

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Комп'ютерні технології і системи
(назва факультету)

Автоматики та телекомунікацій
(повна назва кафедри)

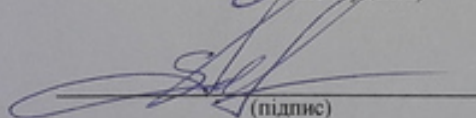
Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
перший (бакалаврський)
(ступінь вищої освіти)

на тему: Дослідження режимів роботи перетворювача напруги для
аккумуляторної батареї резервного живлення
за освітньою програмою "Автоматика та автоматизація на транспорті"
зі спеціальності: 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології"
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: АТ1811


(підпис студента)

Керівник:


(підпис)

Михайло СИВАЧЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

завідувач кафедри
Володимир ГАВРИЛЮК
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

рік

Дніпро – 2022

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Computer technology and systems
(faculty)

Automation and telecommunications
(department)

Explanatory Note
to Master's Thesis
first (bachelor's)
(higher education degree)

on the topic: Investigation of operating modes of the voltage converter for the backup
battery_____

according to educational curriculum "Automation and automation in transport"

in the Speciality: 151 "Automation and computer-integrated technologies"
(speciality and its code)

Done by the student of the group:

Mykhailo Syvachenko
(name, surname)

Scientific Supervisor:

Head of Department
Volodymyr Havryliuk o
(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем

Кафедра: Автоматики та телекомунікації

Рівень вищої освіти: Перший(бакалаврський)

Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті

Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

(підпис)

Володимир Гаврилюк _

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата _____

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу

Бакалавра

(ступінь вищої освіти)

студенту Сиваченко Михайлу Володимировичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Дослідження режимів роботи перетворювача напруги для акумуляторної батареї резервного живлення

Керівник роботи: Гаврилюк Володимир Ілліч, д.ф.-м.н., професор

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від

"___" ____ 202_ р. № ____

2. Строк подання студентом роботи: 29.05.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: Схема ДБЖ, параметри літій-іонних акумуляторів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: Аналітичний огляд літератури за темою роботи

4.2 Основна частина: Джерела безперебійного живлення

4.3. Дослідження режимів роботи перетворювача напруги для акумуляторної батареї резервного живлення на моделі

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	1 розділ	28.02	
2	2 розділ	18.04	
3	3 розділ	29.05	
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	10.06	
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	23.06	

Студент

Михайло СИВАЧЕНКО

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

Володимир Гаврилюк

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Реферат

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра:

Об'єкт розробки: Модель роботи літєвої акумуляторної батареї в режимі зарядження і розрядження при живленні на трифазне навантаження.

Мета роботи: Провести моделювання і отримано залежності струму, напруги на батареї і стану заряду батареї в процесі функціонування.

Методи дослідження: Моделювання заряджання батареї. В процесі зарядження змінювали управляючу напругу на пристрої керування довільним образом, що приводило до зміни напруги на виході акумулятора. Це приводило до зміни струму заряду і, як наслідок, до зміни швидкості зарядження. Моделювання розряджання батареї. В процесі розрядження батареї після перехідного процесу напруга і струм батареї були практично не змінними. Моделювання проводили на протязі 5 секунд. Заряд акумулятора зменшився за цей час.

Ключові слова: ЛІТІЙ-ІОННІ АКУМУЛЯТОРИ, СТРУКТУРА БАТАРЕЇ, ЗАРЯД АКУМУЛЯТОРА, ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ, СТРУКТУРА ДБЖ

ЗМІСТ

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

- 1.1. Основні відомості про літій іонні акумулятори. Структура, принцип дії.
- 1.2. Переваги літієвих акумуляторів
- 1.3. Особливості роботи літієвих акумуляторів. Робочі цикли та цикли зарядки
- 1.4. Безпека літій-іонних акумуляторів. Екологічні питання, пов'язані з їх експлуатацією.
- 1.5. Висновки за розділом

2. ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

- 2.1. Призначення джерела безперебійного живлення
- 2.2. Основні типи джерел безперебійного живлення
- 2.3. Висновки за розділом

3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ ДЛЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ НА МОДЕЛІ

- 3.1. Постановка завдання на моделювання.
- 3.2. Модель перетворювача для заряджання літієвої батареї.
- 3.3. Перетворювач постійної напруги, що знижує напругу.
- 3.4. Модель перетворювача для зарядження батареї.
- 3.5. Перетворювача постійної напруги в змінну.
- 3.6. Трифазний автономний інвертор напруги.
- 3.7. Модель перетворювача для роботи батареї на навантаження змінного струму.
- 3.8. Результати моделювання зарядження батареї.
- 3.9. Результати моделювання розрядження акумуляторної батареї при роботі на трифазне навантаження.
- 3.10. Висновки за розділом

Вступ

На багатьох підприємствах, в тому числі й на залізничних підприємствах необхідне безперервне живлення , зокрема в системах залізничної автоматики. Наприклад, система ЕЦ, автошлагбауми і тд. Зараз використовують резервні генератори або акумулятори , але постійно потрібне технічне обслуговування. Більш перспективними виглядають літієві батареї або джерела безперебійного живлення , які майже не потребують технічного обслуговування, окрім підтримки власного заряду

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1.1 Основні відомості про літій іонні акумулятори. Структура, принцип дії.

Літій-іонна батарея через свою лужну природу випускається у двох найбільш популярних формах: модель призми та плоскою. Основою циліндричної моделі є сердечник, що складається з сукупності електродів у формі тонких пластин, згорнуті в рулон, локалізовані у спеціальній оболонці. Дана ,спеціально розроблена, оболонка розташовується в металевому корпусі, підключеному до негативно заряджених елементів. Щоб звести до мінімуму мимовільний розряд акумулятора, що виникає в результаті циркуляції струму по провіднику, необхідно не допускати дотику полярностей, тому позитивний полюс акумулятора розташовується у верхній частині, а негативний у нижній.

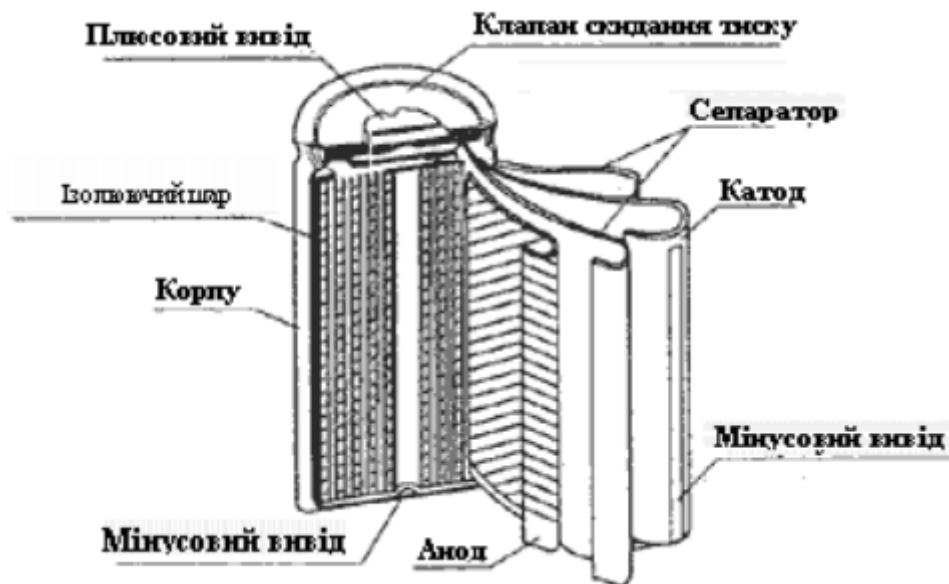


Рисунок 1.1 - Будова циліндричної літій-іонної батареї

Плоский літій-іонний акумулятор формується шляхом накладання пластин у прямокутну форму.

Дані пластини складніше стримують стискаючі зусилля на електроди, але ця конструкція забезпечує найбільш міцну структуру акумулятора на відміну від циліндричної форми. Крім прямокутної форми також використовується спіралеподібна форма, що формується із скручування рулонів електродів. Завдяки своїй структурі ця модель має високі технічні характеристики. Але також є недолік, що призводить до зниження ефективності пристрою – це підвищення температури сердечника та плавлення сітки за рахунок надмірно близького прилягання пластин під час процесу заряджання.



Рисунок 1.2 - Зовнішній вигляд плоского акумулятора.

Щоб уникнути витіку рідкого сепаратора та порушення цілісності акумулятора, його конструкція має бути абсолютно герметичною. За рахунок герметичності ніякі сторонні речовини з навколишньої атмосфери вступлять у хімічну реакцію з вмістом батареї елементами. Будь-які компоненти, що не входять до структури батареї, можуть пошкодити її і вивести з ладу, або знизити показники. Пористий пропілен використовується в якості розділяючого елемента між різноіменними електродами. Крім перерахованих вище двох типів є і комбінований вигляд. Він включає переваги обох

моделей, тим самим підвищуючи властивості батареї, тобто продовження терміну служби, а також покращення вихідні технічні характеристики. Для отримання даної суміщеної моделі електроди, приклавши досить щільно один до одного, згортають у рулон і формують із них циліндр форми овалу. При її моделюванні необхідно враховувати плавність переходу пластин для усунення можливих пошкодження цілісності поверхні батареї. При функціонуванні акумулятора, а також при протіканні хімічної реакції між компонентами всередині системи утворюються токсичні газоподібні речовини. Для запобігання витоку газів у батареї розташований отвір, що випускає при скупченні нагромаджений газ в атмосферу. На даний момент спеціальний клапан, призначений для екстреного скидання надмірно накопиченої пари, достатньо автоматизований та використовується в батареях, що видають високу потужність.

Структура батареї складається з:

- анодного матеріалу, представленого у вигляді мідної фольги;
- катодного матеріалу, представленого у вигляді алюмінієвої фольги;
- Сепаратора – пористої речовини, просоченої рідкою речовиною "електролітом"

Катодний та анодний матеріал батареї розділений сепаратором для запобігання вільному переміщенню іонів літію між пластинами. Для подачі живлення та навантаження клеми-токознімачі приєднують до пластин, а електроди розташовані у водонепроникному корпусі. За рахунок покращення кожного елемента структури покращуватиметься вся літій-іонна батарея. За цієї причини необхідно вести активну роботу з дослідження та покращення електродних матеріалів.

Заряд акумулятора заснований на двох основних процесах: «інтеркаляція» та «деінтеркаляція». Інтеркаляція – оборотне використання

молекул однієї речовини в кристалічну решітку іншої або групи речовин. Деінтеркаляція – процес зворотний «інтеркаляції», вилучення молекули речовини, що утворилася в результаті хімічної реакції зв'язку. Щодо заряду літій-іонної батареї при інтеркаляції катіону літію в кристалічну решітку графіту, утворюючи хімічну пару LiC_6 .

Принцип роботи побудований на вмінні атомів літію впроваджуватися в структуру інших речовин, наприклад солі металів. В результаті цього процесу утворюється хімічний зв'язок, що при заряді дозволяє накопичувати достатню кількість заряджених частинок одному електроду. А при розряді відбувається зворотна ситуація, іони повертаються на свій первісний електрод, при цьому віддаючи необхідний заряд. Досить часто в ролі електроліту застосовують рідини з додаванням води, що зберігають стабільність при високих значеннях напруги і не мають вільних частинок. На даний момент при виробництві батарей не застосовується металевий літій, що зробило процес переходу іонів по сепаратор між електродами безпечним.

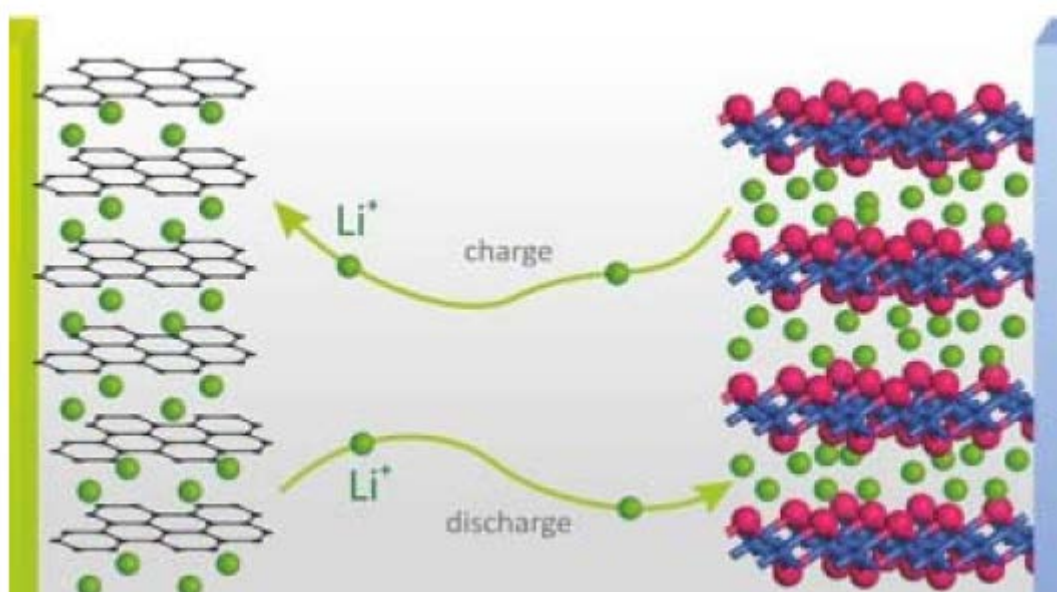


Рисунок 1.3 - Процес заряду та розряду акумулятора

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що цей процес заряду та розряду акумулятора ґрунтується на переміщенні іонів між пластинами, не утворюючи при цьому жодних додаткових зв'язків з 14 елементами. Тому зарядний процес в батареї цілком стабільний при нормальних умов.

1.2 Переваги літійових акумуляторів

Висока енергоємність. Їмність сучасних літій-іонних акумуляторів у 2-3 рази перевищує своїх попередників, наприклад, в порівнянні з NiMH.

Велика кількість циклів заряду-розряду. Літій-іонну батарею не потрібно повністю розряджати для заряджання внаслідок роботи акумулятора за циклами. Тобто, один цикл завершиться, коли на ньому буде витрачено ємність, яка дорівнює 100%. Також через 2000-4000 циклів батарея втрачає лише 20% від своєї первісної ємності.

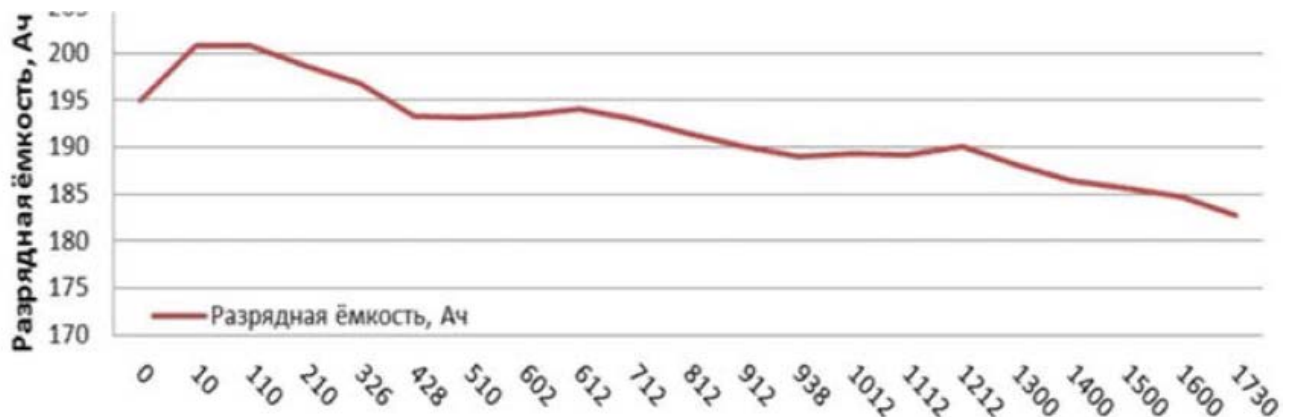


Рисунок 1.4 - Зміна ємності батареї за глибини 70% заряду

Можливість витримувати великі струми розряджання.

Недоліки літій-іонних акумуляторів:

- Працюють у певному діапазоні температур. Для ефективної роботи акумулятора необхідні нормальні умови довкілля,

- без надмірної вологості та в діапазоні температур 0-40°C;
- Вогнебезпечні. При неправильній експлуатації та порушенні цілісності батареї можливе загоряння. Також у ролі захисту від спалаху в батарею вбудовується плата захисту, що обмежує максимальне значення напруги на акумуляторі та захищає його від падіння нижче вказаної межі напруги при розряді. Окрім цього контролюються значення струму заряду-розряду та температура батареї;
 - Схильність до старіння. Незалежно від того, чи експлуатується акумулятор чи ні, його ємність все одно буде знижуватися. З часом акумулятор втратить частину від своєї початкової ємності, особливо помітним це буде через 2-3 роки використання;
 - Більш висока вартість у порівнянні з NiCd акумуляторами.

1.3 Особливості роботи літійових акумуляторів. Робочі цикли та цикли зарядки

Літій-іонні елементи живлення чутливі до перезаряду. На поверхні анода при надмірному заряді осідає металевий літій. Він виглядає як дрібний мшистий осад і здатний вступати у реакцію з електролітом. На катоді при перезаряді активно виділяється кисень. Зовні це може проявлятися у вигляді інтенсивного нагрівання, зростання тиску та розгерметизації елемента

Деякі особливості літій-іонних акумуляторів потрібно розібрати окремо. Насамперед ті, які мають істотний вплив на експлуатацію та термін життя АКБ.

Небезпека вибуху та займання. Вважається, що це одна із ключових проблем. Саме тому їх заборонено провозити у багажі на літаках. Тим не менш, на даний момент небезпека перебільшена (хоча, у випадку з авіацією, краще перестрахуватись і тут заборона має сенс). Часто вибухали літій-іонні акумулятори першого покоління, де анод був із літію. Після циклів зарядки та розрядки на ньому утворювалися дендрити, які призводили до замикання, яке й викликало загоряння або вибух. Матеріал анода замінили на графіт і цього недоліку позбулися. Сьогодні таке відбувається рідко, але у ЗМІ можна часто побачити новини про вибух смартфонів і т.д. Причин може бути багато, але найчастіше це механічні пошкодження, АКБ низької якості, короткі замикання всередині акумулятора (цілком цієї проблеми не позбулися). В даний час найнебезпечнішим компонентом є електроліт, який здатний розкладатися на займисті матеріали при підвищенні температури. В принципі, якщо використовується якісний літій-іонний акумулятор, дотримуються всіх правил експлуатації, то ймовірність вибуху або спалаху вкрай низька. Це приблизно як постраждати від удару блискавки: ніхто не застрахований, але це дуже рідко.

Ефект пам'яті. До переваг літій-іонних акумуляторів традиційно відносять відсутність ефекту пам'яті, особливо в порівнянні з нікель-кадмієвими АКБ. Проте, останні дослідження показали, що це помилка, проте ефект є настільки незначним, що його можна не враховувати. Вся справа в іонах літію, які втрачають свої властивості при неповній зарядці. Частина їх залишається на катоді, вони переходять у прикордонний стан. Тобто вони фактично підійшли до бар'єру визволення, але не подолали його. Тому при зарядці, коли вільні іони намагаються повернутися на своє місце, вони зустрічаються з тими, що перебувають у прикордонному стані і цим процес стає складнішим, а структура електрода змінюється. Існують певні

пропозиції, як позбутися цього ефекту, але, повторимо, він носить незначний характер.

Оригінальні та не оригінальні. Літій-іонні акумулятори виробляють багато компаній і кожен бачив картину, коли АКБ від виробника пристрою коштує значно дорожче, ніж аналог. При цьому ємність може бути однаковою. Чи варто заощаджувати? Питання складне, яке залежить від того, в якому пристрої використовується акумулятор. Розберемо з прикладу смартфонів. Вище ми писали, що під час заряду використовується контролер, але у випадку зі смартфонами він знаходиться не в АКБ, а в самому телефоні. Тобто всі функції, які повинні забезпечувати ефективну роботу, делеговані в сам пристрій. Це зроблено свідомо, подібний підхід якраз і створює не оригінальним АКБ спочатку найгірші умови. Але є пристрої (наприклад, електроінструмент, частина ноутбуків), де ця проблема не є актуальною і там жодної різниці ви не помітите. Тому думка про те, що «дешеві китайські літій-іонні акумулятори погані» - частково міф. Так, зустрічається продукція низької якості, але найчастіше зниження характеристик обумовлено факторами, на які виробник АКБ вплинути аж ніяк не може.

Температура експлуатації. Для більшості літій-іонних акумуляторів температура експлуатації знаходиться у діапазоні від -20 до $+50$ градусів. Перегрів та переохолодження не допускаються. Заряджання при низькій температурі також неприпустиме. Також, при падінні температури, знижується ємність. При негативній температурі батарея може втратити до 50% ємності, тобто розрядиться вдвічі швидше.

Зарядка літій-іонного акумулятора та розряд. Метод заряду акумулятора складається з двох основних та одного додаткового етапу. Два основних етапи включають: при I -const та при U -const та падаючому I .

Процес заряду та його характеристики на кожному з етапів можна спостерігати за схемою (рисунок 1.5). На ньому представлений процес заряду акумулятора з кобальтитом літію, що використовується в ролі позитивного електрода. Отримана крива напруги при додаванні інших хімічних елементів трохи зміниться, але зміст процесу буде тим самим.

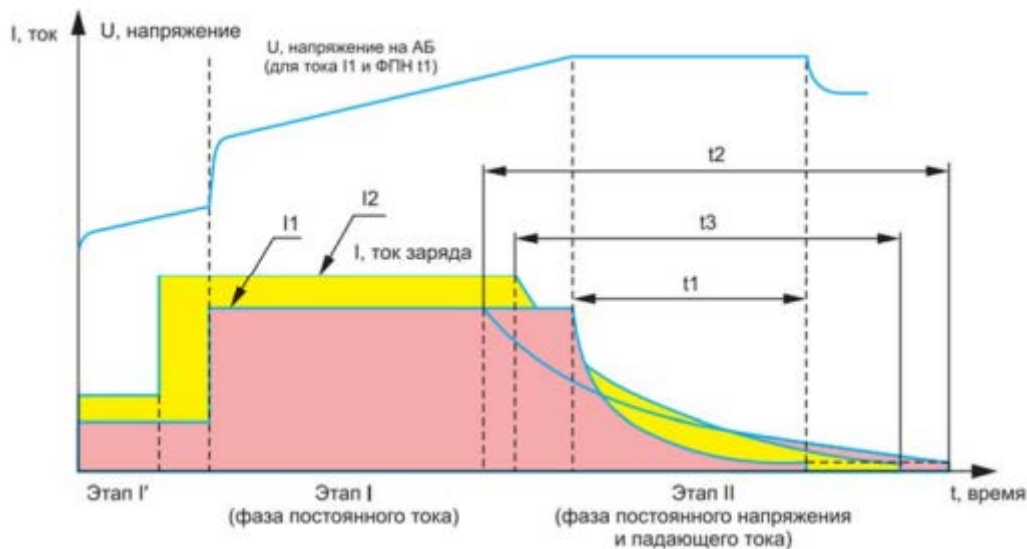


Рисунок 1.5 - Процес заряду акумулятора за етапами

Розглянемо перший і короткочасний етап – додатковий. Цей етап рекомендується при дуже тривалому знаходженні батареї в розрядженому стані, а також при напрузі нижче зазначеного мінімального значення. Для більшості літій-іонних батарей встановленим мінімальним значенням напруги 2,5В. Необхідно відновити електроди та налагодити усі хімічні процеси всередині батареї для коректної роботи акумулятора надалі. Також цей режим використовують за низьких температур (при $T < 4^{\circ}\text{C}$), щоб підвищити температуру електродних пластин та перейти на стандартний

режим заряду. Малий струм, що передається за допомогою клем, забезпечує плавний перехід активних речовин батареї до номінальних значень напруги для коректного функціонування. Крім цього, завдяки I етапу здійснюється захист акумулятора від короткого замикання. Якщо при подачі на батарею малого струму через невелику кількість часу напруга так і не зросте, то це свідчить про його несправність. Але в більшості зарядних пристроїв цей етап пропускається і процес заряду починається відразу з першого етапу.

Етап I проходить при номінальному значенні струму і поступово зростаючому до максимального значення напруги. На схемі зростання напруги зображено умовно, насправді показання кривої залежать від хімічних елементів, що використовуються під час виробництва батареї. Номінальний струм вимірюється у частках від номінальної ємності осередків акумулятора, що вимірюється в Сн. Для ефективної та довгої служби акумулятора величина номінального струму заряду вибирається у діапазоні 0.2–0.5 Сн. Максимально допустимий струм заряду для того чи іншого акумулятора можна дізнатися у документації виробника. Для кращого розуміння необхідно розглянути приклад: якщо ємність акумулятора становить 10А*год, то номінальний струм для нього буде 2А - п'ять годин заряду.

Під час швидкої зарядки застосовується прискорений режим 5-10А. Але такий режим може скоротити термін служби акумулятора. При прискореному заряджанні значення струму зарядки становить 0,5-1 Сн і вище. Але чим вище значення струму, що подається на елемент під час заряджання, тим менше буде набрана ємність і вище можливість нагрівання батареї, для цього необхідно уважно спостерігати за процесом заряду. Заряд номінальний та високий струмом краще чергувати, тому що при постійному використанні прискореного режиму ємність батареї може набагато швидше

впасти, а також можлива швидка деградація батареї. Прискорення першого етапу заряджання призведе до більш швидкого досягнення кінцевого значення напруги та переходу до другого етапу заряджання.

II етап починається після підвищення напруги до його максимального значення. Він протікає при $U = \text{const}$ у якому значення струму падає до своєї мінімальної величини. Процес заряду вважатиметься закінченим при падінні величини струму до $0,1-0,5$ Сн. Якщо розглядати вищеописаний приклад, то до 100 мА. Близько 5-10% ємності батареї набирається за номінального режиму заряду. Після завершення заряду напруга на акумуляторі становить $0,05-0,1$ В. Тривалість даного етапу заряджання залежить від терміну експлуатації акумулятора (кількості циклів заряду-розряду) та його ступеня деградації. Чим більший термін служби батареї, тим довше триватиме заряд на цьому етапі

Після закінчення заряду акумулятора напруга падає до мінімального значення та входить у збалансований стан. Не рекомендується залишати заряджений акумулятор на зарядці через можливу деградацію електродів. Тому після закінчення 2 етапу необхідно вимкнути батарею від мережі.

1.4 Безпека літій-іонних акумуляторів. Екологічні питання, пов'язані з їх експлуатацією.

Наскільки безпечні літій-іонні акумулятори? Усі типи батарей, за визначенням, зберігають хімічну енергію, тому кожна батарея при неправильному поводженні (наприклад, кинута у вогонь) або надмірному заряді потенційно може становити небезпеку, вивільняючи небезпечні матеріали або спалахуючи. Літій-іонні акумулятори вважаються більш нестабільними через повідомлення про випадки загоряння та через їх значно вищої питомої енергії у поєднанні з більшою чутливістю до надмірного

заряду. Неправильно використовувана літій-іонна батарея легша досягне стану «теплого рознесення», оскільки вона має нижчий опір елемента та більш високу ємність для зберігання енергії, ніж свинцево-кислотна батарея. Проте за ці роки було досягнуто значного прогресу, що зробило їх безпечнішими і набагато більш порівнянними з точки зору безпеки з іншими типами батарей, що широко використовуються. Хімічні зміни та покращення упаковки клітин зробили їх більш стабільними. Процеси виробництва стали зрілими, а використовувані матеріали більш довговічними. Схеми управління батареями, що запобігають перегріву або перезаряд, добре протестовані і довели свою ефективність у польових умовах.

Широке використання літієвих батарей у виробництві мільйонів портативних електронних пристроїв, смартфонів та електромобілів є найкращим свідченням їхнього високого рівня безпеки. Оскільки системи літій іонних акумуляторів набагато чутливіші до того, як вони заряджаються і розряджаються, всі вони включають систему управління батареями, або BMS, що складається з мікропроцесорів, датчиків, комутаторів та пов'язаних з ними схем. Він постійно контролює на клітинному рівні температуру батареї, рівень заряду та швидкість заряду, щоб захистити від коротких замикань та перезарядження. Система також є інструментом захисту осередків від пошкоджень, запобігаючи надто низькій напругі при розрядці. BMS надає ДБЖ та користувачеві точну інформацію про стан батареї, працездатності та доступний час виконання. Хоча BMS робить літій – іонні акумуляторні системи набагато безпечніші, самі вони мають високу вартість. Літій-іонні батареї не містять ртуті, свинцю, кадмію або будь-якого іншого матеріалу, вважається небезпечним. Звичайно, це не означає, що переробка чи відсутність переробки не впливає на навколишнє середовище, але уряд США вважає їх досить безпечними для поховання на звалищах.

Як зберігати літій-іонні акумулятори? Зберігання у прохолодному місці уповільнює процес старіння літій-іонних (та інших хімічних) сполук. Виробники рекомендують температуру 15°C. Крім того, акумулятор повинен бути частково заряджений перед зберіганням. Багато виробників рекомендують 20%-40% рівень заряду.

Чи є літій-іонні акумулятори екологічно чистими? Є багато різних способів, якими ви можете вважати продукт більш екологічно чистим чи ні, ніж інший. Літій-іонні акумулятори не містять небезпечних матеріалів, у той час як свинцево-кислотні акумулятори містять їх (наприклад, свинець). Обидва типи батарей придатні для вторинної переробки, проте нині у більшості регіонів світу утилізувати свинець набагато простіше, ніж більш крупноформатні літій-іонні акумулятори, що використовуються в ДБЖ та електромобілях. Однак для отримання повної картини впливу довкілля розглянемо весь вуглецевий слід протягом життєвого циклу батареї. Використання вуглецю накопичується протягом усього життєвого циклу продукту: вилучення сировини, енергія для виробництва та транспортування, робоча енергія для підтримки заряду та охолодження батарей, можливість вторинної переробки та вплив на землю, коли прийшов час утилізувати

Аналіз показує, що експлуатаційні втрати (тобто енергія, що використовується для підтримання заряду батарей) на сьогоднішній день є домінуючою рушійною силою вуглецевого сліду ДБЖ та його акумуляторної системи протягом 10-літнього життєвого циклу. Проте між цими двома системами немає великої різниці в експлуатаційних втратах. Який із них межує з іншим, залежить від фактичного варіанта використання. Літій-іонні акумулятори вимагають менше енергії для підтримки заряду, ніж свинцево-кислотні. Цикл заряду літій-іонного акумулятора ефективний на 90% порівняно з 80-85% для свинцево-кислотного акумулятора. Крім того,

свинцево-кислотні акумулятори саморозряджаються з більшою швидкістю, ніж літій-іонні. Однак цей приріст ефективності компенсується необхідністю використання у Li-ion системи управління батареями (BMS) для захисту від короткого замикання та перезаряджання, яка також споживає енергію. Таким чином, загальні операційні втрати двох типів АКБ дуже схожі між собою.

Враховуючи, що літій-іонні акумулятори, що містять безпечні для звалища матеріали, що підлягають вторинній переробці, а також те, що їх термін служби становить 2-3 рази більше, ніж у свинцево-кислотних акумуляторів, можна стверджувати, що літій-іонні акумулятори «зеленіші». Однак зверніть увагу, що відсоток переробки свинцю із свинцево-кислотних батарей становить 99%, причому більше 90% батарей, що відслужили свій термін, відправляються в переробку. Однак, в даний час переробка літій-іонних акумуляторів, особливо акумуляторів більшого формату (наприклад, що використовуються в електромобілях і ДБЖ центрів обробки даних), ще не настільки розвинена.

Чи придатні літій-іонні акумулятори для вторинної переробки? Так, вони придатні для повторної переробки. І є багато переробників, які візьмуть невеликі літій-іонні батареї. Проте на момент написання цієї роботи більшість батарей меншого формату просто збираються і відправляються на подрібнення та спалювання, де деякі матеріали, що використовуються в виробництві, можуть бути відновлені для подальшого застосування. Але все ж більшість матеріалу з літій-іонних АКБ потрапляє на звалища. З чисто фінансової точки зору переробка літій-іонних акумуляторів для повторного використання дуже невеликої кількості металевого літію та інших поширених, але менш цінних металів (алюмінію, нікелю тощо) не варто витрачених зусиль. Продовжуються дослідження, спрямовані на покращення економіки переробки, і уряди починають заохочувати, зокрема, або прямо

вимагати збору та належної переробки батарейок. Утилізація літій-іонних акумуляторів більшого формату (тобто таких, що використовуються для електромобілів та ДБЖ центрів обробки даних) є складнішим завданням. На момент написання цієї роботи існує кілька компаній, які можуть переробляти великі літій-іонні акумуляторні системи. Ринок незрілий. Поки що дуже мало хто з цих батарей виробили власний ресурс.

1.5 Висновки за розділом

Розглянуто основні відомості про літій іонні акумулятори. Їх структура та принцип дії. Проаналізовані особливості роботи літієвих акумуляторів, а також безпека літій-іонних акумуляторів та екологічні питання

2 ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

2.1 Призначення джерела безперебійного живлення

ДБЖ (або UPS) – це пристрій резервування електроенергії, що забезпечує безперервність електропостачання при відключенні напруги.

Згідно з Міжнародним стандартом ІЕС 62040-3 системи безперебійного енергопостачання (UPS) пристрої мають наступну класифікацію згідно з їхньою схемою побудови: резервні (off-line чи standby), лінійно-інтерактивні (line-interactive), подвійне перетворення (on-line). Залежно від робочої напруги навантаження, ДБЖ можуть бути однофазними (для живлення однофазних споживачів) та трифазними (для живлення трифазних та однофазних споживачів трифазних групових мережах).

Також не маловажливим параметром джерела живлення є його конструктивне виконання, яке залежить від призначення, потужності та часу роботи в автономному режимі, наприклад: пристрої невеликої потужності випускаються в настінному, моноблочному підлоговому (баштовому) виконанні, а також мають уніфіковані розміри для розміщення у 19-дюймових стійках та шафах; безперебійники середньої та великої потужності

випускаються в моноблочному підлоговому або шафному конструктиві, а також у виконанні для розміщення у стандартні 19-дюймові стійки та шафи; безперебійники середньої та великої потужності випускаються в моноблочному підлоговому або шафному конструктиві, а також у виконанні для розміщення у стандартні 19-дюймові стійки та шафи.

Основним призначенням пристроїв є забезпечення безперебійності електроживлення підключених електроприладів при виникненні перебоїв у подачі електроенергії або неприпустимих відхиленнях її параметрів (напруги та частоти) від нормальних значень.



Рисунок 2.1 - Джерело безперебійного живлення

Функціональність ДБЖ сьогодні не обмежується перемиканням живлення підключених електроприладів на роботу від АКБ при короткочасних відключеннях електрики мережі живлення. Додаткові можливості деяких сучасних пристроїв: стабілізація напруги (у джерелах живлення подвійного перетворення та лінійно інтерактивного типу); фільтрація частотних та імпульсних перешкод; «холодний старт», що дозволяє включати електроприлади при відключенні електроенергії (під час знаходження пристрою в автономному режимі); світлова та звукова

індикація станів системи живлення (відображення рівня напруги та частоти на вході та виході, фактична потужність споживання навантаження тощо); таймер відключення/вмикання навантаження у заданий час; синхронізація з ПК, організація віддаленого моніторингу системи живлення та управління пристроєм.

Окремо варто сказати про захист від мережевих перешкод і стрибків напруги, а також захист локальної мережі. Всі сучасні ДБЖ оснащені захистом від проблем, пов'язаних з боку обслуговуваних приладів. Якщо сумарне навантаження перевищуватиме максимально допустиму або станеться коротке замикання, то безперебійник одразу відключить живлення. Перешкоди в мережі можна умовно поділити на частотні та імпульсні. Перші не так небезпечні, особливо для блоків живлення комп'ютерів або телевізорів, які перетворюють змінний струм на постійний. Другі можуть викликати проблему у будь-якої електроніки. Тому більшість ДБЖ оснащені захистом від імпульсів та гармонік за допомогою варисторів та високочастотних фільтрів. Проблема появи високовольтних імпульсів характерна як для силових кабелів, але й для мереж передачі – комп'ютерних чи телефонних. Вони могли виникнути через вплив атмосферної електрики, пробойів поруч розташованої проводки та інших причин.

Для захисту від мережевих перешкод на вході ДБЖ зазвичай встановлюється згладжуючий фільтр ВЧ перешкод, який являє собою пасивний багатоланковий RC або LC-фільтр. Для захисту від високовольтних імпульсів використовується варисторний блок, увімкнений паралельно до ланцюга живлення на вході. Також для приглушення високовольтних імпульсів в джерелах безперебійного живлення застосовуються фільтри з метал-оксидним варистором. При виникненні високовольтного імпульсу опір варистора різко знижується, шунтуючи вхід безперебійника. Надтоки, що

виникають при цьому (можуть досягати значень в кілька кА) будуть протікати через варистор блоку захисту, не надходячи в ланцюги живлення ДБЖ та не впливаючи на підключені електроприлади. Аналогічно на основі варисторів у більшості ДБЖ реалізовано захист локальних мереж. Підключення інформаційних кабелів через виділені роз'єми RJ-45 та RJ-11 забезпечує захист мережного обладнання (мережевих адаптерів, роутерів тощо) та телефонної лінії.

Вибір типу ДБЖ залежно від навантаження. До найважливіших технічних характеристик ДБЖ можна віднести: потужність пристрою, час перемикання роботи від АКБ і назад, схему побудови та форму вихідного сигналу, максимальну тривалість роботи в автономному режимі, наявність функції стабілізації напруги, час повного заряду акумуляторів, виконання та габаритні розміри. Запорукою ефективності та надійності роботи будь-якого навантаження, крім безперебійності електропостачання, є якість напруги живлення, один з найважливіших показників якого – форма вихідного сигналу. Кожному типу ДБЖ властиве формування синусоїди певної форми, яка не завжди підходить для нормальної роботи підключених електроприладів.

2.2 Основні типи джерел безперебійного живлення

ДБЖ резервного типу (off-line). За відсутності напруги в основній мережі ці пристрої виконують перемикання живлення навантаження на акумуляторні батареї. Вони не мають вбудованого захисту від перепадів напруги (стабілізації), тому підійдуть лише для застосування в мережах із відносно стабільною напругою.

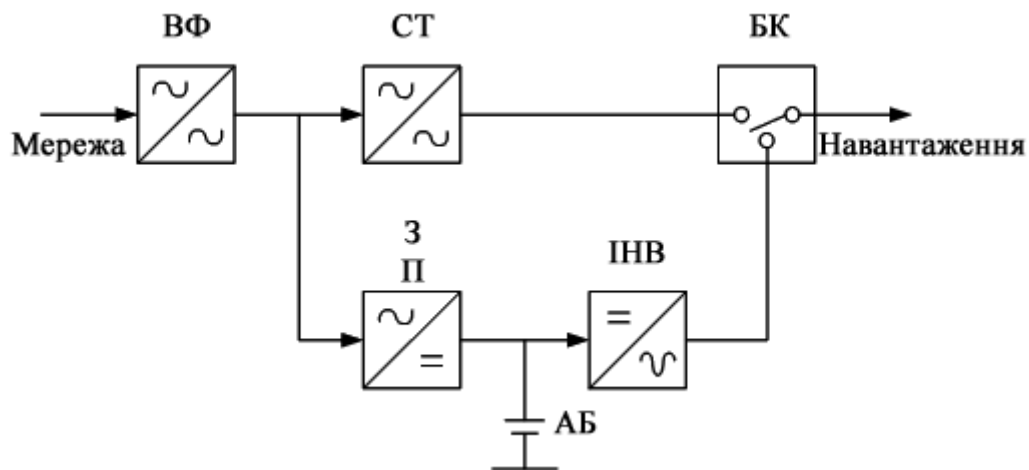


Рисунок 2.2 - Загальна структура ДБЖ резервного типу

Мабуть, це найпопулярніший у побутовому використанні безперебійник. Доступна вартість та задовільні технічні характеристики роблять його оптимальним бюджетним варіантом захисту невимогливого до якості харчування навантаження без індуктивного складової (електродвигунів, трансформаторів, дроселів). Модифікована синусоїда на виході цих ДБЖ категорично не підійде для живлення циркуляційних насосів, холодильників, кухонних комбайнів, блендерів та міксерів. Застосування ДБЖ оффлайн типу як джерела живлення перерахованих електроприладів з електродвигунами гарантовано та досить швидко виведе їх з ладу. Прикладом навантаження, сумісного із резервними ДБЖ, можна назвати домашні або офісні ПК. Їх імпульсні блоки живлення малочутливі до несинусоїдності живильного напруги. Проте, враховуючи можливість виникнення підвищеної кількості перешкод на виходах блоків живлення серверів, офісної та охоронної техніки, буде доцільним утриматися від їх застосування для живлення відповідальної техніки, збої у роботі якої можуть призвести до втрати важливих даних. Цілком розумним буде використання резервного безперебійника та для живлення мережі малопотужного чергового висвітлення. Обмеженням у цьому випадку є наявність у баласті ламп з електромагнітним дроселем.

Результати практики спільного використання оффлайн ДБЖ з лампами прямого включення та працюючими з електронними ПРА підтверджують нормальну роботу ламп із збереженням їх заявленого терміну служби.

Переваги ДБЖ резервного типу: простота й низька вартість та високий ККД у мережному режимі.

Недоліками є затримка у часі перемикання навантаження з мережі на інвертор і навпаки, несинусоїдальна вихідна напруга в автономному режимі, ДБЖ не захищає навантаження від неприпустимих відхилень частоти й форми напруги мережі, можливе виникнення небажаних перехідних процесів при перемиканнях з мережі на інвертор і навпаки, нелінійне навантаження з високим крос-фактором викликає спотворення вхідного струму (відхилення від синусоїдальної форми) й знижує вхідний коефіцієнт потужності.

Типові значення потужностей ДБЖ резервного типу перебувають у межах 250—1500 Вт.

Лінійно-інтерактивні ДБЖ (line-Interactive). Є більш високим класом пристроїв у порівнянні з попереднім. На відміну від ДБЖ резервного типу, вони оснащені вбудованим стабілізатором напруги, що розширює область їх використання, дозволяючи застосовувати у мережах з незначними відхиленнями напруги від норми. Крім того, час перемикання на АКБ ДБЖ цієї топології становить ~ 4 мс, що набагато менше, ніж у резервних джерел живлення. Форма вихідного сигналу дозволяє використовувати ці пристрої для індуктивного живлення навантаження. Але при покупці слід вивчити технічні характеристики безперебійника. При заявленій виробником формі сигналу «чиста синусоїда» (Line-Interactive Sin) до ДБЖ можна підключати електроприлади з електродвигунами – насоси, холодильники, пристрої з трансформаторними блоками живлення, керуюча електроніка газових казанів

тощо. Пристрої з модифікованою синусоїдою (ступінчастої форми) на виході для такого застосування не підійдуть.

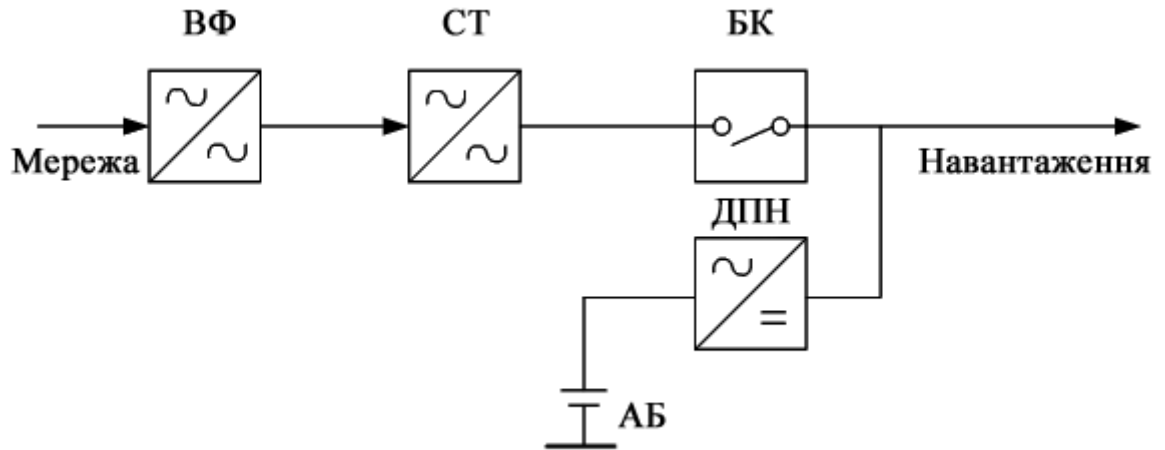


Рисунок 2.3 - Структура ДБЖ лінійно-інтерактивного типу

Переваги ДБЖ лінійно-інтерактивного типу (порівняно з резервними ДБЖ): синусоїдальна форма вихідної напруги в автономному режимі та поєднання функцій ЗМ й ІНВ в одному вузлі.

Деякі недоліки, властиві резервним ДБЖ, характерні й для ДБЖ лінійно-інтерактивного типу. Блок комутації є найбільш відповідальним місцем обох типів ДБЖ, оскільки саме від його роботи залежить забезпечення надійності всього ДБЖ. Це пов'язано з тим, що при переході ДБЖ в автономний режим цей блок має забезпечувати чітке роз'єднання інвертора й мережного джерела з малим внутрішнім опором. При невиконанні цієї вимоги інвертор може виявитися замкненим накоротко та вийти з ладу. Типові потужності ДБЖ лінійно-інтерактивного типу перебувають у межах 500—3000 Вт. ДБЖ із подвійним перетворенням енергії — Double-Conversion UPS. ДБЖ цього типу виконують безперервне перетворення змінної напруги на постійне (з підзарядкою АКБ) та подальше його інвертування у змінний з чистим синусом на виході. За рахунок даної

технології досягається повна незалежність якості вихідної напруги від стану мережі.

Пристрої даної схеми побудови забезпечують найефективніший захист не тільки від перебоїв електропостачання, а й за значних відхиленнях напруги мережі від норми. Завдяки топології онлайн час переходу на автономний режим становить 0 мс, оскільки суті, перемикання працювати від батарей чи з АКБ на зовнішню мережу немає. Додавши до цього високу точність корекції напруги (відхилення від значень норми становить не більше 2%) та синусоїду ідеальної форми на виході, ДБЖ подвійного перетворення можна з упевненістю назвати універсальними для спільного використання з будь-якими, навіть особливо чутливими до якості електроживлення, приладами. Дані безперебійники відмінно себе зарекомендували при роботі з такими вимогливими якості напруги та форми сигналу навантаженнями, як електродвигуни, комп'ютерне та офісне обладнання, електронні блоки управління опалювальних котлів, відеоапаратура та навіть у мережах з вкрай низькою якістю електроенергії. На сьогоднішній день як єдиний серйозний недолік, що обмежує застосування онлайн ДБЖ, можна назвати їхню високу вартість

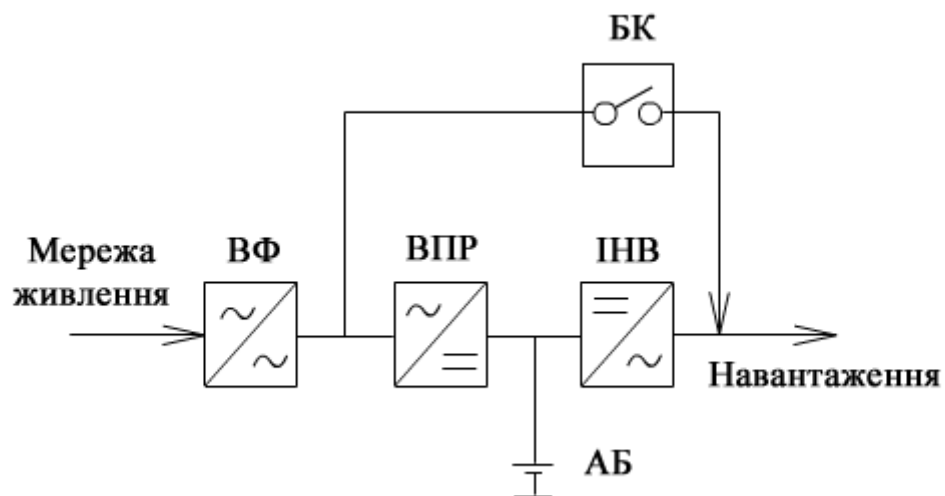


Рисунок 2.4 - Структурна схема ДБЖ із подвійним перетворенням енергії

Основні переваги ДБЖ з подвійним перетворенням енергії: висока точність стабілізації синусоїдальної вихідної напруги в мережному й автономному режимах; стабільна частота вихідної напруги при відхиленнях частоти мережі; відсутність перехідних процесів при перемиканнях з мережного режиму на автономний і навпаки; можливість виключити вплив нелінійного навантаження з високим крос-фактором на форму вхідного струму; підвищена надійність системи щодо забезпечення безперебійного живлення навантаження за рахунок автоматичного шунтування.

2.3 Висновки за розділом

Були розглянуті джерела безперебійного живлення, їх призначення. Проаналізовані основні типи джерел безперебійного живлення, їх переваги та недоліки

3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ ДЛЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ НА МОДЕЛІ

3.1. Постановка завдання на моделювання

Для резервного живлення пристроїв залізничної автоматики потрібна змінна напруга промислової частоти 50 Гц однофазна 220 В, або трифазна 380 В. Літієві батареї є джерелом постійного струму з напругою, що відповідає значенню з ряду напруг, які представлені виробниками батарей. Відповідно для заряджання акумулятора і для живлення від нього пристроїв в режимі резервного постачання необхідні перетворювачі напруги, що змінюють як род живлячого струму (змінний-постійний), так і значення напруги.

В цьому розділі наведено коротке описання перетворювачів напруги, і розроблена для них модель та наведені результати моделювання.

Для проведення моделювання вибрано пакет моделювання Simulink.Matlab.

Для моделювання вибрано літієву батарею з напругою зі стандартного ряду, а саме 48 В. Ємність батареї обрано 0.1 А ч. Така мала ємність була вибрана для ілюстрації процесів заряджання і розрядження батареї за прийнятний для моделювання інтервал часу, оскільки зі збільшенням ємності батареї час моделювання зарядження і розрядження батареї суттєво збільшується. Резервна батарея працює тільки певний період на час зникнення основної напруги. Процент розрядження батареї що переходить у режим зарядження обрано довільно на рівні 50 %.

3.2. Модель перетворювача для зарядження літієвої батареї

Для зарядження батареї використовується промислова мережа змінного струму 220 В частотою 50 Гц. Для перетворення її в постійну напругу на рівні 50-52 В, необхідної для зарядження батареї розроблено електричну схему, що складається з некерованого випрямляча напруги і перетворювача постійної напруги в постійну з необхідним рівнем. Мостова схема випрямляча змінної напруги показана на рис. 3.1 (а).

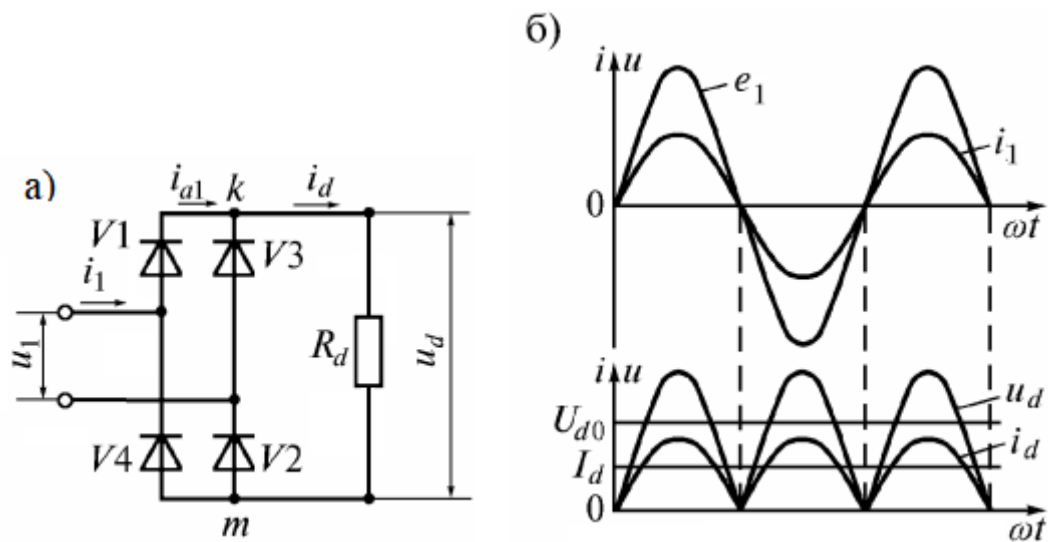


Рисунок 3.1 - Мостова схема випрямляча змінної напруги (а) і часові діаграми струму і напруги.

Зв'язок між діючим значенням змінної напруги і випрямленою напругою визначається формулою

$$U_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d.$$

Таким чином, при 220 В на вході випрямляча напруга на його виході становить $0.9 \cdot 220 = 198$ В. Для зарядження акумулятора необхідний пристрій, що понижує напругу

3.3. Перетворювач постійної напруги, що знижує напругу

На рис. 3.2(а) показана схема перетворювач постійної напруги (ППН), що знижує напругу, а на рис. 3.2(б) - діаграми струмів і напруг на навантаженні і колекторі транзистора. Діаграми відповідають припущенню, що транзистор і діод ідеальні, ємність конденсатора $C_f = \infty$, а струм у ланцюзі навантаження безперервний. Діод VD служить для пропускання струму, що проходить при вимиканні транзистора VT за рахунок енергії, запасеної індуктивності навантаження. Конденсатор C_f зменшує втрати джерела живлення, роблячи споживання енергії від нього більш постійним. Якщо транзистор VT включається в момент t_1 , напруга джерела живлення прикладається до навантаження (до навантаження прикладається імпульс напруги), а коли він вимикається в момент t_2 струм навантаження протікає за рахунок енергії, запасеної в індуктивності L_n , і замикається через діод VD. На момент t_3 процеси повторюються.

Для регулювання напруги на виході ППН змінюють тривалість включеного стану транзистора. Регулювання напруги, у якому частота подачі імпульсів на навантаження стала, але змінюється їх тривалість, називається широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ). ППН, в яких застосовується такий спосіб регулювання, називають широтно-імпульсними перетворювачами (ШИП).

Таким чином, при ШІМ частота і період проходження імпульсів постійні. Можливі й інші способи регулювання, при яких регулювання середнього значення напруги на виході проводиться зміною частоти імпульсів постійної тривалості (частотно-імпульсна модуляція) або одночасним зміною частоти і тривалості імпульсів (частотно-широтно-імпульсна модуляція). Найчастіше застосовується ШІМ. Тому далі розглядається лише ШІМ. Всі співвідношення нижче розглядаються для

безперервного струму в навантаженні, коли за час проходження струму через діод він не спадає до нуля. цю область, тому при проектуванні електроприводу вона, як правило, не враховується.

Чим більша тривалість включеного стану транзистора, тим більше середнє значення напруги на навантаженні U_n

$$U_n = \gamma U_d, \quad (3.1)$$

де γ - відносна тривалість включеного стану транзистора. Так як γ не може бути більше 1, цей ППН називається понижуючим. У понижувальному ППН γ відповідає відносній тривалості імпульсів напруги, що прикладаються до навантаження.

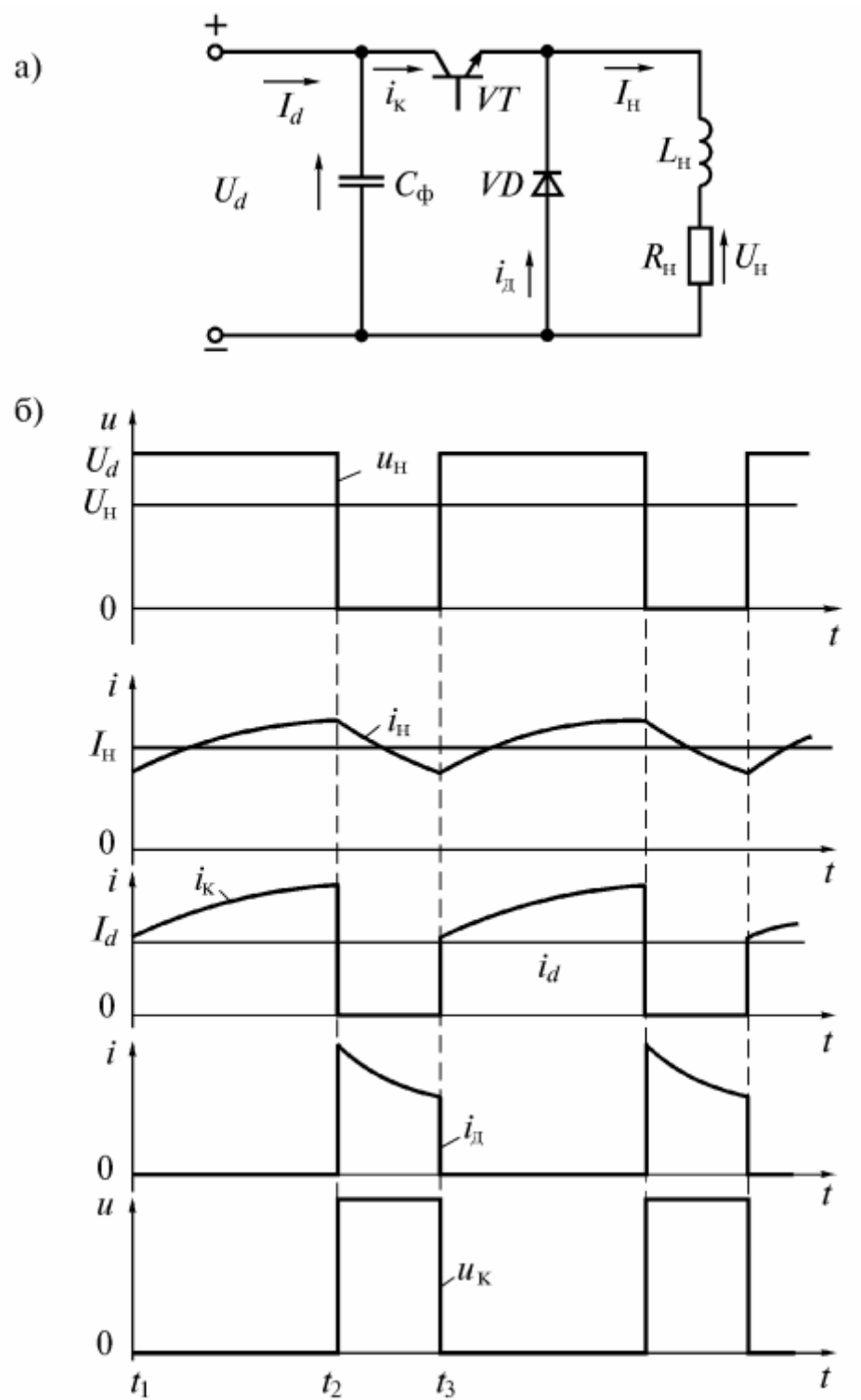


Рисунок 3.2 - Схема понижуючого ППН (а) та діаграми напруг і струмів, що ілюструють його роботу (б)

3.4. Модель перетворювача для зарядження батареї

Модель перетворювача для зарядження батареї в середовищі Simulink/Matlab наведено на рис. 3.3.

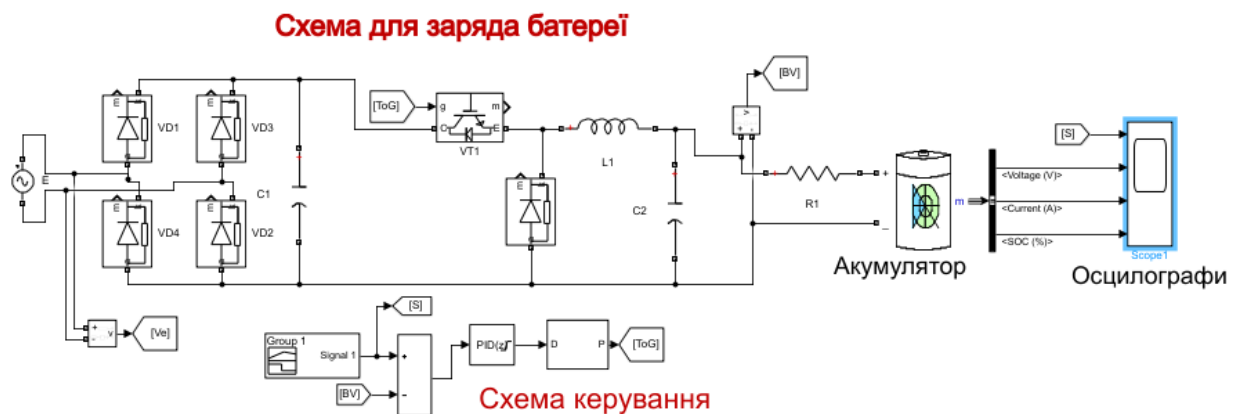


Рисунок 3.3 - Симулінк-модель пристрою для зарядження батареї.

Модель складається з випрямляча на чотирьох діодах і понижуючого ППН. Для управління IGBT транзистором використовується схема керування, яка задає певне значення коефіцієнта

$$\gamma = \frac{t_n}{T},$$

де t_n - тривалість імпульсів напруги, що прикладаються до затвору транзистора або інакше, - тривалість включеного стану транзистора; T - період імпульсів. Відповідно змінюється напруга на виході ППН

$$\gamma = \frac{t_n}{T},$$

$$\gamma = \frac{t_n}{T},$$

3.5. Перетворювач постійної напруги в змінну

Перетворювач для роботи батареї на навантаження змінного струму має забезпечувати на виході змінну однофазну або трифазну напругу частотою 50 Гц. Для цієї мети використовують автономні інвертори напруги (АІН). В роботі розглянуто моделювання трифазного АІН.

3.6. Трифазний автономний інвертор напруги

У схему трифазного АІН (рис. 3.4(а)) входять транзистори VS1-VS6 і включені паралельно їм зворотні діоди VD1-VD4. Навантаження $z_A - z_C$ підключено до загальної точки з'єднання транзисторів VS1, VS3, VS5 анодної та VS2, VS4, VS6 катодної груп інвертора. Паралельно до джерела напруги E_d включений конденсатор C_d великої ємності, через який протікають вищі гармоніки вхідного струму. В результаті роботи інвертора на його виході (фази А, В і С) формується трифазна симетрична система напруг u_A , u_B і u_C навантаження. Діаграма керування транзисторами інвертора показано на рис. 3.5 (а, б, в, г, д, е). Імпульси управління транзисторами анодної і катодної груп зміщені відносно один одного на третину періоду T роботи інвертора (120 ел. град), при цьому управління транзисторами однієї фази зводиться до поперемінного включення (вимкнення)) транзисторів анодної та катодної групи фази інвертора.

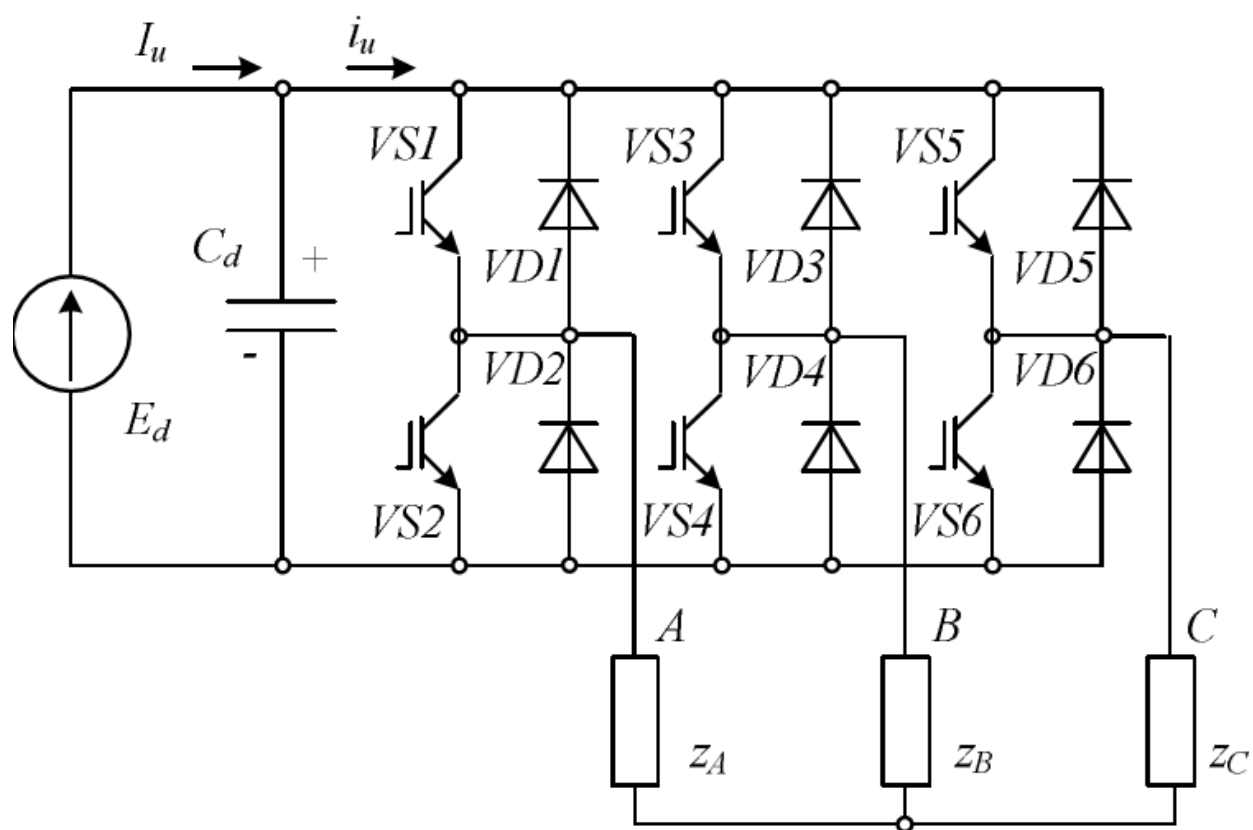


Рисунок 3.4 - Трифазний автономний інвертор напруги

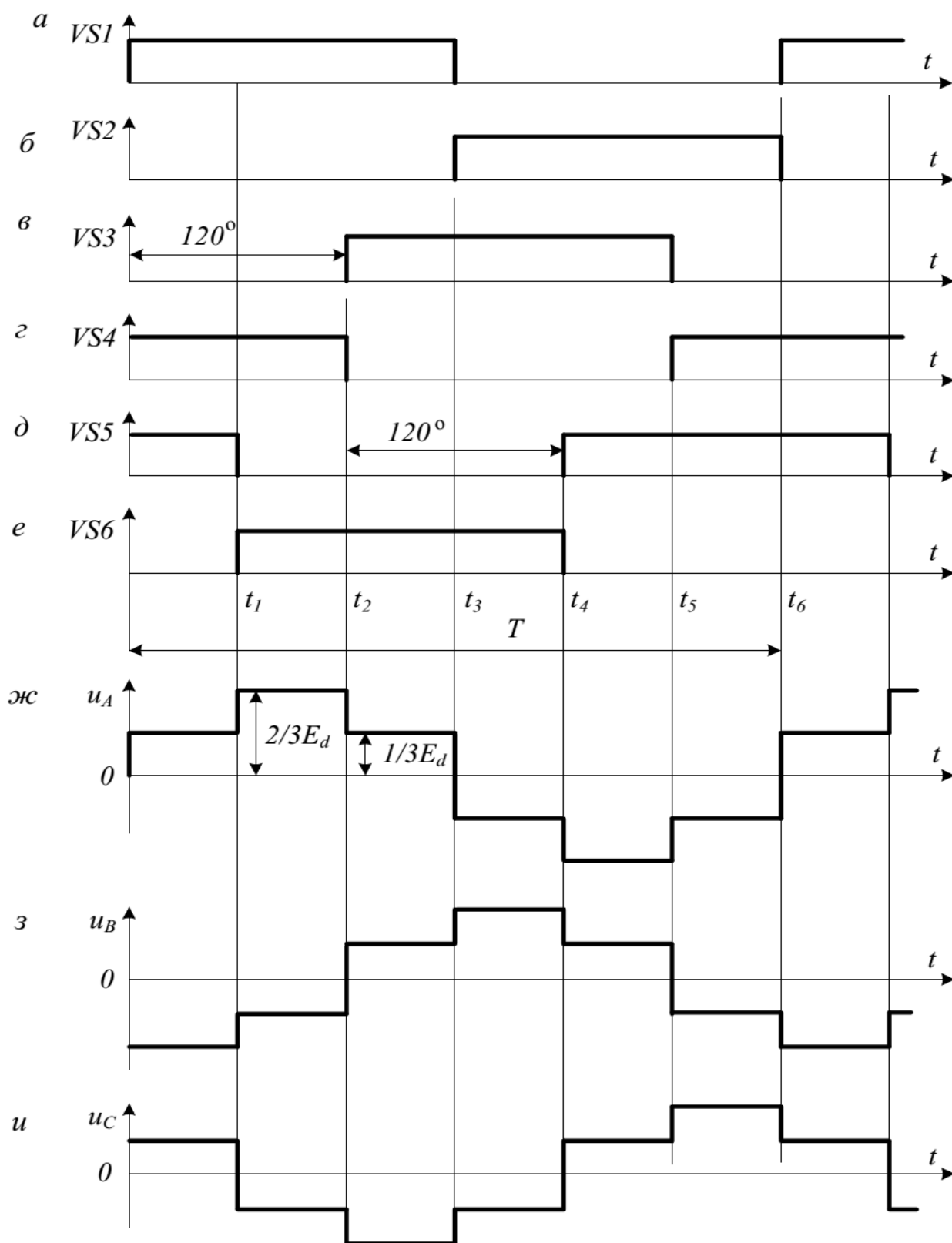


Рисунок 3.5 - Діаграми роботи трифазного АИН: а, б, в, г, д, е – імпульси керування транзисторами; ж, з, і – діаграми вихідної напруги

3.7. Модель перетворювача для роботи батареї на навантаження змінного струму

Модель перетворювача для зарядження батареї в середовищі Simulink/Matlab наведено на рис. 3.6.

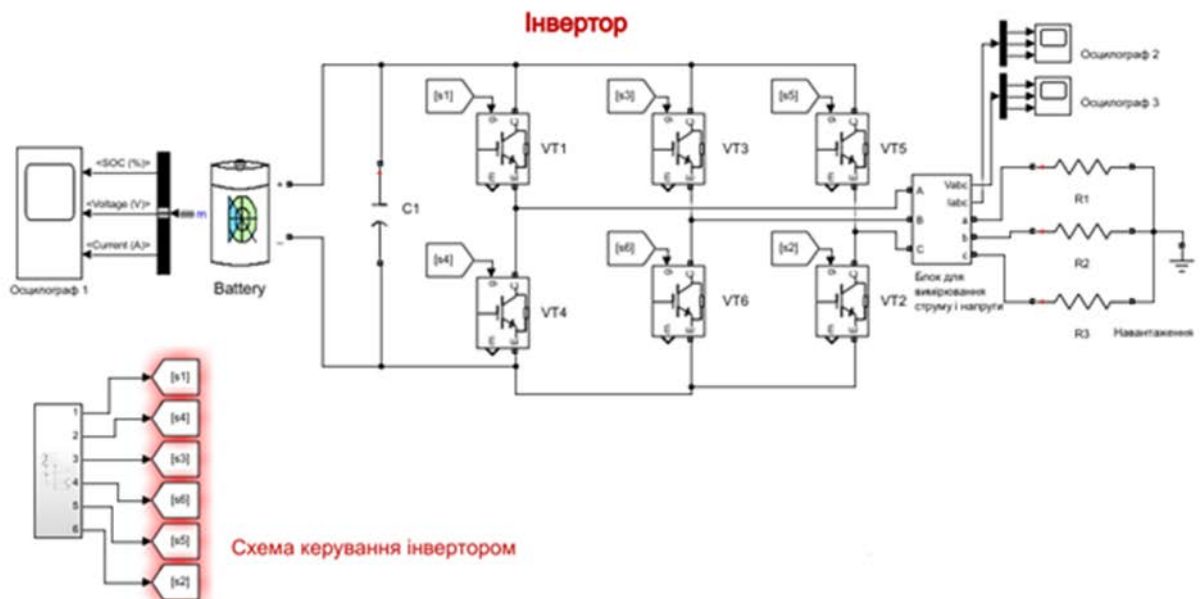


Рисунок 3.6 - Симулінк-модель пристрою для роботи батареї на навантаження змінного струму.

Модель складається з АІН на шести IGBT транзисторах. Для управління IGBT транзисторами використовується схема керування, яка задає управляючі імпульси на затворах транзисторів.

3.8. Результати моделювання зарядження батареї.

Результати моделювання зарядження батареї наведено на рис. 3.7. В процесі зарядження змінювали управляючу напругу на пристрої керування довільним образом, що приводило до зміни напруги на виході ППН і, відповідно на акумуляторі. Як видно з графіків це приводило до зміни

струму заряду i , як наслідок, до зміни швидкості зарядження. Заряд акумулятора збільшився за 5 с від 50 % до приблизно 50.23 %.

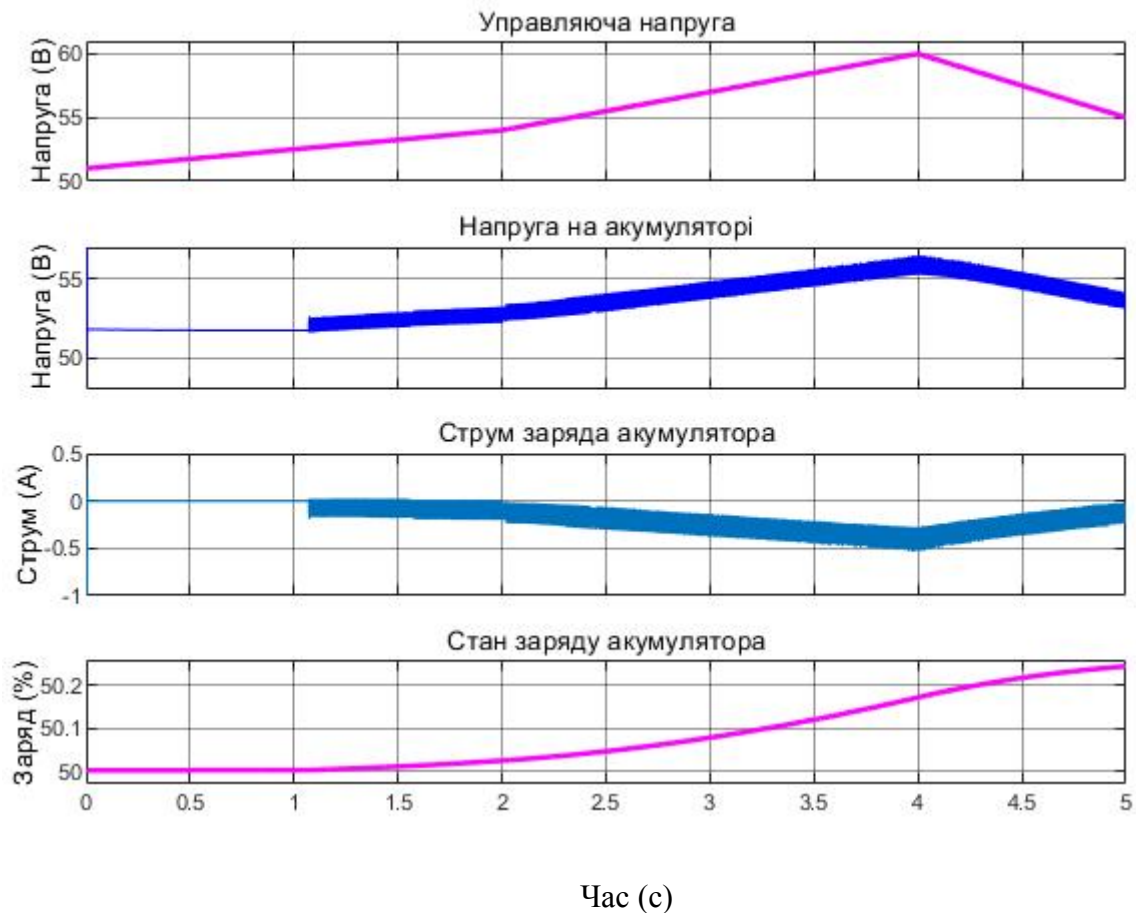


Рисунок 3.7 - Результати моделювання зарядження батареї.

3.9. Результати моделювання розрядження акумуляторної батареї при роботі на трифазне навантаження.

Результати моделювання розрядження акумуляторної батареї при роботі на трифазне навантаження наведено на рис. 3.8. Як видно з рисунку в процесі розрядження батареї після перехідного процесу 0,5 с напруга і струм батареї були практично не змінними. Моделювання проводили на протязі 5 с. Заряд акумулятора зменшився за цей час від 50 % до приблизно 45.6 %.

На рис. 3.9 наведено часові залежності трифазного струму на трифазному навантаженні.

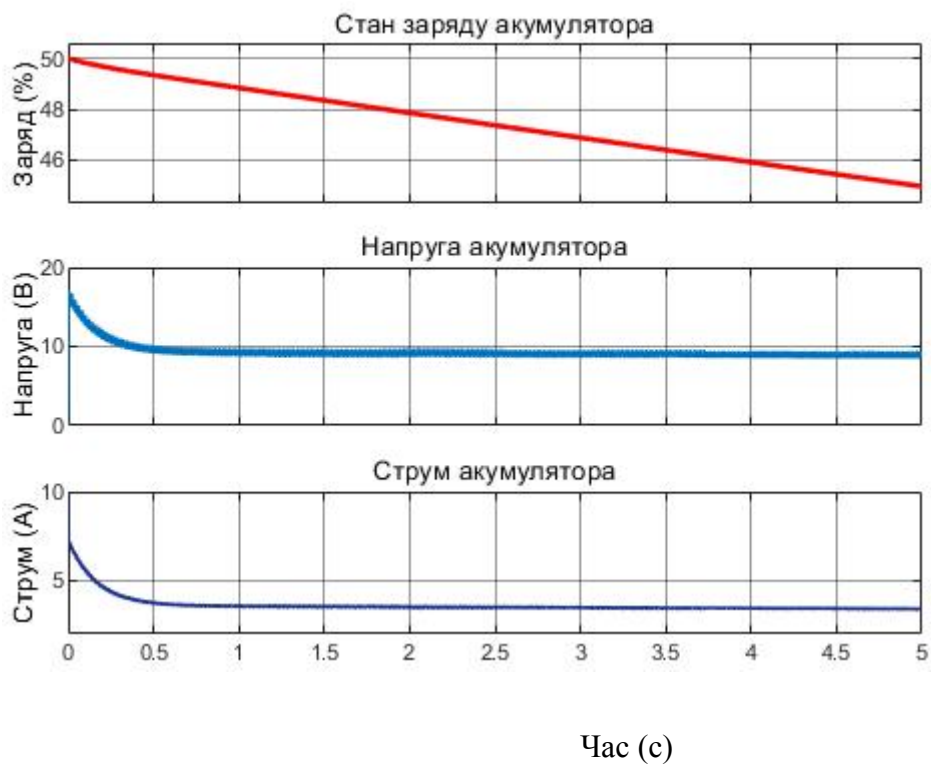


Рисунок 3.8 - Результати моделювання розрядження акумуляторної батареї при роботі на трифазне навантаження.

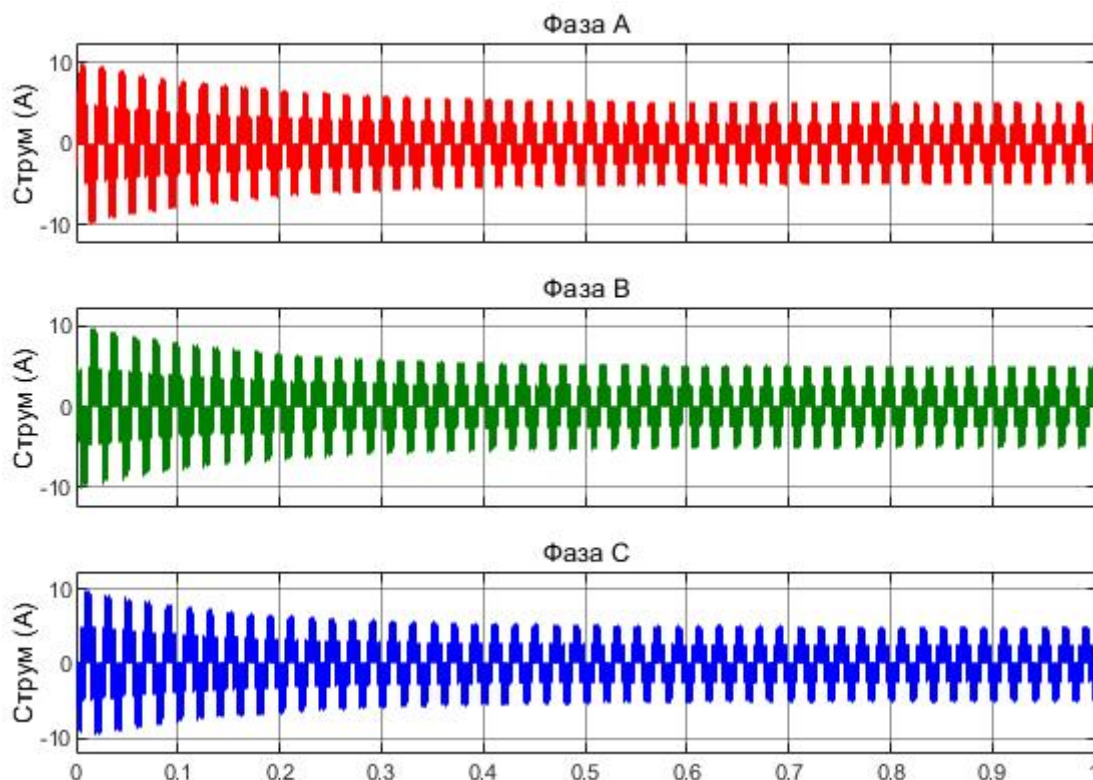


Рисунок 3.9 - Трифазний струм на виході АІН при живленні від батареї.

3.10 Висновки за розділом.

Розроблено моделі роботи літєвої акумуляторної батареї в режимі зарядження і розрядження при живленні на трифазне навантаження.

Проведено моделювання і отримано залежності струму, напруги на батареї і стану заряду батареї в процесі функціонування.

Література

1. Електроніка та мікросхемотехніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» / А. А. Щерба, К. К. Побєдаш, В. А. Святненко ; – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 360 с.
2. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. -К.: ТОВ "Видавництво"Обереги", 2000. Т.1. Елементна база електронних пристроїв.- 300с.
3. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. - Харків: Фоліо, 2002. Т.2. Аналогові та імпульсні пристрої.- 510с.
4. Руденко В.С., Сенько В.И., Трифонюк В.В. Основы промышленной электроники: Учебник для вузов. - Киев, Выща школа, 1985, - 400с.
5. Руденко В.С. та ін. Промислова електроніка: Підручник /В.С. Руденко В.Я. Ромашко, В.В.Трифонюк.- Київ, Либідь, 1993, 432 с
6. Руденко В.С., Сенько В.И., Трифонюк В.В. Приборы и устройства промышленной электроники. -Киев, Техника, 1989.
7. Скаржепа В.А., Новацкий А.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника: Лабораторный практикум. Под ред. А.А. Краснопрошиной. - К., Выща школа, 1989.
8. Скаржепа В.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника Сборник задач. Под ред. А.А. Краснопрошиной. - К., Выща школа, 1989,

9. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники: Учебник для вузов. - М., Высшая школа, 1980. - 424 с.
10. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 2 Цифрова схемотехніка: Підручник/Бойко В. І., Гуртій А. М., Жуйков В. Я. та ін. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 423с.: іл.
11. Руденко В .С, Сенько В .И., Трифонюк В .В. Промышленная электроника. - Киев, Техника, 1979,-503 с.
12. Основы промышленной электроники. /В.С. Руденко, Ю.А. Исаков, А.П. Платонов, В.И. Сенько и др./ Киев, Техника, 1976.
13. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учебное пособие для вузов. - Москва, Высшая школа, 1982,- 485 с.
14. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника: Учебное пособие для вузов. - Киев, Вища школа, 1983.
15. Электроника и микросхемотехника. /Под ред. А.А. Краснопрошиной: Учебник для вузов. - Киев, Вища школа, часть 1, 2, 1989.
16. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч.1,2/ Ю.П.Гончаров, О.А.Будьонний, 4. В.Г.Морозов, М.В. Панасенко, В.Я. Ромашко, В.С. Руденко. За ред. В.С.Руденко. – Харків: Фоліо. 2000. – 360 с.
17. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посібник / За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди. – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.
18. Жуйков В.Я.,Рогаль В.В., Буденний О.А., Пілінський В.В. Енергетична електроніка. Електронний підручник . Київ, 2008. 4. Лаврентьев Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов по направлению "Проектирование и технология электронных средств" / Б. Ф. Лаврентьев.- М. : Академия, 2010.- 333 с.