В. Голиков – заявл. 31.01.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл.№11.
7. Пат. 116639 Україна, МПК⁵¹. Частотний перетворювач / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Жагловська, Л. В. Крилик, І.О. Романчук; заявник(и) і власник(и) ВНТУ– заявл. 26.12.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл.№10.
8. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти : навч. посіб — Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 300 с. <https://lira-k.com.ua/preview/12650.pdf>
9. Победаш К.К.,Святненко В.А. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії: Навчальний посібник К.:НТУУ«КПІ», 2017. - 245с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19823>

10. Інвертори напруги [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://prel.prom.ua/p65547632-nvertor-napругi-dbzh.html>
11. Інвертори напруги - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://stark50-invertor/>
12. Частотні перетворювачі Siemens [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://atmic.ua/chastotnye-preobrazovateli/chastotnyi-preobrazovatel-siemens-sinamics-v20-6sl3210-5be27-5uv0>
13. Хай М.В., Бурштинський М.В., Харчишин Б.М. Електричні апарати. Низьковольтна апаратура розподілу, керування та захисту. Загальний курс. Л.: Львівська політехніка, 2021. - 480 с.
14. Телемеханіка та автоматизовані системи управління в електроенергетиці: навч. посіб. / [П. Г. Плешков, С. В. Серебренніков, К. Г. Петрова] ; М-во освіти і науки України, Кіровоград. нац. тех. ун-т. – Кіровоград : КНТУ, 2016. – 163 с.
URL: <http://dSPACE.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/7946>.
15. Олійник М., Лисяк В., Дудурич О. Енергоощадність та альтернативні джерела енергії: навч. посіб. / ред. М. Сегеда. Львів: Львів. політехніка, 2020. 184 с.
16. PIC16F87X 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontroller [Електронний ресурс]. Режим доступу: ww1.microchip.com/0292c.pdf
17. PIC16F62X FLASH-Based 8-Bit CMOS Microcontroller: [Електронний ресурс]. Режим доступу: ww1.microchip.com/downloads
18. High Side and 3 Low Side Driver IR2131 - [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2131.pdf
19. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. За ред. А.Г. Соскова.-К.: Каравела, 2003.- 368 с.