

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

СИСТЕМА БЕЗПЕРЕРВНОГО ЕНЕРГОЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КРИТИЧНИХ
СПОЖИВАЧІВ
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи ЕЕПС-21-1
Білокінь В.К.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма «Електронні пристрої та системи»
(повна назва освітньої програми)

Керівник Пащенко О. Г.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри МЕЕПП _____
(підпис)

Бондаренко І. М.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженеріїКафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроївРівень вищої освіти перший (бакалаврський)Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійнаОсвітня програма «Електронні пристрої та системи»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Білокінь Владислав Костянтинович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи СИСТЕМА БЕЗПЕРЕРВНОГО ЕНЕРГОЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КРИТИЧНИХ СПОЖИВАЧІВзатверджена наказом університету від «28» квітня 2025 р. № 327 Ст2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії «09» червня 2025 р.3. Вихідні дані до роботи САПР: LTspice 24.1.9; Інвертор: напруга 220 В АС, потужність 1,5–3 кВт, ККД 94–96 %, частота ШІМ 20–40 кГц;Акумулятори: напруга 48 В DC, ємність 100–200 А·год, глибина розряду до 80 %;Електромережа: номінальна напруга 230 В ±10 %, частота 50 Гц ±1 Гц;Спрацювання системи при: перенапрузі > 260 В або просіданні < 190 В, частота поза межами 47–53 Гц;Аварійні параметри: температура > +70 °С, внутрішній опір батарей > 50 мОм, втрата зв'язку з контролером > 3 с

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Сучасні технічні рішення з підтримки енергоживлення в умовах нестабільного або відсутнього зовнішнього енергопостачання.Переваги та недоліки різних типів акумуляторних батарей і джерел живлення з позицій надійності, автономності та ефективності.Принципова схема системи резервного енергоживлення для критичних споживачів з урахуванням специфікацій обладнання.

Комп'ютерне моделювання роботи системи із застосуванням програмного забезпечення LTspice.


Розроблення конструкції та топології друкованої плати для реалізації апаратної частини системи.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

Схеми: схема електрична структурна, схема електрична принципова

Слайди: 9 одиниць


6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Аналітична частина	доцент Пащенко Олексій Георгійович		09.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
	Отримання завдання		
	Огляд інформаційних джерел	06.05.25 – 16.05.25	
	Створення проекту за допомогою САПР	17.05.25 – 20.05.25	
	Розробка конструкції пристрою	21.05.25 – 24.05.25	
	Пояснювальна записка	25.05.23 – 30.05.23	
	Підготовка презентації	31.05.25	
	Рецензування, нормоконтроль	01.06.25 – 08.06.25	
	Здача роботи на кафедру	09.06.2025	

Дата видачі завдання 1 квітня 2025 р.

Студент 
(підпис)

Керівник роботи  Пащенко О.Г.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 35 с., 7 рис., 4 додатки, 8 джерел, 2 табл.

СИСТЕМА БЕЗПЕРЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ, ДЖЕРЕЛО БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ, АКУМУЛЯТОР, РЕЗЕРВУВАННЯ, АВТОНОМНА РОБОТА, МОДУЛЬНА АРХІТЕКТУРА

Об'єкт дослідження - система безперервного енергоживлення для критичних споживачів

Мета роботи - дослідження сучасних рішень у сфері забезпечення резервного живлення, проектування системи безперебійного енергопостачання, яка відповідає вимогам надійності, автономності та безпеки

Актуальність: в умовах регулярних порушень централізованого енергопостачання в Україні через воєнні дії, особливої важливості набуває впровадження надійних систем резервного живлення для об'єктів критичної інфраструктури. Це дозволяє не лише забезпечити безперебійну роботу життєво важливого обладнання, а й підвищити загальний рівень енергетичної стійкості об'єктів. Застосування сучасної модульної архітектури та високоефективних акумуляторних технологій дозволяє створювати адаптивні, масштабовані рішення, що відповідають вимогам новітніх стандартів.

ABSTRACT

Explanatory note contains 35 pages, 7 images, 4 applications, 8 sources of literature, 2 tables.

UNINTERRUPTIBLE POWER SYSTEM, BACKUP POWER SUPPLY, BATTERY, INVERTER, REDUNDANCY, AUTONOMOUS OPERATION, MODULAR ARCHITECTURE

Object of the study – the uninterruptible power supply system for critical infrastructure consumers

Purpose of the work – to investigate existing solutions in the field of emergency power supply, to design a reliable and efficient uninterruptible power system that meets the requirements of autonomy and operational safety, and to develop a hardware component including a printed circuit board

Relevance – in the context of frequent disruptions to centralized power supply in Ukraine due to military actions, the need for robust and autonomous power backup systems for critical infrastructure has become vital. Ensuring uninterrupted operation of medical, industrial, and information systems depends on resilient energy solutions. The use of modular architecture and advanced battery technologies makes it possible to implement flexible, scalable systems in compliance with modern reliability standards.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ	8
1.1 Проблематика енергоживлення критичних споживачів	8
1.2 Огляд існуючих рішень щодо підтримки енергоживлення	9
1.3 Класифікація джерел безперебійного живлення	11
1.4 Типи та характеристики акумуляторних батарей	15
1.5 Основні елементи систем безперервного живлення	17
1.6 Вимоги до надійності та резервування систем	19
1.7 Приклади застосування у промисловості та інфраструктур	20
2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЕНЕРГОЖИВЛЕННЯ	22
2.1 САПР LTspice	23
2.2 Розробка структури і конструкції системи для підтримки живлення в умовах перебоїв з енергопостачанням	24
ВИСНОВКИ	34
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	35
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС - змінний струм

ДБЖ - джерело безперебійного живлення

САПР - Система автоматизованого проектування і розрахунку

СБЕ - система безперервного енергоживлення

ЦСРЖ - централізована система резервного живлення

ДС - постійний струм

N + 1 - конфігурація резервування з одним резервним модулем

2N - конфігурація повного резервування з дублюванням усієї системи

EN - Європейський стандарт

ВСТУП

У сучасному світі стабільність електропостачання є критично важливою умовою для безперервної роботи медичних установ, телекомунікаційних систем, центрів обробки даних, систем управління транспортом, промислових об'єктів та інших інфраструктур. Перебої в подачі електроенергії можуть призвести до значних фінансових втрат, збоїв у технологічних процесах, а в деяких випадках - до загрози життю та здоров'ю людей.

Проблема надійного енергоживлення особливо актуалізувалась в умовах зростання загроз техногенного та воєнного характеру, частішання аварій в енергосистемах, а також активного впровадження цифрових технологій, що вимагають цілодобового доступу до електроенергії. У зв'язку з цим виникає потреба в розробці ефективних систем безперервного енергоживлення, здатних забезпечити стабільне живлення критичних споживачів навіть в умовах повного зникнення зовнішнього енергопостачання.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці системи безперервного енергоживлення для критичних споживачів з урахуванням сучасних вимог до надійності, автономності, масштабованості та безпеки.

Особливі вимоги пред'являються до надійності системи: вона повинна забезпечувати стабільну роботу в будь-яких умовах, включаючи вихід з ладу одного або декількох компонентів. Вимога автономності визначається необхідністю підтримки роботи критичних споживачів протягом хоча б кількох годин після зникнення основного джерела живлення. Масштабованість вимагає, щоб система могла легко адаптуватися до підвищеного навантаження або змінених умов роботи. Безпека включає як електричні, так і експлуатаційні вимоги. Система повинна бути захищена від короткого замикання, перенапруги, перегріву, зворотної полярності, а також повинна відповідати стандартам екологічної та пожежної безпеки.

1 СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ

1.1 Проблематика енергоживлення критичних споживачів

Ситуація з енергопостачанням в Україні за останні роки зазнала суттєвих змін, які виявили вразливість існуючої енергетичної інфраструктури до зовнішніх і внутрішніх загроз. Із початком повномасштабної агресії проти України питання безпеки та надійності електропостачання набуло не лише технічного, а й стратегічного значення. Об'єкти критичної інфраструктури, зокрема лікарні, водопостачальні станції, центри обробки даних, вузли зв'язку, а також об'єкти оборонного призначення, потребують гарантованого живлення незалежно від стану основної енергосистеми. Втрата електроживлення в таких системах може спричинити не лише збій в роботі окремих пристроїв, а й масштабні катастрофи або загрози для життя та здоров'я людей.

У містах і селищах України відключення електроенергії внаслідок обстрілів енергетичних об'єктів стали звичним явищем. У багатьох випадках електропостачання відсутнє годинами, а іноді й добами. Це особливо критично для медичних закладів, де безперервне функціонування обладнання для реанімації або операційних систем напряду впливає на виживання пацієнтів. Те саме стосується дата-центрів, де без належного резервного живлення може бути втрачена або пошкоджена критично важлива інформація, що має юридичне, економічне чи оборонне значення. Такі виклики висувають жорсткі вимоги до систем безперебійного енергоживлення, які повинні гарантувати не лише миттєве переключення на резервне джерело, а й достатній запас автономної роботи до моменту відновлення основного живлення.

Важливим аспектом є не лише сам факт відсутності електрики, а й її якість. Часті стрибки напруги, флуктуації частоти, гармонійні спотворення тощо можуть призвести до поступової деградації чутливої електроніки або навіть миттєвого виходу з ладу обладнання.

Міжнародні нормативи, такі як EN 50171 та BS 5266-1, регламентують вимоги до систем безперервного живлення для життєво важливих навантажень. Зокрема, ці стандарти вимагають наявності захисту від зворотної полярності, високої перевантажувальної здатності, довговічності акумуляторів, а також здатності системи відновити до 80% автономності протягом 12 годин після зникнення живлення. Це означає, що мова йде не просто про перехід на батареї, а про складну інженерну систему, спроможну працювати стабільно в умовах підвищеного навантаження, постійних перемикань і тривалих режимів автономності.

Сучасні виробники систем безперебійного живлення, пропонують рішення, що базуються на модульному підході з можливістю масштабування, заміни окремих компонентів без відключення навантаження та реалізації концепції «гарячої заміни». Це дозволяє досягти повної відмовостійкості, за якої вихід з ладу окремого модуля не впливає на роботу системи в цілому.

1.2 Огляд існуючих рішень щодо підтримки енергоживлення

У сучасних технічних і соціальних умовах стабільність енергопостачання не може гарантуватися жодною енергосистемою на 100 %, особливо в країнах, які перебувають під зовнішніми загрозами або мають вразливу інфраструктуру. Ситуація, коли централізоване електропостачання може зникати на тривалі періоди, що зумовлює необхідність масового впровадження систем підтримки живлення, від побутових до промислових масштабів.

На практиці існує кілька типових рішень для забезпечення безперервного енергоживлення. Найпоширенішим варіантом є використання джерел безперебійного живлення (Рисунок 1.1), які поділяються на офлайн, лінійно-інтерактивні та онлайн. Останні вважаються найбільш надійними, адже забезпечують повну електричну ізоляцію навантаження від основної мережі та дозволяють миттєво перейти на акумуляторне живлення у випадку зникнення зовнішньої напруги.

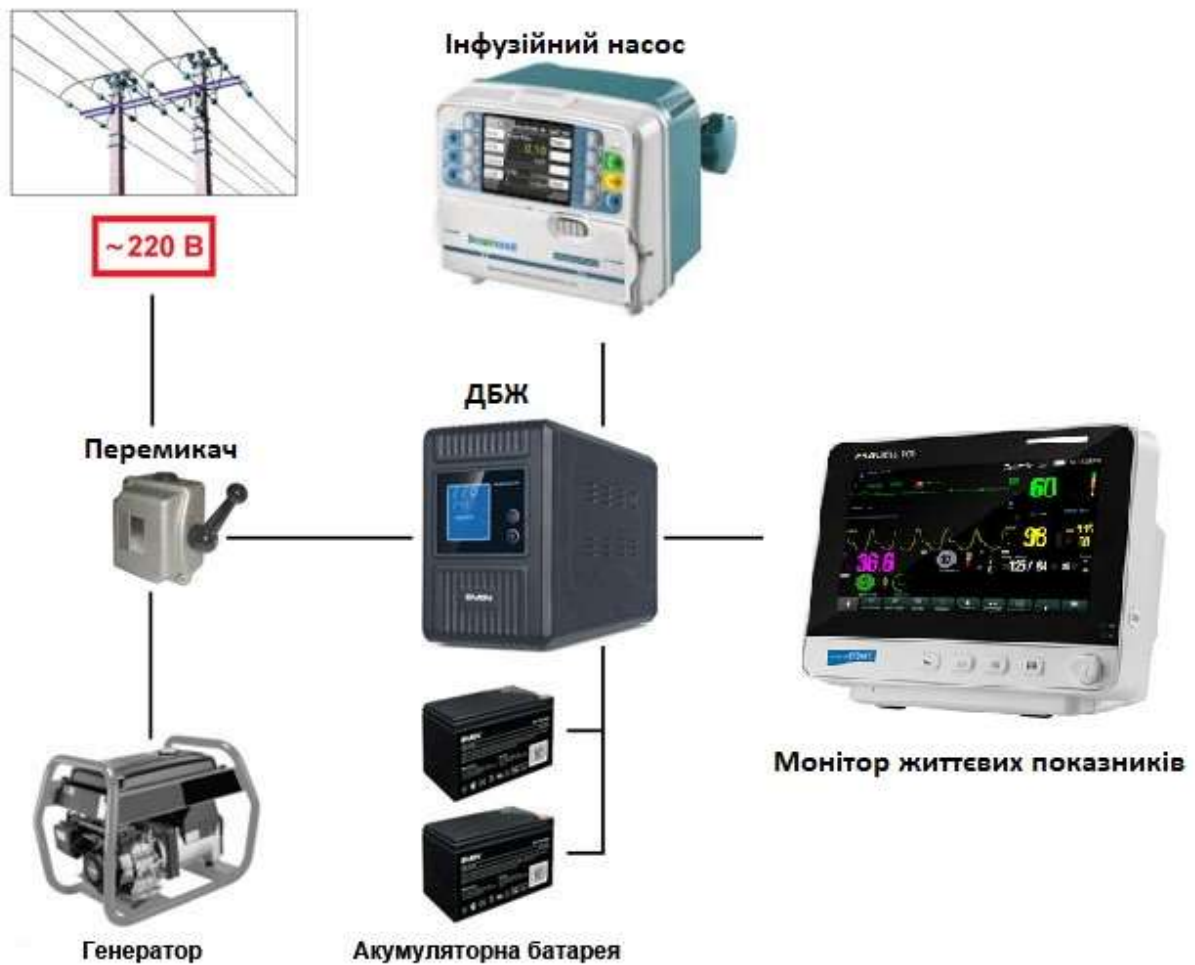


Рисунок 1.1 - Узагальнена структура електронної системи безперебійного живлення з використанням ДБЖ

Альтернативні або додаткові варіанти рішень включають централізовані системи резервного живлення, які орієнтовані на забезпечення життєво важливих систем: аварійне освітлення, протипожежний захист, системи димовидалення, медичне обладнання. На відміну від звичайних джерел безперебійного живлення, централізовані системи резервного живлення підлягають більш жорстким стандартам, які вимагають підвищеної перевантажувальної здатності, тривалого терміну служби батарей, захисту від переполюсування та здатності до швидкого відновлення автономності.

На сьогоднішній день ринок пропонує велику кількість технічних рішень, які можуть бути адаптовані до конкретних потреб: від індивідуальних робочих місць до масштабних об'єктів інфраструктури. Успішне впровадження таких рішень залежить від правильного вибору типу системи, обґрунтованих розрахунків автономності, резервування та відповідності нормативам.

1.3 Класифікація джерел безперебійного живлення

Джерела безперебійного живлення є основним елементом будь-якої системи резервного живлення. Вони забезпечують безперервне постачання електроенергії до споживачів у разі зникнення або нестабільності основного джерела. Основна класифікація ДБЖ базується на принципі роботи, швидкості перемикавання, якості напруги на виході та ступеню захисту навантаження. Найпоширенішими є три основні типи: офлайн, лінійно-інтерактивні та онлайн джерела.

Офлайн-ДБЖ, або резервні джерела живлення, є найпростішими за конструкцією та найдешевшими. У нормальних умовах живлення подається безпосередньо з мережі. У разі зникнення електроенергії пристрій перемикається на акумуляторне живлення, при цьому перемикавання займає декілька мілісекунд (Рисунок 1.2). Такі системи можуть бути ефективними для нескладного обладнання, однак не забезпечують стабілізації напруги та не гарантують повний захист від мережевих коливань.

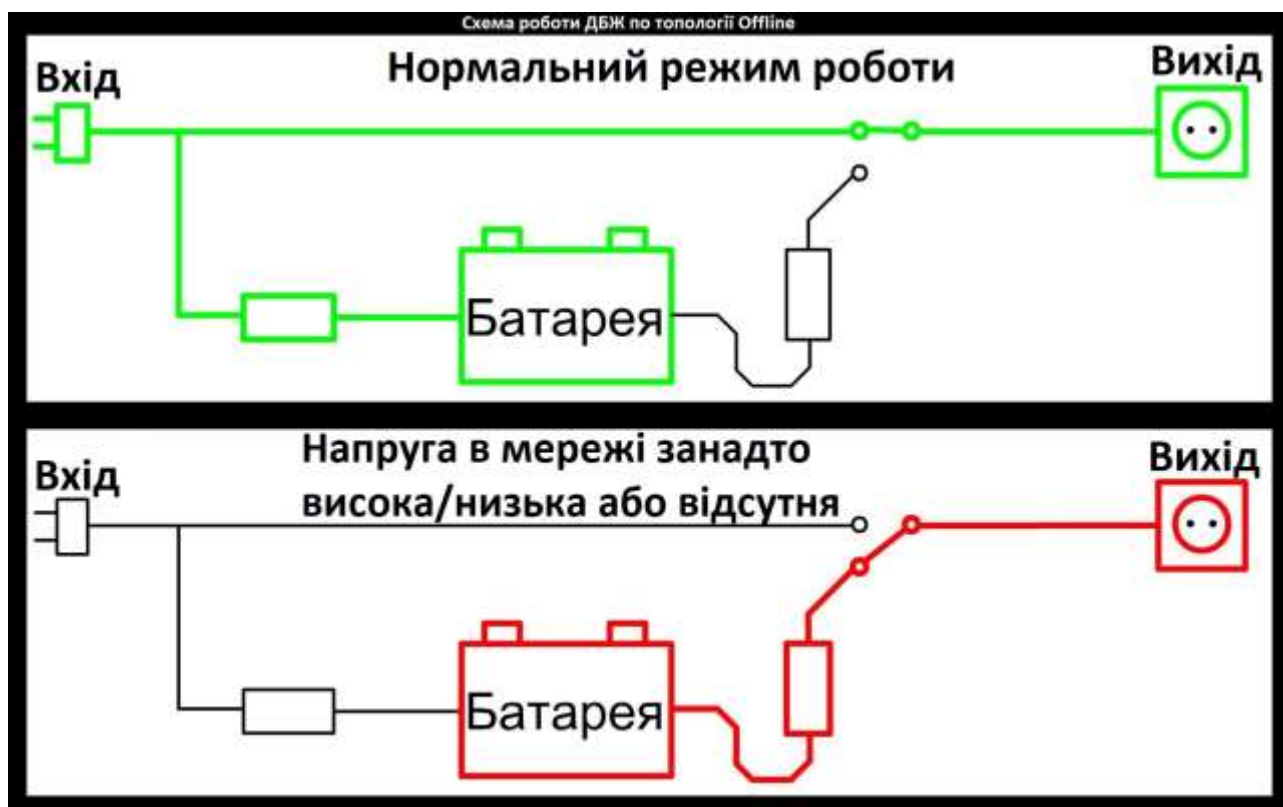


Рисунок 1.2 - Схема роботи ДБЖ по топології offline

Лінійно-інтерактивні ДБЖ забезпечують дещо вищий рівень захисту. Вони мають вбудований автотрансформатор, який стабілізує напругу без переходу на батареї (Рисунок 1.3). Це дозволяє уникати зайвих циклів розряду й продовжує термін служби акумуляторів. Перемикання на живлення від батареї у таких системах також не є миттєвим, однак займає менше часу, ніж в офлайн-моделях. Ці пристрої добре підходять для офісної техніки та систем середньої критичності.

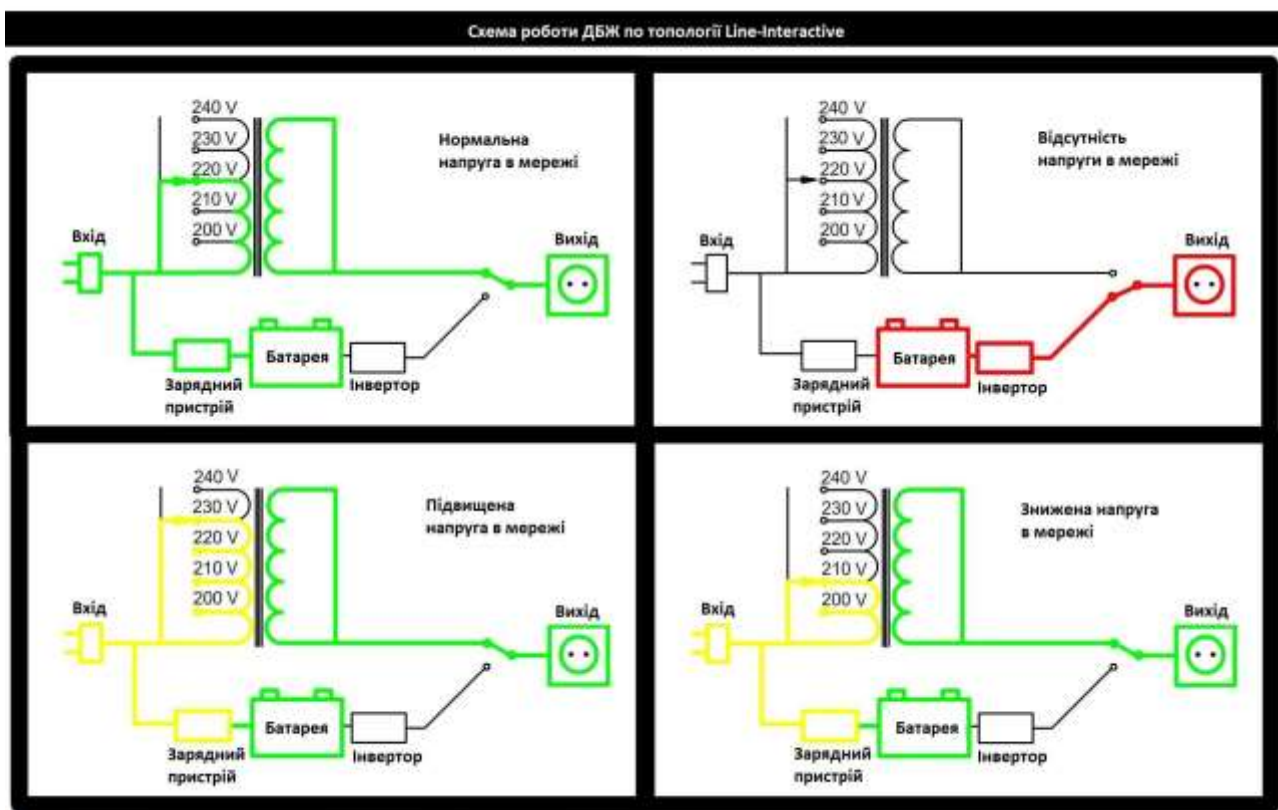


Рисунок 1.3 - Схема роботи ДБЖ по топології line-interactive

Найвищий рівень надійності та якості живлення забезпечують онлайн-ДБЖ з подвійним перетворенням енергії. У таких системах електроенергія постійно перетворюється з змінного струму на постійний, а потім знову на змінний. Це дозволяє повністю ізолювати навантаження від нестабільностей мережі, гарантуючи чисту синусоїду з точними параметрами напруги та частоти (Рисунок 1.4). Онлайн-ДБЖ є незамінними у високонавантажених середовищах, таких як серверні кімнати, медичні заклади або системи автоматизованого управління

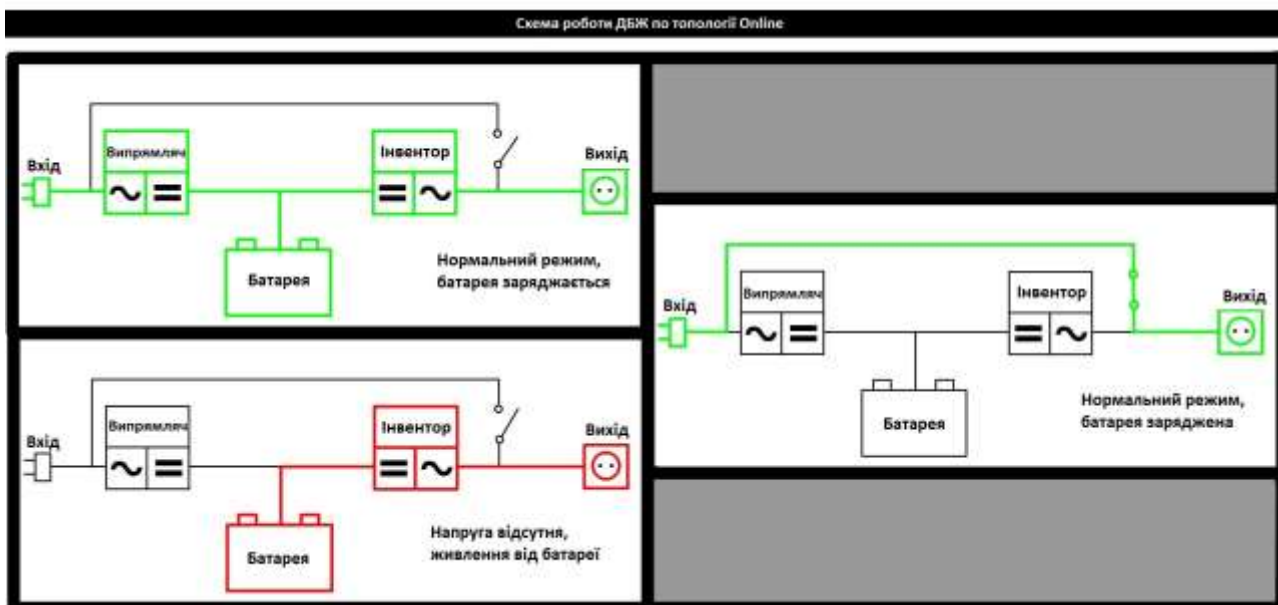


Рисунок 1.4 - Схема роботи ДБЖ по топології online

Сучасні ДБЖ можуть також бути реалізовані в модульному виконанні, що дозволяє поєднувати переваги онлайн-систем з гнучкістю масштабування. Модульні ДБЖ передбачають додавання або заміну окремих силових модулів без зупинки системи, що суттєво підвищує її надійність та скорочує час на обслуговування. У таблиці 1.1 детально порівняно типи ДБЖ.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика типів джерел безперебійного живлення

Тип ДБЖ	Час перемикання	Захист від завад	Ефективність
Offline	4-10 мс	Мінімальний. Не захищає від імпульсів та гармонік	Висока (до 98%)
Line-interactive	2-5 мс	Середній. Компенсує коливання напруги, але не шуми	Висока (90–96%)
Online	0 мс (безперервне)	Високий. Повна фільтрація шумів, гармонік і збоїв	Середня (85–95%)

Окрім того, ДБЖ поділяються за фазністю: однофазні та трифазні. Однофазні зазвичай використовуються для живлення малопотужного обладнання, тоді як трифазні здатні забезпечити безперебійну роботу потужних промислових систем або цілих об'єктів.

1.4 Типи та характеристики акумуляторних батарей

Акумуляторні батареї є ключовим компонентом систем безперебійного живлення, оскільки саме вони забезпечують автономну роботу навантаження під час повного або часткового зникнення основного електропостачання. Ефективність, надійність і тривалість роботи всієї системи ДБЖ напряму залежать від характеристик та типу використаних акумуляторів. У сучасній практиці застосовується декілька основних типів акумуляторних технологій, кожна з яких має свої переваги, недоліки й галузі застосування.

Найпоширенішим типом залишаються свинцево-кислотні акумулятори та гелеві. Ці батареї мають відносно невисоку вартість, добре працюють при кімнатних температурах і не потребують складного обслуговування. Вони широко використовуються в класичних ДБЖ-системах середньої потужності. Термін служби таких батарей зазвичай складає 5–10 років, однак він суттєво скорочується в умовах частого розряду, перегріву чи перевантажень. Стандарти вимагають для критичних систем використання акумуляторів з 10-річним ресурсом і захистом від глибокого розряду.

У системах з підвищеними вимогами до енергоефективності, ваги, компактності та циклічності останнім часом усе активніше впроваджуються літій-іонні батареї. Вони мають значно вищу щільність енергії, менші габарити, стабільнішу напругу в процесі розряду, довший термін служби, до 15 років або понад 5000 циклів, і можливість роботи при ширшому температурному діапазоні. Окрім цього, літій-іонні системи зазвичай обладнані інтелектуальними системами управління батареями, що дозволяє контролювати температуру, балансування елементів, стан заряду та здоров'я батареї в реальному часі. Проте висока

вартість, складність утилізації та чутливість до умов експлуатації залишаються факторами, що обмежують їхнє повсюдне застосування.

Окремо варто згадати нікель-кадмієві та нікель-металгідридні акумулятори, які мають високу надійність при екстремальних умовах, проте відзначаються високою вартістю, токсичністю та нижчою енергетичною щільністю. Їх застосування в ДБЖ поступово витісняється більш сучасними рішеннями. У таблиці 1.2 детально порівняно типи акумуляторів

Таблиця 1.2 - Порівняльна таблиця типів акумуляторів

Тип акумулятора	Свинцево-кислотний	Літій-іонний	Нікель-кадмієвий
Середній термін служби	5-10 років	10-15 років	10-20 років
Глибина розряду	50-60%	80-90%	70-80%
Кількість циклів	500-1000	3000-6000	1500-2000
Робочий температурний діапазон	0...+40°C	-20...+60°C	-40...+60°C
Щільність енергії (Вт·год/кг)	30-50	90-160	45-60
Потреба в обслуговуванні	Низька	Майже відсутня	Помірна
Маса на 1 кВт год	Висока	Низька	Середня

Крім типу хімії, важливими параметрами для вибору батарей є: глибина розряду, внутрішній опір, кількість повних циклів, струм заряду/розряду, температурні обмеження, тип корпусу, розмір, спосіб монтажу та необхідність активного охолодження

У контексті України особливе значення має здатність батарей витримувати часті розряди, знижені температури в неопалюваних приміщеннях, та можливість швидкого відновлення після аварійного вимкнення. Системи, які використовуються в умовах війни або нестабільного енергозабезпечення, мають

підтримувати мінімум 80% автономності протягом 12 годин після повного циклу розряду.

1.5 Основні елементи систем безперервного живлення

Системи безперервного енергоживлення є складними електронно-енергетичними комплексами, які об'єднують в собі декілька функціональних вузлів, кожен з яких виконує визначену роль у забезпеченні стабільної, надійної та безперервної подачі електроенергії до споживача (Рисунок 1.5). Незалежно від типу системи, її структура базується на типових елементах, що забезпечують узгоджену роботу між основною мережею, акумуляторними батареями та навантаженням.



Рисунок 1.5 – Загальна схема системи ДБЖ

Ключовим елементом будь-якої системи безперервного енергоживлення є інвертор, який відповідає за перетворення постійного струму від акумуляторів у змінний струм із стабільними параметрами: напругою, частотою, формою сигналу. У більшості сучасних систем використовується двоступенева схема з по-

двійним перетворенням енергії, що дозволяє повністю ізолювати навантаження від нестабільної мережі та забезпечити чисту синусоїду. Інвертори часто базуються на біполярному транзисторі з ізольованим затвором, що дозволяє знизити втрати енергії та підвищити ефективність при високих навантаженнях.

Другим фундаментальним компонентом є зарядний пристрій, який забезпечує безпечну, ефективну та швидку зарядку акумуляторів. Від його якості залежить термін служби батарей і час відновлення системи після аварії. У сучасних СБЕ застосовуються інтелектуальні зарядні модулі, що підтримують багатоступеневе зарядження, температурну компенсацію та балансування комірок, особливо у випадку з літій-іонними акумуляторами.

Не менш важливим є блок автоматичного перемикачання або статичний перемикач, який здійснює миттєве переключення між основним живленням, резервним (акумуляторним або генераторним) та байпасом. Швидкість реагування перемикача визначає здатність системи ДБЖ підтримувати безперебійне живлення критичних навантажень без навіть найменших перешкод, особливо у випадку з чутливою електронікою

До складу системи також входить вхідний і вихідний фільтр, що слугує для захисту навантаження від високочастотних перешкод, перенапруг, електромагнітних завад і зворотного впливу навантаження на мережу. Це особливо важливо у промислових умовах або при наявності великої кількості імпульсних блоків живлення.

Крім того, будь-яка сучасна система має інтерфейс моніторингу та управління, що дає змогу дистанційно відстежувати стан акумуляторів, напругу на вході/виході, температуру, рівень заряду, наявність несправностей, а також проводити діагностику в режимі реального часу. Комунікаційні інтерфейси дозволяють інтегрувати ДБЖ у загальну систему керування об'єктом.

Не менш важливими є засоби охолодження, захисту від короткого замикання, зворотного струму, перевантаження та механічного впливу. Залежно від конфігурації, система може включати активні вентилятори, теплові сенсори, автоматичні вимикачі, запобіжники, діоди Шоттки тощо.

Загалом, ефективна робота системи безперебійного живлення є результатом узгодженого функціонування всіх її компонентів. Правильний вибір і баланс між складовими елементами системи визначає її надійність, довговічність і здатність ефективно функціонувати в аварійних ситуаціях. У наступному розділі буде розглянуто концепцію резервування як одного з найважливіших принципів побудови високонадійних енергетичних систем.

1.6 Вимоги до надійності та резервування систем

Надійність є однією з ключових вимог до систем безперервного енергоживлення, особливо у випадках, коли мова йде про живлення критичних споживачів. У таких ситуаціях навіть короткочасна зупинка роботи обладнання може спричинити серйозні наслідки. Серед них можна відзначити порушення лікувального процесу в реанімаційних відділеннях, втрату важливої інформації в центрах обробки даних, зупинку промислових виробничих ліній або припинення функціонування систем зв'язку. З огляду на це, під час проектування систем безперебійного живлення необхідно чітко дотримуватись принципів резервування та досягати максимально можливої відмовостійкості.

Поняття резервування у системах безперебійного живлення передбачає таку архітектуру, за якої до складу системи включаються додаткові компоненти, як-от інвертори, батарейні блоки чи канали живлення. Ці елементи не беруть участі в роботі під час нормальної експлуатації, проте автоматично активуються у випадку відмови основних частин системи. Найпоширенішими підходами до резервування є конфігурації типу $N+1$, $N+X$ та $2N$. У модульних системах ДБЖ та ЦСРЖ ці конфігурації застосовуються найчастіше. У першому випадку, тобто при конфігурації $N+1$, до необхідної кількості основних модулів додається ще один додатковий. Його завдання полягає в тому, щоб узяти на себе навантаження у разі несправності будь-якого з основних модулів. Конфігурація типу $2N$, яка зустрічається рідше через її вартісність, передбачає повне

дублювання всієї системи. Це дає змогу проводити навіть профілактичне обслуговування без зупинки живлення підключеного навантаження.

Окрему увагу слід приділити батарейним системам. Резервування тут може полягати як у надлишковій ємності, так і в створенні декількох паралельних батарейних гілок. Це дозволяє не лише продовжити час автономної роботи, а й знизити ризик повної втрати живлення при виході з ладу одного з блоків.

Крім апаратного резервування, велику роль відіграє інформаційне та алгоритмічне резервування - дублювання шляхів передачі сигналів керування, застосування паралельних процесорів для контролю параметрів, використання резервних прошивок та інтелектуальних систем діагностики, які здатні передбачати потенційні відмови та завчасно переключити систему в безпечний режим.

1.7 Моніторинг і управління виробництвом енергії на електростанціях

Системи безперервного енергоживлення є невід'ємною частиною сучасної інженерної інфраструктури, оскільки забезпечують стабільне функціонування критично важливих об'єктів навіть у разі повного або часткового зникнення основного електроживлення. У різних галузях промисловості та суспільної інфраструктури вони відіграють роль гаранта безпеки, надійності й ефективності технологічних процесів.

В енергетичній сфері подібні системи встановлюються на об'єктах генерації, розподілу та диспетчеризації електроенергії. Безперервне живлення в таких умовах забезпечує стійку роботу автоматики, телеметрії, систем керування трансформаторами та релейного захисту. У разі відмови зовнішнього живлення ДБЖ дозволяє утримувати систему під контролем до моменту запуску дизель-генераторних установок або відновлення основного живлення.

У медичних закладах, зокрема в операційних блоках, палатах інтенсивної терапії та лабораторіях, системи безперебійного живлення підтримують роботу життєво важливого обладнання. Мова йде про апарати ШВЛ, кардіомонітори,

томографи, системи централізованого спостереження та медичної інформації. Навіть короткотривала перерва у подачі живлення може призвести до непоправних наслідків, тому використання резервних систем живлення тут є обов'язковим з точки зору нормативів і медичної етики.

У телекомунікаційній сфері ДБЖ застосовуються для безперервної роботи базових станцій мобільного зв'язку, серверних вузлів, мережевих комутаторів і систем резервного копіювання. Надійність передачі даних і постійна доступність мережі безпосередньо залежать від стабільного живлення, особливо в умовах кризових ситуацій або підвищеного навантаження на систему.

У промисловості такі системи встановлюються на виробничих лініях, у цехах керування технологічними процесами, системах контролю якості та на складах із автоматизованим обладнанням. ДБЖ забезпечує збереження безперервності технологічних операцій, унеможливорює аварійні зупинки і втрати продукції. Особливо актуальним це є на підприємствах безперервного циклу виробництва, де будь-яка зупинка обладнання призводить до серйозних фінансових збитків.

У транспортній інфраструктурі системи безперервного живлення відповідають за роботу світлофорів, сигнальних систем на залізниці, автоматичних бар'єрів, диспетчерських пультав та систем відеоспостереження. Вони забезпечують стабільну роботу логістичних вузлів і підтримують безпечне керування потоками транспорту, навіть за умов тимчасової відсутності централізованого енергоживлення.

2 СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЕНЕРГОЖИВЛЕННЯ ДЛЯ МЕДИЧНОЇ СФЕРИ

Застосування системи безперервного енергоживлення для критичних споживачів в медичній сфері. Медичні заклади, особливо багатопрофільні лікарні та реанімаційні центри, потребують постійного живлення широкого спектра електронного обладнання, включно з апаратами штучної вентиляції легень, моніторами життєвих показників, рентгенівськими системами, комп'ютерними томографами, лабораторним діагностичним устаткуванням, а також комп'ютерними системами зберігання та обробки медичних даних. СБЕ у таких закладах не є допоміжною інфраструктурою - вони становлять критичну частину системи безпеки і функціонування медичної установи.

Одним із найважливіших прикладів є блоки інтенсивної терапії, де щоденно рятуються життя пацієнтів, які знаходяться у критичному стані. Перебої в електроживленні можуть призвести до зупинки апаратів життєзабезпечення, таких як дефібрилятори, насоси інфузійної терапії або системи моніторингу. У таких умовах надійна система резервного живлення має активуватись миттєво, без жодного порушення подачі енергії. Саме тому використовуються джерела безперебійного живлення з технологією подвійного перетворення, які гарантують стабільність параметрів напруги незалежно від зовнішніх коливань мережі.

Велике значення має централізоване резервне живлення для таких підсистем лікарні, як електронні медичні картки, телемедицина, сервери з медичними знімками. Ці підсистеми не лише забезпечують функціонування закладу, а й підтримують критичні процеси прийняття клінічних рішень. Збій в їх роботі можуть призвести до втрати даних про пацієнтів, помилок діагностики або втрати можливості провести консультацію в режимі реального часу.

З метою забезпечення надійності, в медичних СБЕ застосовують модульні джерела живлення з можливістю гарячої заміни модулів, а також впроваджують конфігурації з надлишковістю, що дозволяє підтримувати роботу навіть у разі відмови одного з компонентів. Для гарантування високої автономності застосо-

вують літій-залізо-фосфатні акумулятори з тривалим терміном служби, низьким саморозрядом та широким температурним діапазоном експлуатації.

Значна увага також приділяється забезпеченню відповідності міжнародним стандартам, зокрема IEC 60601-1-2 для електромагнітної сумісності медичних приладів та EN 50171 для централізованих систем живлення аварійного освітлення, які також можуть бути частиною комплексної СБЕ в лікарні.

2.1 САПР LTspice

У процесі моделювання роботи системи безперервного енергоживлення було використано програмне забезпечення LTspice 24.1.9, розроблене в жовтні 1999 року компанією Analog Devices, Inc. Програма є безкоштовною та активно використовується в освітніх і професійних цілях для розробки та аналізу аналогових, імпульсних і змішаних електронних схем.

Основне призначення LTspice - моделювання електричних ланцюгів на основі SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), зокрема схем живлення, інверторів, підсилювачів, фільтрів, а також аналіз перехідних, частотних і гармонійних характеристик. Програма підтримує моделювання як лінійних, так і нелінійних елементів, включаючи транзистори, операційні підсилювачі, діоди, джерела живлення, трансформатори, оптрони тощо.

Однією з ключових переваг LTspice є висока швидкість обчислень і стабільність при симуляції складних імпульсних джерел живлення, що досягається завдяки оптимізованому симулятору SPICE-движка. Програма також дозволяє задавати параметри елементів за допомогою мовного скрипта та має вбудовану підтримку математичних моделей для температурних, часових та стохастичних впливів.

Віртуальна елементна база LTspice містить широкий набір базових компонентів, а також бібліотеки з моделями, наданими виробником, включаючи підсилювачі, стабілізатори напруги, DC/DC-перетворювачі та аналого-цифрові пристрої. Крім того, LTspice дозволяє підключати зовнішні бібліотеки елемен-

тів інших виробників, зокрема Texas Instruments, ON Semiconductor, STMicroelectronics, Infineon, Microchip, Nexperia тощо, що забезпечує реалістичне моделювання з використанням актуальних технічних параметрів.

Програма підтримує як стандартні формати моделей SPICE, так і експорт результатів у зручному форматі графіків і таблиць. Це дозволяє точно аналізувати поведінку електронної системи в різних режимах - нормальному, аварійному, при запуску, перевантаженні тощо.

У даній роботі LTspice було використано для створення спрощеної моделі схеми джерела безперебійного живлення з інвертором на MOSFET-транзисторах, акумуляторною батареєю та модулем керування. Завдяки LTspice була змодельована поведінка системи при втраті мережевого живлення, перевантаженні та відновленні мережі, що дозволило провести віртуальну перевірку працездатності проєкту до етапу фізичної реалізації.

2.2 Розробка структури і конструкції системи для підтримки живлення в умовах перебоїв з енергопостачанням

Проектування системи безперервного енергоживлення починається з вибору концепції, що враховує вимоги до надійності, часу автономної роботи, масштабованості та вартості впровадження. У випадку забезпечення живлення критичних споживачів - таких як системи зв'язку, медичне обладнання, інфраструктура безпеки чи центри обробки даних - пріоритетними є критерії безперервності, захисту від аварійних режимів і здатність до тривалої автономної роботи. Згідно з вимогами стандартів EN 50171 та EN 62040, для живлення таких споживачів доцільним є використання джерел безперебійного живлення з подвійним перетворенням. Цей тип забезпечує повну гальванічну розв'язку навантаження від коливань напруги мережі, короткочасних провалів напруги, імпульсних завад, зміщення частоти та інших несприятливих чинників.

Обґрунтованим вибором є модульна архітектура СБЕ, що дозволяє реалізувати схеми резервування типу N+1 або 2N. Це підвищує надійність за ра-

хунок надлишкових модулів, які автоматично підключаються у разі відмови одного з активних компонентів. Модульність також дає змогу масштабувати систему відповідно до зміни навантаження без її повної реконфігурації.

Тип акумуляторних батарей визначає тривалість автономної роботи, експлуатаційні характеристики та габаритно-масові показники. У сучасних СБЕ перевагу віддають літій-іонним батареям, які характеризуються високою щільністю енергії, тривалим ресурсом та зниженим рівнем обслуговування. Концепція резервного живлення для критичних споживачів базується на використанні ДБЖ онлайн типу з модульною архітектурою, застосуванні довговічних акумуляторів, цифровому керуванні та резервуванні за схемою N+1, що забезпечує високу надійність і масштабованість.

Структурна схема системи безперервного енергоживлення (Рисунок 2.1) визначає функціональну взаємодію її основних компонентів. З урахуванням обраної концепції резервного живлення побудова СБЕ реалізується на основі модульної архітектури з подвійним перетворенням енергії. Основні функціональні вузли системи включають:

- вхідний фільтр і захист від перенапруги;
- випрямляч;
- акумуляторний блок з контролером заряду;
- інвертор;
- вузол перемикання;
- мікропроцесорну систему керування;
- засоби комунікації і діагностики.

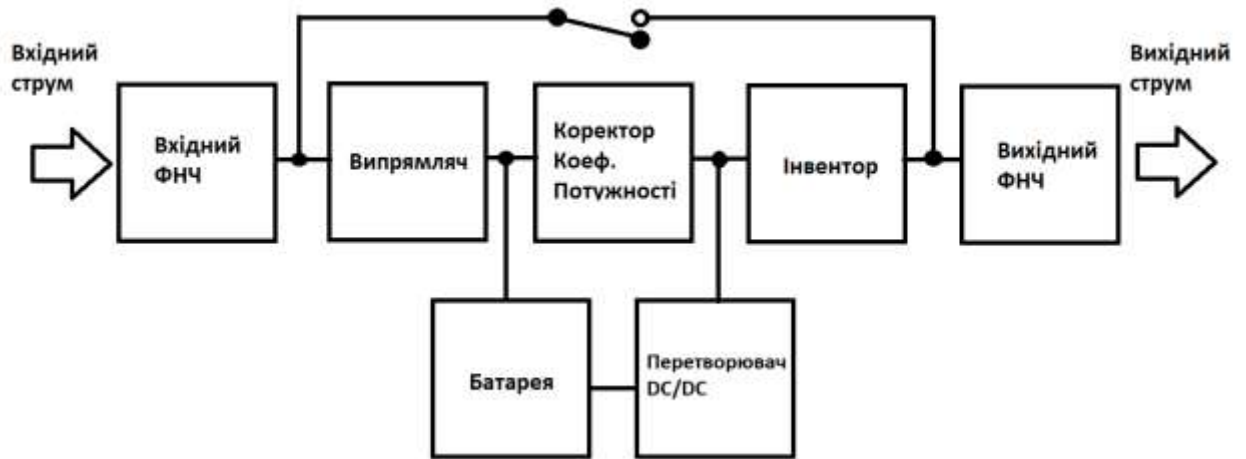


Рисунок 2.1 – Структура СБЕ

На вході СБЕ передбачено встановлення фільтра електромагнітних завад та варисторного захисту для усунення високочастотних імпульсів і грозових перенапруг. Це забезпечує захист усієї системи від пошкодження та продовжує термін служби силових компонентів.

Випрямляч виконує функцію перетворення змінного струму мережі 230 В/50 Гц у стабілізований постійний струм, що забезпечує одночасно живлення інвертора та заряд акумуляторів. Для підвищення ККД системи доцільним є використання IGBT-перетворювача з активною схемою корекції коефіцієнта потужності, що дозволяє досягати значення коефіцієнта потужності $> 0,99$ та низький рівень гармонік.

Акумуляторний блок складається з кількох паралельно з'єднаних осередків із загальною номінальною напругою 48 В або 96 В, або 240–384 В. Вибір напруги визначається потужністю навантаження та типом інвертора. Контролер заряду реалізує алгоритм триступеневого заряджання із температурною компенсацією, що запобігає деградації батарей.

Інвертор формує чисту синусоїдальну напругу змінного струму із постійного струму батарей. Він працює у безперервному режимі подвійного перетворення, що гарантує повну ізоляцію споживача від нестабільності мережі. Осно-

ву інвертора становить мостова схема на основі MOSFET, керована ШІМ-контролером із частотою до 20–40 кГц.

Байпасний вузол (static bypass) дозволяє у випадку перевантаження або внутрішнього дефекту інвертора автоматично перемкнути живлення навантаження безперервно на вхідну мережу. У разі відновлення нормальної роботи інвертора система повертає навантаження у штатний режим. Мікропроцесорна система керування здійснює контроль усіх параметрів: напруг, струмів, температур, стану батарей та модулів.

Принципова електрична схема системи охоплює схематичне зображення зв'язків між усіма зазначеними вузлами, із вказанням номіналів ключових елементів. Особливу увагу приділено блокуванню короткого замикання та обмеженню струму заряду на початковому етапі. Обрана структура дозволяє досягти високого рівня енергетичної доступності та безперервної роботи у критичних умовах експлуатації, відповідає нормам EN 50171 та технічним вимогам сучасних інфраструктурних об'єктів.

Вибір апаратної складової системи безперервного енергоживлення здійснюється на основі попередньо сформованої структурної схеми та функціональних вимог до системи. Основними вузлами, які визначають стабільність, безпеку та ефективність роботи СБЕ, є: інвертор, акумуляторна батарея, контролер заряду/розряду, а також модулі захисту і моніторингу.

Для забезпечення стабільного живлення критичних споживачів обрано інвертор, незалежний від напруги та частоти, який функціонує за принципом подвійного перетворення і дозволяє досягти синусоїдального сигналу з високою точністю. Типова потужність обраного інвертора становить від 1,5кВт до 3 кВт, залежно від передбаченого навантаження. Інвертор побудовано на основі високочастотних MOSFET-транзисторів із керуванням через широтно-імпульсну модуляцію з частотою від 20кГц до 40 кГц. Перевагами обраного рішення є висока ефективність (до 94–96%), можливість роботи в режимах резервного живлення та інверсного синхронізованого запуску, вбудовані засоби моніторингу та самодіагностики.

Акумуляторна частина відіграє ключову роль у забезпеченні автономної роботи СБЕ. Враховуючи вимоги до тривалості автономного живлення та надійності експлуатації, було обрано літій-залізо-фосфатні акумулятори. Основні причини такого вибору, це тривалий термін служби, високий рівень безпеки, низький саморозряд та можливість швидкої зарядки. Номінальна конфігурація акумуляторного блока: 16 елементів по 3,2 В, що формують 51,2 В у зібраному вигляді з ємністю 100 А·год. Така конфігурація забезпечує запас енергії понад 5 кВт·год, чого достатньо для типового навантаження від 1,5кВт до 2 кВт упродовж 2-3 годин. Контролер заряду відповідає за дотримання параметрів заряджання/розряджання акумулятора, балансування елементів та захист від глибокого розряду, перенапруги, перевантаження по струму, перегріву тощо. Обраний контролер реалізує трирівневий алгоритм заряджання. Наявність термодатчиків у кожному модулі забезпечує можливість відключення навантаження при перевищенні температурного порогу.

Особливу увагу приділено узгодженню параметрів зарядного пристрою з характеристиками батарей: максимальний струм зарядки становить 0,5С, що забезпечує швидке відновлення ресурсу без прискореного зносу елементів.

Для забезпечення електробезпеки та довговічності системи передбачено такі захисні елементи:

- запобіжники на вході інвертора та акумуляторного блока (з реакцією на перевищення струму);
- NTC-термістор або електронний м'який старт для обмеження пускового струму на вході;
- оптоізольоване реле або MOSFET-комутатор для управління зарядом і навантаженням;
- варистори та TVS-діоди для захисту від імпульсних перенапруг;
- гальванічна розв'язка між вхідними та вихідними лініями.

Комплексне використання зазначених компонентів забезпечує відповідність системи стандартам електромагнітної сумісності, пожежної безпеки та екологічної безпеки.

Після визначення архітектури та елементної бази системи безперервного енергоживлення наступним етапом є перевірка її працездатності шляхом комп'ютерного моделювання. Метою цього етапу є оцінка поведінки системи в різних режимах, включаючи штатну роботу, аварійне вимкнення мережі, перевантаження, перехід на акумуляторне живлення та відновлення живлення.

Для виконання симуляцій використано програму LTspice (Рисунок 2.2), яка дозволяє моделювати нелінійні електронні системи з високою точністю. В моделі відтворено спрощену схему подвійного перетворення енергії з DC-шиною, інвертором на IGBT-модулях, акумуляторною батареєю та навантаженням.

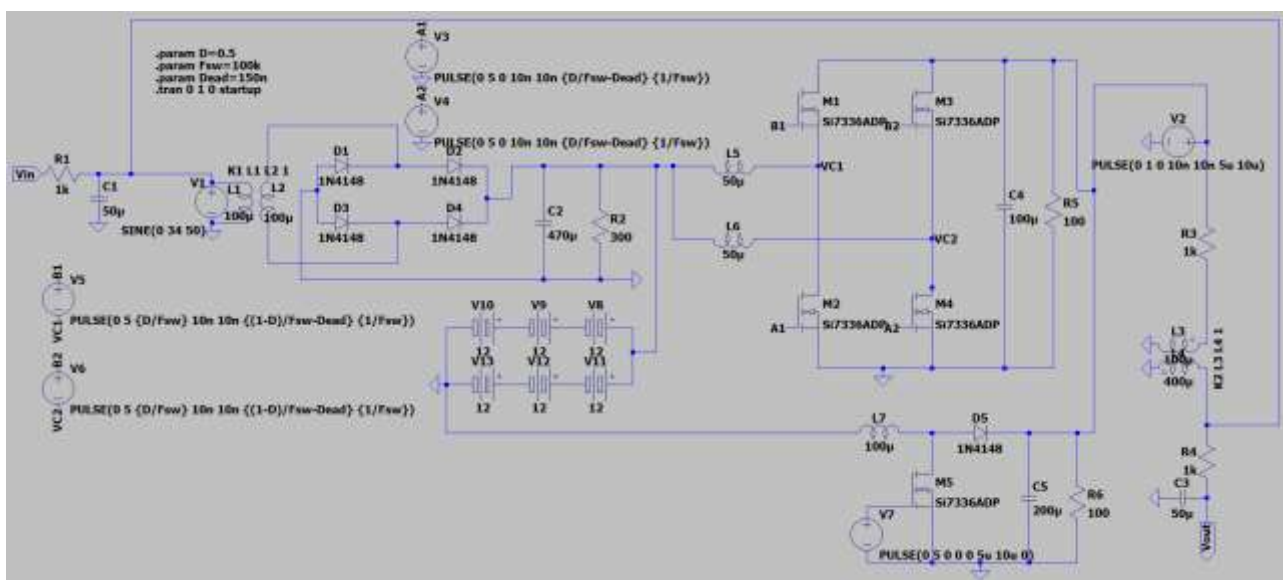


Рисунок 2.2 – Схема друкованої плати СБЕ, розроблене в програмі LTSpice

Режими, які були змодельовані.

Нормальна робота: живлення від мережі, інвертор працює в стабільному режимі, заряд батареї активний. Вихідна напруга стабільна 230 В, 50 Гц.

Раптове зникнення мережі: перемикання на акумуляторне живлення відбувається без зниження напруги на виході.

Робота в режимі розряду: акумулятор поступово знижується до граничної напруги 44 В, після чого контролер подає команду на вимкнення навантаження.

Повернення мережі: система автоматично повертається в нормальний режим, заряджання відновлюється з обмеженням по струму.

Перевантаження більше 120%: активується внутрішній байпас, інвертор розвантажується. Вихідна напруга тримається в межах $\pm 1\%$ від номіналу при стрибках вхідної напруги в межах від 180В до 250 В. Час перемикання з мережі на акумулятор – практично миттєвий. ККД системи становив понад 95% в робочому діапазоні навантажень 50–100%. Нагрівання силових модулів не перевищує 70 °С при максимальному навантаженні (з повітряним охолодженням). Виявлено критичні умови при температурі батареї вище +60 °С – BMS блокує заряд.

Одним із завершальних та водночас найважливіших етапів реалізації системи безперервного енергоживлення є розробка друкованої плати, яка забезпечує фізичну реалізацію електричної схеми з дотриманням вимог до електричної, теплової та електромагнітної сумісності. Коректно спроектована друкована плата є запорукою стабільної, надійної та безпечної роботи системи, особливо в умовах живлення критичних споживачів, де недопустимі будь-які відмови.

Основними вимогами до друкованої плати СБЕ є надійність провідникових з'єднань і контактів у режимах високих струмів, мінімізація паразитних індуктивностей та ємностей на швидкоперемикаючих вузлах, теплова стійкість і охолодження потужних компонентів, фізичне розділення силової та сигнальної частин, для запобігання електромагнітним завадам, можливість сервісного обслуговування та модульної заміни компонентів.

Проектування друкованої плати виконувалося в середовищі KiCad, яке є відкритим, кросплатформним та має достатню функціональність для професійної розробки односторонніх, двосторонніх і багатошарових друкованих плат. Крім того, KiCad дозволяє легко інтегрувати схему з LTSpice або іншими САПР, генерувати Gerber-файли для виробництва, а також моделювати теплові карти та візуалізувати 3D-модель пристрою.

Основні етапи проектування плати:

- створення схеми у схемному редакторі;

- Усі компоненти попередньо розміщено у схемному проекті згідно з логікою функціональної схеми. Особливу увагу приділено правильному з'єднанню вузлів живлення, контролера та інтерфейсів.

- розміщення компонентів;
- розподіл елементів здійснено з урахуванням;
- мінімізації довжин провідників у силових колах;
- забезпечення прямолінійного тепловідведення від силових елементів до радіаторів;
- уникнення перехрещення слідів керуючих сигналів з потужними провідниками;
- трасування доріжок;
- шини живлення виконано товстими доріжками із мідною заливкою для зниження опору;
- сигнальні лінії керування - окремо, із заземленим екраном.

Для високочастотних ділянок застосовано правила трасування з контролем імпедансу.

Проектування заземлення та захисту.

Передбачено багатоточкову систему заземлення з поділом на «силове GND» та «логічне GND»;

Введено варистори, TVS-діоди та фільтри на вході живлення;

Підключення екранованих роз'ємів до корпусу через окремі GND-полігони.

Підготовка Gerber-файлів і виробництво.

У фінальній стадії створено повний набір виробничих файлів:

Top/Bottom Copper, Soldermask, Silkscreen;

Drill file (Excellon);

Pick-and-place файл для автоматичного монтажу;

Bill of Materials (BOM).

Конструктивні особливості плати.

Форм-фактор: 120 × 100 мм, двошарова.

Теплові поля: мідні полігони з підключенням до радіаторів

Для ділянок з максимальним струмом до 10 А обрано ширину провідника 2.5 мм, що при товщині міді 35 мкм дає допустиму щільність струму ≈ 3.5 А/мм², що відповідає стандарту IPC-2221.

Розроблена друкована плата забезпечує повну інтеграцію основних вузлів СБЕ, відповідає нормам електробезпеки, придатна до серійного виготовлення та обслуговування, і в майбутньому може бути масштабована для потужніших конфігурацій. Врахування теплових режимів, зниження паразитних впливів і надійна топологія трасування роблять її придатною для використання у високонавантажених і критичних системах енергоживлення.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було виконано всебічне дослідження проблематики забезпечення стабільного електропостачання критично важливих споживачів в умовах регулярних порушень централізованого енергоживлення. Основною метою роботи стало проектування системи безперебійного енергоживлення, здатної забезпечувати високу надійність, автономність, і масштабованість.

У відповідності до завдання, в роботі реалізовано такі напрямки:

- виконано аналітичний огляд сучасних рішень у сфері резервного живлення, включаючи різновиди ДБЖ, системи резервування, типи акумуляторних батарей та принципи побудови систем з урахуванням вимог критичної інфраструктури;

- проведено порівняльний аналіз елементної бази для побудови ДБЖ, зокрема оцінено експлуатаційні характеристики сучасних літій-іонних батарей;

- на основі отриманих даних розроблено структурну і принципову схему системи, яка здатна забезпечити стабільне живлення споживачів в умовах повної втрати зовнішнього джерела живлення;

- розглянуто питання масштабованості системи за рахунок модульної архітектури, що дозволяє адаптувати її до змінних навантажень;

- використано САПР для проектування друкованої плати, що сприяє оптимізації конструкції та зменшенню помилок у виробництві.

Вибір архітектурного підходу ґрунтується на компромісі між вартістю, надійністю та можливістю гнучкого масштабування. Особливої уваги надано забезпеченню автономності при збереженні параметрів стабільності напруги, що критично важливо для медичних, телекомунікаційних і інформаційних систем.

Запропонована система має практичну значущість і перспективу застосування в умовах воєнних і техногенних ризиків, зокрема у закладах охорони

здоров'я, дата-центрах, системах водопостачання та інших об'єктах критичної інфраструктури.

До потенційних обмежень обраного рішення можна віднести:

- необхідність регулярного моніторингу стану батарей для попередження деградації ємності;
- залежність часу автономної роботи від температурних умов і навантаження;
- складність реалізації повного резервування у побутовому або малобюджетному сегменті.

Рекомендується подальше дослідження в напрямі інтеграції систем моніторингу до структури СБЕ, а також розширення функціоналу за рахунок гібридного живлення із сонячними або вітровими джерелами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. URL: <https://www.commeo.com/en/uninterruptible-power-supply/> [Електронний ресурс. Режим доступу 11.05.2025]
2. URL: <https://factoryandhandlingsolutions.co.uk/ensuring-uninterrupted-power-in-critical-environments/> [Електронний ресурс. Режим доступу 11.05.2025]
3. URL: <https://www.brille.ua/ua/dbzh-funkcii-zastosuvannya-riznovydy/> [Електронний ресурс. Режим доступу 11.05.2025]
4. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Мікропроцесорні системи контролю та керування: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
5. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2019. – 177 с.
6. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Сучасна компонентна база електронних систем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 241с.
7. URL: <https://scispace.com/pdf/an-overview-of-uninterruptible-power-supply-systems-2uj3kcdh.pdf> [Електронний ресурс. Режим доступу 23.05.2025]
8. URL: <https://real-el.ua/ua/media/useful/e5046/> [Електронний ресурс. Режим доступу 23.05.2025]