

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»  
Кафедра електротехніки та електроенергетики

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

магістра

на тему

### АНАЛІЗ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СИСТЕМ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КРИТИЧНИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-1  
Спеціальності: 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

\_\_\_\_\_ / Дмитро БОГАЧИК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник \_\_\_\_\_ / Юлія ОЛІЙНИК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент \_\_\_\_\_ / Світлана АРТЮХ  
(підпис) (ім'я та прізвище)

*«До захисту допущено»*

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ / Артем ЧЕРНЮК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ / Юлія ОЛІЙНИК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК \_\_\_\_\_ / Ігор КИРИСОВ  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія  
Кафедра електротехніки та електроенергетики  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу  
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Дмитру БОГАЧИКУ

1. Тема «Аналіз рівня енергетичного безпеки при використанні систем безперебійного живлення для критичних споживачів електроенергії»  
затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.
2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Перелік критичних споживачів; характеристики навантаження критичних споживачів, потужність, резервні батареї, час автономної роботи СБЖ, дані про надійність електропостачання.
4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):  
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ; РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ДБЖ; РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДБЖ; ВИСНОВКИ
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):  
Слайди презентації
6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024 р.

**Керівник**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

**Завдання прийняв до виконання**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Дмитро БОГАЧИК

(ім'я, прізвище)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК  
виконання кваліфікаційної дипломної роботи**

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	12.10.24 – 15.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	16.10.24 – 23.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	24.10.24 – 01.11.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	02.11.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

**Студент (ка)**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Дмитро БОГАЧИК

(ім'я, прізвище)

**Нормоконтроль**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

## ЗМІСТ

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

### ВСТУП

### РОЗДІЛ 1. ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ

#### 1.1. Основні типи ДПЖ

##### 1.1.1. ДБЖ off-line (Stand-By) типу

##### 1.1.2. ДБЖ Line-interactive типу

##### 1.1.3. Системи типу on-line

#### 1.2. Аналіз структурних схем ДБЖ On-Line типу

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

### РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ДБЖ

#### 2.1. Схема джерела безперебійного живлення, що розробляється

##### 2.2. Розрахунок параметрів вхідної мережі та навантаження

##### 2.3. Вибір акумуляторних батарей

##### 2.4. Розрахунок інвертора напруги

##### 2.5. Розрахунок фільтру на виході інвертора напруги

#### 2.6. Розрахунок імпульсного перетворювача постійної напруги №1

#### 2.7. Розрахунок імпульсного перетворювача постійної напруги №2

##### 2.8. Розрахунок некерованого випрямляча №1

##### 2.9. Розрахунок некерованого випрямляча №2

#### 2.10. Електрична принципова схема ДБЖ з описом роботи її елементів

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

### РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДБЖ

3.1. Опис імітаційної моделі

3.2. Дослідження вищих гармонік струму на виході ДБЖ

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕ – електрична енергія

ЛЕП – лінії електропередавання

ПЛЕП - -повітряні лінії електропередавання

ЯЕЕ – якість електричної енергії

Т – силовий трансформатор

ТС – трансформатор струму

ТН – трансформатор напруги

СБЖ – системи безперебійного живлення

КВ - керованого випрямляча

НВ - некерований випрямляч

ЗП - зарядний пристрій

АБ - акумуляторна батарея

ЗП - зарядний пристрій

ДЗП - додаткове зарядне пристрій

## РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему

### **«Аналіз рівня енергетичної безпеки при використанні систем безперебійного живлення для критичних споживачів електроенергії»**

БОГАЧИКА ДМИТРА

Магістерська робота виконана на \_\_\_\_ сторінок, містить \_\_\_\_ таблиць, \_\_\_\_ рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел.

Забезпечення надійного енергопостачання критичних споживачів електроенергії є одним із ключових завдань сучасної енергетичної системи. Критичні об'єкти, такі як медичні заклади, об'єкти військової інфраструктури, центри обробки даних та інші важливі об'єкти, потребують безперервного електропостачання навіть в умовах аварійних ситуацій. У зв'язку з цим, роль систем безперебійного живлення (СБЖ) стає надзвичайно важливою для підтримки енергетичної безпеки на належному рівні.

Метою даної магістерської роботи є аналіз рівня енергетичної безпеки при використанні систем безперебійного живлення для критичних споживачів електроенергії, визначення основних ризиків та вразливостей в існуючих СБЖ, а також розробка рекомендацій для підвищення надійності таких систем.

Для досягнення поставленої мети використовуються методи системного аналізу, моделювання, експериментальних досліджень та математичного моделювання. Проведено аналіз наукових джерел, а також зібрано емпіричні дані для розуміння роботи СБЖ у різних умовах.

У роботі досліджено різні типи СБЖ, включаючи онлайн-, офлайн- та лінійно-інтерактивні системи. Розглянуто їхню ефективність та вразливості в умовах нестабільної роботи енергосистеми.

Виділено основні ризики для критичних споживачів електроенергії в умовах аварійного живлення, такі як збої, перенавантаження, втрати

електропостачання. Визначено, як ці ризики впливають на енергетичну безпеку та стабільність роботи об'єктів.

Проведено моделювання роботи системи у випадку різних збоїв. На основі отриманих даних створено рекомендації щодо покращення стабільності СБЖ.

Досліджено ефективність використання СБЖ в умовах підвищеного навантаження, розглянуто питання зниження енергетичних витрат і підвищення ефективності за рахунок новітніх технологій та інноваційних підходів.

На основі проведеного дослідження було виявлено, що рівень енергетичної безпеки критичних об'єктів напряму залежить від ефективності застосованих систем безперебійного живлення. Основними факторами, що впливають на надійність СБЖ, є їх технологічні особливості, якість обслуговування та готовність до роботи в умовах високого навантаження.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення технологій СБЖ з використанням штучного інтелекту для більш точного прогнозування можливих збоїв, а також на розробку методів автономного відновлення роботи систем.

ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ, КРИТИЧНІ СПОЖИВАЧІ, НАДІЙНІСТЬ, РИЗИКИ

## **ABSTRACT**

to a master's thesis on

### **«Analysis of the level of energy safety when using uninterruptible power supply systems for critical electricity consumers»**

**BOHACHYK DMYTRO**

The master's work is executed on \_\_\_\_ pages, contains \_\_\_\_ tables, \_\_\_\_ drawings, which characterize the results of research, additions, used literary sources.

Ensuring reliable power supply to critical electricity consumers is one of the key tasks of the modern energy system. Critical facilities such as medical facilities, military infrastructure facilities, data centers and other important facilities require continuous power supply even in emergency situations. In this regard, the role of uninterruptible power supply systems (UPS) becomes extremely important to maintain energy security at the proper level.

The purpose of this master's thesis is to analyze the level of energy security when using uninterruptible power supply systems for critical electricity consumers, identify the main risks and vulnerabilities in existing CSBs, and develop recommendations to improve the reliability of such systems.

To achieve this goal, methods of system analysis, modeling, experimental research and mathematical modeling are used. An analysis of scientific sources was carried out, and empirical data were collected to understand the work of SBJ in various conditions.

The paper studies various types of CSF, including online, offline and linear-interactive systems. Their efficiency and vulnerabilities in the conditions of unstable operation of the power system are considered.

The main risks for critical consumers of electricity in emergency power supply conditions, such as failures, overload, loss of power supply, have been identified. It is determined how these risks affect the energy security and stability of the facilities.

The simulation of the system in case of various failures. Based on the data obtained, recommendations for improving the stability of CSF were created.

The efficiency of the use of SBJ in conditions of increased load was studied, the issues of reducing energy costs and increasing efficiency due to the latest technologies and innovative approaches were considered.

Based on the conducted research, it was found that the level of energy security of critical objects directly depends on the effectiveness of the applied uninterruptible power supply systems. The main factors affecting the reliability of CSF are their technological features, quality of service and readiness to work under high load conditions.

Further research may be aimed at improving SBJ technologies using artificial intelligence to more accurately predict possible failures, as well as developing methods for autonomously restoring systems.

**ENERGY SECURITY, UNINTERRUPTIBLE POWER SYSTEMS, CRITICAL CONSUMERS, RELIABILITY, RISKS**

## ВСТУП

### Актуальність.

В даний час електричні мережі, як промислові, так і загального призначення розвиваються швидкими темпами, і не завжди здатні впоратися з зростаючими навантаженнями, як на етапі розподілу енергії споживачам, і у її передачі. Під час експлуатації електричних мереж, виникають різноманітні проблеми:

- ✓ провали напруги, що виникають зазвичай через підключення споживачів великої потужності не більше цієї електричної мережі;
- ✓ вищі гармоніки; зниження або підвищення напруги щодо номінальних параметрів; тривале відключення напруги, що виникає, як правило, внаслідок аварій.

Дані проблеми можуть призвести до різноманітних негативних наслідків: відхилення від номінального режиму роботи різного обладнання; порушення роботи налагодженого, автоматизованого, безперервного виробництва; втрата даних (при роботі на комп'ютері; сервер); вихід із ладу устаткування.

Перелічені наслідки призводять до порушення технологічного процесу на різних підприємствах, внаслідок чого виникають матеріальні витрати та економічні проблеми. Але якщо ці проблеми тягнуть лише матеріальні витрати, то, наприклад, при порушенні живлення медичного обладнання, охоронно-пожежної сигналізації, вентиляції або обладнання, пов'язане з енергетикою, може призвести до травм робочого та обслуговуючого персоналу, загибелі людей або техногенним катастроф.

З прогресивним розвитком промисловості та науки в різних галузях збільшується потреба в телекомунікаційному та комп'ютеризованому устаткуванні: дата центри, високошвидкісні центри обробки даних, необхідність застосування систем у промисловості, процес роботи яких не можна переривати. Зі збільшенням необхідності такого обладнання, збільшуються і вимоги до джерел електроживлення.

Для досягнення необхідних вимог щодо обладнання споживачів до електроенергії необхідно застосовувати джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Розповсюдження отримали такі типи ДБЖ: Off-line типу, line-interactive типу, з подвійним перетворенням, ферорезонансного типу, з дельта-перетворенням. У даній магістерській дисертації проводиться розробка та дослідження джерела безперебійного живлення відповідальних споживачів електричної енергії.

У ході виконання роботи необхідно вибрати тип джерела безперебійного живлення, спроектувати принципову електричну схему, розробити систему управління, яка забезпечуватиме вихідні параметри напруги, що відповідають вимогам технічного завдання. А також зробити розрахунок та вибрати елементи силової частини та зробити моделювання функціонування даної схеми.

Джерела безперебійного живлення (ДБЖ) є критично важливими для відповідальних споживачів електричної енергії, таких як дата-центри, лікарні, телекомунікаційні системи, банківські установи та промислові підприємства. Основна функція ДБЖ - забезпечення безперервного живлення під час перебоїв у електропостачанні, що дозволяє уникнути пошкоджень обладнання, втрати даних та зупинок у роботі.

Джерела безперебійного живлення можуть бути наступних типів:

✓ **Offline (Standby) UPS:** Це найбільш простий і недорогий тип ДБЖ. Вони забезпечують базовий захист від перепадів напруги, але мають невеликий час перемикання на батарею (зазвичай 2-10 мілісекунд).

✓ **Line-Interactive UPS:** Цей тип має вбудований стабілізатор напруги, що дозволяє коригувати невеликі коливання напруги без переходу на батарею. Час перемикання також невеликий.

**Метою роботи** є оцінка рівня енергетичної безпеки при використанні систем безперебійного живлення для критичних споживачів електроенергії та розробка рекомендацій для забезпечення їхньої безперервної роботи.

**Об'єктом дослідження** є системи безперебійного живлення (СБЖ), які використовуються для забезпечення критичних споживачів електроенергії.

**Предметом дослідження** є технічні характеристики, принципи роботи та ефективність систем безперебійного живлення, а також їх вплив на енергетичну безпеку критичних споживачів електроенергії.

**Основні завдання дослідження:**

✓ Аналіз існуючих систем безперебійного живлення для критичних споживачів, їхні технічні характеристики та особливості застосування.

✓ Вивчення впливу СБЖ на стабільність та надійність електропостачання для критичних об'єктів.

✓ Розробка моделей функціонування СБЖ у різних умовах експлуатації для оцінки їх ефективності.

✓ Проведення експериментальних досліджень щодо роботи СБЖ у реальних умовах та аналіз отриманих результатів.

✓ Оцінка економічної доцільності впровадження систем безперебійного живлення для різних категорій критичних споживачів.

✓ Формування рекомендацій щодо оптимального використання СБЖ для забезпечення безперебійного постачання електроенергії критичним споживачам.

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Аналіз рівня енергетичного безпеки при використанні систем безперебійного живлення для критичних споживачів електроенергії» складається з таких частин: перелік умовних позначень, вступ, три розділи, висновки, список посилань.

## **РОЗДІЛ 1. ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Відповідальний споживач – споживач, у разі порушення електроживлення якого можуть виникнути такі проблеми:

- ✓ аварійні ситуації, які можуть спричинити екологічні лиха, економічні збитки тощо;
- ✓ небезпека для життя людей (аж до смертельних випадків);
- ✓ розлад складних технологічних процесів.

Основними критеріями нормальної роботи різноманітного обладнання або споживачів, які задіяні в різних технологічних процесах, є: безперебійність та висока якість напруги живлення.

Як устаткування можуть бути: серверні приміщення, центри обробки даних, військові об'єкти, медичне обладнання, торгові та розважальні центри, атомні електростанції. Будь-які споживачі, порушення електроживлення обладнання, яких може спричинити вихід з ладу дорогого обладнання, зупинити складний виробничий процес та небезпеку для життя людей вважаються відповідальними споживачами.

Джерело безперебійного живлення, що розробляється, має володіти наступними режимами роботи:

Мережевий режим – режим, у якому навантаження живиться електроенергією від мережі. Цей режим застосовується у випадку, коли показники напруги знаходяться в допустимих межах і відхилення не досягають максимальних значень. У цьому режимі ДБЖ виробляє: за допомогою випрямляча та схеми корекції коефіцієнта потужності перетворювати змінний струм мережі на постійний струм; за допомогою інвертора перетворювати постійний струм на змінний струм зі стабільними та необхідними параметрами; фільтрацію мережевих перешкод; заряджати акумуляторні батареї за допомогою зарядного пристрою.

Автономний режим – режим, коли навантаження отримує енергію лише від акумулятора. В разі відключення мережі або відхилення за допустимі межі параметрів напруги ДБЖ оперативно включає автономний режим живлення навантаження. І переходить назад до мережного режиму при відновленні напруги мережі.

Режим Байпас – режим, який захищає навантаження від виходу з ладу ДБЖ або технічного обслуговування ДБЖ. Якщо перегрів, перевантаження ДБЖ або одна з частин несправна, то ДБЖ автоматично перемикає навантаження безпосередньо до мережі. У разі відновлення номінальних параметрів мережі ДБЖ автоматично повертається до мережного режиму. У режим Байпас також можна перейти в ручному режимі. У цьому режимі навантаження не захищене від неякісної напруги мережі.

### 1.1. Основні типи ДПЖ

Найбільшого поширення набули такі джерела безперебійного живлення: резервні, лінійно-інтерактивні, з подвійним перетворенням енергії (рисунок 1.1).

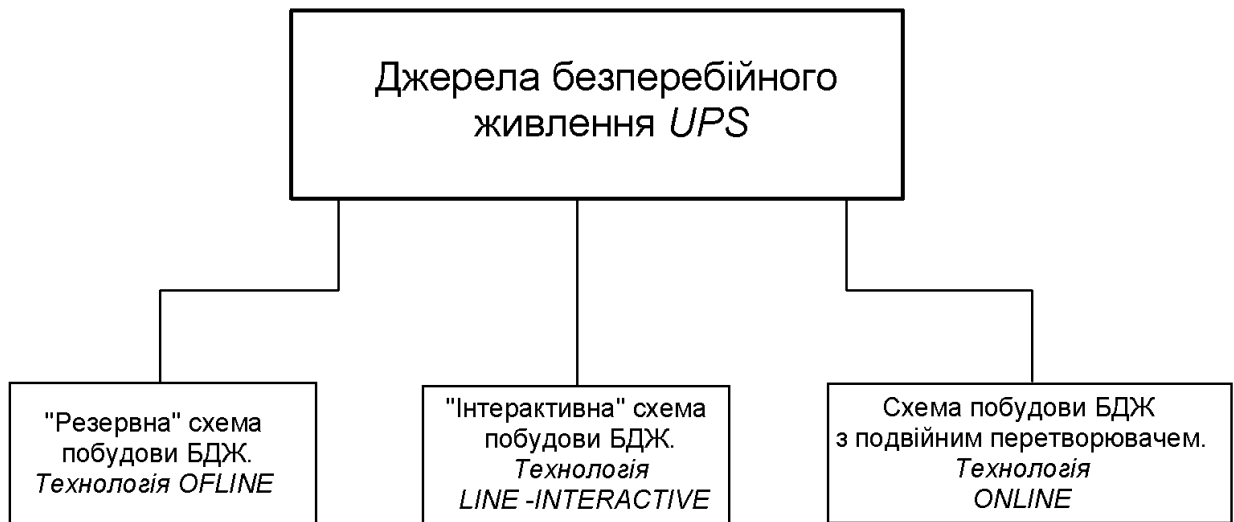


Рисунок 1.1 – Основні типи БДЖ

### 1.1.1. ДБЖ off-line (Stand-By) типу

До простих і тому досить дешевим відносяться резервні ДБЖ (рисунок 1.2). В англійській літературі подібний тип ДБЖ називається Standby, або «off-line», які за будь-яких неполадок в електромережі переходять на живлення від батарей. Застосування тонного типу ДБЖ зустрічається у домашніх чи офісних приміщеннях для захисту ПК. Джерела такого типу не застосовуються для більш відповідальних споживачів, тому що під час перемикання (що займає від 4 до 12 мілісекунд для різних моделей ДБЖ) на виході ДБЖ відсутня напруга. Отже, є невеликий розрив у напрузі, а роботи наприклад серверів це неприйнятно. В таблиці 1.1 наведено переваги та недоліки даного типу ДБЖ.

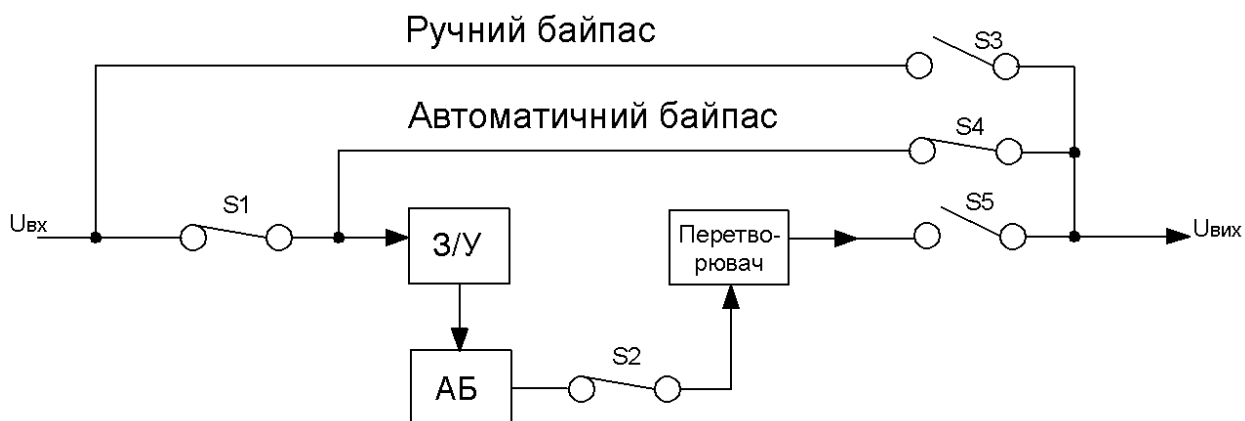


Рисунок 1.2 – Структура ДБЖ резервного типу у загальному вигляді

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки ДБЖ резервного типу

Переваги		Недоліки	
1	ККД біля 99%	1	Відносно тривалий час переключення (порядок 4...12 мс) на живлення від батарей
2	Мають мінімальне тепловиділення	2	Відсутність можливості корегування напруги і частоти
3	Мала вартість	3	Несинусоїдальна форма вихідної напруги (квазі-

			синусоїда, апроксимована синусоїда)
--	--	--	-------------------------------------

### 1.1.2. ДБЖ Line-interactive типу

Даний тип джерела безперебійного живлення (рисунок 1.3) виходить модифікуванням ДБЖ резервного типу шляхом додавання додаткових ланцюгів стабілізації напруги («бустери», «трансформатори» тощо). Інвертор з'єднаний з виходом та працює паралельно зі стабілізатором вхідної напруги, який побудований на основі автотрансформатора. Завдяки цьому перемикання на живлення від батареї не відбувається навіть за значних коливань вхідної напруги. Інвертор забезпечує «підстроювання» вихідної напруги та підзарядку акумуляторів, включаючись на повну потужність при зникненні вхідної напруги. Перемикання живлення навантаження від батареї та назад відбувається розрив електроживлення. В таблиці 1.2 наведено переваги та недоліки ДБЖ типу line-interactive.

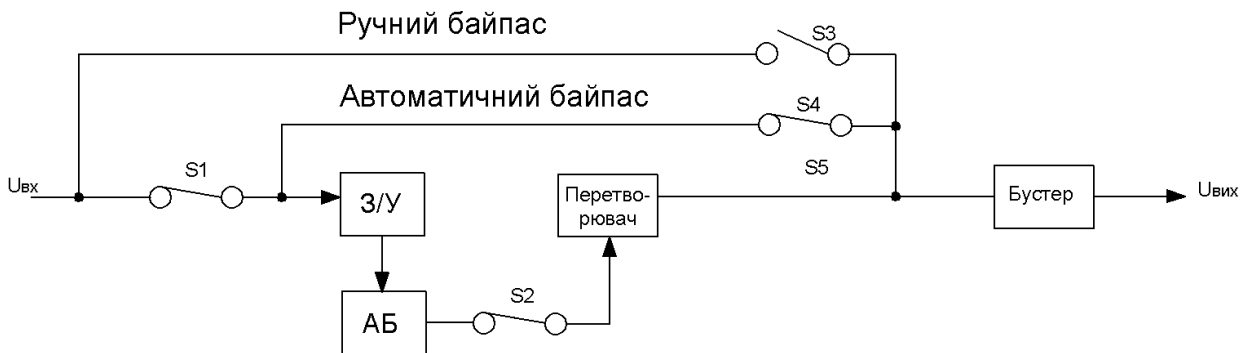


Рисунок 1.3 – Схема ДБЖ типу line-interactive у загальному вигляді

Таблиця 1.2 – Переваги та недоліки ДБЖ лінійно-інтерактивного типу

Переваги		Недоліки	
1	Є можливість регулювання напруги	1	Низьке значення ККД (у порівнянні з системою типу Off-line)
2	Гальванічна розв'язка.	2	Відносно тривалий час переключення (порядок

			4...12 мс) на живлення від батарей
--	--	--	------------------------------------

### 1.1.3. Системи типу on-line

Даний тип ДБЖ (рисунок 1.4) має на увазі, що надходить на вхід ДБЖ змінна мережна напруга перетворюється випрямлячем постійне, а потім за допомогою інвертора знову в змінну.

Акумуляторна батарея, постійно включена між випрямлячем та інвертор. Схема On-Line забезпечує ідеальну вихідну напругу за будь-яких неполадок в електромережі. Вона характеризується нульовим часом перемикавання з нормального режиму в автономний та назад без перехідних процесів у вихідній напрузі. В таблиці 1.3 наведено переваги та недоліки ДБЖ on-line типу.

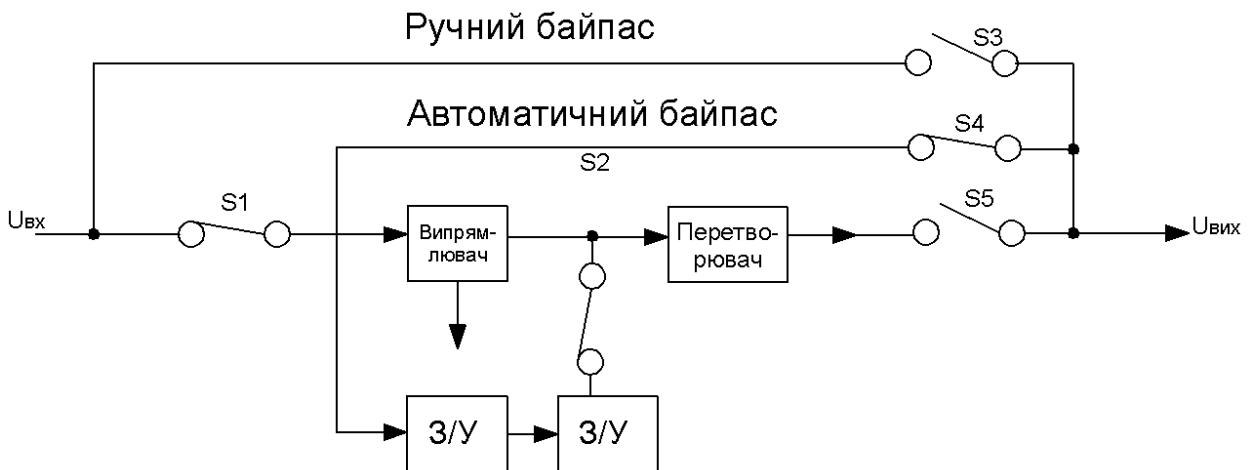


Рисунок 1.4 – ДБЖ on-line типу

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки ДБЖ on-line типу

		Недоліки	
1	Відсутність часу переключення на живлення від батарей	1	Низький ККД (80-94%) підвищена галасливість і тепловиділення
2	Синусоїдальна форма вихідної напруги	2	Висока вартість
3	Можливість коригування і напруги, і частоти	-	-

Для забезпечення якісного електроживлення відповідального споживача необхідно напруги із частотою 50 Гц. ДБЖ резервного (off line) типу має відносно великий час перемикання (4..12 мс), а також не має можливості регулювати напругу та частоту. ДБЖ типу Line-interactive також має значний час перемикання, не фільтрує частоту від перешкод та не забезпечує коригування напруги за частотою. ДБЖ on-line типу, представлений рисунку 1.4, відфільтровує напругу, забезпечує перемикання на роботу від акумуляторних батарей без розриву напруги живильного навантаження, рахунок того, що комутуючі ключі знаходяться в режимі плаваючого заряду. Він повністю підходить для живлення відповідальних споживачів, забезпечує всі вимоги до ДБЖ і забезпечує рішення поставленого завдання. Для подальших розрахунків вибираємо on-line тип ДБЖ.

## **1.2. Аналіз структурних схем ДБЖ On-Line типу**

Джерела безперебійного живлення On-Line типу поділяють на два типу:

- ✓ Трансформаторні;
- ✓ Безтрансформаторні.

Цей поділ заснований не тільки через застосування трансформаторів, а й загалом через особливості побудови схеми ДБЖ

### **Безтрансформаторні джерела безперебійного живлення**

При побудові джерела безперебійного живлення без трансформатора необхідно враховувати, що інвертор повинен забезпечувати більш висока напруга, тому в ланцюзі постійного струму необхідно встановити пристрої, що підвищують напругу – ППН (рисунок 1.5).

За допомогою перетворювачів постійної напруги можна здійснити регулювання постійної напруги, таким чином, можливе застосування некерованих випрямлячів. Але варто зазначити, що даний тип випрямляча не має можливості регулювання вхідного напруги, а отже неможливо здійснити плавний старт ДБЖ.

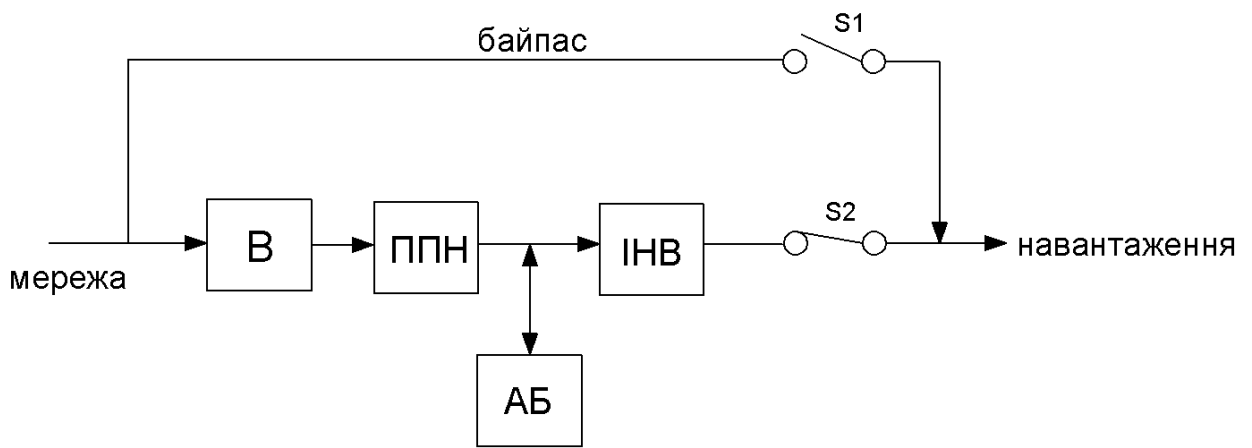


Рисунок 1.5 - Блок-схема ДБЖ On-line типу без трансформатора (випрямляч, ППН-перетворювач постійної напруги; ІНВ інвертор; S1-S2-комутаційні ключі)

Відсутність трансформатора в даній схемі ДБЖ сприяє зниженню габаритних розмірів та загальній масі пристрою. Трансформатор займає досить великий обсяг у корпусі пристрою, тим самим його відсутність забезпечує вимоги, що пред'являються доступу частин, що обслуговуються. Коефіцієнт потужності безтрансформаторного джерела безперебійного живлення досягає 0.95-0.99, а значення коефіцієнта корисної дії (ККД) досягає значень 93-93.5%, що трохи вище значень ДБЖ з трансформатором (див. нижче).

### **Трансформаторні джерела безперебійного живлення**

Для оптимального заряджання акумуляторних батарей необхідно знизити пульсації напруги, що заряджає, для чого на виході випрямляча в однофазних джерелах безперебійного живлення ставлять фільтр. Оскільки вихідний трансформатор забезпечує підвищення напруги, то інвертор може працювати при зниженій напрузі, вступник з його вхід. Трансформатор та конденсатори, що знаходяться на виході інвертора виконують роль пасивного фільтра.

Через застосування трансформатора в даному типі ДБЖ, збільшуються габаритні розміри та маса пристрою в цілому, а через великого обсяги, займаним трансформатором ускладнюється обслуговування та доступ до

складових частин ДБЖ, тому необхідний доступ до комплектуючих із різних боків, що ускладнює конструкцію.

При використанні стандартних шести імпульсних випрямлячів, трансформаторні джерела безперебійного живлення (рисунок 1.6) породжують у вхідних ланцюгах високий рівень гармонік. Високий рівень гармонік, близько 28%, при застосуванні пасивних фільтрів, суттєво знижується. Також пасивні фільтри суттєво підвищують коефіцієнт потужності від 0.8 до 0.89-0.97

В даному типі джерела безперебійного живлення випрямляч суміщений із зарядним пристроєм акумуляторної батареї, що дозволяє забезпечити необхідний зарядний струм для акумуляторної батареї.

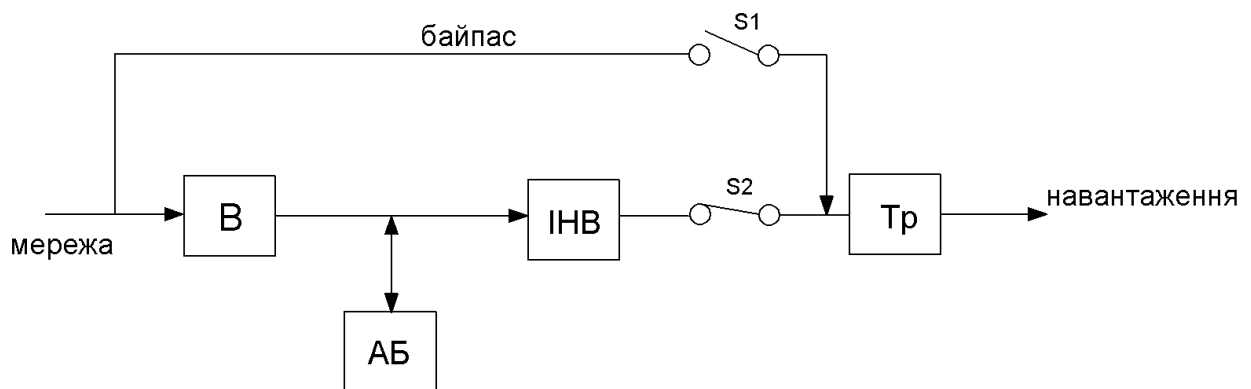


Рисунок 1.6 – Блок-схема ДБЖ On-line типу із трансформатором

Застосування трансформатора в даному типі джерела безперебійного живлення знижує загальний ККД джерела, але при певному алгоритмі управління інвертора, наприклад, просторово-векторної модуляції, ККД цього типу може становити 92-93%. Застосування трансформатора в даному типі ДБЖ забезпечує відсутність постійної складової у вихідній напрузі, що є перевагою, а також наявність трансформатора забезпечує гальванічну розв'язку.

Розглянувши переваги та недоліки двох варіантів побудови ДБЖ On-Line типу, вибираємо джерело безперебійного живлення без трансформатора,

основна перевага яких, спрощена конструкція, менші габаритні розміри та маса.

Розглянемо 4 найпоширеніші схеми побудови безтрансформаторних ДБЖ On-Line типу.

1) На рисунку 1.7 представлена схема, в якій вхідний напруга регулюється за допомогою керованого випрямляча (КВ). Якщо напруга нижче рівня, необхідного споживачеві, то за допомогою перетворювача постійної напруги (ППН) напруга збільшується до номінального значення. За допомогою інвертора (І) відбувається перетворення постійної напруги на змінне. На виході інвертора встановлюється фільтр для зменшення пульсацій вищих гармонік, фільтрації та згладжування напруги. В цій схемі, замість керованого випрямляча (УВ), можна використовувати некерований випрямляч (НВ), при такій побудові схеми, регулювання вхідного напруга складає ППН.

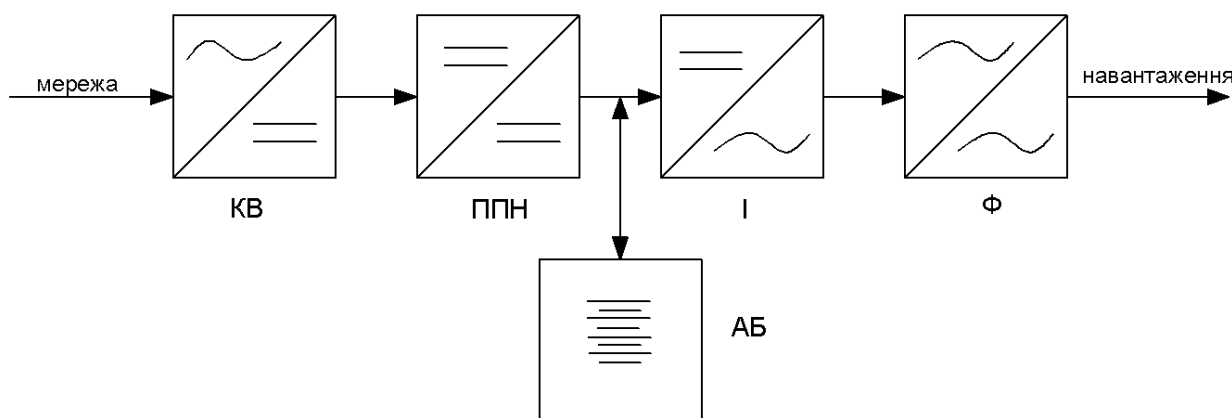


Рисунок 1.7 – Структурна схема ДБЖ з АБ у ланцюзі живлення інвертора

Дана схема має мінімальну кількість блоків, проте при такому побудова схеми зменшується надійність, наприклад, при некоректної роботи чи поломки УВ чи ППН, є ймовірність виникнення великих струмів на ділянці з постійною напругою, що може призвести до серйозних збитків пристрою в цілому.

2) Для заряду акумулятора можна використовувати окремий зарядний пристрій (ЗП), схема побудована за цим принципом представлена рисунку 1.8.

Акумуляторна батарея (АБ) заряджається незалежно від загальної схеми, тим самим загалом підвищується надійність. Окремий зарядний пристрій дозволяє знизити навантаження на керовані випрямляч (КВ). При аварійному режимі роботи схеми живлення здійснюється безпосередньо від акумуляторних батарей, а верхня частина схеми знаходиться в режимі плаваючого заряду, завдяки комутуючим ключам. При заряді АБ окремими КВ забезпечується регулювання процесу заряду, що сприятливо відображається на стані АБ. Недоліком даної схеми є більш складна конструкція і система управління, порівняно із схемою, представленою вище.

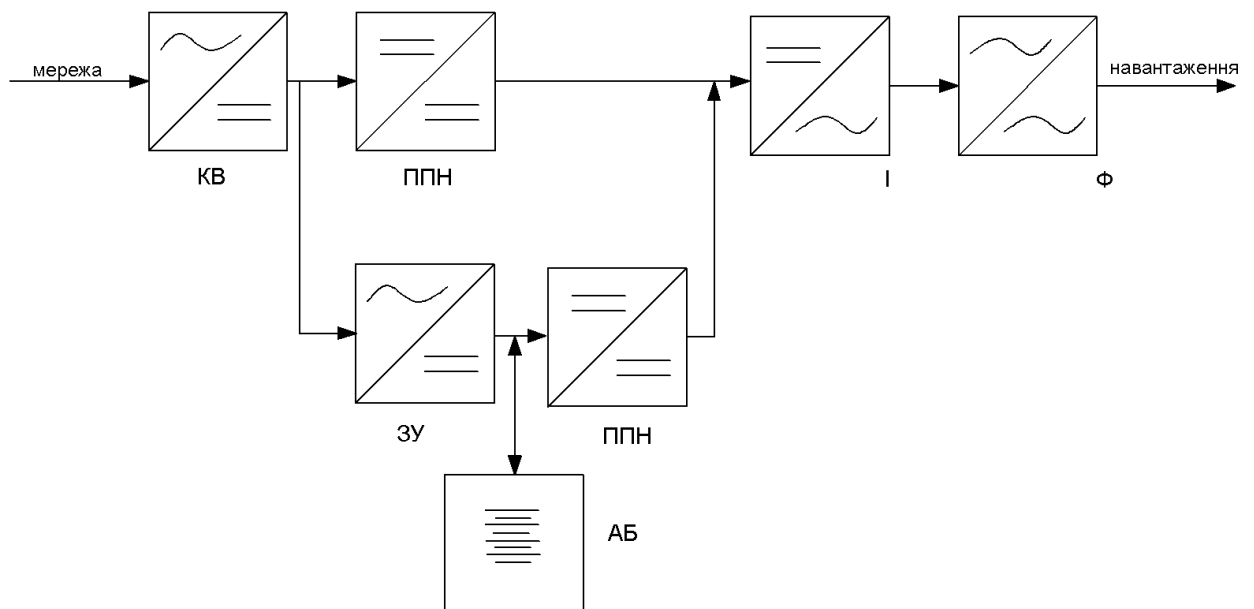


Рисунок 1.8 – Структурна схема ДБЖ з окремим зарядним пристроєм

3) В схемі представленої на рисунку 1.9, при побудові використовувався окремий зарядний пристрій (ЗП), живлення якого здійснюється паралельно з живленням інвертора, що є відмінною особливістю зі схемою представленою вище. В даному випадку, ЗУ перетворює постійну напругу одного рівня на постійну напругу іншого рівня, тим самим забезпечуючи оптимальні умови для заряду акумуляторної батареї (АБ). В режимі АБ перебуває в режимі підзарядки. У цій схемі є тиристор-силовий керований ключ (К), який у

мережному режимі, замикає гілку, через яку в аварійному режимі, живить навантаження АБ.

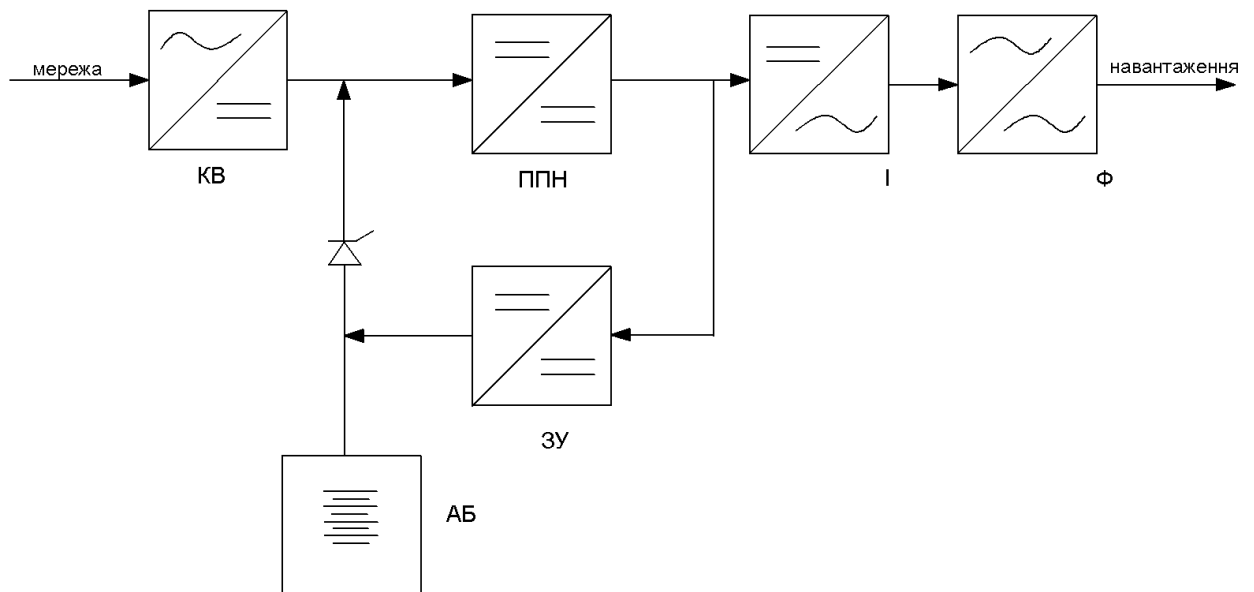


Рисунок 1.9 – Структурна схема ДБЖ із зарядним пристроєм у ланцюгу живлення інвертора

Недолікам даної схеми, на відміну від схеми, представленої вище (рисунок 1.8), є ускладнення конструкції та через відсутність окремого входу для ЗП, зменшується надійність ДБЖ загалом.

4) Для вирішення проблеми низької надійності, у схемі представленої на рисунку 1.10, застосовується додаткове зарядне пристрій (ДЗП). У номінальному-мережевому режимі заряд акумуляторної батареї (АБ) здійснюється через перетворювач постійної напруги (ППН). Якщо необхідно керувати струмом заряду, для оптимальної зарядки АБ, використовується ДЗП. В даній схемі є тиристор-силовий керований ключ(К), який у мережному режимі, замикає гілку, через яку аварійному режимі, живить навантаження АБ. До недоліків схеми можна віднести ускладнення як системи управління, так і конструкції ДБЖ загалом, що тягне задля його подорожчання.

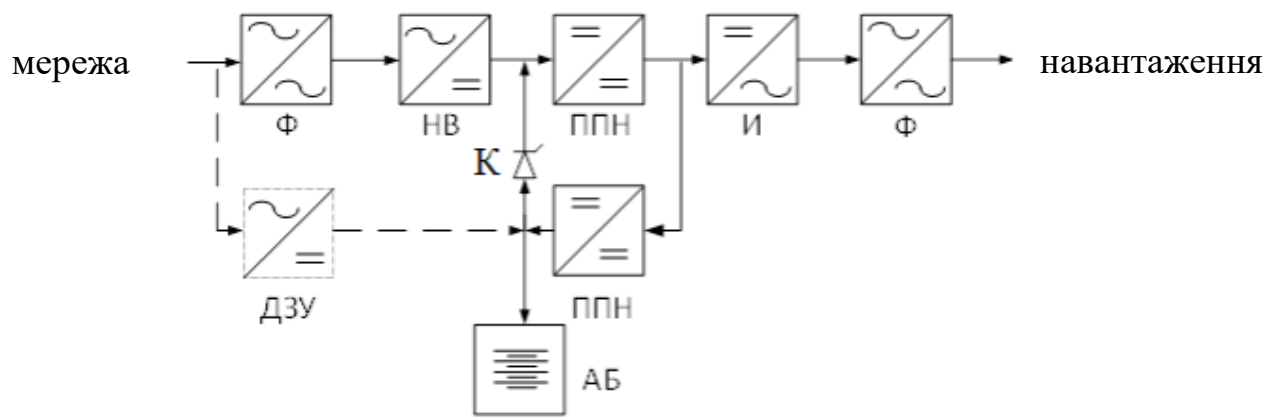


Рисунок 1.10 – Структурна схема ДБЖ з подвійним перетворенням та додатковим зарядним пристроєм

Розглянувши всі переваги та недоліки розглянутих вище схем, для забезпечення вирішення поставленого завдання, вибирається структурна схема ДБЖ з окремим зарядним пристроєм, представлена рисунку 1.8. Дана схема володіє оптимальним кількістю блоків, необхідних для отримання якісного напруги для живлення відповідальних серверів Також дана схема має окремий зарядний пристрій, що забезпечить заряд АБ, необхідною напругою, тим самим збільшить термін їхньої експлуатації.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

В розділі «Джерела безперебійного живлення для відповідальних споживачів електричної енергії змінного струму» було розглянуто основні типи джерел безперебійного живлення (ДБЖ) та проведено аналіз структурних схем ДБЖ On-Line типу. Основні висновки цього розділу включають:

Аналіз основних типів ДБЖ дозволив виявити їх ключові переваги та недоліки для забезпечення безперебійного живлення відповідальних споживачів.

Використання резервних (Standby) ДБЖ є ефективним для менш критичних навантажень, однак вони не забезпечують належного рівня захисту для високочутливих споживачів.

Лінійно-інтерактивні (Line-Interactive) ДБЖ надають додаткові можливості для стабілізації напруги та кращого захисту від перепадів напруги, але мають певні обмеження щодо тривалості роботи при значних навантаженнях.

On-Line (подвійного перетворення) ДБЖ забезпечують найвищий рівень захисту та стабільності електроживлення завдяки постійному перетворенню електроенергії, що дозволяє мінімізувати перерви в живленні.

Структурні схеми ДБЖ On-Line типу забезпечують безперервне живлення критичних споживачів завдяки технології подвійного перетворення, що дозволяє ефективно усувати перешкоди та стабілізувати напругу.

Аналіз структурних схем показав, що основними компонентами таких систем є випрямляч, інвертор, батарея та статичний перемикач, які працюють у тісній взаємодії для забезпечення безперебійного живлення.

Використання ДБЖ On-Line типу забезпечує нульовий час перемикання на резервне живлення, що є критично важливим для високочутливих електронних систем та обладнання.

Переваги On-Line ДБЖ включають високу стабільність вихідної напруги, можливість роботи з великим спектром вхідних напруг та мінімізацію

гармонічних спотворень, що дозволяє значно підвищити надійність живлення відповідальних споживачів.

Загальний аналіз показав, що використання джерел безперебійного живлення, особливо On-Line типу, є ефективним засобом для забезпечення стабільного та надійного електропостачання критичних споживачів електричної енергії змінного струму. Це дозволяє значно підвищити рівень енергетичної безпеки та мінімізувати ризики, пов'язані з перебоями в електропостачанні. Впровадження рекомендацій щодо вибору та використання різних типів ДБЖ залежно від специфіки споживачів сприятиме підвищенню надійності роботи електромереж та зменшенню втрат, пов'язаних з аварійними відключеннями.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ДБЖ

### 2.1. Схема джерела безперебійного живлення, що розробляється

ДБЖ, що використовується, буде виконаний за технологією On-line типу із режимом ручного Bu-pass. Структурна схема ДБЖ, що розробляється наведено на рисунку 2.1.

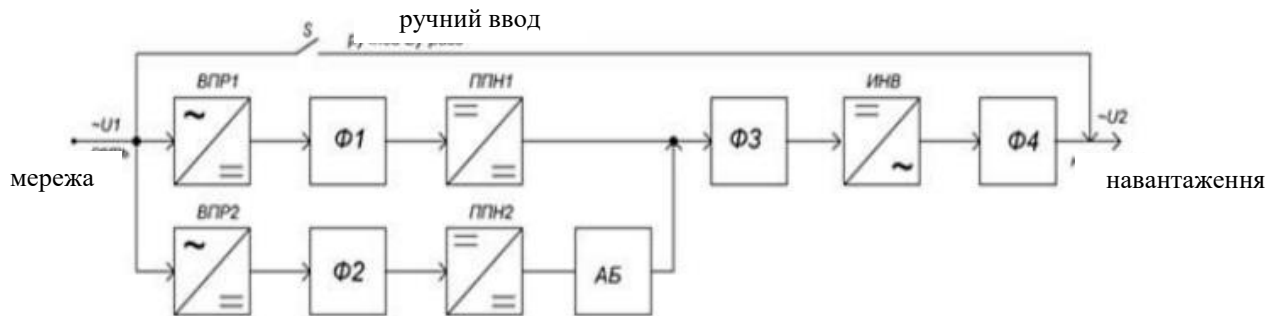


Рисунок 2.1 - Структурна схема ДБЖ, що розглядається

В мережевому режимі роботи, живлення навантаження буде здійснюватися по ланцюга «МЕРЕЖА-ВПР1-Ф1-ППН1-Ф3-ІНВ-Ф4-НАВАНТАЖЕННЯ». Паралельно буде відбуватися зарядка АБ і, надалі, батарея перебуватиме в режим очікування. В цій схемі буде застосований трирівневий інвертор, оскільки він забезпечує синусоїду вихідної напруги, максимально наближену до ідеальної.

В разі втрати напруги живлення, інвертор починає працювати в аварійному режимі Основний ланцюг живлення при цьому знеструмлюється.

Автоматично, без розриву живильної синусоїди, відбувається перемикання на аварійне живлення від акумуляторної батареї, що знаходиться в режимі очікування. Ланцюг живлення виглядатиме так: «АБ Ф3-ІНВ-Ф4-НАВАНТАЖЕННЯ». За рахунок особливостей використовуваного інвертора, підключення батарей відбувається послідовно-паралельно відношенню один до одного.

## 2.2. Розрахунок параметрів вхідної мережі та навантаження

Номінальна напруга мережі живлення:

$$U_{\text{ном.мережі}} = 220 \text{ (В)}$$

Напруга мережі живлення  $U_{c \text{ макс}}$  і  $U_c$  хв згідно технічного Завдання визначаємо за формулою:

$$U_{c \text{ макс}} = U_{c \text{ ном}} + 0,15 \cdot U_{c \text{ ном}} = 220 + 33 = 253 \text{ В}, \quad (2.1.)$$

$$U_{c \text{ мин}} = U_{c \text{ ном}} - 0,15 \cdot U_{c \text{ ном}} = 220 - 33 = 187 \text{ В}. \quad (2.2.)$$

Номінальна, мінімальна та максимальна напруга навантаження, згідно технічним завданням:

$$U_{\text{ном}} = 220 \text{ В};$$
$$U_{\text{ном макс}} = U_{\text{ном}} + 0,03U_{\text{ном}} = 220 + 6,6 = 226,6 \text{ В}; \quad (2.3.)$$

$$U_{\text{ном мин}} = U_{\text{ном}} - 0,03U_{\text{ном}} = 220 - 6,6 = 213,4 \text{ В}. \quad (2.4.)$$

$$I_{\text{ном макс}} = \frac{P_{\text{макс}}}{U_{\text{ном мин}}} = \frac{S \cdot \cos_{\text{макс}} \varphi}{U_{\text{ном мин}}} = \frac{10000 \cdot 0,99}{213,4} = 46,4 \text{ (А)}; \quad (2.5.)$$

$$I_{\text{ном мин}} = \frac{P_{\text{макс}}}{U_{\text{ном макс}}} = \frac{S \cdot \cos_{\text{макс}} \varphi}{U_{\text{ном макс}}} = \frac{10000 \cdot 0,99}{226,6} = 43,7 \text{ (А)}. \quad (2.6.)$$

## 2.3. Вибір акумуляторних батарей

Напруга заряду моноблочної батареї, що складається з 6 секцій, становить 14 В, напруга розряду 11 В. Оптимальним струмом заряду акумуляторних батарей вважається струм, що відповідає 10% від номінальної ємності АБ. Нормальний заряд триває близько 10 годин.

Заряджаючи батареї струмом більше 10% від номінальної ємності можливо викликати перегрів та втрати активної частини пластин. Але для зменшення часу заряду збільшують струм заряду до 20%.

При послідовному з'єднанні батарей однакової ємності загальна ємність батарейного блоку не змінюється. Якщо потрібно збільшити сумарну ємність або отримати більший струм розряду, застосовується паралельне з'єднання, при якому напруга блоку не збільшується.

В ДБЖ on-line типу акумуляторні батареї постійно заряджаються від мережі без перезарядки. Зменшення зарядного струму відбувається після того, коли напруга на виводах батареї перестає підвищуватись. Це говорить про те, що батарея автоматично регулює процес заряду та не створює додаткових вимог до пристрою зарядного пристрою.

Амплітуда першої гармоніки напруги на навантаженні:

$$U_{\text{т ном}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ном макс}} = \sqrt{2} \cdot 226.6 = 320.46 \text{ (В)}. \quad (2.7.)$$

Прийmemo максимальний коефіцієнт модуляції інверторна  $M_{\text{max}} = 0,95$

Втрати напруги у силових ключах  $\Delta U_{\text{ключ}} = 2,5 \text{ В}$ .

Падіння напруги на вхідному реакторі:

$$\Delta U_{\text{L}} = 0.01 \cdot U_{\text{с ном}} = 0.01 \cdot 220 = 2.2 \text{ (В)}. \quad (2.8.)$$

Напруга входу інвертора відповідає напрузі розряду акумуляторних батарей:

$$U_{\text{д макс}} = U_{\text{бр}} = \frac{U_{\text{т ном}} + 2 \cdot \Delta U_{\text{ключ}} + \Delta U_{\text{L}}}{M_{\text{макс}}}. \quad (2.9.)$$

Відповідно (2.9) знаходимо напругу розряду акумуляторних батарей:

$$U_{\text{бр}} = \frac{320.46 + 2 \cdot 2.5 + 2.2}{0.95} = 344.91 \text{ (В)}.$$

Необхідна кількість батарей:

$$N = \frac{U_{\text{бр}}}{11} = \frac{344.91}{11} = 31.36 \approx 32. \quad (2.10)$$

Максимальна потужність на навантаженні:

$$P_{\text{нмакс}} = S \cdot \cos_{\text{макс}} \varphi = 10000 \cdot 0.8 = 8.0 (\text{кВт}).$$

$\varphi$  – коефіцієнт потужності приймемо рівним 0,8 [6].

Приймемо ККД інвертора  $\eta_{\text{інв}} = 0,95$ .

Потужність розряду батареї з урахуванням (2.11):

$$P_{\text{брмакс}} = \frac{P_{\text{нмакс}}}{\eta_{\text{інв}}} = \frac{8000}{0.95} = 8421 (\text{Вт}).$$

Максимальний струм розряду батареї:

$$I_{\text{брмакс}} = \frac{P_{\text{брмакс}}}{N \cdot U_{\text{бр}}} = \frac{8421}{32 \cdot 11} = 24.42 (\text{А}).$$

Ємність батареї:

$$Q_{\text{б}} = I_{\text{брмакс}} \cdot t_{\text{автраб}} = 24.42 \cdot 0.167 = 4.07 (\text{А} \cdot \text{год})$$

де  $t_{\text{авт.роб.}} = \frac{10}{60} = 0,167$  (годин), згідно технічного завдання

Для підтримки роботи навантаження протягом 10 хвилин потрібно акумуляторна батарея у якої так розряду дорівнює 24,42 А.

Для джерела безперебійного живлення, що розробляється, вибираємо акумуляторну батарею фірми Sonnenschein A412/20, здатну протягом 10 хвилин видавати струм розряду рівний 25 А. У таблиці 2.1 представлені технічні характеристики даної акумуляторної батареї, а таблиці 2.2 розрядна характеристика.

Таблиця 2.1 –Технічні характеристики акумулятора A412/20

$U_{\text{ном}}$ , В	Номинальна ємність, А·години	Струм розряду, А	Максимальне навантаження, А	Час резервування, хвилини	Струм резервування, А
12	20	2,0	200	10	25

Таблиця 2.2 – Розрядна характеристика акумулятора.

$V_{PC}$	5 хвилин	10 хвилин	15 хвилин
1,85	33	25	22
1,8	36	27	23
1,75	45	34	27

Струм заряду батареї:

$$I_{б\text{зар}} = \frac{Q_{10}}{10} = \frac{20}{10} = 2.0(\text{А}). \quad (2.15)$$

Потужність зарядного пристрою на виході:

$$P_{з\text{у}} = I_{б\text{зар}} \cdot N \cdot U_{б\text{зар}} = 2.0 \cdot 32 \cdot 14 = 0.896(\text{кВт}). \quad (2.16)$$

#### 2.4. Розрахунок інвертора напруги

У джерелі безперебійного живлення для формування вихідного напруги, використовується інвертор. Для того, щоб вихідна напруга мала високу якість, інвертор повинен мати якісне складання та електрична схема, що забезпечує необхідні вихідні параметри.

При розробці ДБЖ, для формування напруги, використовується три рівня напруги: напруга на одному конденсаторі, нульовий рівень та напруга двох послідовно з'єднаних конденсаторах. Через даного поділу напруги, що розглядається інвертор називається трирівневим (рисунок 2.2.).

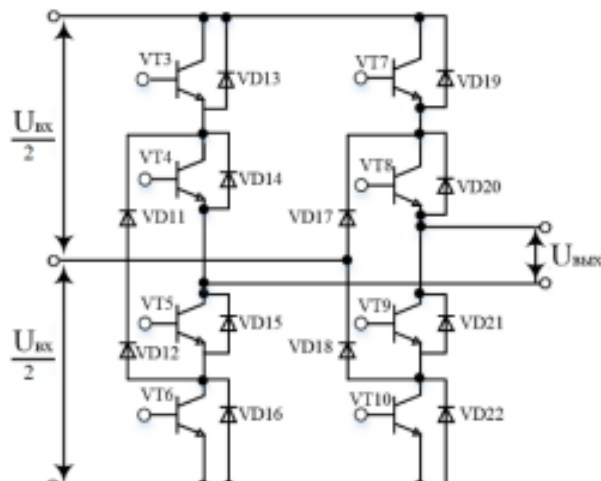


Рисунок 2.2. – Інвертор постійної напруги

Трирівневий інвертор має ряд переваг, вплив яких і позначився на виборі схеми побудови інвертора:

✓ При роботі інвертора, у режимі синусоїдальної ШІМ, забезпечуються найменші спотворення струму та напруги навантаження;

✓ Є можливість використовувати порівняно низьковольтні елементи у схемі (конденсатори, транзисторні зборки), при підвищеній напрузі як на вході, так і на виході інвертора;

✓ При роботі інвертора, у режимі синусоїдальної ШІМ, у напівпровідникових елементах, мінімальні динамічні втрати;

Розрахунок інвертора напруги полягає у виборі IGBT-транзисторів зі вбудованими зворотними діодами. Елементи будуть вибиратися по максимальному струму колектора з урахуванням хрест-фактора і напруги на колекторі. Коефіцієнт запасу приймемо рівним 1,5.

Під час роботи інвертора до закритого транзистора прикладається напруга ланки постійного струму, за винятком напруги переходу колектор-емітер відкритого транзистора. Зазвичай значення падіння напруги на відкритому IGBT-транзисторі приймають рівним  $U_{к-е\text{макс}} = 1,7 \dots 2,8 \text{ В}$ .

Хрест-фактор навантаження (Crest Factor) – показник, що характеризує ДБЖ здатністю забезпечувати живленням нелінійне навантаження, що споживає нелінійний імпульсний струм. Визначається як відношення амплітуди імпульсного струму в нелінійному навантаженні до амплітуди струму гармонійної форми при еквівалентній спожитій потужності. Для навантаження сер вірних приміщень, хрест-фактор(CF) приймають рівним 3.

Визначаємо зворотну напругу на транзисторі:

$$U_{к-э\text{макс}} = U_{бр} - U_{к-э\text{нас}} = U_{d\text{ макс}} - U_{к-э\text{нас}} = 344.91 - 2.5 = 342.41 \text{ (В)}. \quad (2.17)$$

Максимальний колекторний струм через транзистор з урахуванням хрест-фактора:

$$I_{к\text{ макс}} = \sqrt{2} \cdot I_{ном\text{ макс}} \cdot CF = \sqrt{2} \cdot 46.39 \cdot 3 = 196.82 \text{ (А)}. \quad (2.18)$$

За отриманими розрахунковими параметрами вибираємо модуль IGBT CM200DY-12H, що випускаються фірмою Mitsubishi Electric Semiconductor.

Протікання струму через діоди нульової точки має на увазі його завантаженість лише половиною навантаження струму транзистора. Але у випадку виходу з ладу одного з транзисторів, все навантаження припадає на діод. В зв'язку з цим вибираємо діод із запасом по струму та напрузі.

### 2.5. Розрахунок фільтра на виході інвертора напруги

При побудові схеми джерела безперебійного живлення, як вихідного фільтра, після інвертора, застосовуємо Г-подібний LC-фільтр, представлений рисунком 2.3. Головними завданнями даного фільтра є виділення першої гармоніки напруги, що формується інвертором, і навіть ослаблення вищих гармонік.

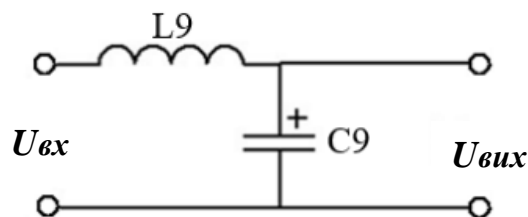


Рисунок 2.3. - Схема фільтра на виході інвертора

Для розрахунку даного фільтра скористаємося методом накладання, використовуючи схему заміщення, яка представлена на рисунку 2.4. У розроблюваному ДБЖ інвертор формує напругу в режимі синусоїдальної ШІМ, тому на вхід даного фільтра надходить напруга, яка є високочастотними модульованими імпульсами, що містять першу і високочастотні гармоніки. Виходячи з цього при розрахунку фільтра можна використовувати наведену схему заміщення, яка представлена на рисунку 2.5, враховуючи, що  $U_{(1)}$  - джерело першої корисної гармоніки,  $U_{(n)}$  - джерело інших гармонік.

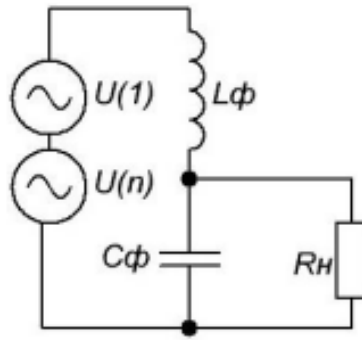


Рисунок 2.4 – Схема заміщення вихідного ланцюга інвертора

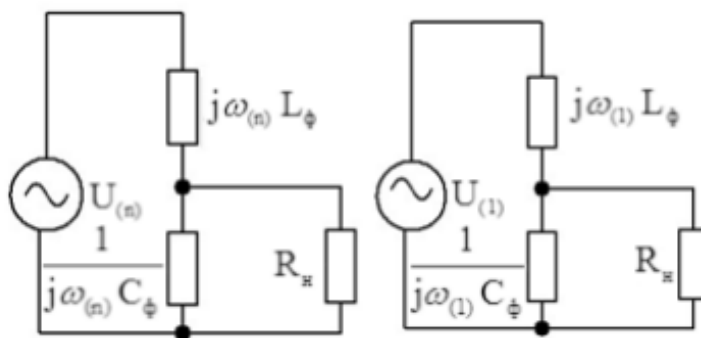


Рисунок 2.5 – Наведена схема заміщення вихідного ланцюга інвертора

Для розрахунку індуктивності поставимо падіння напруги на ній від першої гармоніки  $U_{L(1)} = 2,3$  В,  $I_{L(1)}$  - перша гармоніка струму навантаження.

Реактивний опір індуктивності  $L_9$ :

$$X_{L(1)} = \frac{U_{L(1)}}{I_{L(1)}} = \frac{2.3}{46.39} = 0.05 \quad (\text{Ом}) \quad (2.19)$$

Індуктивність фільтра:

$$L_\phi = \frac{X_{L(1)}}{\omega} = \frac{X_{L(1)}}{2\pi f_{\text{внх}}} = \frac{0.05}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.193 \text{ мГн} \quad (2.20)$$

Номінальний струм навантаження:

$$I_{\text{н.ном}} = \frac{S_{\text{внх.}}}{U_{\text{н.ном}}} = \frac{10000}{220} = 45.46 \quad (\text{А}) \quad (2.21)$$

Струм, який протікає через ємність, складаємо 20% від струму навантаження:

$$I_c = 0.2 \cdot I_{\text{ном}} = 0.2 \cdot 45.46 = 9.09 \quad (\text{А}) \quad (2.22)$$

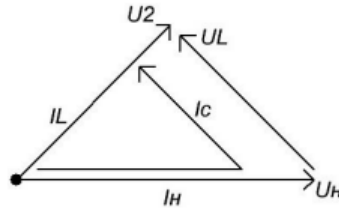


Рисунок 2.6. – Векторна діаграма струмів і напруг

Виходячи з вище зазначеної діаграми, визначаємо струм, що протікає через індуктивність:

$$I_{L\phi} = \sqrt{I_c^2 + I_{\text{ном}}^2} = \sqrt{9.09^2 + 45.46^2} = 46.36 \quad (\text{А}) \quad (2.23)$$

Знаходимо опір індуктивності:

$$X_{L\phi} = \frac{U_{L(1)}}{I_{L\phi}} = \frac{2.3}{46.36} = 0.05 \quad (\text{Ом}) \quad (2.24)$$

Тоді індуктивність фільтру буде дорівнювати:

$$L_\phi = \frac{X_{L\phi}}{2\pi f_{\text{вих}}} = \frac{0.05}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 158 \quad (\text{мкГн}) \quad (2.25)$$

Визначаємо втрати в реакторі L9:

$$\Delta P_L = 0.01 \cdot P_{\text{макс}} = 0.01 \cdot 8000 = 80 \quad (\text{Вт}) \quad (2.26)$$

Визначаємо активний опір реактора L9:

$$R_L = \frac{\Delta P_L}{I_{\text{ном}}^2} = \frac{80}{45.46^2} = 0.039 \quad (\text{Ом}) \quad (2.27)$$

Обійдемо контури і запишемо розрахункові рівняння:

$$I_{\text{сф}} = \frac{U_{(n)}(j\omega)}{X_{L\phi} + \frac{X_{\text{сф}} \cdot R_{\text{н}}}{X_{\text{сф}} + R_{\text{н}}}} \quad (2.28)$$

$$I_{C\phi} = \frac{U_{(n)}(j\omega) - U_n(j\omega)}{X_{L\phi}} = \frac{U_{(n)}(j\omega) - k_r \cdot U_{(n)}(j\omega)}{X_{L\phi}} = \frac{U_{(n)}(j\omega) \cdot (1 - k_r)}{X_{L\phi}} \quad (2.29)$$

Прирівнюємо вирази (2.28) і (2.29), виражаємо  $X_{C\phi}$ :

$$X_{C\phi} = \frac{X_{L\phi} \cdot k_r \cdot R_n}{(1 - k_r) \cdot R_n - X_{L\phi} \cdot k_r} \quad (2.30)$$

де  $k_r$  - коефіцієнт гармонік, приймаємо рівним 3%.

Визначимо номінальний опір навантаження:

$$R_n = \frac{U_{н.ном}}{I_{н.ном}} = \frac{220}{45.46} = 4.84 \quad (\text{Ом}) \quad (2.31)$$

Визначаємо на реальній частоті комутацій прийнятої 25 кГц, що відповідає частоті комутацій IGBT модулів:

$$X_{L\phi} = \omega_k L_{\phi} = 2\pi f_k L_{\phi} = 2 \cdot 3.14 \cdot 25000 \cdot 0.158 \cdot 10^{-3} = 24.81 \quad (\text{Ом}) \quad (2.32)$$

Підставляючи (2.13) отримуємо:

$$X_{C\phi} = \frac{24.81 \cdot 4.84 \cdot 0.03}{(1 - 0.03) \cdot 4.84 - 24.81 \cdot 0.03} = 0.92 \quad (\text{Ом})$$

Отже:

$$C = \frac{1}{\omega_k \cdot X_{C\phi}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 25000 \cdot 0.92} = 7 \quad (\text{мкФ}) \quad (2.33)$$

За отриманими розрахунковими параметрами вибираємо конденсатор К78-36.

## 2.6. Розрахунок імпульсного перетворювача постійної напруги №1

Для забезпечення необхідного рівня напруги на вході інвертора необхідно стабілізувати напругу, що подається з мережі з відхиленнями. В цій схемі як стабілізатор напруги виступає імпульсний перетворювач постійної напруги, який підвищує постійну напругу одного рівня в постійну напругу іншого рівня (рисунок 2.7).

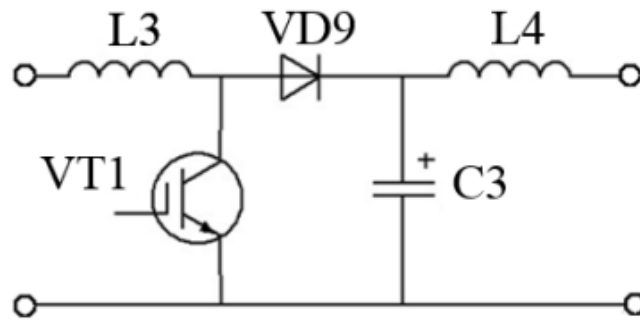


Рисунок 2.7 – імпульсний перетворювач постійної напруги №1

Імпульсний перетворювач постійної напруги (ППН1) працює в режимі безперервного струму, це забезпечує менші пульсації напруги на виході, на відміну роботи в режимі переривчастих струмів.

На рисунку 2.8 представлені часові діаграми, що пояснюють роботу імпульсного перетворювача постійної напруги.

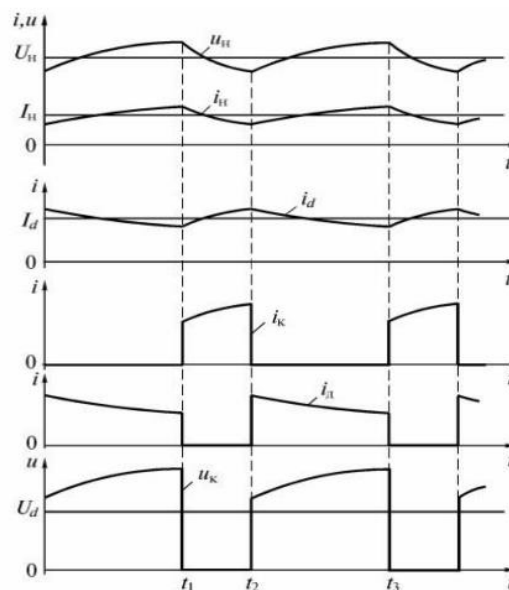


Рисунок 2.8 – Тимчасові діаграми імпульсного перетворювача постійної напруги

Визначимо максимальну та мінімальну напругу на вході імпульсного перетворювача з урахуванням втрат у випрямлячі:

$$\begin{aligned}
 U_{d \max} &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \max} - \Delta U_{\text{пп}} = 0.9 \cdot 253 - 2 = 226 \text{ (В)}; \\
 U_{d \min} &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \min} - \Delta U_{\text{пп}} = 0.9 \cdot 187 - 2 = 166 \text{ (В)};
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

де  $\Delta U_{\text{пп}}$  – втрати у випрямлячі,

Визначимо коефіцієнт передачі (перетворення):

$$\begin{aligned}
 k_{\text{пер max}} &= \frac{U_{\text{бзар max}}}{U_{d \min}} = \frac{14 \cdot 32}{166} = \frac{448}{166} = 2.69; \\
 k_{\text{пер min}} &= \frac{U_{\text{бзар min}}}{U_{d \max}} = \frac{344.91}{226} = 1.53.
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

Розрахуємо максимальну та мінімальну відносну тривалість відкритого стану транзистора VT1:

$$\begin{aligned}
 \gamma_{\max} &= 1 - \frac{U_{d \min}}{U_{\text{бзар max}}} = 1 - \frac{166}{448} = 0.63; \\
 \gamma_{\min} &= 1 - \frac{U_{d \max}}{U_{\text{бзар min}}} = 1 - \frac{226}{344.91} = 0.37
 \end{aligned}
 \tag{2.36}$$

Для подальшого розрахунку задаємося наступними параметрами:

- ✓ Частота комутації силового ключа (транзистор VT1)  $f_K = 25$  кГц;
- ✓ ККД імпульсного перетворювача напруги  $\eta_{\text{ппн}} = 0,92$  ( $\eta_{\text{ппн}} = 0,9 \dots 0,95$ );
- ✓ Коефіцієнт пульсації струму реактора  $K_{\text{п}} = 0,2$  ( $K_{\text{п}} = 0,2 \dots 0,3$ ).

Струм на вході імпульсного перетворювача необхідно розраховувати, забезпечуючи потужність інвертора.

Потужність на вході інвертора:

$$P_{d. \text{инв}} = P_{\text{вых ппн}} = \frac{P_{\text{н max}}}{\eta_{\text{инв}}} = \frac{8000}{0.95} = 8421 \text{ (Вт)} \tag{2.37}$$

Потужність на вході імпульсного перетворювача:

$$P_{\text{вх ппн}} = \frac{P_{\text{вых ппн}}}{\eta_{\text{инв}}} = \frac{8421}{0.95} = 8864 \text{ (Вт)} \tag{2.38}$$

Максимальний струм на вході імпульсного перетворювача:

$$I_{\text{вх.пмп.макс}} = \frac{P_{\text{вх.пмп}}}{U_{\text{дмін}}} = \frac{8864}{166} = 53.28 \text{ (А)} \quad (2.39)$$

Розглянемо інтервал часу, що відповідає відкритому станом транзистора. Складаємо диференціальне рівняння для контуру на вході джерела безперебійного живлення:

$$L_3 \frac{dI_{L3}}{dt} = U_{\text{двып}} - \Delta U_{\text{мп}} \quad (2.40)$$

Струм змінюватиметься від мінімуму до максимуму за наступним закону протягом часу  $t$ :

$$I_{L3}(t) = \frac{U_{\text{двып}} - \Delta U_{\text{мп}}}{L_3} t + I_{L3\text{макс}} \quad (2.41)$$

Струм у реакторі збільшується і зменшується в залежності від стану ключа, змінюючись від початкового значення до максимального:

$$I_{L3\text{макс}} = I_{L3\text{макс}}(\gamma T) = \frac{U_{\text{двып}} - \Delta U_{\text{мп}}}{L_3} \gamma T + I_{L3\text{мін}} \quad (2.42)$$

Запишемо вирази з урахуванням прийнятої величини пульсацій:

$$1.2I_{L3\text{ср}} = \left( \frac{U_{\text{двып}} - \Delta U_{\text{мп}}}{L_3} \right) (\gamma T) + 0.8I_{L3\text{ср}} \quad (2.43)$$

$$\frac{U_{\text{двып}} - \Delta U_{\text{мп}}}{L_3} = \frac{1.2I_{L3\text{ср}} - 0.8I_{L3\text{ср}}}{\gamma T} \quad (2.44)$$

Звідси отримаємо:

$$L_3 = \frac{(U_{\text{двып}} - \Delta U_{\text{мп}})\gamma T}{0.4I_{L3\text{ср}}} \quad (2.45)$$

При розрахунку індуктивності розглядається найважчий режим роботи імпульсного перетворювача постійної напруги, при якому:

- ✓  $\gamma$  – максимальний;
- ✓  $U_{\text{двып}}$  – максимальне.

$$L3 = \frac{(U_{\text{двип}} - \Delta U_{\text{III}}) \gamma_{\text{max}} T}{0.4 I_{L3 \text{ ср max}} \cdot f_k} = \frac{(166 - 2) \cdot 0.63}{0.4 \cdot 25000 \cdot 53.28} = 0.31 (\text{мкГн});$$

$$I_{L3 \text{ ср max}} = I_{\text{вхип max}} = 53.28 (\text{А}). \quad (2.46)$$

Визначимо струм, що протікає через діод VD9:

$$I_{\text{VD9 ср}} = I_{L3 \text{ ср max}} \cdot (1 - \gamma_{\text{min}}) = 53.28 \cdot (1 - 0.37) = 34.88 (\text{А}) \quad (2.47)$$

Визначимо напругу діода VD9:

$$U_{\text{VD9 ср}} = U_{\text{бз max}} = 448 (\text{В}).$$

Визначимо струм, що протікає через транзистор VT1:

$$I_{\text{VT1 max}} = I_{L3 \text{ ср max}} \cdot (1 - k_n) = 53.28 \cdot (1 + 0.2) = 63.94 (\text{А}) \quad (2.48)$$

Визначимо напругу транзистора VT1:

$$U_{\text{VT1 max}} = U_{\text{бз max}} + U_{\text{VD9 ср}} = 448 + 1 = 449 (\text{В}) \quad (2.49)$$

За отриманими розрахунковими параметрами вибираємо транзистор IGBT HG2G20N60A4 фірми Fairchild Semiconductor, параметри якого наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Технічні параметри IGBT транзистора HG2G20N60A4

$U_{\text{к-е max}}, \text{В}$	$I_{\text{кном}}, \text{А}$	$f_{\text{ком}}, \text{кГц}$
600	70	30

Вибираємо діод VS-40EPF06PBF фірми Vishay.

Розрахуємо параметри, необхідні для вибору конденсатора.

Пульсаційна складова струму:

$$\Delta I_{\text{C3}} = I_{\text{VT1 max}} - I_{\text{VD9 ср}} = 63.94 - 34.88 = 29.06 (\text{А}) \quad (2.50)$$

Напруга в режимі заряду:

$$U_{\text{C3}} = U_{\text{бз max}} = 448 (\text{В})$$

$$\Delta U_{\text{C3}} = k_n \cdot U_{\text{C3}} = 0.02 \cdot 448 = 8.96 (\text{В}). \quad (2.51)$$

$$C_3 = \frac{\Delta I_{C3} \cdot \gamma_{\max}}{\Delta U_{C3} \cdot f_{\text{ком}}} = \frac{29.06 \cdot 0.63}{8.96 \cdot 30000} = 67.97 (\text{мкФ}). \quad (2.52)$$

За отриманими розрахунковими параметрами вибираємо конденсатор ЕСАР К50-35, який позиціонується фірмою виробником для роботи у режимі заряд-розряд як накопичувачі електроенергії.

Отже,

$$\Delta U_{C3} = \frac{\Delta I_{C3}}{C_3 \cdot 2\pi f_{\text{ком}}} = \frac{29.06}{67.97 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 30000} = 2.27 (\text{В}). \quad (2.53)$$

Визначаємо через реактор L4:

$$I_{L4} = I_{\text{бз}} + I_{\text{бразрmax}} = 2 + 24.42 = 26.42 (\text{А}). \quad (2.54)$$

Прийmemo коефіцієнт пульсації струму реактора  $K_{\text{п}} = 0,05$ , тоді

$$\Delta I_{L4} = k_{\text{п}} \cdot I_{L4} = 0.05 \cdot 26.42 = 1.32 (\text{А}). \quad (2.55)$$

Падіння напруги на індуктивності прирівнюємо падінню напруги на конденсаторі:

$$\Delta U_{L4} = \Delta U_{C3} = 2.27 (\text{В}).$$

Визначаємо опір та індуктивність реактора:

$$X_{L4} = \frac{\Delta U_{L4}}{\Delta I_{L4}} = \frac{2.26}{1.32} = 1.72 (\text{Ом}). \quad (2.56)$$

$$L_4 = \frac{X_{L4}}{2\pi f_{\text{ком}}} = \frac{1.72}{2 \cdot 3.14 \cdot 30000} = 9.11 (\text{мкГн}). \quad (2.57)$$

Визначимо втрати потужності та опір індуктивного елемента:

$$\Delta P_{L4} = 0.005 P_2 = 0.005 \cdot 8000 = 40 (\text{Вт}). \quad (2.58)$$

$$R_{L4} = \frac{\Delta P_{L4}}{I_{L4}^2} = \frac{40}{26.42^2} = 0.06 (\text{Ом}). \quad (2.59)$$

## 2.7. Розрахунок імпульсного перетворювача постійної напруги №2

Цей елемент на схемі виконує функцію стабілізації напруги живлення АБ. Принцип роботи імпульсного перетворювача постійної напруги (ППН2-

рисунок 2.9) аналогічний принципу роботи ППН1, часові діаграми, що пояснюють роботу яких, представлені на рисунку 2.8.

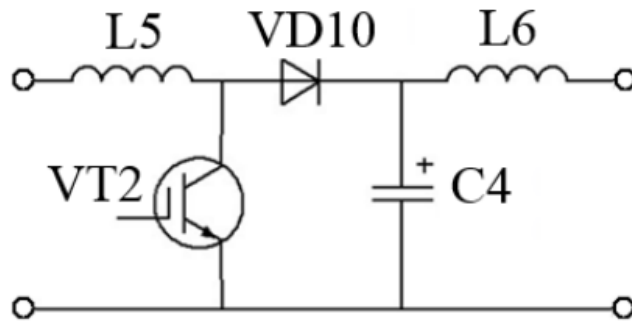


Рисунок 2.9 – імпульсний перетворювач постійної напруги №2

Визначимо максимальну та мінімальну напругу на вході імпульсного перетворювача з урахуванням втрат у випрямлячі:

$$U_{d \max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \max} - \Delta U_{\text{ин}} = 0.9 \cdot 253 - 2 = 226 \text{ (В)};$$

$$U_{d \min} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \min} - \Delta U_{\text{ин}} = 0.9 \cdot 187 - 2 = 166 \text{ (В)};$$
(2.60)

де  $\Delta U_{\text{ПП}}$  – втрати у випрямлячі;

Визначимо коефіцієнт передачі (перетворення):

$$k_{\text{пер max}} = \frac{U_{\text{бзар max}}}{U_{d \min}} = \frac{14 \cdot 32}{166} = \frac{448}{166} = 2.69;$$

$$k_{\text{пер min}} = \frac{U_{\text{бзар min}}}{U_{d \max}} = \frac{344.91}{226} = 1.53.$$
(2.61)

Розрахуємо максимальну та мінімальну відносну тривалість відкритого стану транзистора VT2:

$$\gamma_{\max} = 1 - \frac{U_{d \min}}{U_{\text{бзар max}}} = 1 - \frac{166}{448} = 0.63;$$

$$\gamma_{\min} = 1 - \frac{U_{d \max}}{U_{\text{бзар min}}} = 1 - \frac{226}{344.91} = 0.37$$
(2.62)

Для подальшого розрахунку задаємося такими параметрами:

- ✓ Частота комутації силового ключа (транзистор VT2)  $f_k = 25$  кГц;
- ✓ ККД імпульсного перетворювача напруги  $\eta_{\text{ППН}} = 0,92$  ( $\eta_{\text{ППН}} = 0,9 \dots 0,95$ );

- ✓ Коефіцієнт пульсації струму реактора  $K_{\text{п}} = 0,2$  ( $K_{\text{п}} = 0,2 \dots 0,3$ ).

Струм на вході імпульсного перетворювача напруги необхідно розраховувати забезпечуючи потужність акумуляторної батареї.

Потужність на виході імпульсного перетворювача:

$$P_{\text{вих\text{ип}}} = P_{\text{бзар}} = I_{\text{бзар}} \cdot U_{d\text{max}} = 2 \cdot 448 = 896 \text{ (Вт)}. \quad (2.63)$$

Потужність на вході імпульсного перетворювача:

$$P_{\text{вх\text{ппн}}} = \frac{P_{\text{вих\text{ппн}}}}{\eta_{\text{ппн}}} = \frac{896}{0,95} = 943,16 \text{ (Вт)}. \quad (2.64)$$

Максимальний струм на вході імпульсного перетворювача:

$$I_{\text{вх\text{ппнmax}}} = \frac{P_{\text{вх\text{ппн}}}}{U_{d\text{min}}} = \frac{943,16}{166} = 5,67 \text{ (А)}. \quad (2.65)$$

Розглянемо інтервал часу, який відповідає відкритому стану транзистора. Складаємо диференціальне рівняння:

$$L_5 \frac{dI_{L5}}{dt} = U_{d\text{вып}} - \Delta U_{\text{ппн}}. \quad (2.66)$$

Струм змінюватиметься від мінімуму до максимуму за наступним законом протягом часу  $t$ :

$$I_{L5}(t) = \frac{U_{d\text{вып}} - \Delta U_{\text{ппн}}}{L_5} t + I_{L5\text{max}}. \quad (2.67)$$

Струм у реакторі збільшується і зменшується в залежності від стану ключа, змінюючись від початкового значення до максимального:

$$I_{L5\text{max}} = I_{L5\text{max}}(\gamma T) = \frac{U_{d\text{вып}} - \Delta U_{\text{ппн}}}{L_5} \gamma T + I_{L5\text{min}}. \quad (2.68)$$

Запишемо вирази з урахуванням прийнятої величини пульсацій:

$$\begin{aligned} I_{L5\text{min}} &= 0,8 \cdot I_{L5\text{cp}}; \\ I_{L5\text{max}} &= 1,2 \cdot I_{L5\text{cp}}. \end{aligned}$$

Підставляючи ці значення у вирази, отримаємо:

$$1.2I_{L5cp} = \left( \frac{U_{dвып} - \Delta U_{ппп}}{L_5} \right) (\gamma T) + 0.8I_{L5cp}. \quad (2.69)$$

$$\frac{U_{dвып} - \Delta U_{ппп}}{L_5} = \frac{1.2I_{L5cp} - 0.8I_{L5cp}}{\gamma T}. \quad (2.70)$$

Звідси отримуємо:

$$L_5 = \frac{(U_{dвып} - \Delta U_{ппп})\gamma T}{0.4I_{L5cp}}. \quad (2.71)$$

При розрахунку індуктивності розглядається найважчий режим роботи імпульсного перетворювача постійної напруги, при якому:

- ✓  $\gamma$  – максимальний;
- ✓  $\Delta U_{dвып}$  – максимальне.

$$L_{5max} = \frac{(U_{dвып} - \Delta U_{ппп})\gamma_{max} T}{0.4I_{L5cpmax} \cdot f_k} = \frac{(166 - 2) \cdot 0.63}{0.4 \cdot 25000 \cdot 5.67} = 1823 \text{ (мкГн)};$$

$$I_{L5cpmax} = I_{вхипmax} = 5.67 \text{ (А)}. \quad (2.72)$$

Визначимо струм, що протікає через діод VD10<sup>^</sup>

$$I_{VD10cp} = I_{L5cpmax} \cdot (1 - \gamma_{min}) = 3.55 \cdot (1 - 0.3) = 2.49 \text{ (А)}. \quad (2.73)$$

Визначимо напругу діода VD10:

$$U_{VD10cp} = U_{бзmax} = 448 \text{ (В)}.$$

Визначимо струм, що протікає через транзистор VT2:

$$I_{VT2max} = I_{L5cpmax} \cdot (1 - k_n) = 5.67 \cdot (1 + 0.2) = 6.8 \text{ (А)}. \quad (2.74)$$

Визначимо напругу транзистора VT2:

$$U_{VT2max} = U_{бзmax} + U_{VD10пр} = 448 + 1 = 449 \text{ (А)}. \quad (2.75)$$

За отриманими розрахунковими параметрами вибираємо IGBT транзистор IRGB4607DPBF фірми International Rectifier, параметри якого наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. - Технічні параметри транзистора IGBT IRGB4607DPBF

$U_{к-е макс}, В$	$I_{кном}, А$	$f_{ком}, кГц$
600	7	30

Вибираємо ультрашвидкий діод HFA04TB60 фірми Vishay.

Розрахуємо параметри, необхідні для вибору конденсатора.

Пульсаційна складова струму

$$\Delta I_{C4} = I_{VT2max} - I_{VD10cp} = 6.8 - 3.71 = 3.09(A). \quad (2.76)$$

Напруга в режимі заряду:

$$U_{C4} = U_{бзmax} = 448(B).$$

$$\Delta U_{C4} = k_{п} \cdot U_{C4} = 0.02 \cdot 448 = 8.96(B). \quad (2.77)$$

$$C_4 = \frac{\Delta I_{C4} \cdot \gamma_{max}}{\Delta U_{C4} \cdot f_{ком}} = \frac{3.09 \cdot 0.63}{8.96 \cdot 30000} = 7.2(мкФ). \quad (2.88)$$

За отриманими розрахунковими параметрами вибираємо конденсатор ЕСАР ТКR100M2WJ20, який позиціонується фірмою виробником роботи в режимі заряд-розряд як накопичувачі електроенергії.

Отже,

$$\Delta U_{C4} = \frac{\Delta I_{C4}}{C_4 2\pi f_{ком}} = \frac{3.09}{7.2 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 30000} = 2.27(B). \quad (2.79)$$

Визначаємо через реактор L6:

$$I_{L6} = I_{бз} + I_{бразрmax} = 2 + 24.42 = 26.42(A) \quad (2.80)$$

Прийmemo коефіцієнт пульсації струму реактора  $k_{п} = 0,05$ , тоді

$$\Delta I_{L6} = k_{п} \cdot I_{L6} = 0.05 \cdot 26.42 = 1.32(A). \quad (2.81)$$

Падіння напруги на індуктивності прирівнюємо падінню напруги на конденсаторі:

$$\Delta U_{L6} = \Delta U_{C4} = 2.27 (\text{В}).$$

Визначаємо опір та індуктивність реактора:

$$X_{L6} = \frac{\Delta U_{L6}}{\Delta I_{L6}} = \frac{2.27}{1.32} = 1.72 (\text{Ом}). \quad (2.82)$$

$$L_6 = \frac{X_{L6}}{2\pi f_{\text{ком}}} = \frac{1.72}{2 \cdot 3.14 \cdot 30000} = 9.1 (\text{мкГн}). \quad (2.83)$$

Визначимо втрати потужності та опір індуктивного елемента:

$$\Delta P_{L6} = 0.005 P_2 = 0.005 \cdot 8000 = 40 (\text{Вт}). \quad (2.84)$$

$$R_{L6} = \frac{\Delta P_{L6}}{I_{L6}^2} = \frac{40}{26.42^2} = 0.06 (\text{Ом}). \quad (2.85)$$

## 2.8. Розрахунок некерованого випрямляча №1

На рисунку 2.10 представлений некерований випрямляч №1, що входить до складу схеми джерела безперебійного живлення.

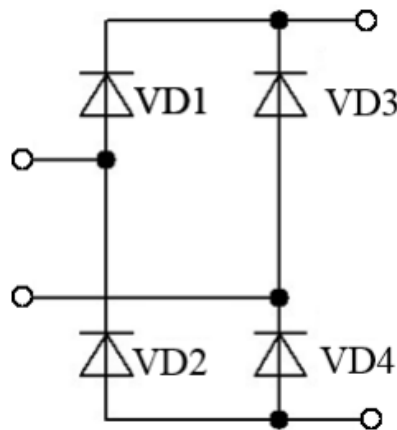


Рисунок 2.10 – Некерований випрямляч №1

Визначимо максимальну та мінімальну напругу на діоді, з урахуванням падіння напруги:

$$U_{d \max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \max} - \Delta U_{\text{пад}} = 0.9 \cdot 253 - 2 = 226 (\text{В});$$

$$U_{d \min} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \min} - \Delta U_{\text{пад}} = 0.9 \cdot 187 - 2 = 166 (\text{В}); \quad (2.86)$$

Максимальний струм через діод:

$$I_{d\max} = \frac{P_{\text{вх ппн}}}{U_{d\min}} = \frac{8864}{166} = 53.28(\text{A}). \quad (2.87)$$

Середній струм діода:

$$I_{\text{дсп}} = \frac{I_{d\max}}{2} = \frac{53.28}{2} = 26.64(\text{A}). \quad (2.88)$$

Максимальна зворотна напруга на діодах:

$$U_{VD\max} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{d\max} = \sqrt{2} \frac{I_{d\max}}{2} \cdot U_{c\max} = 1.41 \cdot 253 = 357.8(\text{В}). \quad (2.89)$$

За отриманими розрахунковими параметрами вибираємо діод фірми Semiconductor FFH60UP40S.

## 2.9. Розрахунок некерованого випрямляча №2

На рисунку 2.11 представлений некерований випрямляч №2, що входить до складу схеми джерела безперебійного живлення.

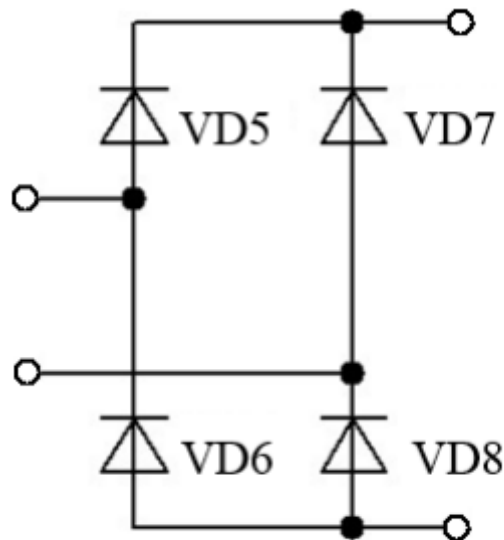


Рисунок 2.11 – Некерований випрямляч №2

Визначимо максимальну та мінімальну напругу на діоді, з урахуванням падіння напруги:

$$U_{d\max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c\max} - \Delta U_{\text{тн}} = 0.9 \cdot 253 - 2 = 226(\text{В});$$

$$U_{d\min} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c\min} - \Delta U_{\text{тн}} = 0.9 \cdot 187 - 2 = 166(\text{В}); \quad (2.90)$$

Максимальний струм через діод, з урахуванням (2.43):

$$I_{d\max} = \frac{P_{\text{вх.пін}}}{U_{d\min}} = \frac{943.16}{166} = 5.67(\text{A}). \quad (2.91)$$

Середній струм діода:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{d\max}}{2} = \frac{5.67}{2} = 2.84(\text{A}). \quad (2.92)$$

Максимальна зворотна напруга на діодах:

$$U_{VD\max} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{d\max} = \sqrt{2} \frac{I_{d\max}}{2} \cdot U_{c\max} = 1.41 \cdot 253 = 357.8(\text{В}) \quad (2.93)$$

За отриманими розрахунковими параметрами вибираємо діод фірми Vishay VS-10ETF06PBF.

## **2.10. Електрична принципова схема ДБЖ з описом роботи її елементів**

Відповідно до структурної схеми представленої рисунку 2.1, складаємо електричну принципову схему ДБЖ (рисунок 2.12), розрахунок елементів якої представлений вище.

Діоди VD1-4 формують схему випрямного мосту і служать для випрямлення змінної напруги мережі U1 в постійну напругу.

Г-подібний фільтр, побудований на елементах L1 та C1, згладжує вихідна напруга та струм випрямляча.

Керуючи роботою транзистора VT1, отримуємо на виході підвищує перетворювача стабільний рівень постійного напруги. Схема ППН №1 задана елементами: VT1, L3, C3, L4 та VD9.

Подаючи різний рівень відносної тривалості імпульсів схеми управління на базу IGBT транзистора можна отримувати різний рівень вихідної напруги перетворювача. В тому випадку якщо накопичувальний конденсатор C3 заряджається не до рівня напруги живильної мережі, різницю напруг компенсує заряд енергії, накопичений індуктивністю L3. При перезарядженні

конденсатора С3, відбувається накопичення енергії котушкою L4, що і зумовлює властивість ППН видаватиме підвищений рівень напруги.

Цей рівень залежить від опору навантаження та від відносної тривалості імпульсів з урахуванням транзистора. Діод VD9 виконує захисну функцію, запобігаючи застосування високого рівня напруги виходу ППН №1 до транзистора VT1. Використання ППН в даному ланцюгу живлення навантаження обумовлено тим, що при зміні рівня вхідної напруги та вихідного струму рівень вихідної напруги перетворювача залишається стабільним. Тут ППН №1 виконує функцію живлення інвертора постійної напруги.

Г-подібний фільтр, що складається з двох плечей і побудований на елементах L7, С5 та L8, С6 згладжує вихідну напругу та струм перетворювача.

Для перетворення постійної напруги на однофазне змінну напругу використовують трирівневий інвертор, побудований з використанням IGBT VT3-VT10 та зворотних діодів VD13-VD22. Керуючи контролером частотою перемикачів транзисторів, відбувається періодична зміна полярності напруги живлення навантаження та рівня вихідної напруги. На виході маємо стабільний рівень змінної напруги.

Г-подібний фільтр, побудований на елементах L9 та С9, згладжує вихідну напругу та струм інвертора постійної напруги.

Робота мостового випрямляча змінної напруги, побудованого на діодах VD5-8, Г-подібного фільтра на елементах L2 та С2, ППН №2 на елементах VT2, L5, С4, L6 та VD10, аналогічна наведеній вище за роботу відповідних їм елементів. З тією відмінністю, що ППН №2 тут виконує функцію заряду акумулятора. В аварійному режимі, наприклад при втраті напруги, АБ розряджається на інвертор постійної напруги через фільтр, що складається з двох плечей L7, С5 і L8, С6 описаний раніше.

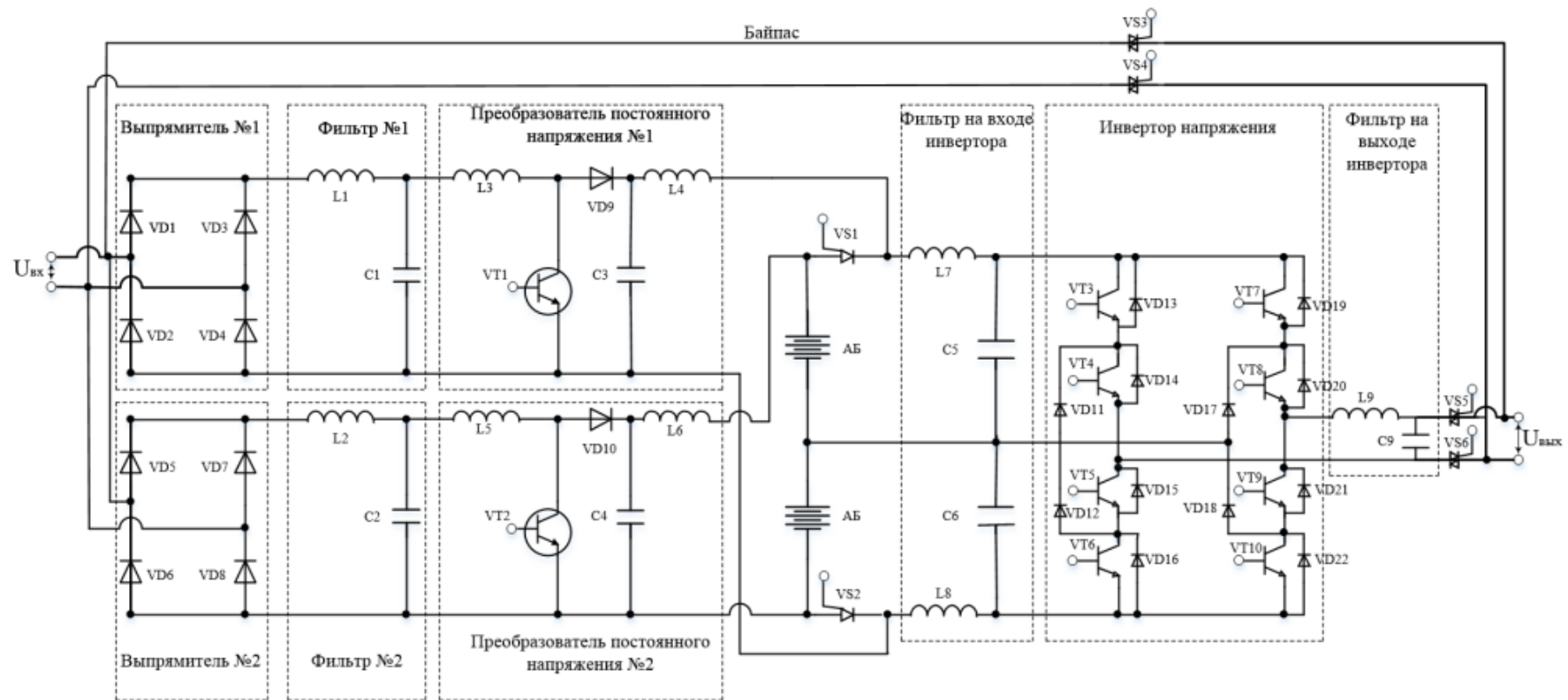


Рисунок 2.12 – Електрична принципова схема джерела безперерйного живлення

Швидкодіючі тиристори VS1-VS2 розмежують роботу ДБЖ для двох режимів, роботи від мережі та аварійний режим. При роботі ДБЖ від мережі, тиристори знаходяться в закритому стані, та зарядний пристрій, описане вище, постійно підтримує заряд акумуляторних батарей на номінальному рівні. При втрати напруги мережі, тиристори VS1-VS2 миттєво відкриваються і живлення інвертора напруги здійснюється від АБ, без розриву синусоїди вихідної напруги.

Симистори VS3-VS4 і VS5-VS6 виконують роль силових ключів, що забезпечують перемикання живлення навантаження безпосередньо від мережі (Байпас), варто зазначити, що в даному випадку, живлення навантаження не гарантується якісною напругою, а використовується при аварійних ситуаціях і виході будь-яких блоків ДБЖ, як резервування.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

В розділі «Розрахунок та вибір елементів силової частини ДБЖ» було розглянуто ключові аспекти проектування та оптимізації джерела безперебійного живлення (ДБЖ).

Розроблена схема ДБЖ враховує всі необхідні компоненти для забезпечення надійного та стабільного електропостачання відповідальних споживачів.

Конфігурація схеми забезпечує ефективне перетворення та регулювання напруги, що мінімізує перерви в живленні та покращує якість електропостачання.

Параметри вхідної мережі були детально проаналізовані для забезпечення стабільної роботи ДБЖ в умовах різних навантажень.

Розрахунок навантаження дозволив визначити оптимальні характеристики компонентів ДБЖ, що забезпечують надійне живлення навіть при пікових навантаженнях.

Вибір акумуляторних батарей здійснено на основі аналізу їхніх технічних характеристик, що забезпечують тривалу та надійну роботу ДБЖ.

Обрана конфігурація батарей дозволяє зберігати достатній запас енергії для забезпечення безперебійного живлення у випадку аварійних ситуацій.

Розрахунок інвертора напруги забезпечив оптимальний вибір компонентів для перетворення постійного струму в змінний, що дозволяє мінімізувати втрати енергії та підвищити ефективність ДБЖ.

Інвертор забезпечує високу стабільність вихідної напруги, що є критично важливим для живлення високочутливих електронних пристроїв.

Фільтр на виході інвертора розраховано з урахуванням необхідності мінімізації гармонічних спотворень та забезпечення високої якості вихідної напруги.

Застосування фільтру дозволяє покращити параметри стабільності та чистоти напруги, що подається на відповідальних споживачів.

Аналіз розрахунків та вибір елементів силової частини ДБЖ показали, що правильно розроблена та оптимізована схема забезпечує високу надійність та стабільність електропостачання критичних споживачів. Вибір акумуляторних батарей, розрахунок інвертора та фільтру на виході інвертора напруги дозволяють досягти необхідної ефективності та якості живлення. Впровадження розроблених рішень сприятиме підвищенню енергетичної безпеки та стабільності роботи електромереж.

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДБЖ

Відповідно до електричної принципової схеми джерела безперебійного живлення (рисунок 2.12), була розроблена імітаційна модель у моделюючому середовищі Matlab (рисунок 3.1), для розгляду двох режимів роботи: мережевий та аварійний.

### 3.1. Опис імітаційної моделі

Як джерело змінної напруги застосовується блок AC Voltage Source. Для побудови двох некерованих випрямлячів – випрямляч №1 та випрямляч №2, використовуємо 2 блоки Universal bridge відповідно. У параметрах блоку вибираємо однофазну бруківку випрямлення.

За допомогою елемента Load наступним елементом за схемою встановлюємо Г-подібні LC фільтри, для мережного режиму, та для зарядного пристрою. В елементі Load вказується ємність або індуктивність та розраховані раніше параметри.

Імпульсні перетворювачі постійної напруги реалізовані з допомогою блоків Subsystem IPPT1 та Subsystem IPPT2, вміст яких представлено рисунку 3.2. Кожен елемент схеми налаштовуємо згідно розрахованим раніше параметрам.

Управління імпульсними перетворювачами постійного напруги здійснюється блоками Control IPPT1 та Control IPPT2, представлені рисунку 3.3. Робота блоку управління заснована на статичній помилки, що визначається порівнянням заданого напруги та напругою на виході ППН№1 та ППН№2. PID Controller1 застосовується для формування сигналу, пропорційного задається сигналу  $i_{sin}$ . PID Controller2 формує сигнали, що надходять на базу транзистора, що входить до складу імпульсного перетворювача постійного напруги.

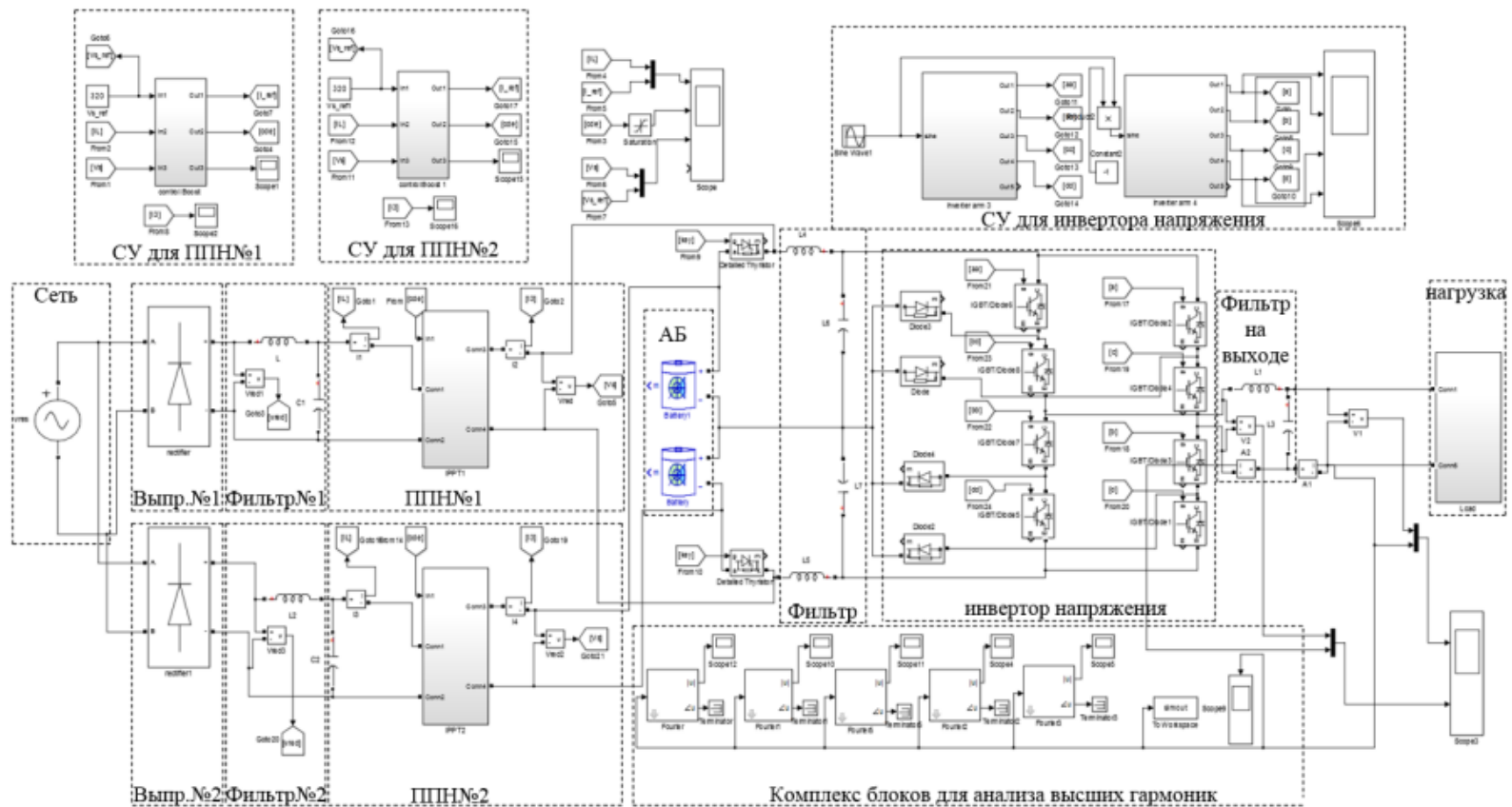


Рисунок 3.1 – Імітаційна модель ДБЖ у моделюючому середовищі Matlab

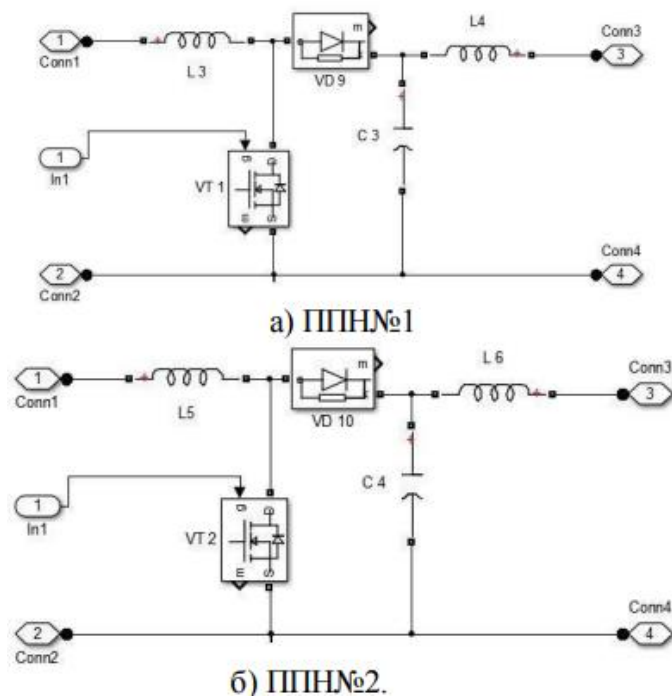


Рисунок 3.2 – Блок Subsystem IPPT:

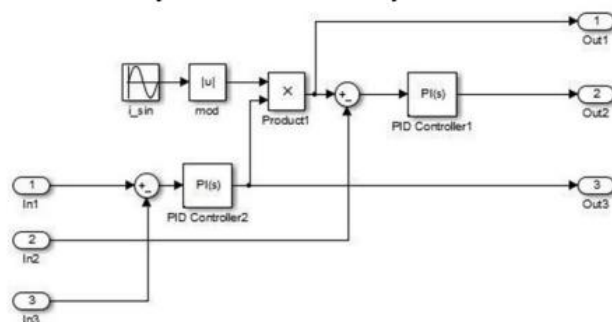


Рисунок 3.3 – Блок Subsystem control IPPT1(IPPT2)

Акумуляторні батареї реалізовано за допомогою двох блоків battery.

На вході інвертора встановлено вхідний Г-подібний фільтр, реалізований за допомогою елементів Load, що складається з двох плечей, для забезпечення середньої точки інвертора. Налаштовуємо елементи за параметрами розрахованим у розділі 2.

Після вхідного фільтра розміщуємо трирівневий інвертор напруги (рисунок 3.4), реалізований за допомогою 4 діодів та 8 транзисторів з вбудованими зворотними діодами. Параметри напівпровідникових приладів, налаштовуємо відповідно до розрахованих значень.

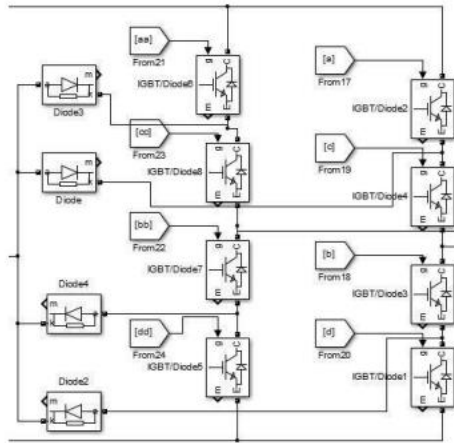


Рисунок 3.4. - Модель трирівневого інвертора із середньою точкою

Перетворення постійної напруги на змінну на інверторі здійснюється за допомогою системи управління, реалізованої двома блоками: subsystem inverter arm 1 та subsystem inverter arm 2 (рисунок 3.5).

Другий блок виконаний аналогічно першому. Дані блоки здійснюють імітацію широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для кожного плеча інвертора напруги.

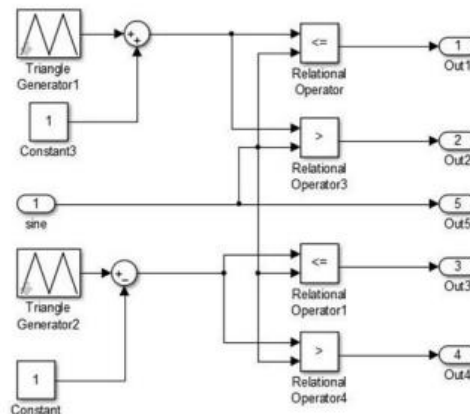


Рисунок 3.5 – Блок subsystem inverter arm 1, який імітує ШІМ для одного плеча інвертора

Для формування керуючих сигналів, кожного плеча інвертора напруги, використовується такі блоки: синусоїда і трикутний сигнал. Для формування кожної напівхвилі синусоїди застосовується пилкоподібний сигнал з певною

поляристю. Після використання блоків, що забезпечують порівняння, створюється 4 вихідні сигнали, що забезпечують роботу одного плеча інвертора. Робота другого плеча, засноване на тому ж принципі, з тією різницею, що синусоїда, що використовується, зсунута по фазі на  $180^\circ$ .

Після інвертора встановлено вихідний Г-подібний фільтр, реалізований за допомогою елементів Load. Налаштовуємо елементи по параметрам розрахованим у попередньому розділі.

Для моделювання змінного навантаження застосовується блок subsystem Load, представлений рисунку 3.6.

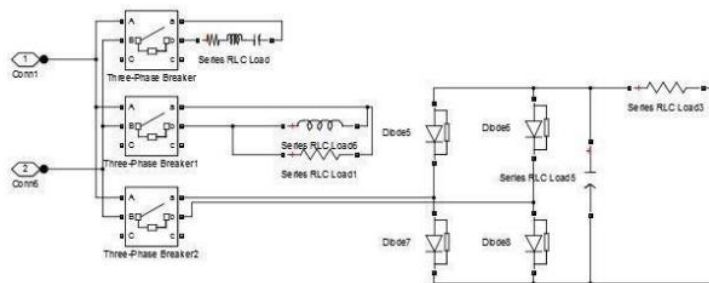


Рисунок 3.6 - Блок Subsystem load

Для моделювання роботи джерела безперебійного живлення, двох режимах: мережевому та аварійному, застосовуємо, згідно з технічним завдання, наступне навантаження:

- 1) Постійне активно-індуктивне навантаження 12 кВА,  $\cos\varphi = 0,95$ ;
- 2) активно-індуктивне навантаження, що підключається, 3 кВА,  $\cos\varphi = 0,95$ ;
- 3) Випрямлювальне навантаження, що підключається, 3 кВА,  $\cos\varphi = 0,95$ .

Для забезпечення увімкнення та відключення навантаження необхідні комутаційні пристрої, реалізовані за допомогою блоків Breaker, які забезпечують комутацію у заданий час, при моделюванні роботи ДБЖ, тим самим забезпечується наброс навантаження.

### **Опис моделі ДБЖ під час роботи в мережевому режимі:**

При роботі ДБЖ у мережевому режимі, живлення надходить від джерела змінної напруги з амплітудним значенням 310 В. Зарядне пристрій, до складу якого входить випрямляч №2, фільтр №2, перетворювач постійної напруги №2, працює на заряд акумуляторних батарей, які відключені, за допомогою тиристорів, від ланцюга живлення навантаження.

Живлення навантаження здійснюється через некерований випрямляч №1, фільтр №1 і перетворювач постійної напруги №1, який забезпечує регулювання напруги на ділянці постійної струму. Потім випрямлена напруга надходить на вхідний фільтр інвертора, що згладжується, і надходить на трирівневий інвертор, після формується змінна напруга і через вихідний фільтр надходить безпосередньо на навантаження.

### **Опис моделі ДБЖ під час роботи в аварійному режимі:**

Для імітації аварійного режиму забезпечується відключення напруги живлення, приймаючи напруги джерела живлення рівне 0 В. Зарядний пристрій знеструмлюється, та живлення навантаження здійснюється від акумуляторних батарей, які включаються до ланцюга живлення навантаження при миттєвому відкритті тиристорів, які використовуються раніше для роботи в мережному режимі. Варто зазначити, що діод VD10, що входить до складу імпульсного перетворювача постійної напруги №2, розриває контур, тим самим забезпечує запобігання витоку струму в мережу та розряд батарей.

### **3.2. Дослідження вищих гармонік струму на виході ДБЖ**

При підключенні електроустановок із категорії відповідальних споживачів до електричної мережі, яка забезпечує живлення від двадцяти і більше персональних комп'ютерів, то дані електроустановки живляться струмами, які містить значну кількість вищих гармонік порівняно з промисловою мережею із частотою 50 Гц.

У сучасній промисловості можна виділити таке обладнання, що генерує вищі гармоніки в електричну мережу:

- ✓ Електрозварювальні комплекси;
- ✓ Персональні комп'ютери та комп'ютерні мережі;
- ✓ Статично перетворювачі енергії (тиристорні регулятори) напруги, випрямлячі, імпульсні джерела живлення тощо)
- ✓ Індукційні та електродугові печі;
- ✓ Електродвигуни змінного струму, із здійсненням регулювання напруги;
- ✓ Електроосвітлювальні прилади, побудовані на газорозрядних лампах та електронних баластах;
- ✓ Пристрої для плавного пуску двигуна тощо

При включенні в мережу персональних комп'ютерів такої кількості що їх сумарна потужність виявиться порівнянною з характерною потужністю електричної мережі, може статися спотворення синусоїди електромережі. Це пояснюється перевантаженням мережі живлення нелінійними навантаженнями, що може призвести до збоїв та відхилень від номінальної роботи чутливого обладнання, до яких відносяться відповідальні сервери.

Характерною ознакою того, що мережа перевантажена великою кількістю персональних комп'ютерів, є наявність у мережі третій гармоніки, яка надає найінтенсивніші впливи на навантаження. Нелінійні споживачі сприяють генерації вищих гармонійних складових у мережі, що призводить до негативних наслідків для навантаження:

- ✓ Виникнення перешкод у лініях зв'язку;
- ✓ На частотах вищих гармонік є ймовірність виникнення резонансних явищ, що може призвести до виходу з ладу як окремих елементів, і комплексних складання системи;
- ✓ У системах електроживлення із заземленою нейтраллю, третя гармоніка та гармоніки кратні 3, можуть вимагати збільшення перерізу нульових провідників. Це пояснюється перевагою струмів у нульовому

провіднику, на відміну від фазних, що призводить до перегріву та руйнування ізоляції.

- ✓ Наявність гармонік призводить до перегріву та виходу з ладу конденсаторів, електродвигунів, баластових люмінесцентних світильників;
- ✓ Вищі гармоніки завдають додаткових втрат у трансформаторах, які спричиняють його перегрів, і як слідство призводять до виходу з ладу;
- ✓ Відбувається значне старіння ізоляції, що суттєво скорочує термін експлуатації кабельних ліній;
- ✓ Гармоніки призводять до вібрації в електромагнітних системах, наприклад, електромагнітний пускач, вібрації струмопровідних ножів призводить до щирості та поганого контакту, що може призвести до виникнення пожежі;
- ✓ Високочастотні перешкоди сприяють збоям у роботі систем управління та нестабільній роботі чутливого електронного обладнання.

У розробленій імітаційній моделі джерела безперебійного живлення (рисунок 3.1), для дослідження вихідного струму на гармонійний склад, у моделюючому середовищі Matlab використовуємо блок Powergui.

Моделювання навантаження використовуємо блок Load, представлений на рисунку 3.6. Навантаження застосовується активно-індуктивне та випрямляє, побудована за допомогою однофазного випрямляча. Джерело безперебійного живлення постійного навантажений 80% навантаженням, згідно технічного завдання  $S = 10$  кВА, через 0.2 секунди накидаються інші 20% навантаження  $S = 2$  кВА.

Після моделювання процесу роботи ДБЖ, із заданим проміжком часу, для гармонійного аналізу, використовуємо модуль FFT Anflysis, що входить до складу блоку Powergui. Для аналізу гармонійного складу, необхідно здійснити налаштування у вікні Powergui FFT Tools (швидке перетворення фур'є). Задаємо частоту основної гармоніки 50 Гц, кількість періодів та вид сигналу. Зверху, у вікні Signal to analuze, відображається вхідний сигнал із заданим

проміжком часу, починаючи з 0.2 секунд, тривалістю в один період коливання, знизу відображається гармонійний склад.

### **Робота ДБЖ у режимі живлення від мережі**

Слід зазначити, що з моделюванні роботи джерела безперебійного живлення від мережі, використовується блок AC source, внутрішній опір якого прагне до нескінченності, тому при збільшенні навантаження забезпечується стабільна напруга мережі.

У реальній мережі буде спостерігатися просадка напруги, яка обумовлена внутрішнім опором джерела. Внаслідок цього результати моделювання та реальної роботи ДБЖ можуть значно відрізнятися.

### **Наброс активно-індуктивного навантаження**

При моделюванні роботи джерела безперебійного живлення, момент часу 0.2 с. відбувається комутація ключів і підключається активно індуктивне навантаження, що становить 20% від заданого значення 10 кВА. На рисунках 3.7 та 3.8 представлені осцилограми напруги та струму відповідно.

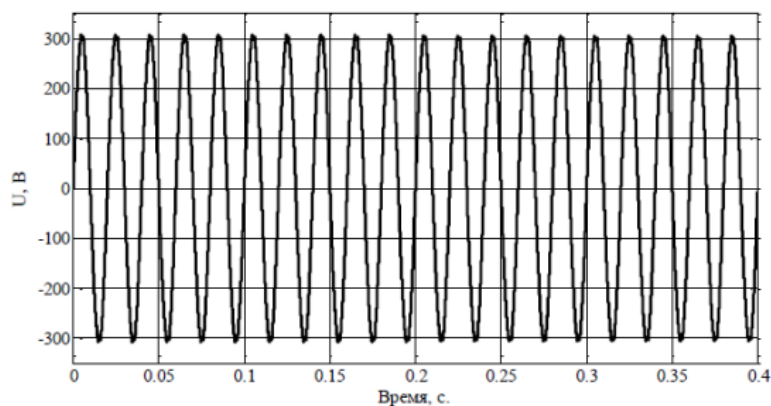


Рисунок 3.7 – Осцилограма напруги при накиданні активно-індуктивного навантаження

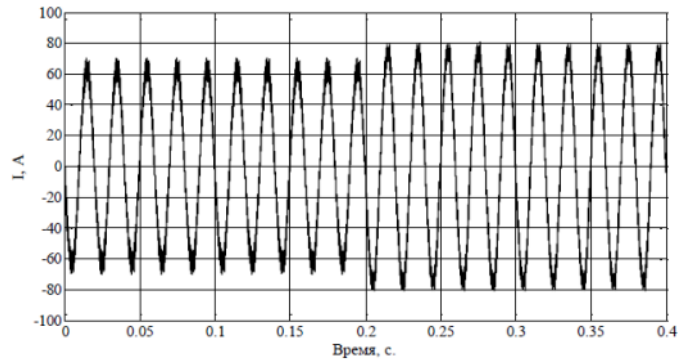


Рисунок 3.8 – Осцилограма струму при набросі активно-індуктивного навантаження

### Аналіз вищих гармонік

На рисунку 3.9 представлена осцилограма струму, отримана з за допомогою функції FFT Analysis.

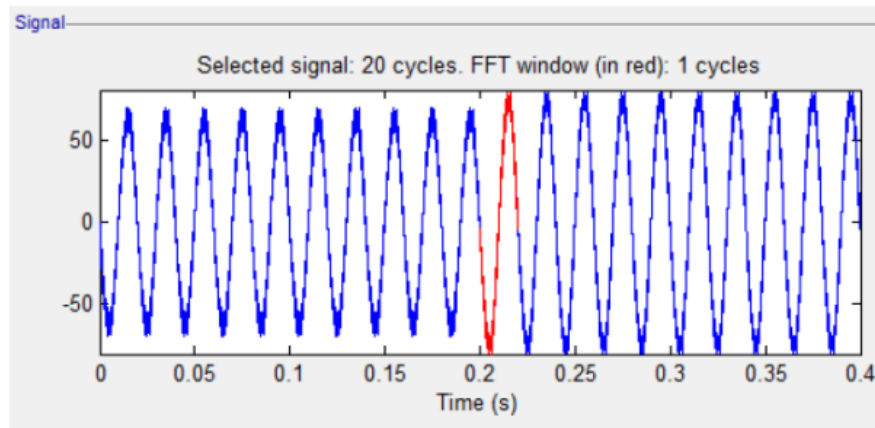


Рисунок 3.9 – Осцилограма струму на навантаженні

Синусоїда струму досліджувалась для одного періоду коливання - після накидання навантаження на момент часу 0.2 секунди.

Проаналізувавши результат розкладання струму до ряду Фур'є, представлений на рисунку 3.10, робимо висновок, що параметри вхідних та вихідних фільтрів підбрані правильно, а значення вищих гармонік не перевищують допустимі значення.

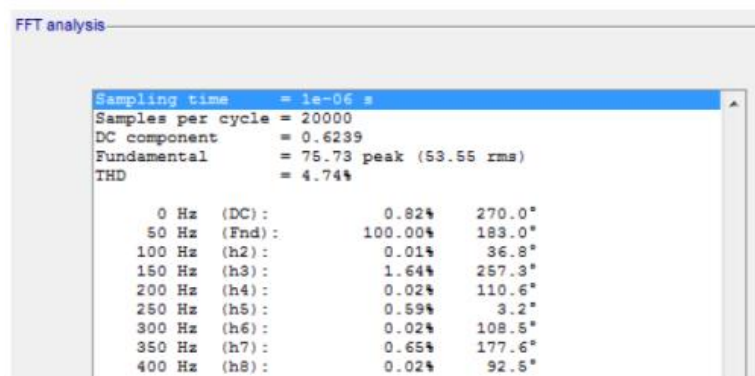


Рисунок 3.10 – Ряд Фур'є

### Накид випрямного навантаження

На рисунках 3.11 та 3.12 представлені осцилограми напруги та струму, при накиданні випрямного навантаження, відповідно. При комутації додаткового навантаження напруга залишається практично незмінним, а струм зростає. При роботі на даний вид навантаження, Спотворення синусоїди струму приймають великі значення, в порівнянні з попереднім навантаженням.

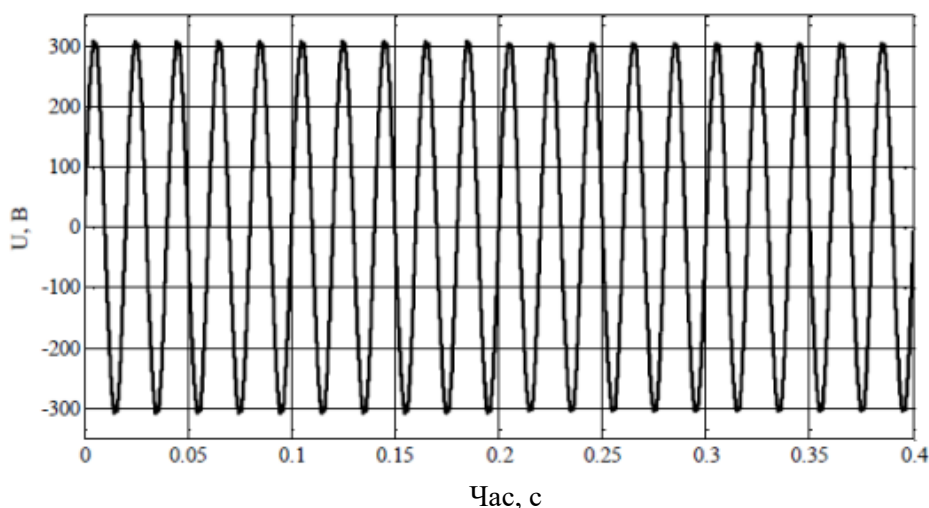


Рисунок 3.11 – Осцилограма напруги при накиданні випрямного навантаження

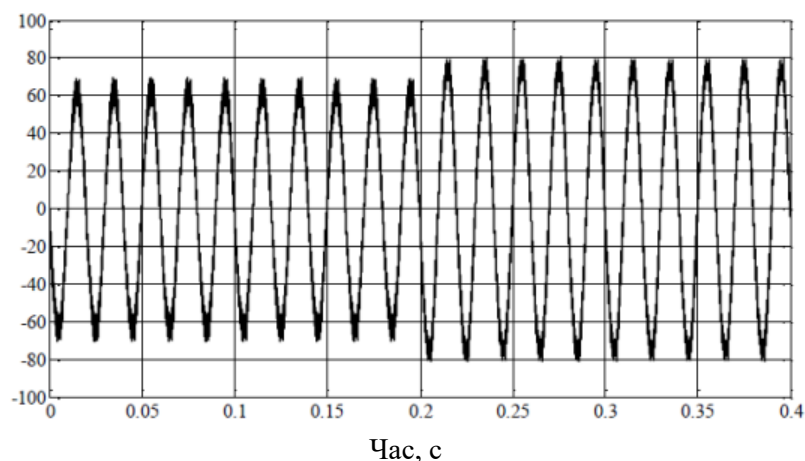


Рисунок 3.12 – Осцилограма струму при накиданні випрямного навантаження

### Аналіз вищих гармонік

Аналіз вищих гармонік: рисунку 3.13, отриманому з допомогою функції FFT Analysis, представлений гармонійний склад вихідного струму при випрямляючому навантаженні.

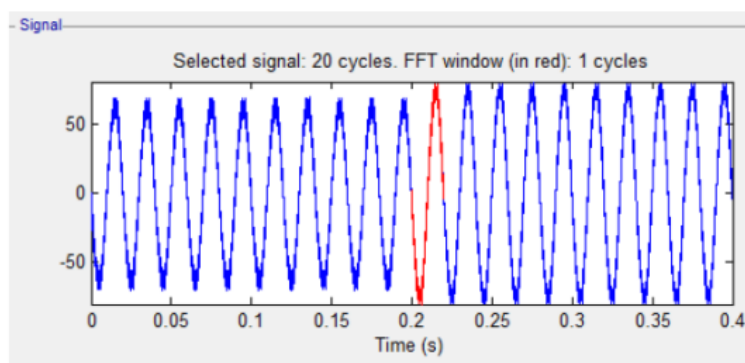


Рисунок 3.13 – Осцилограма струму на навантаженні.

Дослідження синусоїди струму проводилася одного періоду коливання, після накидання навантаження, в останній момент часу 0,2 с.

Аналізуючи результат розкладання струму ряд Фур'є, представлений рисунку 3.14, можна дійти невтішного висновку, що параметри вхідних і вихідних фільтрів підбрані правильно і значення вищих гармонік вбирається у встановлених значень. Значення спотворення струму при випрямному навантаженні вище, ніж при активно-індуктивному.

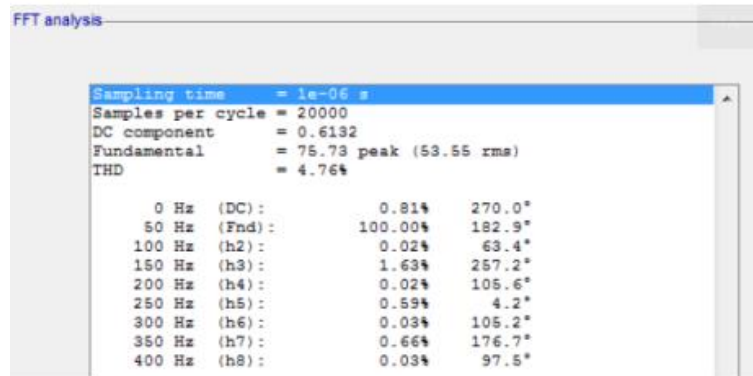


Рисунок 3.14 – Результат аналізу Фур'є.

### Робота ДБЖ в аварійному режимі

Аварійний режим роботи ДБЖ, при моделюванні, забезпечується виставленням значення 0, в блоці AC source. Також для забезпечення роботи ДБЖ від батарей, і для прискорення процесу моделювання, можна обірвати ланцюг від вихідного фільтра №2.

Також як і в попередньому випадку навантаження застосовується активно індуктивне та випрямляє, побудоване за допомогою однофазного випрямляча. Джерело безперебійного живлення постійного навантаження 80% навантаженням, відповідно до технічного завдання  $S = 10$  кВА, через 0,2 секунди накладаються решта 20% навантаження  $S=2$  кВА.

### Наброс активно-індуктивного навантаження

На рисунках 3.15 та 3.16 представлені осцилограми напруги та струму відповідно.

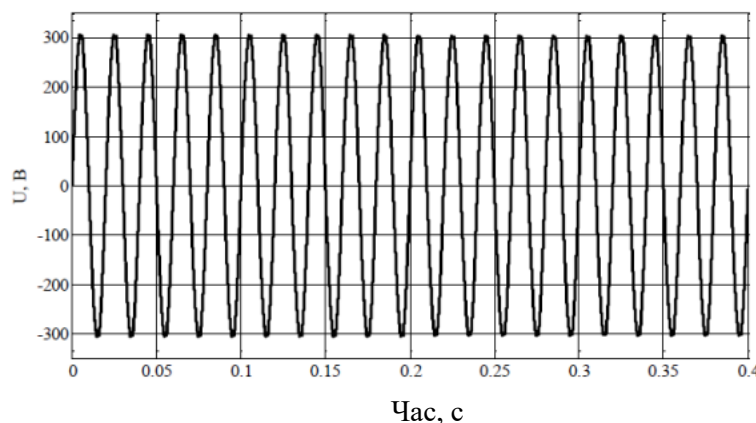


Рисунок 3.15 – Осцилограма напруги при накладанні активно індуктивного навантаження

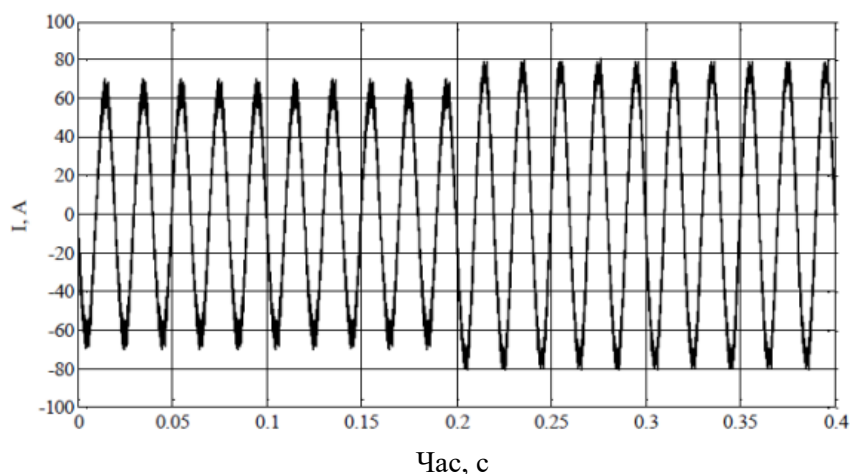


Рисунок 3.16 – Осцилограма струму при накиданні активно індуктивного навантаження

Як видно з представлених осцилограм: напруги, при комутації додаткового навантаження залишається незмінним, а струм зростає. Результати моделювання роботи джерела безперебійного живлення при аварійному режимі, повністю збігаються з режимом роботи від мережі.

### Аналіз вищих гармонік

За допомогою функції FFT Analysis отримуємо осцилограму струму, представлену рисунку 3.17

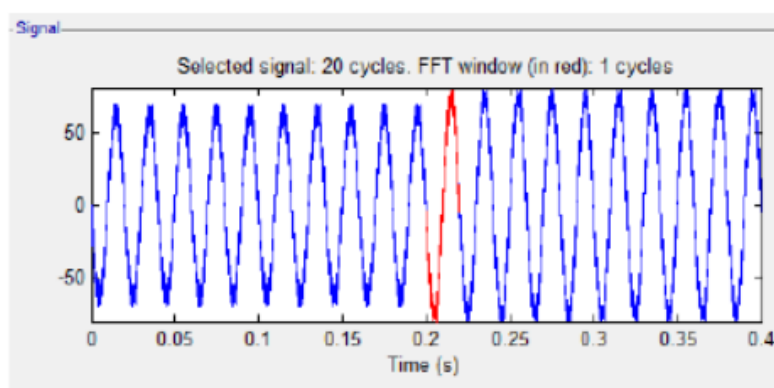


Рисунок 3.17 – Осцилограма струму на навантаженні

Дослідження синусоїди струму проводилася на один період коливання, після накидання навантаження, на момент часу 0,2 с.

Аналізуючи результат розкладання струму ряд Фур'є, представлений на рисунку 3.18, можна зробити висновок, що параметри вхідних та вихідних фільтрів підібрані правильно і значення вищих гармонік не перевищують встановлених значень.

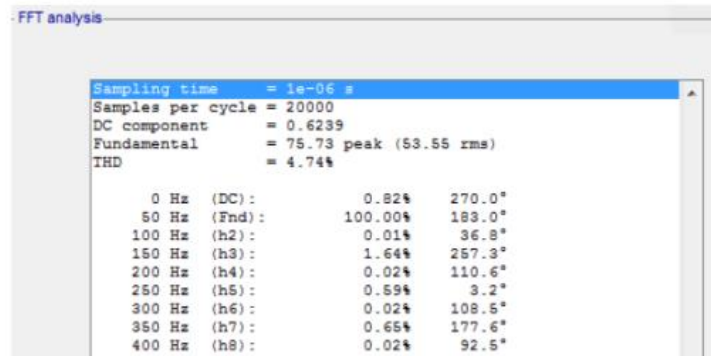


Рисунок 3.18 – Результат аналізу Фур'є

Значення 3, 5 і 7 гармонік практично не відрізняються від значень, отримані при мережному режимі.

Накид випрямного навантаження На рисунках 3.19 та 3.20 представлені осцилограми напруги та струму, при накиданні випрямного навантаження, відповідно. При комутації додаткового навантаження напруга залишається практично незмінним, а струм зростає. При роботі на даний вид навантаження, Спотворення синусоїди струму приймають великі значення, в порівнянні з попереднім навантаженням.

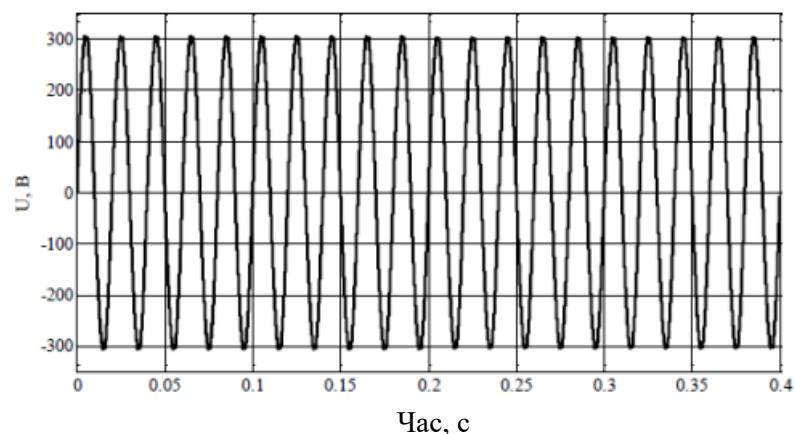


Рисунок 3.19 – Осцилограма напруги при накиданні випрямного навантаження

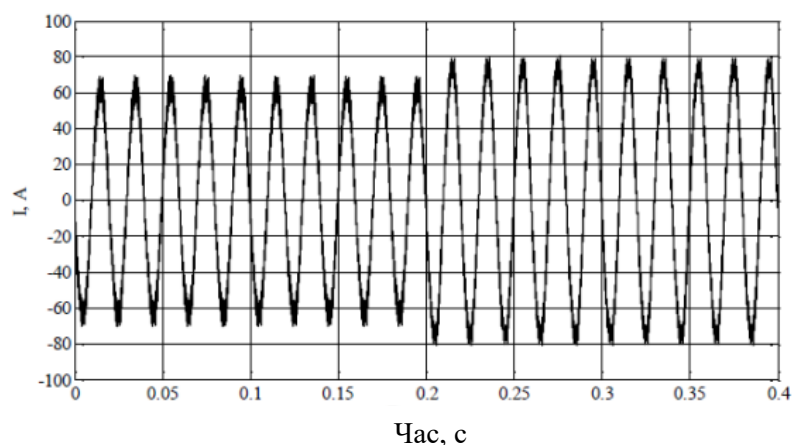


Рисунок 3.20 – Осцилограма струму при накиданні випрямляючого навантаження.

Результати моделювання в аварійному режимі повністю збігаються з результатами, отриманими під час моделювання в режимі живлення від мережі.

#### Аналіз вищих гармонік

На рисунку 3.21 представлена осцилограма струму, отримана з допомогою функції FFT Analysis.

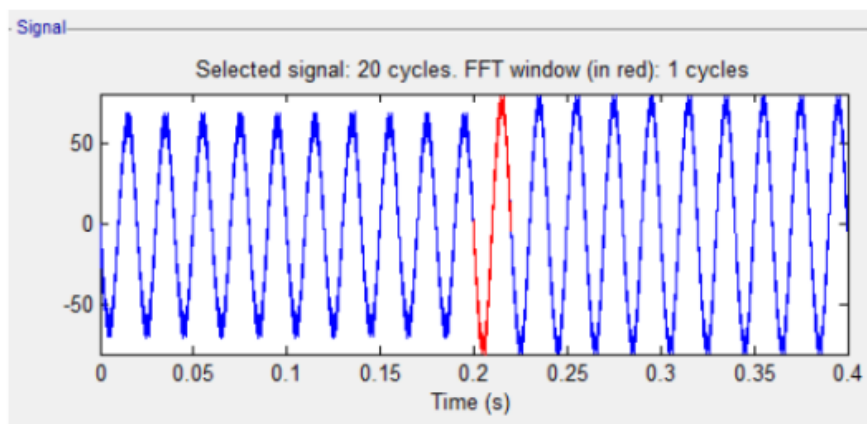


Рисунок 3.21 – Результат аналізу Фур'є.

Дослідження синусоїди струму проводилася на один період коливання, після накидання навантаження, на момент часу 0,2 с.

Аналізуючи результат розкладання струму ряд Фур'є, представлений на малюнку 3.22, можна зробити висновок, що параметри вхідних та вихідних

фільтрів підібрані правильно і значення вищих гармонік не перевищують встановлених значень. Значення спотворення струму при випрямлянні навантаженні вище, ніж при активно-індуктивному.

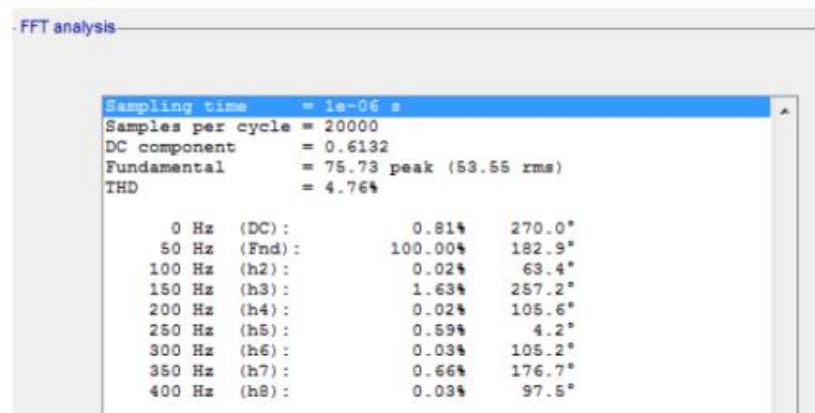


Рисунок 3.22 - Результат аналізу Фур'є.

Порівнявши результати, отримані розкладанням вихідного струму у ряд Фур'є, за допомогою блоку FFT Analysis, видно таке: що як у мережевому, і в аварійному режимі, вищі гармоніки розподіляються практично ідентично. Значення 3, 5 та 7 гармонік практично не відрізняються в обох експериментах. Рівень кожної з 3, 5, 7 гармоніки становить менше 3%. Таке зменшення величин вищих гармонік стало можливе завдяки використанню трирівневого інвертора. Щоб якісніше оцінити роботу трирівневого інвертора даного типу, потрібен порівняльний аналіз з однофазним мостовим інвертором.

### **Порівняльний аналіз 3-рівневого та однофазного мостового інвертора**

Для порівняння роботи ДБЖ з 3-рівневим інвертором, зробимо моделювання роботи джерела безперебійного живлення, на тужче навантаження, з однофазним мостовим інвертором (рис. 3.25).

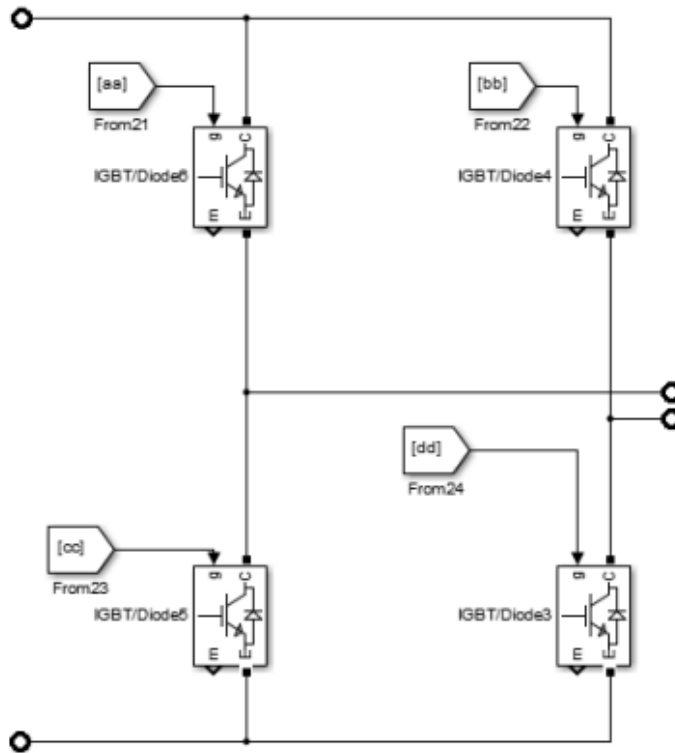


Рисунок 3.25 – модель однофазного мостового інвертора

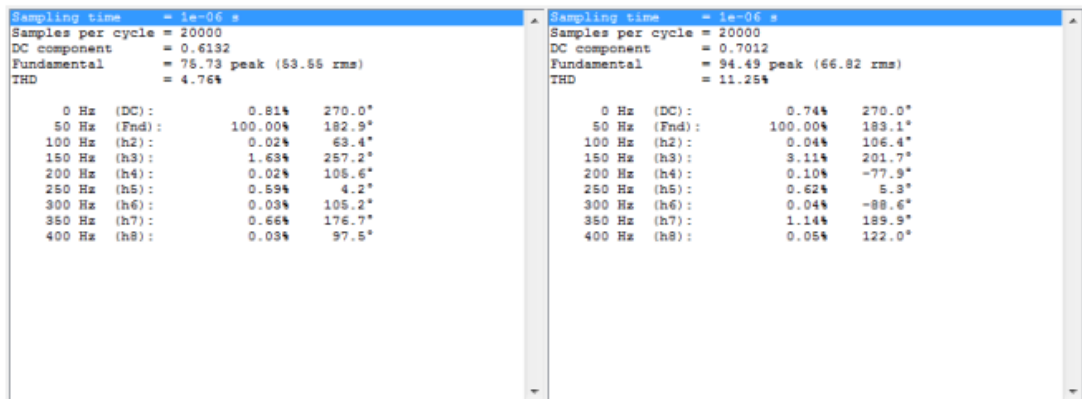
Для якісного навантаження роботи трирівневого інвертора зі середньою точкою, на рисунках 3.26 та 3.27 наведено результати гармонійного аналізу у порівнянні з однофазним інвертором.

При накиданні активно-індуктивного та випрямного навантаження у трирівневого інвертора величина 3, 5 і 7 гармонік у кілька разів менше, ніж при однофазному мостовому інверторі.

а) Дані для трирівневого інвертора				б) Дані для однофазного мостового інвертора			
Sampling time = 1e-06 s				Sampling time = 1e-06 s			
Samples per cycle = 20000				Samples per cycle = 20000			
DC component = 0.6239				DC component = 0.7399			
Fundamental = 75.73 peak (53.55 rms)				Fundamental = 94.49 peak (66.82 rms)			
THD = 4.74%				THD = 11.25%			
0 Hz (DC):	0.82%	270.0°	0.78%	270.0°			
50 Hz (Fnd):	100.00%	183.0°	100.00%	183.1°			
100 Hz (h2):	0.01%	36.8°	0.03%	112.4°			
150 Hz (h3):	1.64%	257.3°	3.12%	202.0°			
200 Hz (h4):	0.02%	110.6°	0.11%	-79.1°			
250 Hz (h5):	0.59%	3.2°	0.63%	3.9°			
300 Hz (h6):	0.02%	108.5°	0.06%	-88.1°			
350 Hz (h7):	0.65%	177.6°	1.14%	190.7°			
400 Hz (h8):	0.02%	92.5°	0.04%	131.2°			

а) дані для трирівневого інвертора; б) дані для однофазного мостового інвертора

Рисунок 3.26 – Порівняння аналізів низки Фур'є при накиданні активно індуктивного навантаження:



а) дані для трирівневого інвертора; б) дані для однофазного мостового інвертора.

Рисунок 3.27 – Порівняння аналізів низки Фур'є при накиданні випрямного навантаження:

Аналізуючи рисунки 3.26 і 3.27 можна дійти невтішного висновку, що з застосуванні трирівневого малюнка, рівень вищих гармонік значно знижується.

При роботі джерела безперебійного живлення на випрямне навантаження інвертор в сукупності з навантаженням є системою змінюваними параметрами. Це тим, що його роботи і двох етапів. На одному з етапів відкриті діоди, що входять до склад випрямляча, і здійснюється заряд вихідного конденсатора через силовий фільтр інвертора. На другому етапі діоди закриваються, та інвертор перебуває у режимі холостого ходу. Отже, інвертор на протязі циклу своєї роботи повинен забезпечувати імпульсне споживання струму навантаженням, для форсованого заряду вихідного конденсатора випрямляча при заданій якості вихідної напруги.

Також необхідно зазначити, що через фільтр інвертора протікає несинусоїдальний, імпульсний струм.

Під час роботи інвертора на випрямляч, на інтервалах коли діоди знаходяться у провідному стані, вихідна напруга представляє собою початкові

ділянки коливальних перехідних процесів. У відмінності від роботи інвертора на інші види навантаження, форма струму та напруги значніше спотворена, а коефіцієнт потужності значно знижується.

Для наочного подання роботи трирівневого та однофазного мостового інвертора, за отриманими результатами аналізу Фур'є (рисунки 3.26 та 3.27), будуємо діаграми, які представлені на рисунку 3.28 та 3.29.

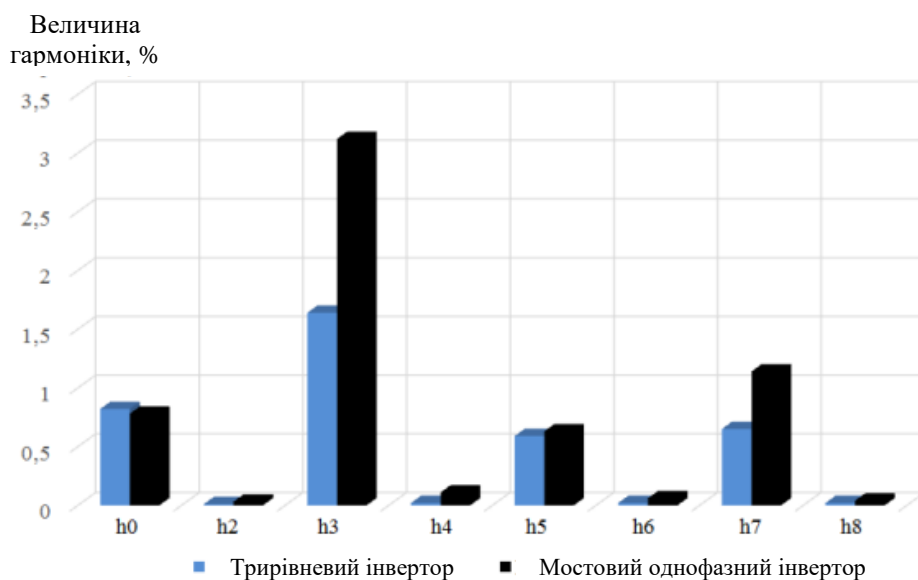


Рисунок 3.28 – Діаграма величин гармонік за активно-індуктивного навантаження

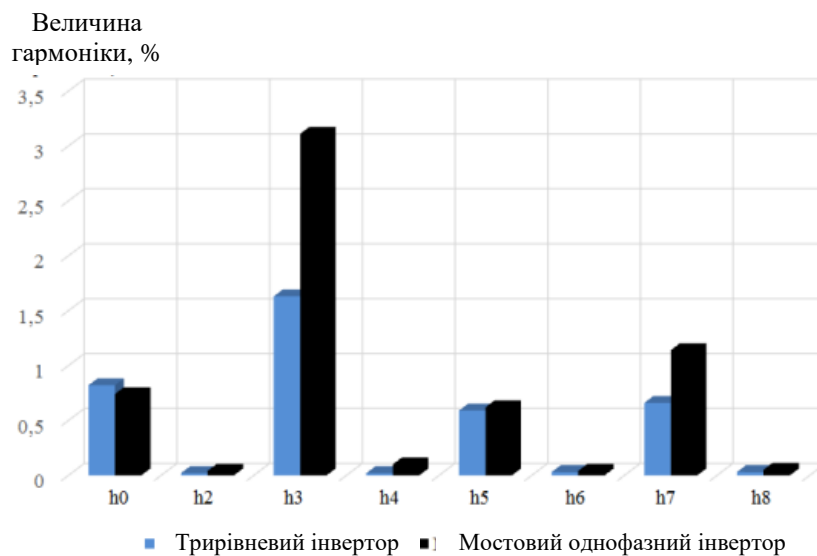


Рисунок 3.29 – Діаграма величин гармоніки при випрямлячому навантаженні

При аналізі порівняльних діаграм, що представлені на рисунках 3.28 та 3.29 можна зробити висновок, що застосування трирівневого інвертора, на відміну від однофазного мостового, дозволяє суттєво знизити вищі гармоніки. Найбільш характерно це спостерігається на 3, 5 та 7 гармоніках. Зниження величин яких особливо важливо, тому що вони надають найбільш сильний негативний вплив на роботу, що підключається до джерела безперебійного живлення, обладнання. Застосування трирівневого інвертора, на відміну однофазного, дозволяє отримати синусоїду напруги на виході, за формою наближеною до ідеальної, навіть при реактивному навантаженні, що сприятливо позначається на навантаженні.

### **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:**

В розділі «Дослідження імітаційної моделі ДБЖ» було розглянуто основні аспекти моделювання джерел безперебійного живлення (ДБЖ) та дослідження вищих гармонік струму на їх виході. Основні висновки цього розділу включають:

Розроблена імітаційна модель ДБЖ забезпечує адекватне відтворення всіх ключових процесів, що відбуваються в реальних системах безперебійного живлення.

Імітаційна модель дозволяє детально аналізувати вплив різних параметрів на ефективність і стабільність роботи ДБЖ, що є важливим для подальшого вдосконалення системи.

Дослідження вищих гармонік струму показало, що вища гармоніка суттєво впливає на якість електропостачання, особливо для чутливих електронних пристроїв.

Аналіз гармонічних спотворень виявив, що оптимізація параметрів інвертора та фільтру на виході ДБЖ може значно знизити рівень вищих гармонік, покращуючи таким чином якість вихідної напруги.

Розробка та впровадження заходів щодо зниження гармонічних спотворень дозволяє підвищити надійність та ефективність роботи ДБЖ, зменшуючи негативний вплив на підключене обладнання.

Загальний аналіз показав, що використання імітаційних моделей є ефективним інструментом для дослідження та вдосконалення джерел безперебійного живлення. Модель дозволяє детально вивчити вплив різних параметрів на роботу ДБЖ та оптимізувати їх для покращення якості електропостачання. Дослідження гармонічних спотворень показало, що правильний підбір та налаштування компонентів інвертора і фільтру дозволяють значно знизити рівень вищих гармонік, що є критично важливим для забезпечення стабільного і якісного електропостачання чутливих споживачів.

Впровадження отриманих результатів у практику дозволить покращити показники надійності та стабільності роботи систем безперебійного живлення, що є важливим для підвищення загального рівня енергетичної безпеки.

## **ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:**

В розділі «Джерела безперебійного живлення для відповідальних споживачів електричної енергії змінного струму» було розглянуто основні типи джерел безперебійного живлення (ДБЖ) та проведено аналіз структурних схем ДБЖ On-Line типу. Основні висновки цього розділу включають:

Аналіз основних типів ДБЖ дозволив виявити їх ключові переваги та недоліки для забезпечення безперебійного живлення відповідальних споживачів.

Використання резервних (Standby) ДБЖ є ефективним для менш критичних навантажень, однак вони не забезпечують належного рівня захисту для високочутливих споживачів.

Лінійно-інтерактивні (Line-Interactive) ДБЖ надають додаткові можливості для стабілізації напруги та кращого захисту від перепадів напруги, але мають певні обмеження щодо тривалості роботи при значних навантаженнях.

On-Line (подвійного перетворення) ДБЖ забезпечують найвищий рівень захисту та стабільності електроживлення завдяки постійному перетворенню електроенергії, що дозволяє мінімізувати перерви в живленні.

Структурні схеми ДБЖ On-Line типу забезпечують безперервне живлення критичних споживачів завдяки технології подвійного перетворення, що дозволяє ефективно усувати перешкоди та стабілізувати напругу.

Аналіз структурних схем показав, що основними компонентами таких систем є випрямляч, інвертор, батарея та статичний перемикач, які працюють у тісній взаємодії для забезпечення безперебійного живлення.

Використання ДБЖ On-Line типу забезпечує нульовий час перемикання на резервне живлення, що є критично важливим для високочутливих електронних систем та обладнання.

Переваги On-Line ДБЖ включають високу стабільність вихідної напруги, можливість роботи з великим спектром вхідних напруг та мінімізацію

гармонічних спотворень, що дозволяє значно підвищити надійність живлення відповідальних споживачів.

Загальний аналіз показав, що використання джерел безперебійного живлення, особливо On-Line типу, є ефективним засобом для забезпечення стабільного та надійного електропостачання критичних споживачів електричної енергії змінного струму. Це дозволяє значно підвищити рівень енергетичної безпеки та мінімізувати ризики, пов'язані з перебоями в електропостачанні. Впровадження рекомендацій щодо вибору та використання різних типів ДБЖ залежно від специфіки споживачів сприятиме підвищенню надійності роботи електромереж та зменшенню втрат, пов'язаних з аварійними відключеннями.

В розділі «Розрахунок та вибір елементів силової частини ДБЖ» було розглянуто ключові аспекти проектування та оптимізації джерела безперебійного живлення (ДБЖ).

Розроблена схема ДБЖ враховує всі необхідні компоненти для забезпечення надійного та стабільного електропостачання відповідальних споживачів.

Конфігурація схеми забезпечує ефективне перетворення та регулювання напруги, що мінімізує перерви в живленні та покращує якість електропостачання.

Параметри вхідної мережі були детально проаналізовані для забезпечення стабільної роботи ДБЖ в умовах різних навантажень.

Розрахунок навантаження дозволив визначити оптимальні характеристики компонентів ДБЖ, що забезпечують надійне живлення навіть при пікових навантаженнях.

Вибір акумуляторних батарей здійснено на основі аналізу їхніх технічних характеристик, що забезпечують тривалу та надійну роботу ДБЖ.

Обрана конфігурація батарей дозволяє зберігати достатній запас енергії для забезпечення безперебійного живлення у випадку аварійних ситуацій.

Розрахунок інвертора напруги забезпечив оптимальний вибір компонентів для перетворення постійного струму в змінний, що дозволяє мінімізувати втрати енергії та підвищити ефективність ДБЖ.

Інвертор забезпечує високу стабільність вихідної напруги, що є критично важливим для живлення високочутливих електронних пристроїв.

Фільтр на виході інвертора розраховано з урахуванням необхідності мінімізації гармонічних спотворень та забезпечення високої якості вихідної напруги.

Застосування фільтру дозволяє покращити параметри стабільності та чистоти напруги, що подається на відповідальних споживачів.

Аналіз розрахунків та вибір елементів силової частини ДБЖ показали, що правильно розроблена та оптимізована схема забезпечує високу надійність та стабільність електропостачання критичних споживачів. Вибір акумуляторних батарей, розрахунок інвертора та фільтру на виході інвертора напруги дозволяють досягти необхідної ефективності та якості живлення. Впровадження розроблених рішень сприятиме підвищенню енергетичної безпеки та стабільності роботи електромереж.

В розділі «Дослідження імітаційної моделі ДБЖ» було розглянуто основні аспекти моделювання джерел безперебійного живлення (ДБЖ) та дослідження вищих гармонік струму на їх виході. Основні висновки цього розділу включають:

Розроблена імітаційна модель ДБЖ забезпечує адекватне відтворення всіх ключових процесів, що відбуваються в реальних системах безперебійного живлення.

Імітаційна модель дозволяє детально аналізувати вплив різних параметрів на ефективність і стабільність роботи ДБЖ, що є важливим для подальшого вдосконалення системи.

Дослідження вищих гармонік струму показало, що вища гармоніка суттєво впливає на якість електропостачання, особливо для чутливих електронних пристроїв.

Аналіз гармонічних спотворень виявив, що оптимізація параметрів інвертора та фільтру на виході ДБЖ може значно знизити рівень вищих гармонік, покращуючи таким чином якість вихідної напруги.

Розробка та впровадження заходів щодо зниження гармонічних спотворень дозволяє підвищити надійність та ефективність роботи ДБЖ, зменшуючи негативний вплив на підключене обладнання.

Загальний аналіз показав, що використання імітаційних моделей є ефективним інструментом для дослідження та вдосконалення джерел безперебійного живлення. Модель дозволяє детально вивчити вплив різних параметрів на роботу ДБЖ та оптимізувати їх для покращення якості електропостачання. Дослідження гармонічних спотворень показало, що правильний підбір та налаштування компонентів інвертора і фільтру дозволяють значно знизити рівень вищих гармонік, що є критично важливим для забезпечення стабільного і якісного електропостачання чутливих споживачів.

Впровадження отриманих результатів у практику дозволить покращити показники надійності та стабільності роботи систем безперебійного живлення, що є важливим для підвищення загального рівня енергетичної безпеки.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. [https://electro100.ua/akumulyatory/brand-brand-sonnenschein?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwko21BhAPEiwAwfaQCK1\\_UnKtIh\\_a7bQk-JrDOj4etKugyD5h37Aaxz3GURb\\_tXO88bgo-BoC2pQQA\\_vD\\_BwE](https://electro100.ua/akumulyatory/brand-brand-sonnenschein?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwko21BhAPEiwAwfaQCK1_UnKtIh_a7bQk-JrDOj4etKugyD5h37Aaxz3GURb_tXO88bgo-BoC2pQQA_vD_BwE)
2. <https://www.duet-power.com.ua/akkumuljatornye-batarei/stacionarnye-akkumuljatory/akkumuljatory-gnb-industrial-power/sonnenschein/sonnenschein-a400-2/>
3. <https://i-energy.com.ua/ua/p1634198563-akkumulyator-sonnenschein-a41250.html>
4. Андреев А.І., Банзак О.В. Джерела безперебійного живлення телекомунікаційних і комп'ютерних систем: навч. посіб. / А.І. Андреев, О.В. Банзак – Одеса, 2010. – 196 с.
5. Джерела безперебійного живлення телекомунікаційних і комп'ютерних систем: Навч. посіб. – Одеса, 2008. – 158 с.
6. Андреев А.І. Сучасна концепція побудови пристроїв електроживлення телекомунікаційних та комп'ютерних мереж // Праці НПК “Сучасні проблеми телекомунікацій. – 2005”. – Львів, 2005.
7. .Воєца А.С. Резервні та автономні джерела електроживлення постійним струмом. Методпосібник. – Львів: ЛК ДУІКТ, 2004. – 51 с.
8. .Галузева методика визначення питомих норм споживання електроенергії в електрозв'язку. Видання офіційне. ДКЗІУ ВАТ “Укртелеком”. – К.: 2000. – 58 с. 13.Геращенко М.А., Первак В.Л., Хоменко О.І., Коробко В.В. Концепція, основні принципи та заходи енергозбереження в зв'язку. – К.: Знання, 1997. – 39 с.
9. Зенцев В.Г. Ефективне використання електричної енергії в підприємствах. Нормування і планування витрат енергії: Навч. посібник. – К.: ІЗМН, 1996. – 152 с.
10. .Правила технічної експлуатації електроустановок підприємств електрозв'язку України. – К.: ДВІА «Зв'язок», 1997. – 216 с.