

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

бакалаврської кваліфікаційної роботи

Вдосконалення схемотехнічних рішень перетворювачів для систем
електроживлення від акумуляторів

Виконав:

студент 4 курсу, групи ЕТ 2022-1

Максим БОРТНІКОВ

Керівник бакалаврської роботи:

Олександр ДОНЕЦЬ

ХАРКІВ – 2026 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О.М. Бекетова

Навчально-науковий інститут Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра *Електричного транспорту*
Освітньо-кваліфікаційний рівень *Бакалавр*
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма – Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 **Микола ХВОРОСТ**

“ 15 ” червня 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Бортніков Максим Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи:** *Вдосконалення схемотехнічних рішень перетворювачів для систем електроживлення від акумуляторів*

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи **Донець Олександр Вадимович, к.т.н., доцент**

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

затверджені наказом університету від “22” травня 2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 20.06.2026 р.

3. **Вихідні дані до бакалаврської роботи** Матеріали переддипломної практики, Електричні схеми та фізичні моделі електроприводу змінного і постійного струму.

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

4.1. **Стан питання.** Виконати порівняльний аналіз акумуляторів за основними показниками для визначення можливості використання як резервних джерел живлення.

4.2. **Розробка технічного завдання.**

Виконати вдосконалення послідовного резонансний перетворювач для електроживлення від акумуляторів.

4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення)




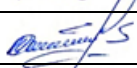
Виконати розрахунок резонансного мостового dc-dc перетворювача з вольтодобувною ланкою під час живлення від акумулятора.

4.4. Охорона праці. Забезпечення охорони праці на законодавчому рівні.

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

Термін служби різних типів акумуляторів; акумуляторні батареї із додатковими пристроями; послідовний резонансний перетворювач, ветросиловою установкою; діаграми роботи резонансного LC-перетворювача; еквівалентні схеми інвертора на інтервалах роботи схеми.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

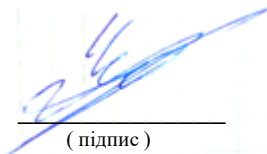
Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Олександр ДОНЕЦЬ, доц.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 01.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	02.05.26-07.05.26	
2.	Розробка технічного завдання	07.05.26-13.05.26	
3.	Розрахункова частина	13.05.26-20.05.26	
4.	Охорона праці	20.05.26-28.05.26	
5.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	28.05.26-10.06.26	
6.	Підготовка доповіді та презентації	12.06.26-19.06.26	

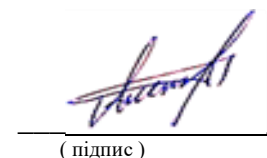
Студент


(підпис)

Максим БОРТНІКОВ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Олександр ДОНЕЦЬ

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано вдосконалення схемотехнічних рішень перетворювачів для систем електроживлення від акумуляторів.

Виконано порівняльний аналіз акумуляторів за основними показниками для визначення можливості використання як резервних джерел живлення; аналіз критичних режимів роботи акумуляторних батарей. Розглянуто послідовний резонансний перетворювач для електроживлення від акумуляторів; резонансний перетворювач розряду акумулятора у системах електроживлення; режими обмеження вихідної потужності акумуляторної батареї. Виконано розрахунок резонансного мостового dc-dc перетворювача з вольтодобувною ланкою під час живлення від акумулятора; забезпечення безперебійного живлення навантаження за рахунок включення до системи живлення від акумулятора; вольтододатковий резонансний перетворювач у режимі стабілізації вихідної напруги.

Склад бакалаврської роботи:

- листів розрахунково-пояснювальної записки - 52
- рисунків - 13
- таблиць - 0
- формул - 22
- Графічна частина до бакалаврської роботи складається з 10 слайдів.

ЗМІСТ

	Стор
ВСТУП.....	7
1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АКУМУЛЯТОРІВ ЗА ОСНОВНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЯК РЕЗЕРВНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ.....	9
1.1 Аналіз критичних режимів роботи акумуляторних батарей....	10
1.2 Застосування додаткових пристроїв для керування та обслуговування акумуляторів.....	15
2 ПОСЛІДОВНИЙ РЕЗОНАНСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ВІД АКУМУЛЯТОРІВ.....	23
2.1 Резонансний перетворювач розряду акумулятора у системах електроживлення.....	23
2.2 Режими обмеження вихідної потужності акумуляторної батарей.....	25
2.3 Принципова схема послідовного резонансного перетворювача.....	26
2.3.1 Послідовний резонансний перетворювач при регулюванні інвертором.....	27
2.3.2 Результати експерименту резонансного перетворювача.....	33
3 РОЗРАХУНОК РЕЗОНАНСНОГО МОСТОВОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ВОЛЬТОДОБУВНОЮ ЛАНКОЮ ПІД ЧАС ЖИВЛЕННЯ ВІД АКУМУЛЯТОРА.....	36

3.1	Забезпечення безперебійного живлення навантаження за рахунок включення до системи живлення від акумулятора....	36
3.2	Вольтододатковий резонансний перетворювач у режимі стабілізації вихідної напруги.....	37
3.3	Режим роботи резонансного перетворювача при струмових навантаженнях.....	42
4	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	45
4.1	Задачі розділу.....	45
4.2	Аналіз умов праці й виявлення небезпечних і шкідливих факторів.....	45
4.3	Розрахунок штучного освітлення.....	47
4.4	Пожежна безпека.....	49
	ВИСНОВКИ.....	51
	СПИСОК ПОСИЛАНЬ.....	52

ВСТУП

Сучасний вектор розвитку електроенергетичної галузі дедалі більше орієнтується на розподілену енергетику, автономну генерацію та системи накопичення енергії [1–3]. Для підтримання стабільного функціонування енергетичних об'єктів критично важливими є системи власних потреб (СВП). Вони являють собою інфраструктуру допоміжного електрообладнання станції, головне завдання якої – гарантувати безперебійну роботу основного генеруючого устаткування.

При цьому безперебійне функціонування механізмів власних потреб (ВП) можливе лише за умови їхнього надійного електропостачання. У структурі ВП підвищені вимоги висуваються до живлення обладнання, що відповідає за безпеку об'єкта.

З огляду на умови експлуатації, ці механізми потребують гарантованого та безперервного енергозабезпечення в усіх режимах роботи. Робоче живлення всіх категорій електроприймачів власних потреб, зокрема й особливо відповідальних, реалізується шляхом відбору потужності на генераторній напрузі головної електричної схеми за допомогою знижувальних трансформаторів або реакторів

Для особливо відповідальних споживачів власних потреб передбачають додаткове незалежне (автономне) джерело живлення. У такій ролі зазвичай використовують автономні акумуляторні батареї (АБ) та дизель-генераторні установки. Впровадження акумуляторних батарей обумовлене необхідністю мати гарантоване джерело енергії у разі будь-яких аварійних ситуацій чи відмов у первинних колах.

Актуальність теми обумовлена збільшенням вимог енергозбереження та якістю регулювання сучасного електроприводу з імпульсною системою керування.

Мета: вдосконалення схемотехнічних рішень перетворювачів для систем електроживлення від акумуляторів.

Завдання:

Виконати аналіз елементів широтно-імпульсних перетворювачів з метою застосування у системі плавного пуску електроприводу.

Запропонувати структурну схему автоматизованого електроприводу з двигуном постійного струму.

Виконати розрахунок запропонованої принципової схеми з транзисторним широтно-імпульсним перетворювачем.

1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АКУМУЛЯТОРІВ ЗА ОСНОВНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЯК РЕЗЕРВНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

На сьогодні на електричних станціях для забезпечення живлення постійним струмом особливо відповідальних механізмів власних потреб в аварійних режимах застосовуються стаціонарні свинцево-кислотні акумуляторні батареї.

Свинцево-кислотний акумулятор (СКА) складається з електродів та пористих роздільних пластин (сепараторів), виготовлених із матеріалу, що є інертним до кислоти. Ці сепаратори запобігають короткому замиканню електродів, які занурені в електроліт [3].

Електроди являють собою свинцеві пластини, покриті активною масою, яка взаємодіє з електролітом під час заряджання та розряджання. Активною масою позитивного електрода є діоксид свинцю Pb_2 (коричневого кольору), а негативного – чистий (губчастий) свинець Pb світло-сірого кольору.

Як електроліт використовують розчин сірчаної кислоти в дистильованій воді. Густина електроліту повністю зарядженого та справного акумулятора за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить $1,20\text{ г/см}^3$. Принцип роботи СКА базується на електрохімічних реакціях свинцю та діоксиду свинцю в сірчано-кислотному середовищі.

Під час розряджання акумулятора відбувається відновлення діоксиду свинцю на катоді та окиснення свинцю на аноді. У процесі заряджання перебігають зворотні реакції, до яких наприкінці циклу додається електроліз води, що супроводжується виділенням кисню на позитивному електроді та водню – на негативному [4].

За конструктивним виконанням СКА поділяють на: клапанно-регульовані, що оснащені клапанами, які відкриваються у разі підвищення внутрішнього тиску до $100\text{--}200\text{ мБар}$ (Valve Regulated Lead-Acid, далі – VRLA); батареї на основі технології AGM (Absorbent Glass Mat) із

сепараторами з абсорбуючого скловолокна; а також батареї з гелеподібним електролітом (GEL).

Серед основних недоліків зазначених акумуляторних батарей слід виділити такі:

Необхідність регулярного моніторингу:

- потреба в періодичному контролі ключових параметрів елементів живлення.

- чутливість до складу електроліту: знижена густина електроліту спричиняє сульфатацію пластин, тоді як підвищена – прискорює корозію електродів, що призводить до стрімкого погіршення технічних характеристик.

Обмежений ресурс: порівняно невисокий термін експлуатації.

Екологічні ризики: висока ймовірність забруднення навколишнього середовища токсичним свинцем та сполуками кислот.

Складність поводження з відходами: обов'язкова утилізація після закінчення терміну служби.

1.1 Аналіз критичних режимів роботи акумуляторних батарей

Критичні режими роботи, що виникають в аварійних ситуаціях, призводять до інтенсивного розряджання акумуляторів. Через це під час експлуатації АБ здійснюється постійний моніторинг їхніх ключових параметрів, що вимагає підвищеної уваги з боку обслуговуючого персоналу.

Слід зазначити, що значна частина наявного парку батарей потребує реконструкції, оновлення базових робочих елементів, модернізації схемних рішень та заміни кабельних ліній. Це зумовлює безперервне зростання витрат на їхнє поточне технічне обслуговування. Додатковим деструктивним чинником є екологічні ризики, оскільки на етапі утилізації відпрацьованих акумуляторів існує висока ймовірність забруднення довкілля.

Потрапляючи на сміттєзвалища, акумуляторні батареї з часом руйнуються, внаслідок чого значна кількість свинцю проникає в ґрунт та

підземні води. Процеси вторинної переробки, а також безпосереднє виробництво таких джерел живлення супроводжуються забрудненням докільля, зокрема свинцевмісним пилом та мікрочастинками. Сполуки свинцю завдають істотної шкоди екосистемам, поповнюючи перелік найнебезпечніших забруднювачів навколишнього середовища.

Отже, традиційні АБ потребують регулярного технічного обслуговування і створюють серйозне екологічне навантаження, що знижує загальну ефективність їхнього використання як резервних джерел живлення.

У зв'язку з цим високоактуальною є задача розробки та впровадження систем постійного струму на базі нових, екологічно чистіших, довговічніших і безпечніших хімічних джерел струму (ХДС). Серед таких альтернативних рішень дедалі більшу увагу дослідників та інженерів привертають літій-іонні акумулятори (ЛІА).

На сьогодні літій-іонні акумулятори є технологією, яка найдинамічніше розвивається в галузі хімічних джерел енергії [5].

Під час заряджання акумулятора катіони літію впроваджуються (інтеркалюють) у структуру анода, як який зазвичай використовують вуглецеві матеріали (графіт, кокс, а останнім часом значну увагу приділяють розробкам на основі вуглецевих нанотрубок).

У процесі розряджання іони літію деінтеркалюють з анода та інтеркалюють у кристалічну ґратку катода, виконаного, як правило, на основі літійованих оксидів перехідних металів.

До головних переваг літій-іонних акумуляторів належать такі:

- Вища номінальна напруга одного елемента порівняно з іншими типами хімічних джерел струму.
- Висока питома густина накопичуваної енергії та значна величина розрядних струмів.
- Значний ресурс: суттєвий запас робочих циклів «заряд-розряд», який перевищує 1000 одиниць.

- Низький рівень саморозряду: втрата ємності становить лише 4–6% за місяць або 10–20% за рік.
- Мінімальні експлуатаційні витрати: відсутність потреби в регулярному технічному обслуговуванні порівняно зі свинцево-кислотними аналогами.
- Стабільність характеристик: широкий температурний діапазон робочого режиму – від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

До недоліків літій-іонних акумуляторів належать такі чинники:

- Необхідність інтеграції досить складної електронної системи керування (BMS) різними секціями та комірками батареї.
- Порівняно висока ринкова вартість.

На рисунку 1.1 наведено залежність терміну служби різних типів акумуляторів від глибини їхнього розрядження за нормальних умов. Ресурс батареї тісно пов'язаний із такими експлуатаційними параметрами, як температура та глибина розряду.

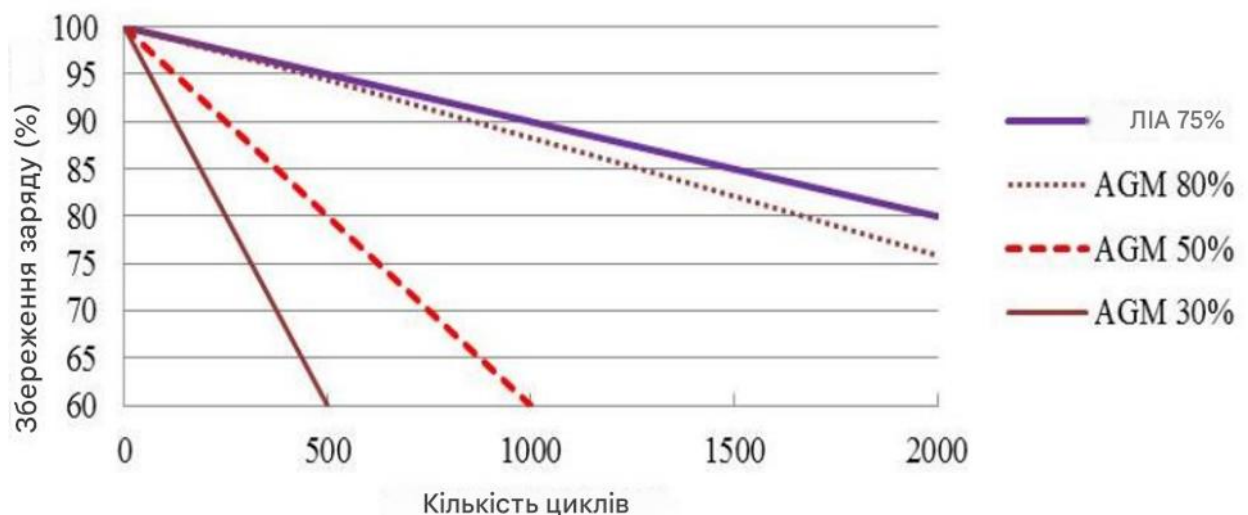


Рисунок 1.1 – Термін служби різних типів акумуляторів від глибини розряду, в нормальних умовах

Глибина розряду – це відносна величина (зазвичай у відсотках), яка показує частку знятої ємності відносно номінальної ємності акумулятора, до

межі якої його можна розряджати без незворотної шкоди для конструкції та втрати експлуатаційних властивостей.

Слід наголосити, що ЛІА мають значно більший термін служби, ніж СКА та акумулятори типу AGM за умов глибокого розряджання. Збільшення робочого ресурсу можливе шляхом обмеження глибини й швидкості розряду, а також контролю температури, проте свинцево-кислотні батареї є набагато чутливішими до кожного з цих чинників.

На рисунку 1.1 наведено порівняльні дані щодо циклічного ресурсу ЛІА, традиційних СКА та батарей VRLA типу AGM за нормальних умов за середньої температури близько 25 °С.

З графіків чітко простежується негативний вплив глибини розряду на термін служби акумуляторів. Очевидно, що навіть обмеження глибини розряду СКА до 30% не дозволяє йому досягти показників довговічності ЛІА, що експлуатується з глибиною розряду 75%.

Це означає, що для забезпечення однакової корисної ємності за аналогічної кількості циклів, встановлена потужність (або габаритна ємність) СКА має бути у 2,5 раза більшою, ніж у ЛІА.

Крім того, така невідповідність характеристик суттєво зростає у разі підвищення температури навколишнього середовища, як проілюстровано на рисунку 1.2.

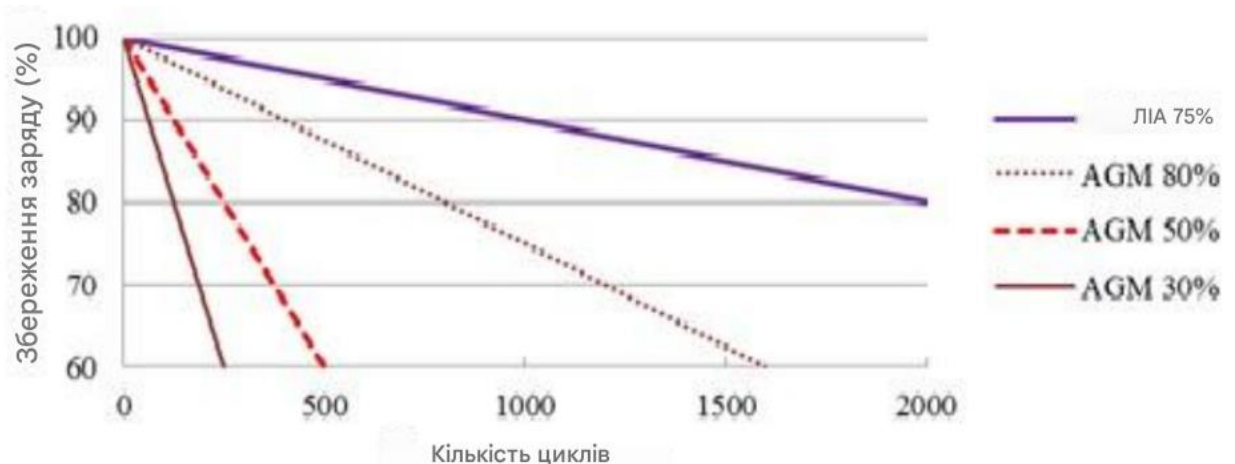


Рисунок 1.2 – Термін служби різних типів акумуляторів від глибини розряду, в екстремальних умовах

Як видно з рисунка, за умов спекотного клімату, де середня температура становить 33 °С, розбіжність між показниками ЛІА та СКА стрімко зростає. Термін служби СКА з технологією AGM знижується на 45–50% порівняно з аналогічними показниками за кімнатної температури. Водночас ресурс ЛІА залишається стабільним, аж поки температура не перевищить межу 49 °С.

З рисунку 1.3 простежується, що в міру збільшення струму розрядження ємність свинцево-кислотних акумуляторів типу AGM та GEL істотно зменшується.

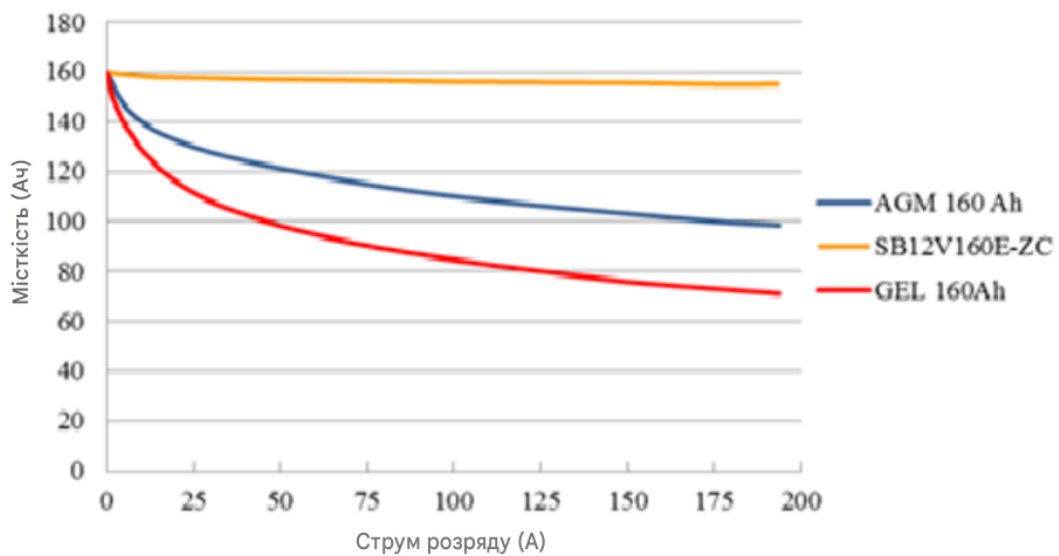


Рисунок 1.3 – Порівняльні розрядні характеристики різних типів акумуляторів з однаковою ємністю

Водночас слід звернути увагу на те, що зміна ємності ЛІА є незначною. За відсутності навантаження всі досліджувані типи акумуляторів мають однакову початкову ємність, яка становить 160 А·год. Проте в міру зростання розрядного струму кожен із тестованих зразків демонструє різний характер розрядження.

Наприклад, за струму розряду 175 А ємність батареї типу AGM зменшується зі 160 А·год до 100 А·год, типу GEL – до 75 А·год, тоді як ємність ЛІА знижується лише до 155 А·год.

Таким чином, можна зробити обґрунтований висновок про те, що ЛІА, порівняно з акумуляторами типу AGM та GEL, мають здатність стабільно

витримувати значні навантаження, зберігаючи ємність на рівні, близькому до початкового значення. Ця перевага є визначальною під час вибору джерела оперативного постійного струму для систем власних потреб (ВП) особливо відповідальних механізмів, оскільки в позаштатних ситуаціях розрядний струм суттєво зростає. Ще однією з ключових характеристик акумуляторних батарей є їхній саморозряд.

Явище саморозряду більшою чи меншою мірою властиве всім типам акумуляторів і полягає у втраті ними запасеної ємності після повного заряджання за умов відсутності зовнішнього споживача струму.

Рівень саморозряду в герметизованих свинцево-кислотних акумуляторах є значно вищим і становить 24–48% на рік порівняно з ЛА, у яких цей показник не перевищує 12% на рік за температури 20 °С. Крім того, глибоке розрядження СКА та його наступне заряджання призводять до збільшення струму саморозряду.

Отже, на основі наведених порівняльних характеристик СКА та ЛА можна стверджувати, що літій-іонні акумуляторні батареї мають значно більший термін служби й вищу питому густину енергії. Вони є менш чутливими до температурних коливань, здатні зберігати номінальну ємність за підвищених розрядних струмів і не потребують постійного контролю ключових параметрів.

Через це впровадження ЛА як автономних джерел живлення для систем власних потреб (СВП) особливо відповідальних механізмів електричних станцій є високоперспективним напрямом розвитку

1.2 Застосування додаткових пристроїв для керування та обслуговування акумуляторів

Для захисту АБ від перезаряджання та надмірного розряджання система керування (СКУ) здійснює моніторинг напруги кожного окремого ЛА в батареї. При цьому вимірювальні кола всіх акумуляторів мають бути

гальванічно розв'язаними й розрахованими на роботу під напругою, що відповідає максимальному значенню напруги АБ.

Для більшості практичних застосувань точність вимірювання напруги ЛА повинна бути не гіршою за 20 мВ. Під час формування керуючих сигналів за рівнем напруги ЛА необхідно враховувати падіння напруги на їхньому внутрішньому опорі, а також поточну температуру акумулятора.

Поелементний контроль температури ЛА є необхідним для захисту АБ від перегрівання. Останнім часом для вирішення цього завдання часто застосовують датчики температури з цифровим або аналоговим виходом, які є відносно простими в експлуатації та забезпечують точність вимірювання. Водночас терморезистори (термістори) або термопари продовжують використовувати для низки спеціальних застосувань, пов'язаних із роботою АБ в екстремальних умовах або за потреби обмеження використання імпоротної елементної бази.

Для вимірювання струму АБ, поряд із шунтами, застосовують датчики струму на основі ефекту Холла. Їхня широка номенклатура дозволяє вимірювати струми в діапазоні від 10 до 1000 А з точністю близько 2%. Окрім підрахунку зарядної та розрядної ємностей АБ, значення струму є необхідним для розрахунку коригувальних поправок до вимірних значень напруги ЛА.

Датчики струму також можуть використовуватися для захисту силових кіл АБ від струмових перевантажень у поєднанні з плавкими вставками або самовідновлюваними запобіжниками. Останні захищають АБ лише від струмів короткого замикання (КЗ) і є неефективними у разі відносно невеликих (1,5–2-кратних) перевантажень за струмом.

Найбільш складним завданням є забезпечення працездатності АБ у разі відмов (короткого замикання або обриву кола) всередині ЛА. Обрив у ЛА є найбільш небезпечним за умови їхнього послідовного з'єднання в батареї, тоді як коротке замикання – при паралельному з'єднанні.

Захист від внутрішніх КЗ переважно реалізується на рівні окремих ЛА ще етапі їхнього виготовлення за допомогою таких конструктивних елементів:

- сепаратори, які плавляться у разі перевищення допустимих значень струму;
- самовідновлювані температурні запобіжники різних типів;
- струмопроводи (захисні мембрани), що руйнуються при підвищенні внутрішнього тиску в акумуляторі тощо.

Для збереження працездатності АБ у разі відмови одного з послідовно з'єднаних ЛПА необхідно вивести його із силового кола, забезпечивши при цьому безперервність струму в батареї.

Для цього застосовують електромеханічні або електронні байпасні (обхідні) пристрої, які керуються системою СКУ. Вони можуть монтуватися безпосередньо на борнах (виводах) ЛПА для ефективного відведення через них тепла, що виділяється під час роботи байпасного пристрою рисунок 1.4.

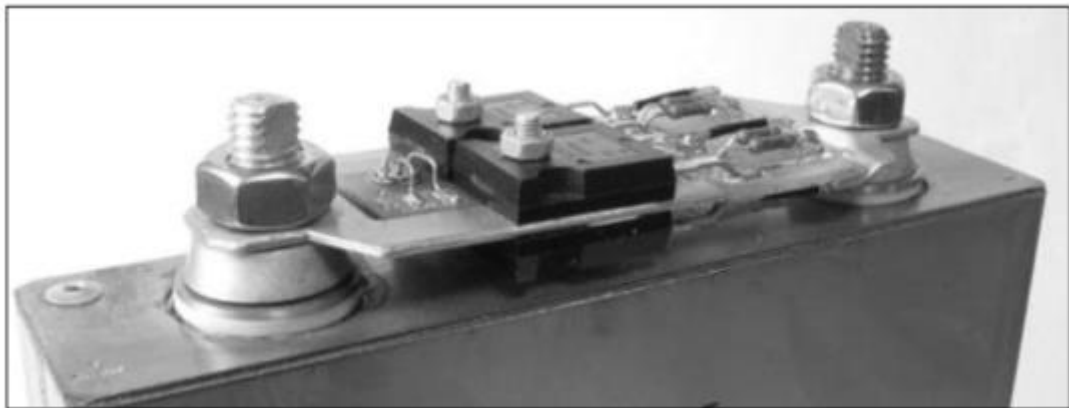


Рисунок 1.4 – Електронний байпасний пристрій на робочі струми до 100 А

Найпростішим, але водночас досить ефективним системним методом нівелювання розбалансу в АБ великої та надвеликої ємності є її заряджання за допомогою багатоканального зарядного пристрою.

Для низьковольтних портативних АБ добре зарекомендували себе схемотехнічні рішення, що забезпечують автоматичну перекомутацію елементів батареї з послідовної схеми на паралельну під час підключення до неї спеціалізованого зарядного пристрою рисунок 1.5 [6].



Рисунок 1.5 – Акумуляторна батарея 4ICR-10 із зарядним пристроєм

В активних балансувальних пристроях зазвичай реалізують трансформаторні схеми перерозподілу енергії в АБ або застосовують підзаряджання «відстаючих» ЛПА від одного чи кількох джерел постійного струму.

Живлення цих джерел здійснюється безпосередньо з виходу АБ або від зовнішньої мережі, наприклад, зарядного пристрою. Такі системи забезпечують великі вирівнювальні струми, що дозволяє не лише нівелювати розбаланс напруг в АБ, а й забезпечити її повне розрядження, усуваючи обмеження ємності всієї батареї характеристиками найгіршого елемента.

На рисунку 1.6 показано трансформаторний блок ТБНН-15А, виконаний на вітчизняній елементній базі, який при розбалансі напруг в 1 В забезпечує перетікання струму між ЛПА в АБ величиною до 15 А.

Під час випробувань на першому циклі балансування цей блок дозволив збільшити розрядну ємність розбалансованої АБ з 7,2 до 13,3 А год. У наступних (із другого по п'ятий) циклах, попри часткову втрату ємності акумулятором № 6, пристрій забезпечив розрядження АБ на 15,3 А год із одночасним повним розрядженням усіх ЛПА в збірці.

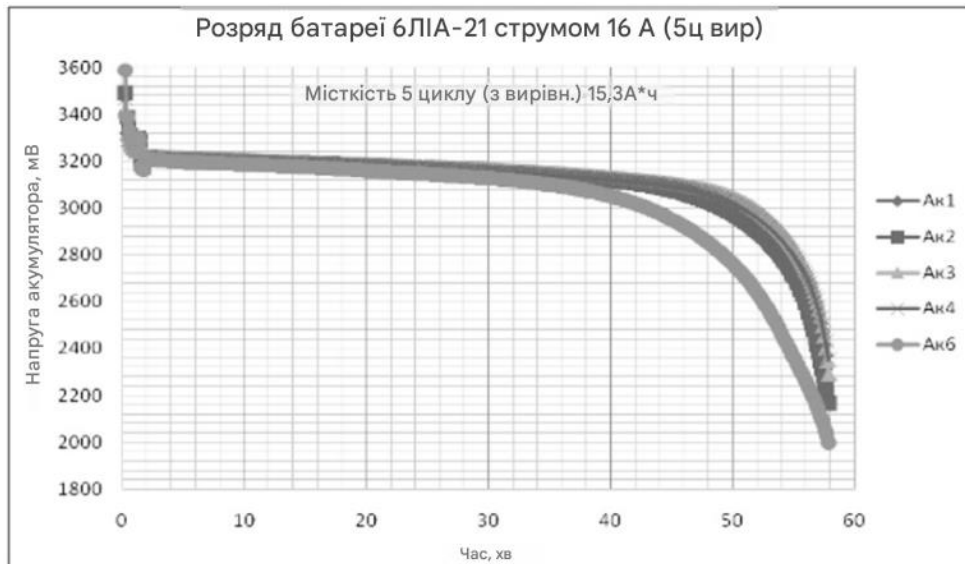
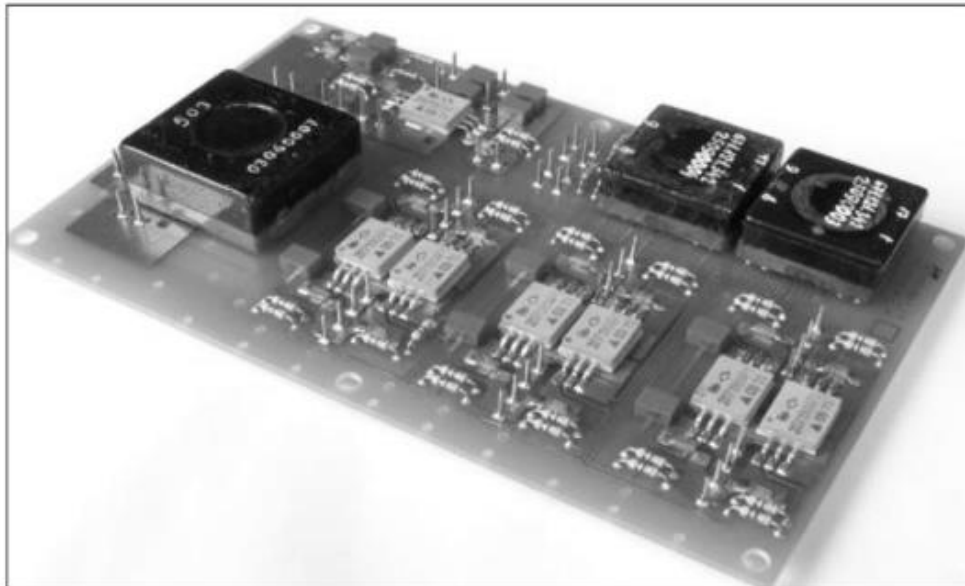


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд та графіки, що ілюструють роботу трансформаторного блоку вирівнювання напруги ТБНН-15А

Для зручності експлуатації АБ інформація про її поточний стан може передаватися до зовнішньої системи керування стандартним цифровим каналом, виводитися на монітор або відображатися за допомогою світлодіодної індикації.

В останньому випадку використовується інтуїтивно зрозуміла «світлофорна» колірна символіка, яка відображає стан параметрів АБ у трьох градаціях: «Норма», «Попередження» та «Аварія» (або «Граничний стан»).

За потреби, використовуючи лише один двоколірний світлодіод у режимах постійного та переривчастого (миготливого) світіння, можна відобразити до 10 різних станів певного параметра АБ.

На рисунку 1.7 показано джерело безперебійного електроживлення для імплантованого електромеханічного штучного серця на базі двох літій-іонних АБ ємністю 10 А год та 1,5 А год. Ступінь зарядженості цих батарей індикуюється за допомогою двох світлодіодів, які забезпечують відображення градацій стану заряду для основної та резервної АБ.

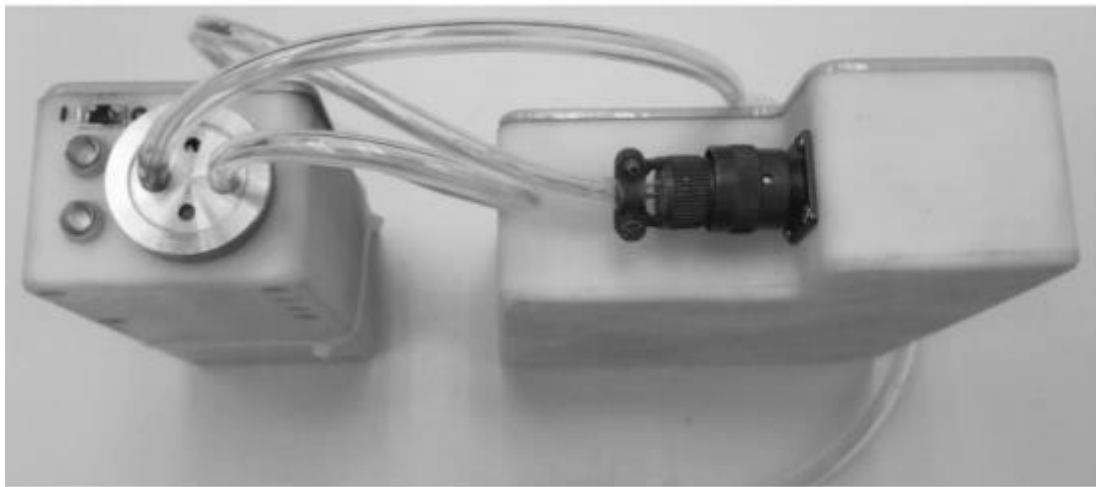


Рисунок 1.7 – Джерело безперебійного електроживлення на базі основної (14В/10А·год) та резервної (14В/1,5А·год) АБ на ЛІА фірми Кокам

Високовольтні високоемні АБ проектують за модульним принципом, виходячи з вимог забезпечення електробезпеки під час монтажу та ремонту, а також для забезпечення можливості їх транспортування з мінімальним залученням підйомно-транспортних механізмів.

У таких системах використовують СКУ, що також побудовані за модульним принципом із дво- або тривірневою структурою керування.

На рисунку 1.8 показано акумуляторну батарею з номінальною напругою 115 В, створену на базі 32 послідовно з'єднаних літій-полімерних акумуляторів фірми Кокам ємністю 40 А·год, яка оснащена дворівневою системою контролю, вирівнювання та захисту [7].

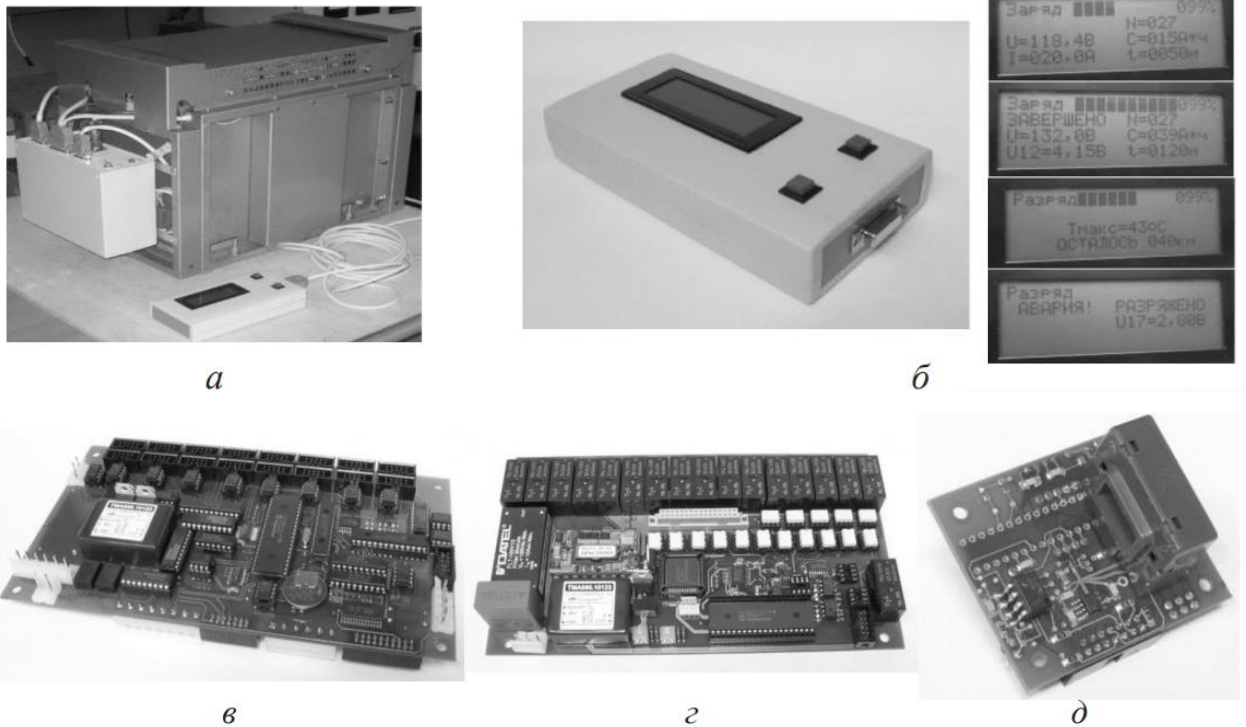


Рисунок 1.8 – Акумуляторна батарея 32ЛИА40 (а) та її блоки ВКВЗ: модуль індикації (б), модуль управління (в), модуль контролю та вирівнювання (г), модуль датчика струму (д)

Вимірювання напруги та температури ЛІА здійснюють два модулі контролю та вирівнювання (МКВ), які передають отримані дані до блока верхнього рівня – модуля керування (МК). За його командами вони також забезпечують нівелювання розбалансу напруг у батареї шляхом підзаряджання «відстаючих» ЛІА за допомогою двох джерел струму, що живляться з виходу АБ. До модуля керування надходить і інформація з модуля датчика струму, яка використовується для підрахунку зарядної та розрядної ємностей, а також для захисту АБ від струмових перевантажень.

Захист АБ від небезпечних режимів роботи здійснюється шляхом формування попереджувальних та аварійних сигналів (замикання «сухих» контактів) для зовнішнього обладнання (зарядного пристрою, навантаження).

Інформація про основні параметри АБ, а також сформовані модулем керування (МК) аварійні та попереджувальні сигнали виводиться на

чотирирядковий дисплей модуля індикації. Параметри, що відображаються на екрані, змінюються залежно від режиму роботи АБ рисунку 1.8, б.

Архітектура МК дозволяє здійснювати обмін інформацією із зовнішніми пристроями за одним або кількома стандартними цифровими інтерфейсами, а також підтримувати роботу до 15 модулів нижнього рівня (МКВ). Враховуючи, що кожен МКВ здатний контролювати до 16 осередків ЛІА, ця СКВЗ може бути використана для побудови АБ, яка містить до 240 ЛІА.

2 ПОСЛІДОВНИЙ РЕЗОНАНСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ВІД АКУМУЛЯТОРІВ

2.1 Резонансний перетворювач розряду акумулятора у системах електроживлення

Сучасна тенденція до нарощування потужності систем електроживлення (СЕЖ) постійно підвищує вимоги щодо енергоефективності напівпровідникових перетворювачів. Одним із ключових компонентів СЕЖ є акумуляторна батарея, яка забезпечує автономне живлення навантаження під час тимчасової відсутності або аварії основної мережі.

До характеристик перетворювальних пристроїв, що забезпечують реалізацію цих процесів, висуваються жорсткі енергетичні вимоги, головними з яких є високий коефіцієнт корисної дії (ККД) та мінімальні масогабаритні показники.

Особливо перспективною у цьому контексті є реалізація силового перетворювача на основі інверторно-трансформаторної топології, що дозволяє гнучко узгоджувати рівні напруги АБ та навантаження. Детальний аналіз таких перетворювальних пристроїв найбільш повно представлено в роботах [3, 4].

Іншою важливою перевагою інверторних структур є можливість простої реалізації на їхній основі резонансних перетворювачів. Вони характеризуються роботою транзисторів із мінімальними комутаційними втратами без використання додаткових демпфувальних кіл (снейберів). Зокрема, перетворювачі з послідовним LC-контуром уже неодноразово досліджувалися в низці наукових праць.

Реалізація резонансного перетворювача для систем електроживлення (СЕР) пов'язана із розв'язанням низки специфічних інженерних задач. Зокрема, мінімізація комутаційних втрат під час увімкнення транзисторів досягається виключно за умови нульової напруги (режим ZVS), що потребує попереднього відмикання зворотного діода.

Забезпечення такого режиму комутації у перетворювачах із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) можливе лише завдяки впровадженню адаптивного частотного регулювання. При цьому слід враховувати, що умови для увімкнення транзисторів інвертора та випрямляча при нульовій напрузі відрізняються через різний напрямок протікання струму в цих вузлах.

Зважаючи на чутливість акумуляторних батарей до експлуатаційних навантажень, у системах електроживлення (СЕР) впроваджують різні режими обмеження їхньої вихідної потужності.

Зокрема, може здійснюватися лімітування як максимального розрядного струму самої АБ, так і максимального вихідного струму навантаження, який не залежить від поточного рівня напруги на батареї.

Обраний режим обмеження потужності є визначальним фактором при виборі методу регулювання перетворювача, оскільки він безпосередньо формує величину робочих струмів його транзисторів.

З огляду на це, виникає потреба у визначенні та аналізі регулювальних характеристик для зазначених режимів з метою пошуку енергетично оптимальних методів керування.

Специфікою досліджуваних СЕР є вимога забезпечення стабільної роботи в умовах малих навантажень, близьких до режиму нехтуваного струму (холостого ходу). Це суттєво впливає на діапазон частотного підлаштування перетворювача, який обмежений частотними властивостями та характеристиками динамічних втрат транзисторів.

Таким чином, дослідження енергетичних і регулювальних характеристик резонансних перетворювачів за різних режимів живлення навантаження, аналіз методів керування ними, а також визначення умов «м'якої» комутації (ZVS/ZCS) транзисторів є актуальним науково-практичним завданням.

2.2 Режими обмеження вихідної потужності акумуляторної батареї

Оскільки акумуляторна батарея є джерелом обмеженої вихідної потужності, вона не повинна піддаватися струмовим перевантаженням. Це вимагає обов'язкового лімітування струмів, що споживаються від АБ, яке може бути реалізоване різними шляхами. Сучасні методи обмеження споживаної від батареї потужності загалом зводяться до двох основних варіантів.

У першому випадку, коли виникає потреба в забезпеченні навантаження всією доступною потужністю АБ, обмежується безпосередньо максимальне значення її розрядного струму I_{ABmax} . За такого підходу гранична вихідна потужність стає залежною від поточної напруги батареї й може досягти свого абсолютного максимуму лише за умови максимальної напруги на АБ:

$$P_{вих\ max} = U_{AB\ max} I_{AB\ max} \quad (2.1)$$

Відповідно, у разі зниження напруги на АБ пропорційно зменшується і її максимальна вихідна потужність. В іншому випадку, коли виникає потреба в забезпеченні живлення навантаження певною гарантованою потужністю, яка не залежить від коливань напруги батареї, як обмежувальний параметр використовують струм навантаження. Його величина встановлюється відповідно до заданої номінальної вихідної потужності:

$$P_{вих\ max} = U_{AB\ min} I_{AB\ max} \quad (2.2)$$

Величина цієї потужності значно менша за максимальну вихідну потужність АБ. Таким чином, у зазначеному режимі при максимальній напрузі батареї її розрядний струм обмежуватиметься значенням

$$I_{AB} = \frac{U_{AB\ min}}{U_{AB\ max}} I_{AB\ max} \quad (2.3)$$

Зниження струму АБ за умови її максимальної напруги забезпечує суттєве розвантаження перетворювача та покращує його енергетичні показники. Таким чином, під час проєктування енергоефективного перетворювача необхідно враховувати режими живлення навантаження, оскільки вони визначають максимальні значення струмів у резонансному контурі й транзисторах, а відповідно – і величину статичних втрат.

2.3 Принципова схема послідовного резонансного перетворювача

Схему інверторно-трансформаторного резонансного перетворювача наведено на рисунку 2.1.

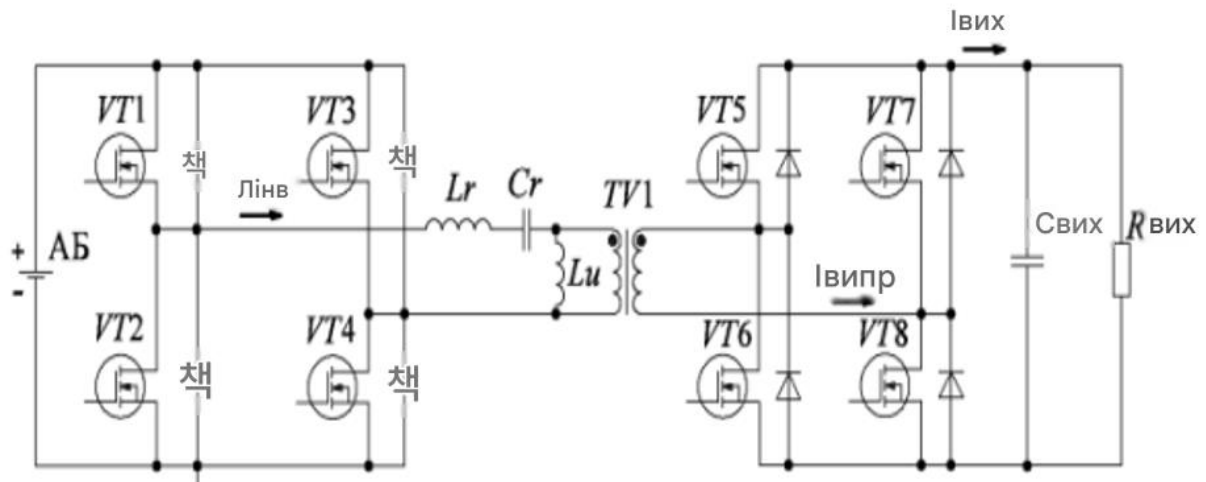


Рисунок 2.1 – Послідовний резонансний перетворювач

Інвертор, виконаний за мостовою схемою на транзисторах VT1–VT4, генерує прямокутну напругу з частотою, що дорівнює резонансній частоті контуру, утвореного дроселем L_r і конденсатором C_r . Унаслідок цього в резонансному контурі протікає синусоїдальний струм, синфазний із напругою.

Випрямляч, побудований на транзисторах VT5–VT8, працює синхронно з інвертором, що забезпечує зворотне перетворення для формування постійної вихідної напруги. За умови синхронної роботи обох мостових перетворювачів у режимі резонансу вихідна напруга дорівнює вхідній.

Регулювання вихідної напруги може здійснюватися різними методами. Зокрема, у таких перетворювачах застосовують фазове керування, що базується на зміні фазового зсуву між напругами випрямляча та інвертора. За такого підходу рівень вихідної напруги безпосередньо залежить від фази струму в резонансному контурі [9].

Ця залежність є суттєвим недоліком методу, оскільки фазовий зсув між струмом і напругою зумовлює рекуперацію енергії, що призводить до зростання амплітуди струму в резонансному контурі та збільшення статичних втрат у транзисторах.

Альтернативним і більш ефективним варіантом є широтно-імпульсне регулювання (ШІР) напруги інвертора або випрямляча. Його перевага полягає в тому, що інтервал рекуперації замінюється станом короткого замикання (закорочення) виходу мостового перетворювача, що мінімізує зворотні переток енергії.

Слід зазначити, що для досягнення цього результату в процесі регулювання необхідне частотне підлаштування за критерієм резонансу. Крім того, таке підлаштування є обов'язковим для забезпечення протікання струму через зворотний діод транзистора перед його увімкненням, що мінімізує динамічні втрати завдяки реалізації режиму м'якої комутації при нульовій напрузі ZVS.

2.3.1 Послідовний резонансний перетворювач при регулюванні інвертором

Одним із варіантів регулювання вихідної напруги перетворювача є широтно-імпульсне керування напругою інвертора – тобто напругою, яка безпосередньо подається на вхід резонансного контуру.

Цей алгоритм реалізують шляхом зсуву фази імпульсів керування транзисторами регульованого плеча інвертора відносно нерегульованого на

кут керування ϕ . За такого підходу керуючі імпульси регульованого плеча випереджають за фазою імпульси нерегульованого.

Це зумовлює появу інтервалу закорочення резонансного контуру в межах періоду керування інвертором. Таким чином, зазначений метод регулювання забезпечує зменшення ширини імпульсу напруги, що подається на контур.

Керуючі імпульси транзисторів у плечах випрямляча перемикаються без фазового зсуву, внаслідок чого напруга випрямляча залишається синфазною зі струмом навантаження. За такого режиму інтервал закороченого стану відсутній, а ширина імпульсу напруги є максимальною рисунку 2.2.

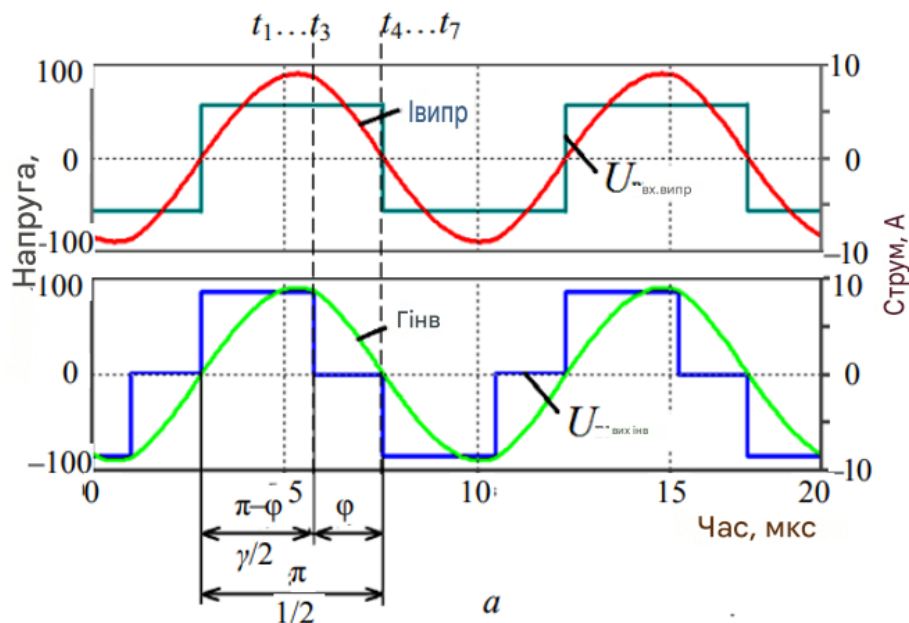


Рисунок 2.2 – Діаграми роботи резонансного LC-перетворювача в режимі зниження напруги

Регульовальна характеристика для цього випадку визначається на основі балансу (рівності) потужностей інвертора та випрямляча. Струм у резонансному контурі змінюється за гармонічним законом і є спільним як для інвертора, так і для випрямляча.

Перетворювач, у якому регулювання здійснюється на стороні інвертора, є знижувальним. Це дає змогу ефективно стабілізувати вихідну напругу у випадках, коли діапазон зміни вхідної напруги перебуває вище за рівень вихідної.

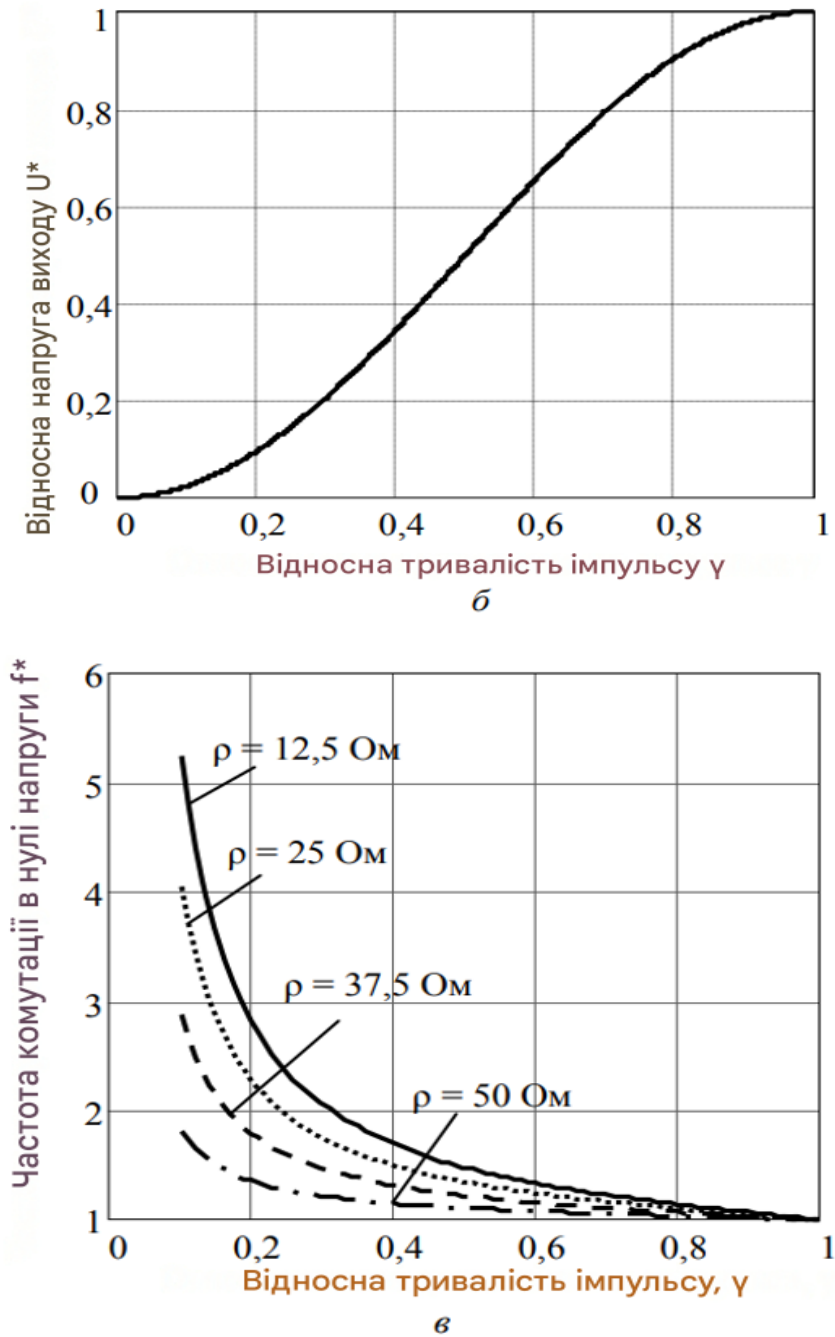


Рисунок 2.3 – Діаграми роботи резонансного LC-перетворювача в режимі зниження напруги: $U_{вх} = 85$, $R_H = 10$ Ом, $T = 9,45$ мкс, $\gamma = 0,62$; регулювальна характеристика – б; сімейство частотних характеристик перетворювача при різних характеристичних опорах резонансного контуру – в

Оскільки діапазон зміни напруги АБ зазвичай лежить нижче за рівень вихідної напруги, у разі регулювання на стороні інвертора виникає потреба в застосуванні підвищувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{АБ min}}}{U_{\text{вих}}} \quad (2.4)$$

Регулювання на стороні інвертора дає змогу запобігти перевищенню струму резонансного контуру відносно вихідного струму перетворювача. Це означає, що струми транзисторів випрямляча не перевищують струму навантаження, тому такий режим керування є найбільш ефективним за умови обмеження потужності АБ.

У роботі детально розглянуто комутаційні процеси в регульованому інверторі. На рисунку 2.4 представлено еквівалентні схеми заміщення перетворювача для різних часових інтервалів.

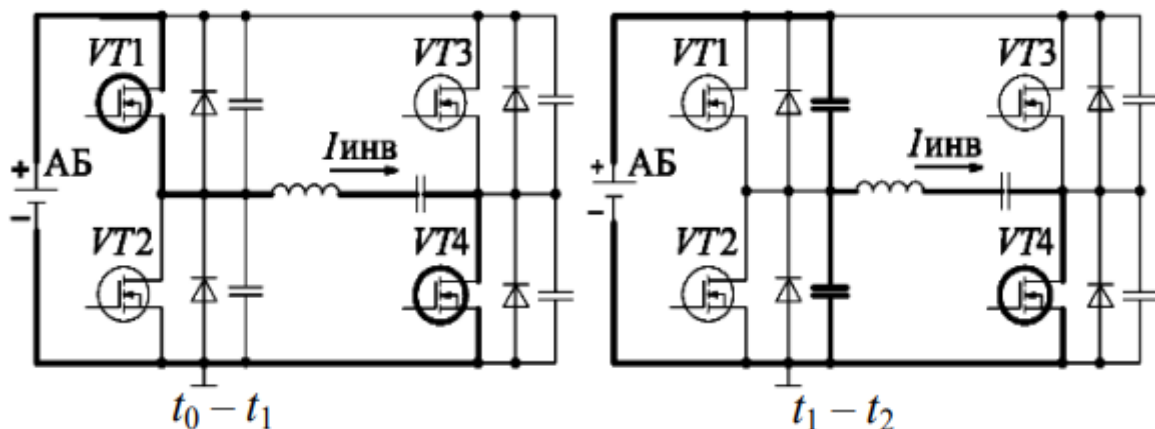


Рисунок 2.4 – Еквівалентні схеми інвертора на інтервалах роботи схеми

У сталому режимі на часовому інтервалі $t_0 - t_1$ транзистори VT1 і VT4 є відкритими, а напруга вхідного джерела прикладається до резонансного контуру. У момент часу t_1 , який визначається заданим кутом керування, транзистор VT1 закривається. Струм резонансного контуру, продовжуючи протікати через закритий до цього моменту транзистор VT4 у попередньому напрямку, розряджає вихідну ємність «стік-витік» C_{ds2} транзистора VT2 і заряджає ємність C_{ds1} транзистора VT1.

Процес перезаряджання паразитних ємностей транзисторів регульованого плеча інвертора завершується в момент часу t_2 . Після цього струм резонансного контуру повністю перемикається у зворотний діод транзистора VT_2 , який відкривається за нульової напруги

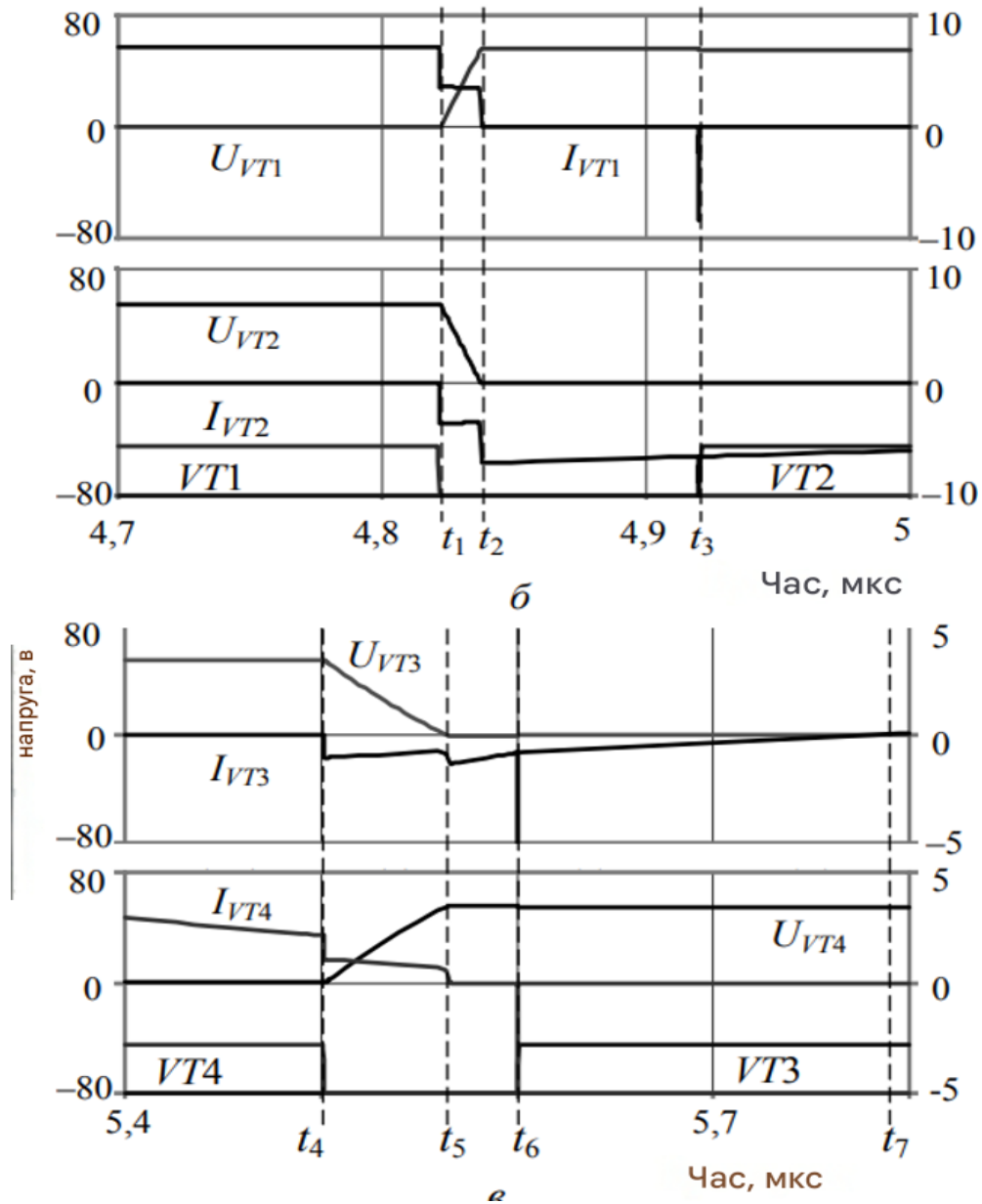


Рисунок 2.5 – Діаграми роботи на інтервалі комутаційної паузи нерегульованої стійки інвертора – а; регульованої стійки інвертора – б

Після завершення комутаційної паузи в момент часу t_3 за умови нульової напруги (режим ZVS) відмикається транзистор VT_2 , вихідна ємність «стік-

витік» якого була попередньо розряджена. При цьому струм зворотного діода перехоплюється каналом відчиненого транзистора VT2.

Інтервал $t_3 - t_4$ відповідає закороченому стану інвертора через провідні транзистори VT2 та VT4, причому через VT2 протікає інверсний (зворотний) струм. Із наближенням струму резонансного контуру до нуля момент часу t_4 закривається транзистор VT4. У цей момент комутується незначний за величиною струм, який, зберігаючи свій попередній напрямок, перезаряджає паразитні ємності транзисторів VT3 та VT4.

Оскільки комутується істотно менший струм, процес перезаряджання триває значно довше й завершується в момент часу t_5 . Слідом за цим відмикається зворотний діод транзистора VT3, що забезпечує необхідні умови для «м'якої» комутації (режим ZVS) самого транзистора VT3, який вмикається в момент часу t_6 . Починаючи з цього моменту і до переходу струму через нуль t_7 , інвертор перебуває в режимі рекуперації енергії, за якого через канали транзисторів VT2 та VT3 протікає інверсний струм.

У момент часу t_7 напрямок струму в резонансному контурі змінюється на протилежний, і інвертор переходить із режимі рекуперації в режим живлення навантаження, після чого всі процеси в схемі циклічно повторюються.

Важливо зазначити, що «м'яке» увімкнення транзисторів нерегульованого плеча інвертора (VT3, VT4) можливе лише за умови їхньої комутації до моменту зміни напрямку струму в резонансному контурі, оскільки саме цей струм забезпечує перезаряджання паразитних ємностей.

Для забезпечення режиму «м'якого» увімкнення транзисторів регульованого плеча інвертора достатньо дотримуватися умови випередження за фазою імпульсів регульованої пари відносно нерегульованої (тобто кут керування має бути від'ємним). Це дозволяє формувати вихідну напругу інвертора з регульованим заднім фронтом.

2.3.2 Результати експерименту резонансного перетворювача

Для експериментальної перевірки отриманих результатів було спроектовано макет досліджуваного резонансного перетворювача. До його складу входять мостові перетворювачі на транзисторах IRFP4668, а також трансформатор із коефіцієнтом трансформації $K_{тр} = 1,1$, виконаний на магнітопроводі ETD 59/31/22.

Резонансний контур містить дросель індуктивністю $L_r = 0,1$ мкГн, намотаний на магнітопроводі E55/28/21 із немагнітним зазором $g = 2$ мм, та резонансний конденсатор загальною ємністю $0,235$ мкФ, що складається з п'яти з'єднаних конденсаторів типу K78-26-1000В номіналом по $0,47$ мкФ кожен.

На рисунку 2.6 наведено експериментальні осцилограми параметрів регульованого мостового перетворювача за номінального навантаження $R_H = 12$ Ом та добротності контуру $Q = 0,5$.

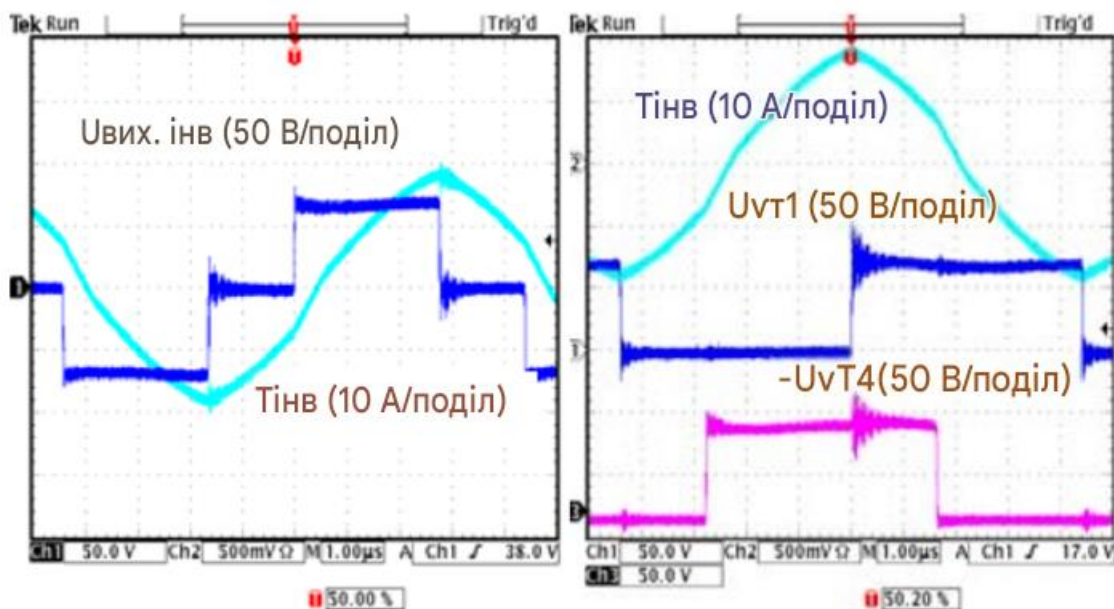
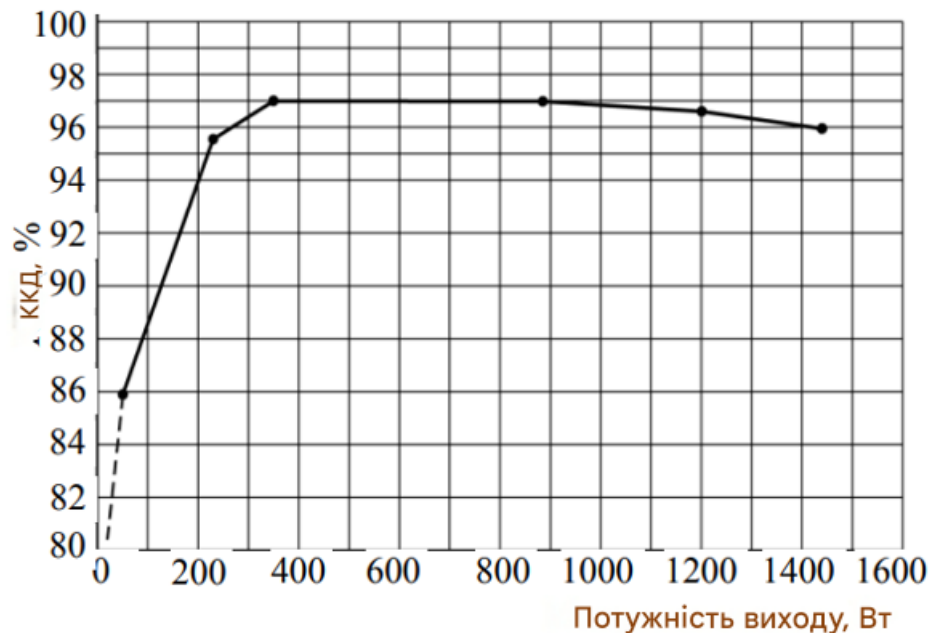
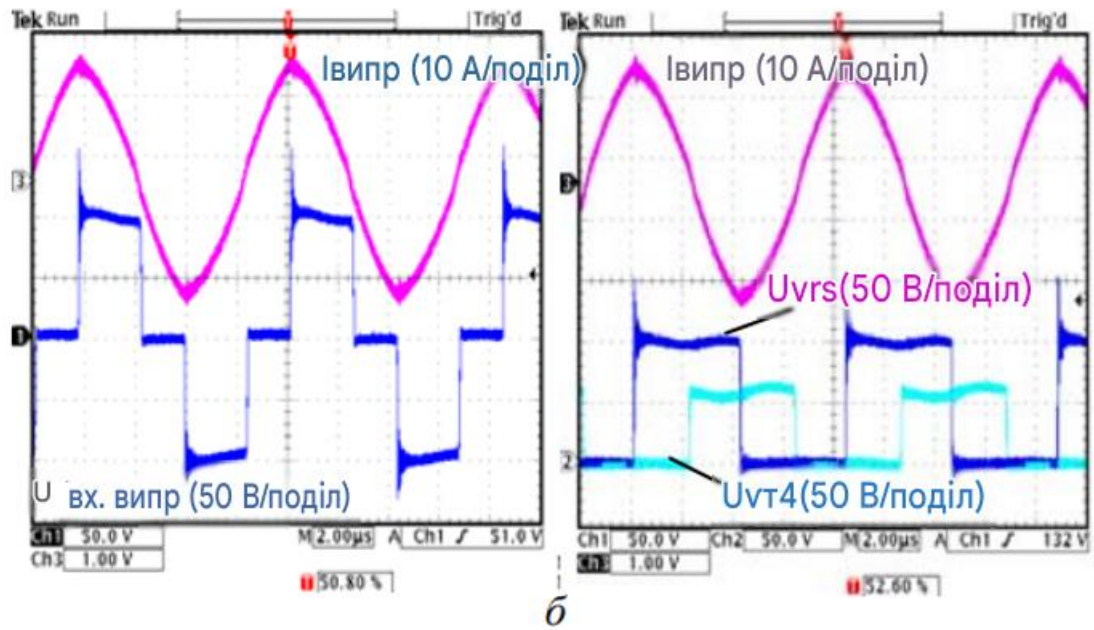


Рисунок 2.6 – Експериментальні осцилограми параметрів регульованого мостового перетворювача



в

Рисунок 2.7 – Осцилограми струму та напруги LC-перетворювача при при регулюванні випрямлячем – б; залежність ККД перетворювача від вихідної потужності при синхронній роботі транзисторних мостів – в

На рисунку 2.6 представлено експериментальні осцилограми вихідної напруги та струму інвертора, а також напруги на силових транзисторах у режимі регулювання за інвертором. Вимірювання виконано за вхідної напруги інвертора $U_{вх.інв} = 70$ В та середньовипрямленого значення струму

резонансного контуру $I_{\text{випр}} = 15,6$ А. Отримані осцилограми повністю підтверджують сформульовані в роботі теоретичні висновки.

На рисунку 2.7, б наведено осцилограми напруги та струму регульованого випрямляча, а також напруги на транзисторах VT5 і VT4 для таких параметрів схеми: вхідна напруга $U_{\text{вх}} = 70$ В, вихідна напруга $U_{\text{вих}} = 99,6$ В, середньовипрямлений струм резонансного контуру $I_{\text{випр}} = 16,8$ А. Експериментально доведено, що в цьому разі регулювання здійснюється за переднім фронтом напруги.

На рисунку 2.7, в представлена залежність ККД перетворювача від вихідної потужності резонансного інвертора та активного випрямляча. Опір навантаження $R_{\text{н}}$ змінювався в діапазоні від 200 до 7,5 Ом. Вхідна напруга становила $U_{\text{вх}} = 90$ В, а вихідна напруга підтримувалася на рівні $U_{\text{вих}} = 100$ В.

Зниження ККД у зоні малих потужностей зумовлене великими значеннями кутів керування на цій ділянці регульовальної характеристики.

3 РОЗРАХУНОК РЕЗОНАНСНОГО МОСТОВОГО DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ВОЛЬТОДОБУВНОЮ ЛАНКОЮ ПІД ЧАС ЖИВЛЕННЯ ВІД АКУМУЛЯТОРА

3.1 Забезпечення безперебійного живлення навантаження за рахунок включення до системи живлення від акумулятора

Покращення енергетичних характеристик вольтододаткового перетворювача зумовлене тим, що високочастотному перетворенню піддається лише частина загального потоку енергії вхідного джерела.

При цьому величина потужності, що трансформується, визначається діапазоном регулювання, що дозволяє суттєво знизити робочі струми та статичні втрати в перетворювачі. Однак жорстка комутація транзисторів викликає додаткові (динамічні) втрати, а також є чинником, який стримує підвищення частоти перетворення.

Крім того, певні труднощі викликає реалізація обмеження вихідного струму перетворювача в режимах навантаження, близьких до короткого замикання. Це є критично важливим для перетворювачів енергії акумуляторних батарей, які за своєю фізичною природою є джерелами ЕРС.

Іншим шляхом підвищення ККД є зниження комутаційних втрат у транзисторах завдяки застосуванню резонансних перетворювачів на основі топології DAB (*Dual Active Bridge*) із послідовним LC -контуром, які неодноразово досліджувалися в низці вітчизняних [6–9] та закордонних праць.

Протікання в резонансному контурі синусоїдального струму, синфазного з напругою, створює умови для забезпечення «м'якої» комутації ключів. Проте актуальною задачею залишається синтез такого методу регулювання, який дозволить зберегти режим м'якого ввімкнення транзисторів у всьому робочому діапазоні.

Зокрема, доведено, що режим м'якої комутації в резонансному перетворювачі з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) може бути

реалізований лише за умови адаптивного підлаштування частоти. Оскільки в міру зменшення навантаження частота комутації суттєво зростає, її підвищення на практиці може досягати неприйнятно високих значень.

3.2 Вольтододатковий резонансний перетворювач у режимі стабілізації вихідної напруги

Схему досліджуваного вольтододадового резонансного перетворювача наведено на рисунку 3.1. Інвертор, виконаний за мостовою схемою на транзисторах VT1–VT4, генерує прямокутну напругу з частотою, що дорівнює резонансній частоті контуру, утвореного дроселем L і конденсатором C. Унаслідок цього в резонансному контурі протікає синусоїдальний струм, синфазний із напругою.

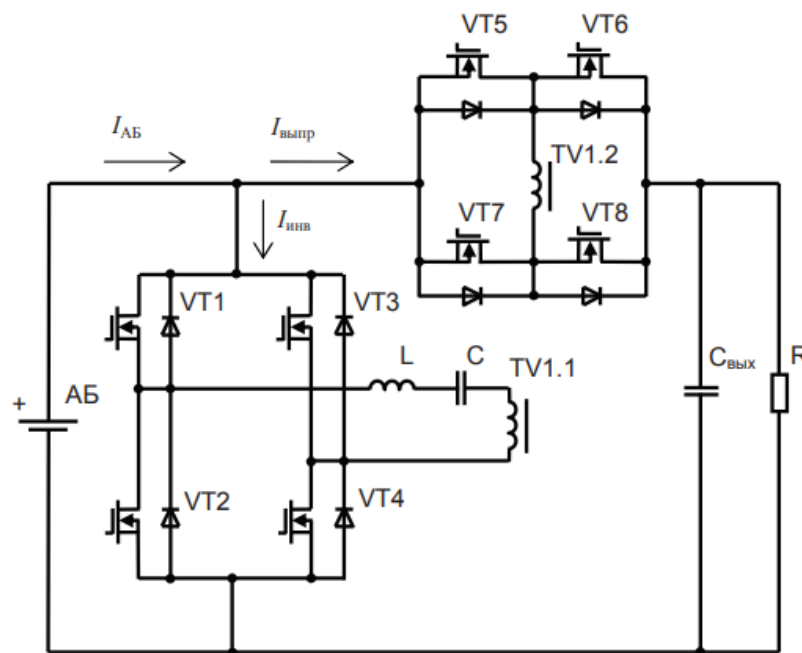


Рисунок 3.1 – Вольтододатковий резонансний перетворювач

Струм у резонансному контурі є спільним як для інвертора, так і для випрямляча. Випрямляч, виконаний на транзисторах VT5–VT8, працює синхронно з інвертором, що забезпечує зворотне перетворення та формування необхідної вольтодобавки до вхідної напруги.

У такій топології вольтододаткового перетворювача напруга акумуляторної батареї має бути меншою за напругу навантаження. Оскільки MOSFET-транзистори є ключами зі зворотною провідністю (через наявність внутрішніх діодів), перетворювач здатний функціонувати лише в підвищувальному режимі.

Відповідно, коефіцієнт трансформації перетворювача можна визначити за виразом:

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{АБ min}}}{U_{\text{вих}} - U_{\text{АБ min}}} \quad (3.1)$$

і забезпечує необхідну вихідну напругу при мінімальній нарузі акумулятора, в цьому випадку забезпечується максимальна добавка вольто
рисунок 3.2.

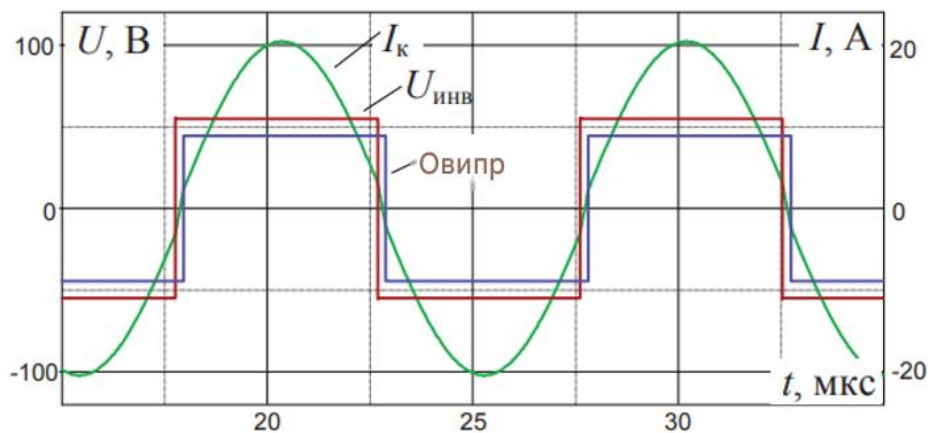


Рисунок 3.2 – Діаграми його роботи при номінальному навантаженні; $R_{\text{н}}=12 \text{ Ом}$, $L=15 \text{ мкГн}$, $C=0,17 \text{ мкФ}$ (б

У міру зростання напруги акумуляторної батареї величина необхідної вольтодобавки, яку формує випрямляч, зменшується. Це забезпечується за допомогою широтно-імпульсного регулювання напруги інвертора.

Зазначене регулювання реалізують шляхом фазового випередження імпульсів керування транзисторами регульованого плеча інвертора (VT1, VT2) відносно нерегульованого (VT3, VT4). Внаслідок цього в межах періоду керування з'являється інтервал закороченого стану виходу інвертора, що

дозволяє змінювати ширину імпульсу напруги, прикладеної до коливального контуру.

При цьому перемикання транзисторів випрямляча відбувається синфазно зі струмом навантаження для підтримання режиму резонансу. Часові діаграми роботи перетворювача за різних значень напруги акумулятора наведено на рисунку 3.3, 3.4.

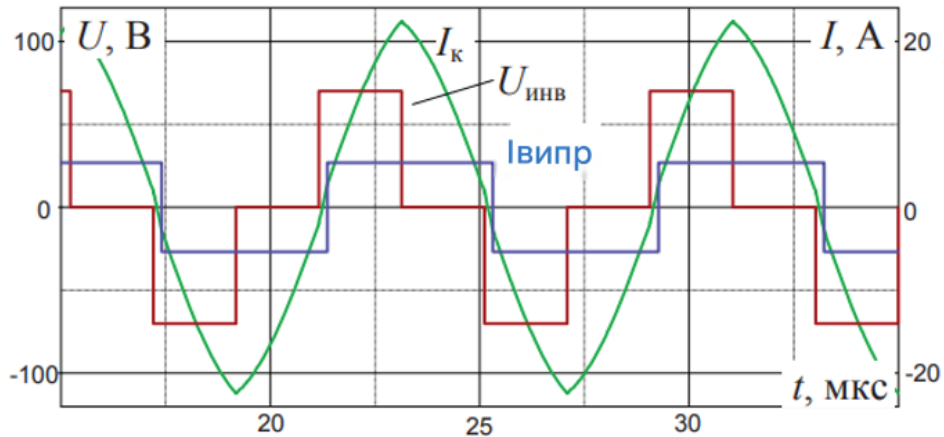


Рисунок 3.3 – Діаграми його роботи при номінальному навантаженні;

$$R_H=12 \text{ Ом}, L=15 \text{ мкГн}, C=0,17 \text{ мкФ}$$

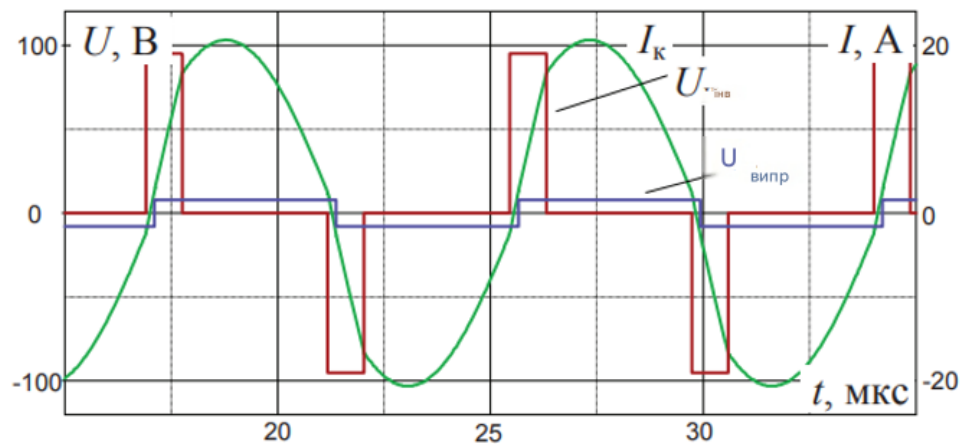


Рисунок 3.4 – Діаграми його роботи при номінальному навантаженні

Слід зазначити, що в процесі регулювання відбувається перерозподіл напруги між мостовими перетворювачами, проте величина струму контуру не залежить від напруги акумуляторної батареї, оскільки визначається суто величиною навантаження.

Для оцінювання ефективності обраної топології доцільно розглянути режим роботи системи електроживлення геофізичних приладів, який полягає в обмеженні вихідної потужності на заданому рівні. Цей рівень потужності визначається максимальним струмом акумулятора I_{ABmax} та його мінімальною робочою напругою U_{ABmin} .

$$P_{вих max} = U_{AB min} I_{AB max} \quad (3.2)$$

Відповідно, за максимальної напруги акумулятора, близької до значення вихідної напруги, його розрядний струм не перевищуватиме максимального струму навантаження.

$$I_{AB} = \frac{I_{AB max}}{\sigma U_{AB}} = I_{н max} \quad (3.3)$$

де U_{AB} – відносний діапазон зміни напруги акумулятора.

Таким чином, можна визначити максимальні значення струмів транзисторів мостових перетворювачів.

Максимальний струм транзисторів випрямляча дорівнює струму навантаження, тому що випрямляч перебуває в резонансі

$$I_{VTвипр} = \frac{\pi}{2} I_{вих} \quad (3.4)$$

струм транзисторів інвертора може бути знайдений через коефіцієнт трансформації

$$I_{VTінв} = \frac{I_{VTвипр}}{K_{тр}} = \frac{\pi}{2} I_{вих} (\sigma U_{AB} - 1) \quad (3.5)$$

Таким чином, можна зробити висновок, що значення струму інвертора визначається діапазоном регулювання перетворювача. З огляду на це, із погляду енергетичної ефективності робота перетворювача є найбільш

доцільною у вузькому діапазоні регулювання, тобто за умови $U_{ABarrow} U_{вих}$ (або коефіцієнта регулювання).

Отже, струми, що протікають через силові транзистори, визначаються виключно параметрами навантаження, а не максимальним струмом акумуляторної батареї. Крім того, напруга на транзисторах випрямляча не перевищує різниці значень $U_{вих} - U_{AB}$, що додатково підтверджує високу ефективність функціонування перетворювача саме у вузькому діапазоні регулювання.

«М'яка» комутація транзисторів випрямляча реалізується за іншим принципом. У цьому разі через роботу MOSFET-транзисторів в інверсному режимі (режимі активного випрямляча) перезарядження їхніх паразитних ємностей до моменту зміни напрямку струму є неможливим, оскільки струм ключа, що вимикається, шунтується його зворотним діодом.

Тому вимикання транзисторів необхідно виконувати вже після зміни напрямку струму в резонансному контурі. Таким чином, сприятливі умови для ввімкнення транзисторів створюються тоді, коли струм резонансного контуру випереджає за фазою напругу інвертора, а напруга випрямляча відстає від струму.

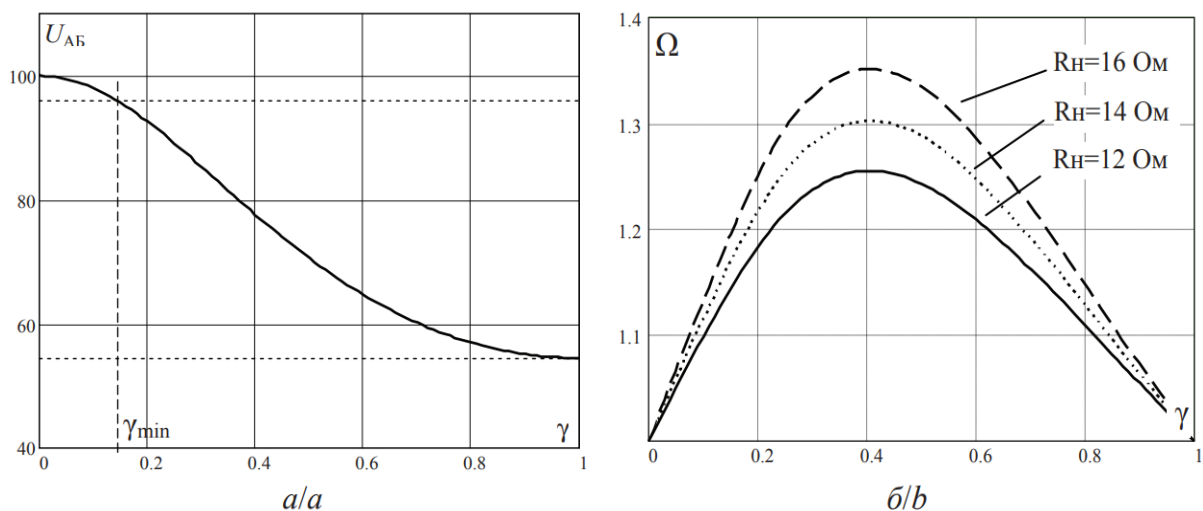


Рисунок 3.5 – Регульовальна характеристика (а) та характеристика частотного підстроювання при різних опорах; нях навантаження (б) при $U_{out}=100$ В, $U_{ABmin}=55$ В, $K_{тр}=1,2$

Відповідно, напруга випрямляча має відставати за фазою від напруги інвертора. Це забезпечується шляхом введення фіксованої часової затримки імпульсів керування транзисторами випрямляча відносно інвертора (рис. 3.5).

3.3 Режим роботи резонансного перетворювача при струмових навантаженнях

Під час функціонування системи енергозабезпечення геофізичних приладів можуть виникати режими короточасних перевантажень, за яких перетворювач переходить у режим обмеження вихідного струму. У такому режимі вихідна напруга може стати суттєво меншою за вхідну. Реалізувати це у базовій вольтододатковій схемі (рис. 3.1) неможливо через наявність зворотних діодів випрямляча.

Тому до схеми пристрою введено дискретний ключ SA1. Його розмикання в разі перевантаження дозволяє змінити структуру перетворювача, переводячи його з вольтододаткового режиму в режим класичного резонансного перетворювача за топологією подвійного моста (*Dual Active Bridge*). Цю модифіковану схему представлено на рисунку 3.6.

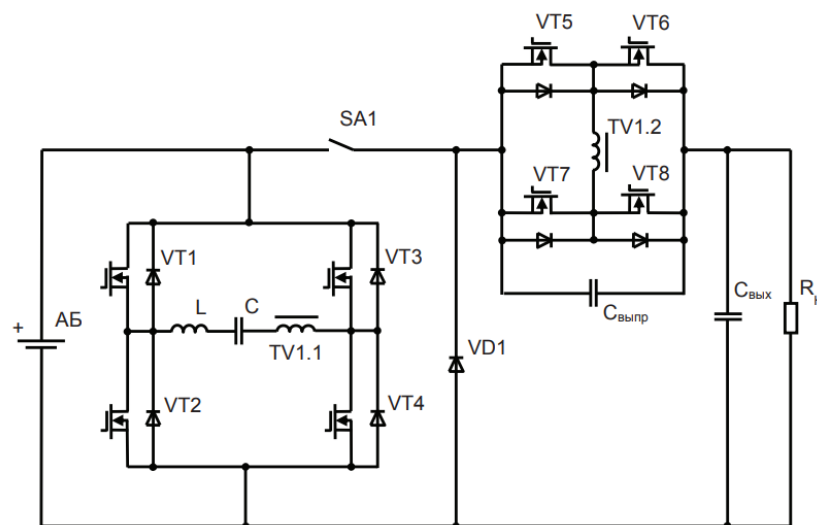


Рисунок 3.6 – Вольтододатковий резонансний перетворювач з обмеженням вихідного струму

Особливістю схеми перетворювача, отриманої за розімкненого ключа SA1, є її висока стійкість до струмових перевантажень. У разі стрибкоподібного зростання навантаження система не здатна миттєво підлаштувати робочу частоту. Як наслідок, перетворювач виходить із резонансу, а реактивна складова імпедансу резонансного контуру, що виникає при цьому, ефективно перешкоджає зростанню аварійного струму. Граничне значення цього струму визначається виразом:

$$I_{fault} = U_{AB} \sin \frac{\pi \gamma_{fault}}{2} \frac{1}{\omega_{fault} L - \frac{1}{\omega_{fault} C}} \quad (3.6)$$

де I_{fault} – тривалість імпульсів напруги, що подається на контур у момент навантаження;

ω_{fault} – частота в момент навантаження.

На рисисунку 3.7 показаний перехідний процес при короткому замиканні на вантажі с 12 до 0,2 Ом, зміна навантаження і розмикання ключа SA1 відбувається в момент часу t_{fault} .

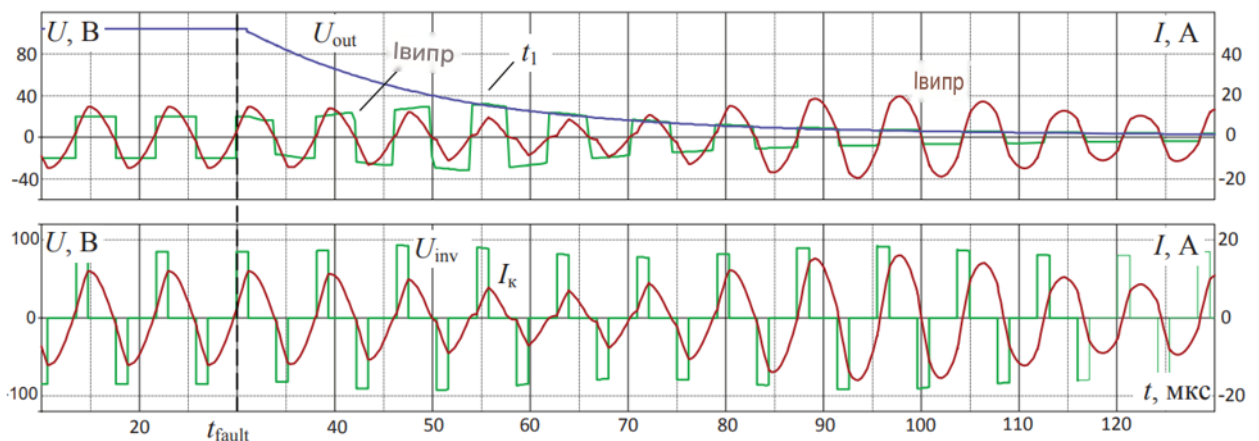


Рисунок 3.7 – Перехідний процес при скачуванні; подібне збільшення навантаження з 12 до 0,2 Ом

У момент часу t_{fault} , після розмикання ключа SA1, живлення навантаження від перетворювача припиняється, оскільки напруга на вихідному фільтрі є вищою за напругу випрямляча. Через це вихідний струм

випрямляча починає повільно заряджати його власний фільтруючий конденсатор Свипр.

Водночас вихідна напруга $U_{вих}$ експоненційно зменшується зі сталою часу U момент часу t_1 напруга на навантаженні зрівнюється з напругою випрямляча, і з цього моменту перетворювач знову починає жити навантаження.

Зменшення напруги випрямляча призводить до збільшення добротності резонансного контуру згідно з наведеними характеристиками. Це зумовлює фазовий зсув між першими гармоніками струму резонансного контуру та напруги інвертора на кут, близький до 2 , оскільки активна складова імпедансу навантаження інвертора фактично дорівнює нулю.

На часових діаграмах (рис. 3.7) видно, що до моменту зміни навантаження t_{fault} перетворювач функціонував у квазірезонансному режимі, тоді як після завершення перехідного процесу спостерігається інтервал рекуперації енергії.

У такому режимі інвертор не споживає активної потужності від акумулятора, струм якого дорівнює нулю. Відновлення номінального навантаження автоматично забезпечує відновлення вихідної напруги до заданого рівня.

Таким чином, режим параметричного обмеження струму завдяки фазовому зсуву між струмом контуру та напругою є важливою властивістю резонансного перетворювача, яка суттєво підвищує його надійність та стійкість до перевантажень.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Задачі розділу

Законодавство України про охорону праці — це система взаємопов'язаних нормативно-правових актів, що регулюють відносини у сфері реалізації державної політики щодо правових, соціально-економічних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності людини в процесі трудової діяльності.

Оскільки міський електричний транспорт належить до об'єктів підвищеної небезпеки, питанням охорони праці на таких підприємствах необхідно приділяти особливу увагу.

Згідно із Законом України «Про охорону праці» [10], умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, експлуатації машин, механізмів, устаткування та інших засобів виробництва, стан засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови мають відповідати вимогам нормативно-правових актів з охорони праці.

Під час укладання трудового договору роботодавець зобов'язаний поінформувати працівника під розписку про умови праці на підприємстві, наявність на його майбутньому робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які ще не усунуто, можливі наслідки їхнього впливу на здоров'я, а також про права працівника на пільги та компенсації за роботу в таких умовах відповідно до законодавства й колективного договору.

4.2 Аналіз умов праці й виявлення небезпечних і шкідливих факторів

Аналіз умов праці для цього технологічного процесу полягає у виявленні небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які впливають на персонал під

час виконання робіт із обслуговування чи модернізації електропривода транспортних засобів.

На основі детального аналізу технологічного процесу модернізації електропривода рухомого складу було виявлено такі шкідливі та небезпечні виробничі фактори [10]:

1) Фізичні фактори:

- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- рухомі машини та механізми, а також незахищені елементи виробничого устаткування;
- підвищений рівень шуму та вібрації на робочому місці;
- підвищена рухливість повітря (протяги);
- відсутність або нестача природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони та знижена контрастність поверхонь;
- наявність гострих крайок, задирок і шорсткості на поверхнях заготовок, інструменту та обладнання;
- підвищена напруга в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини.

2) Хімічні фактори:

- за характером дії на організм людини – токсичні та подразнювальні (зокрема, пил переважно фіброгенної дії, а також абразивно-металевий пил);
- за шляхом проникнення в організм людини: через дихальні шляхи, шкірний покрив та слизові оболонки.

3) Біологічні фактори:

- патогенні мікроорганізми та макроорганізми (біологічні об'єкти).

4) Психофізіологічні фактори:

- фізичні перевантаження (зокрема, статичне навантаження через тривале перебування у незручній робочій позі з нахилом тулуба понад 30°);
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, висока концентрація та тривала зосередженість уваги, а також перенапруження зорових і слухових аналізаторів).

З метою запобігання виробничому травматизму, зниження ризиків професійних захворювань та покращення загальних умов праці необхідно розробити комплекс відповідних організаційних і технічних рішень.

4.3 Розрахунок штучного освітлення

Відсутність або нестача природного освітлення, а також недостатня освітленість робочої зони підвищують імовірність виробничого травматизму та викликають подразнення слизової оболонки очей.

У громадських та адміністративних будівлях як основні джерела штучного освітлення мають використовуватися сучасні світлодіодні (LED) системи або люмінесцентні лампи. Вони є обов'язковими до застосування за наявності підвищених вимог до кольоропередачі, незалежно від розряду зорових робіт.

Основними перевагами таких джерел світла перед лампами розжарювання є висока світлова віддача, значний термін експлуатації, можливість вибору різноманітного спектрального складу, якісніша кольоропередача, а також порівняно мала габаритна яскравість, що зменшує засліплювальний ефект.

Джерела світла – це пристрої, призначені для перетворення будь-якого виду енергії в оптичне випромінювання. У газорозрядних лампах люмінесцентне випромінювання виникає внаслідок електричного розряду в газах, металевих парах або їхніх сумішах.

Метою цього розрахунку є визначення необхідної потужності електричної освітлювальної установки для забезпечення заданого рівня освітленості на робочих місцях ділянки.

Необхідну кількість ламп (або світильників) визначають за виразом:

$$n = E_{\text{нmin}} \cdot S \cdot k_z \cdot Z / \Phi \cdot \eta, \quad (4.1)$$

де $E_{\text{нmin}} = 300$ лк - нормована освітленість;

$S = 2067.6$ м² площа цеху;

$k_z = 1.5$ - коефіцієнт запасу;

$\Phi = 3050$ лм - світловий потік лампи ЛБ-36;

η - коефіцієнт використання світлового потоку;

Для визначення η знаходимо індекс приміщення:

$$i = A \cdot B / H \cdot (A + B), \quad (4.2)$$

де A й B - довжина й ширина ділянки, м;

де H - повна висота приміщення, м;

$$i = 86.15 \cdot 24 / 6.5 \cdot (86.15 + 24) = 2.93$$

Тоді коефіцієнт використання $\eta = 1.3$ [7].

$$n = 300 \cdot 86.15 \cdot 1.5 \cdot 1.3 / 3050 \cdot 0.62 = 51.03 \text{ ламп}$$

Приймаємо число ламп рівне 52.

Визначаємо число світильників у ряді:

$$N = n / 2 \quad (4.3)$$

де n - кількість ламп;

2 - число ламп у світильнику;

$$N = 52 / 2 = 26 \text{ світильника.}$$

Розміщуємо світильники в два ряди по 13 в кожному.

4.4 Пожежна безпека

Імовірність виникнення пожежі визначається переважно особливостями технологічного процесу. Від конструктивно-планувальних рішень значною мірою залежать характер поширення вогню та наслідки небезпечної події. Тривалість і температурний режим пожежі обумовлюються кількістю горючих матеріалів у приміщенні, їхньою теплотою згорання та швидкістю вигорання.

На основі зазначених властивостей використовуваних речовин, а також умов їхнього застосування або обробки, всі виробничі та складські приміщення поділяють на п'ять категорій (від А до Д). За результатами аналізу для цього об'єкта визначено категорію В (пожежонебезпечну). Належність до категорії В визначає вимоги до ступеня вогнестійкості виробничих будівель, а також до груп горючості будівельних матеріалів і конструкцій, що використовуються для їх зведення [11].

Причини виникнення пожежі в цеху поділяють на два основні типи:

1. Причини електричного характеру:

- несправності в електричних машинах (обладнанні);
- виникнення електричної дуги або іскріння між контактами комутаційних апаратів;
- тривалі перевантаження електричних машин та апаратів;
- перевантаження кабельних ліній або пошкодження ізоляції дротів і кабелів.

2. Причини неелектричного характеру:

- порушення регламенту технологічного процесу;
- куріння у пожежо- та вибухонебезпечних приміщеннях;
- самозаймання або самоzapалювання окремих видів матеріалів.
- Первинні засоби пожежогасіння (ломи, багри, сокири, лопати тощо) слід розміщувати біля входу в цех або поблизу нього на спеціально

обладнаному пожежному щиті. Поруч із ним встановлюють конічні відра та ящик із піском.

- На території підприємства передбачено протипожежну водойму місткістю не менше ніж 50 м³.
- У виробничому приміщені створюється пожежно-технічна комісія, яку очолює головний інженер. Комісія регулярно здійснює протипожежні обстеження, розробляє необхідні заходи (технічні, експлуатаційні, організаційні та режимні) для зниження рівня пожежної небезпеки, організовує їх виконання, контролює готовність протипожежного інвентарю до дії, а також забезпечує належні умови для навчання персоналу правилам пожежної безпеки.
- Начальник дільниці проводить обов'язковий протипожежний інструктаж для працівників, який зазвичай поєднують з інструктажем з охорони праці.

ВИСНОВКИ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано вдосконалення схемотехнічних рішень перетворювачів для систем електроживлення від акумуляторів.

В першій частині виконано порівняльний аналіз акумуляторів за основними показниками для визначення можливості використання як резервних джерел живлення; аналіз критичних режимів роботи акумуляторних батарей; застосування додаткових пристроїв для керування та обслуговування акумуляторів.

В другій частині розглянуто послідовний резонансний перетворювач для електроживлення від акумуляторів; резонансний перетворювач розряду акумулятора у системах електроживлення; режими обмеження вихідної потужності акумуляторної батареї; принципова схема послідовного резонансного перетворювача.

В третій частині виконано розрахунок резонансного мостового dc-dc перетворювача з вольтодобувною ланкою під час живлення від акумулятора; забезпечення безперебійного живлення навантаження за рахунок включення до системи живлення від акумулятора; вольтододатковий резонансний перетворювач у режимі стабілізації вихідної напруги; режим роботи резонансного перетворювача при струмових навантаженнях.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі були розглянуті питання з охорони праці, де розроблені організаційні та технічні заходи зі створенням безпечних та нешкідливих умов праці на об'єкті.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Bloomberg NEF. (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.
2. European Commission. (2023). *Regulation (EU) 2023/... on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFIR). Text adopted*.
3. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. *навч. посібник* Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004. 404с.
4. Попович М. Г., Артименко Л. Ф., Бурмістенков О. П. та ін. Електричні машини та електропривод побутової техніки: *Підручник*. За ред. Д. Б. Головка, М. Г. Поповича. – 2-ге вид., стеретик. К.: Либідь, 2004. 352с.
5. Буртний В. В., Карплюк Л. Ф., Панченко Б. Я.. Тиристорний електропривід постійного струму: *Навч. посібник* Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007. 128с.
6. Барало О. В., Самойленко П. Г., Гранат С. Є., Ковальов В. О. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: *Навчальний посібник* К.: Аграрна освіта, 2010. 557с.
7. Колісник М. П., Шевченко Д. Ф., Мелашич В. В. Основні розробки, виробництва, монтажу, випробувань та обстежень підйомно-транспортних машин. *Навчальний посібник* Дніпропетровськ: *Пороги*, 2007. 193с.
8. A New Range Of Medium Voltage Multilevel Inverter Drives With Floating Capacitor Technology. Beinhold Georg // EPE 2001 – Graz. – P. 42–44.
9. Dynamic Average-Value Modeling of a Four-Level Drive System / Corzine Keith // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2003. – № 18. – P.
10. Закон України «Про охорону праці». – К., 2016.
11. Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності». – К., 2001.