

User name:  
**Ірина Юрїївна Кісенко**

Check ID:  
**1008245736**

Check date:  
**09.06.2021 14:11:21 EEST**

Check type:  
**Doc vs My Database**

Report date:  
**09.06.2021 14:44:41 EEST**

User ID:  
**100006728**

File name: **Диплом\_Никулин**

Page count: **51** Word count: **8027** Character count: **59031** File size: **968.80 KB** File ID: **1008317895**

## 2.17% Matches

Highest match: **1.79%** with Library source (File ID: **EF-100000128698**)

No Internet search was conducted

0% Library sources

41

Page 53

## 0% Quotes

Exclusion of quotes is off

Exclusion of references is off

## 0% Exclusions

No exclusions

## Modifind

Text modifications detected. Find more details in the online report.

Replaced characters

42

## ВСТУП

Розвиток електротранспорту – це можливість не лише зменшити імпорт нафтопродуктів, а й запустити додаткові економічні процеси в Україні.

Також електротранспорт – екологічно чистий, його робота не супроводжується викидами шкідливих газів у повітря і не шкодить навколишньому середовищу. Що, безперечно, відповідає політиці України, яка ратифікувала Паризьку кліматичну угоду та зобов'язалася скорочувати викиди CO<sub>2</sub>.

Важливою перевагою розвитку екологічного виду транспорту для країни є його вплив на економіку. Збільшується кількість електрокарів – зростає й необхідність у розвиненій інфраструктурі та відповідних сервісних послугах. У результаті з'являються нові робочі місця, поживається бізнес та збільшуються надходження до бюджету.

Кількість електромобілів в Україні щорічно стрімко зростає. Наприклад, у січні 2018 р. зареєстровано у 6 разів більше електрокарів, ніж у січні минулого року.

У сучасному світі різку популярність набирає особистий електротранспорт: електроавтомобілі, мотоцикли, велосипеди та інші види транспортних засобів. Їх поєднує одне: необхідність використовувати портативне джерело живлення постійного струму у вигляді акумуляторної батареї.

Такий розвиток електротранспорту став можливий за рахунок доступності відносно дешевих батарей на основі з'єднань літію з іншими елементами (літій-полімерні, литій-залізо-фосфатні, літій-тітанатні та ін.) які мають досить високу ємність.

Метою дипломної роботи бакалавра є розробка відповідно до технічного завдання зарядного пристрою акумуляторної батареї електротранспортного засобу.

Для заряду акумуляторів необхідний портативний пристрій, який можливо взяти з собою у дорогу, та який живиться від побутової електромережі. Зарядний

пристрій має мати широкі вхідні параметри, оскільки стандарт напруги та частоти у різних країнах може відрізнятися.

Існуючі на сьогоднішній день системи такого типу або не відповідають необхідним параметрам якості та безпеки, або їх відношення “ціна/якість” занадто високе.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Види акумуляторів для електротранспорту

На даному етапі розвитку в електротехніці в основному використовується два види акумуляторів, це свинцево-кислотні і літій іонні. В свою чергу літєві акумулятори розрізняють за складовими осередків з яких вони зібрані: Li-ion, Li-pol, LiFePO<sub>4</sub> і LiNiCoMnO<sub>2</sub>. На рисунку 1.1 приведена діаграма розподілу різних видів акумуляторів на ринку.

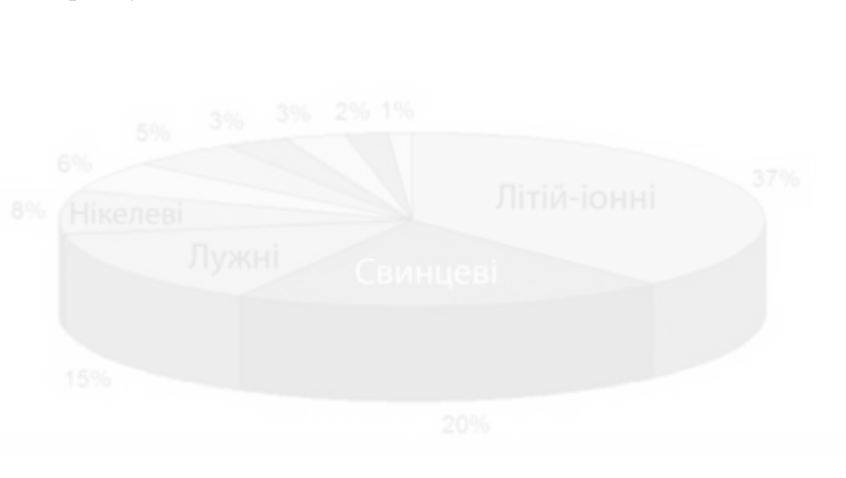


Рисунок 1.1 – Розподіл різних електрохімічних систем

У багатьох видах електротранспорту досі використовуються свинцево-кислотні акумулятори. Вони підходять для електровелосипедів, електромотоциклів, скутерів, електрокарів. Такі акумулятори є досить дешевими, але мають низку недоліків: дуже велику вагу, порівняно з іншими видами акумуляторів тієї ж самої ємності, та невеликий термін експлуатації.

Одне із сучасних джерел живлення для електротранспорту є гелеві акумулятори. При аналогічній ємності, порівняно з свинцево-кислотним, важить такий тип акумулятора майже вдвічі менше і при цьому має більш тривалий термін

гарантійної роботи. Також добре переносить низьку температуру, і має відмінні технічні характеристики після тривалого неробочого стану.

Технології виробництва літій-іонних і літій залізо-фосфатних акумуляторів схожі однак хімічний склад цих двох типів акумуляторів відрізняється. Це обумовлює різну номінальну напругу елементів першого і другого типу. У літій-іонних номінальна напруга 3.7 В, а у літій-залізо-фосфатних – тільки 3.2 В. Тому літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї при однаковій ємності і напрузі з літій іонними, – завжди більше їх за розміром і вагою, – приблизно на 20% і коштують дорожче на 25%-35% .

У літій-залізо-фосфатних акумуляторів є перевага. Вони мають більшу кількість циклів заряду – розряду в порівнянні з іншими типами літієвих акумуляторів. Так, вони приблизно в два рази перевершують за кількістю циклів літій марганцеві акумулятори та на 25 – 30% літій полімерні. І цей факт, дійсно давав би перевагу літій-залізо-фосфатним акумуляторам перед літій полімерними, якби не два недоліки: висока вага і ціна.

Літій-полімерний акумулятор – один з найсучасніших і безпечних підвидів літій іонних акумуляторів для електротранспорту, що поєднує в собі невеликі габарити та середню вагу серед літієвих акумуляторів на одиницю ємності і розумну ціну, крім того, літій-полімерні акумуляторні батарею не займаються при контакті з повітрям, на відміну від літій-іонних акумуляторів.

Літієві акумулятори на сьогоднішній день – найефективніші по питомій щільності енергії, що запасється на одиницю власної маси. Перші літієві акумулятори були випущені на початку 90-х років минулого століття, компанією Sony. З того часу, область застосування, весь час розширюється: від побутової електроніки і електроінструменту – до електромобілів, електричних автобусів і космічних кораблів.

Тому, за сукупністю характеристик, літій-іонні акумулятори набули найбільшого поширення в світі.

Джерела живлення на основі літію, зробили революцію в легкому електротранспорті. Ними оснащуються електробайки, електровелосипеди, електроскутери, електросамокати, електрокари.

Якщо дотримуватися правил експлуатації, то літєві акумулятори – цілком безпечні. У них тривалий термін служби. Літєві акумулятори можуть працювати до 10 років і годяться для переробки та повторного використання матеріалів, які в них містяться.

На рисунку 1.2 приведено порівняння енергоємності і потужності акумуляторів.

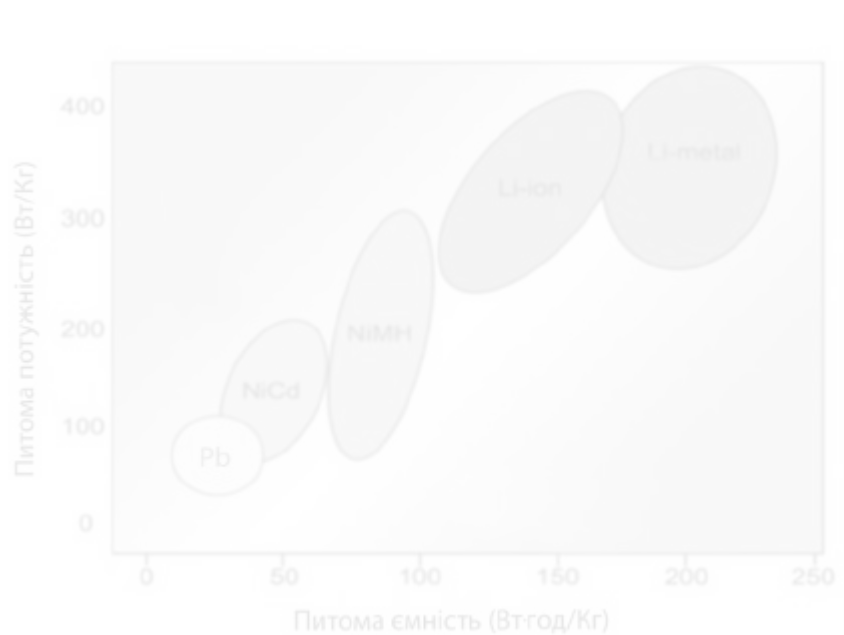


Рисунок 1.2 – Питома енергоємність і питома потужність акумуляторів

### 1.2 Способи заряду літій-іонних акумуляторних батарей

Зарядні і розрядні процеси в електричних батареях є хімічними реакціями, але літій-іонна система має свої нюанси. Рух енергії в батареї є частиною іонного потоку між анодом і катодом. Падіння ємності з часом пояснюється втратою іонів, але і

процеси внутрішньої корозії укупі з іншими дегенеративними ефектами також відіграють певну роль.

Зарядний пристрій для літій-іонної електрохімічної системи являє собою обмежений по напрузі пристрій, досить схожий на зарядний пристрій для свинцево-кислотних акумуляторів. Але є і відмінності - більш висока напруга на елемент, більш жорсткі допуски напруги і відсутність режиму підтримки при повному заряді. У той час як свинцево-кислотна електрохімічна система має деяку гнучкість порогових значень напруги, літій-іонна вимагає дуже суворої настройки зарядних пристроїв, так як перезаряд елементів недопустим. Літій-іонна є "чистою" системою і приймає рівно той заряд, який вона може акумулювати.

Літій-іонні акумулятори з такими традиційними катодними матеріалами як кобальт, нікель, марганець і алюміній зазвичай мають напругу 4,20 В на елемент. Допустимим відхиленням є  $\pm 50$  мВ на елемент. Деякі версії на основі нікелю заряджаються до 4,10 В на елемент; існують і спеціально оптимізовані під ємність моделі з напругою 4,30 В і вище на елемент. Підвищення напруги допомагає збільшити ємність акумулятора, але зловживання шляхом перевищення значень специфікацій може пошкодити акумулятор і навіть створити загрозу безпеці. Вбудована в акумулятор схема захисту захищає його від перевищення заданого напруги.

На рисунку 1.3 показані графіки струму і напруги літій-іонного акумулятора щодо етапів зарядки. Повний заряд досягається, коли струм зменшується до показника 3-5% від значення номінальної ємності.

Літій-іонні акумулятори вважаються повністю зарядженими, коли зарядний струм падає до заданого рівня. Замість режиму безперервної підтримки заряду, деякі зарядні пристрої використовують підзарядку тільки при падінні напруги акумулятора.

Рекомендована швидкість зарядки літій-іонних елементів, оптимізованих під ємність, становить 0,5-1 с, повне час заряду при такій швидкості складе 2-3 години. Виробники рекомендують використовувати швидкість зарядки 0,8 с і менше для продовження терміну служби акумулятора. Елементи які були оптимізовані під

показники потужності, можуть використовувати більш "швидкий" зарядний пристрій. Ефективність зарядки літій-іонної електрохімічної системи становить близько 99%, завдяки цьому відсутнє тепловиділення і акумулятор залишається прохолодним.

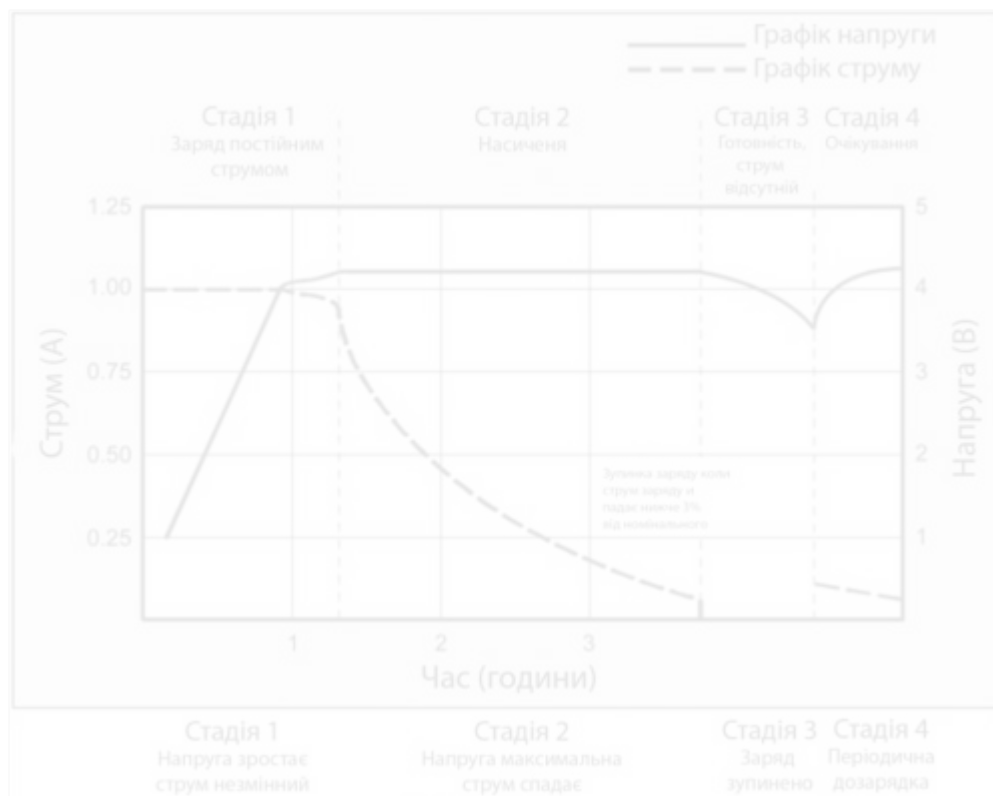


Рисунок 1.3 – Етапи зарядки літій-іонного акумулятора.

Деякі акумулятори все ж можуть трохи нагрітися (приблизно на 5 °С) при досягненні повного заряду. Це може бути викликано роботою схеми захисту і/або підвищеним внутрішнім опором. Якщо ж температура акумулятора підвищилася більш ніж на 10 °С при помірних швидкостях зарядки, це може говорити про його несправність, отже, необхідно припинити подальшу зарядку і експлуатацію.

Повна зарядка фіксується при досягненні акумулятором порогового значення напруги і падінням зарядного струму до 3 відсотків від номінального значення. Також



акумулятор вважається зарядженим, якщо напруга і струм досягли деякого значення і не можуть більше наблизитися до своїх порогових значенням. Причиною такої поведінки може служити підвищений саморозряд.

Збільшення струму зарядки, як не дивно, не прискорить процес досягнення повного заряду. Хоча акумулятор і швидше досягне пікового значення напруги, йому все ще буде необхідний режим насичення, який в нашому випадку займе більше часу. Зменшення часу першого етапу зарядки компенсується збільшенням часу другого. Високий струм зарядки, тим не менш, досить швидко заповнить акумулятор енергією приблизно до 70%.

Літій-іонному акумулятору не потрібна повна зарядка, як у випадку зі свинцево-кислотних, навіть навпаки - легкий недозаряд забезпечить кращі показники довговічності. Справа в тому, що при повному заряді в акумуляторі виникає досить висока напруга, яка носить деградаційний характер. Обмеження напруги або усунення режиму насичення продовжить термін служби акумулятора, але, з іншого боку, призведе до зменшення часу автономної роботи. Більшість зарядних пристроїв оптимізовані саме під ємність, тривалість терміну служби сприймається менш важливою.

Деякі недорогі зарядні пристрої взагалі можуть ігнорувати режим насичення, використовуючи більш спрощений метод зарядки, який триває одну годину або навіть менше. Така зарядка фіксує своє закінчення досягненням акумулятором певного значення напруги. Остаточний рівень заряду при такому методі складає приблизно 85% від номінальної ємності, що для більшості споживачів є достатнім рівнем.

Промислові ж зарядні пристрої часто використовують декілька занижене значення порогового напруги для продовження терміну служби акумулятора.

Застосування режиму повного насичення при заданому напрузі відсічки дає підвищення ємності приблизно на 10%, але призводить до стресу через високої напруги.

На самому початку зарядного процесу напруга акумулятора дуже швидко піднімається. Такій поведінці можна привести аналогію - підйом вантажу гумкою, коли в перший момент гумка натягується, а вантаж все ще на своєму місці. Показник використання ємності протягом процесу зарядки стабілізується щодо напруги акумулятора (рисунок 1.4).

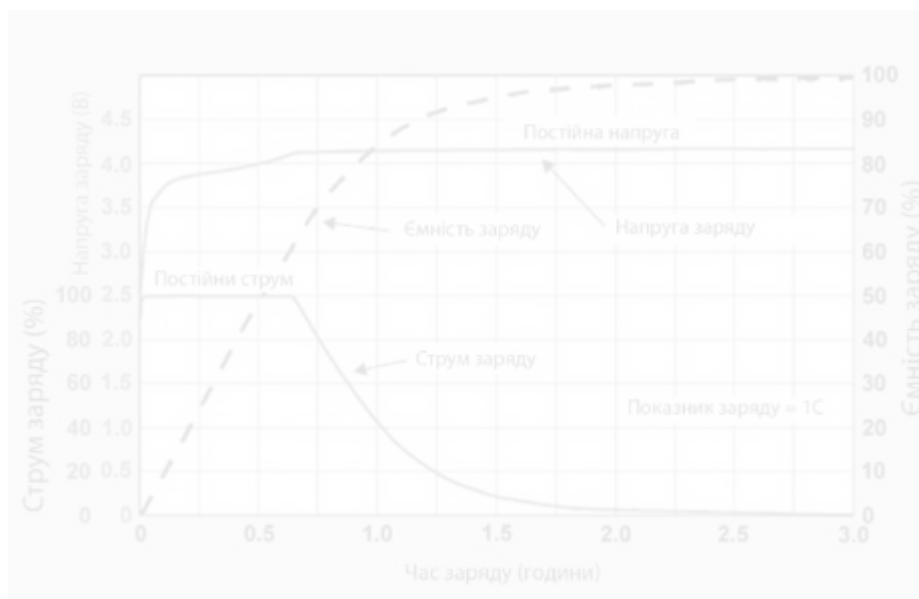


Рисунок 1.4 – Залежність напруги і ємності літій-іонного акумулятора від часу зарядки.

Такий ефект характерний для всіх електричних батарей. Чим вище струм зарядки, тим ефект "гумки" буде яскравіше виражений. Холодна температура зарядки або високе внутрішнє опір елемента можуть посилити прояв цього ефекту.

Ефект залежності ємності від напруги при зарядці схожий на ефект підйому вантажу розтягується гумкою.

Оцінка стану заряду шляхом зчитування напруги акумуляторної батареї непрактична, набагато більш точним індикатором служить напруга розімкнутого ланцюга акумулятора після декількох годин спокою. Та навіть напруга розімкнутого

ланцюга не є 100-відсотковим показником, так як воно залежно від температури. Рівень заряду смартфонів, ноутбуків і інших пристроїв оцінюється за допомогою кулонівського підрахунку.

Літій-іонний акумулятор не може поглинути перезаряд. При досягненні повної ступеня заряду необхідно відсікти зарядний струм. Додаток безперервного струму підтримки заряду може привести до металізації літію, що може спричинити проблеми з безпекою акумулятора. Щоб звести до мінімуму стрес, бажано не залишати заряджений літій-іонний акумулятор з'єднаним із зарядним пристроєм.

Після того, як процес зарядки закінчився, напруга акумулятора починає падати. Згодом, напруга холостого ходу стабілізується на рівні 3,70-3,90 В на елемент. Варто звернути увагу, що літій-іонний акумулятор, до якого застосовувалася зарядка в режимі насичення, буде тримати напругу високої більш тривалий час, ніж той, до якого цей режим не застосовувався.

Коли виникає необхідність зберігання літій-іонних акумуляторів підключеними до зарядного пристрою, деякі з них можуть мати функцію крапельного підтримки заряду, покликаною компенсувати невеликий саморазряд самого акумулятора і споживання енергії вбудованою схемою захисту. Такий зарядний пристрій спрацює при зниженні напруги акумулятора до 4,05 В на елемент і заряджає його знову до значення 4,20 В. Існує й інший режим зарядки, зі спрацюванням при напрузі 4,00 В на елемент і підзарядкою до 4,05 В. Використання такого режиму несе менше шкоди від акумуляторної батареї та продовжує термін його служби.

Деякі портативні пристрої можуть залишатися включеними або навіть експлуатуватися під час зарядки. Споживання енергії пристроєм в цьому випадку називається паразитним навантаженням і може викликати спотворення циклів зарядки. Виробники акумуляторів радять уникати паразитних навантажень, так як вони призводять до виникнення множинних міні-циклів заряду / розряду. Цього не завжди можна уникнути, наприклад, часто виникає необхідність експлуатації того ж ноутбука від електромережі. Виникає ситуація, коли акумулятор заряджається до 4,20 В на

елемент і тут же піддається розряду. Рівень стресового впливу на такий акумулятор досить високий, оскільки цикли виникають при високій напрузі, а часто - і при підвищеній температурі.

Портативний пристрій має бути відключено при зарядці. Це дозволить акумулятору безперешкодно досягти порогового значення напруги і точки насичення. Паразитне навантаження збиває з пантелику зарядний пристрій, впливаючи на напругу акумулятора і перешкоджаючи току насичення, можливі навіть ситуації, коли акумулятор вже повністю заряджений, але через вплив паразитного навантаження зарядний пристрій продовжує зарядку, що звичайно ж призводить до пошкодження акумулятора.

Літій-іонні акумулятори цілком безпечні в межах робочої напруги, але якщо по необережності перевищити напругу, це може привести до нестійкості акумулятора. Тривала зарядка напругою вище 4,30 В акумулятора, розрахованого на напругу 4,20 В, може привести до металізації літію на аноді. На катоді починають відбуватися окислювальні процеси, він стає нестабільним і виділяє вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ). Тиск в елементі зростає, і якщо зарядка триватиме, може спрацювати пристрій переривання струму, який відповідальний за безпеку при підвищенні внутрішнього тиску елемента до 1,000-1,380 кПа. Якщо з якихось причин тиск продовжує зростати далі, то при значенні в 3,450 кПа може розкритися мембрана безпеки. У будь-якому випадку, такі екстремальні значення тиску небезпечні, і можуть стати причиною пожежі або навіть вибуху акумуляторів.

Тепловий пробій, який і призводить до займання або вибуху, безпосередньо залежний від високої температури. Повністю зарядженому акумулятору потрібний менший температурний вплив для колапсу в порівнянні з частково зарядженим. Всі акумулятори на основі літію є більш безпечними при низькому рівні заряду, тому повністю заряджені акумулятори навіть заборонено перевозити повітряним транспортом (регламентований рівень заряду становить 30 відсотків).

Пороговою температурою для повністю зарядженого літій-кобальтового акумулятора є 130-150 °C, для літій-нікель-марганець-кобальтового (NMC) - 170-180 °C, а для літій-марганцевого - близько 250 °C. Літій-фосфатний володіє температурною стабільністю, навіть трохи кращою, ніж у літій-марганцевого.

Не тільки літій-іонна електрохімічна система небезпечна при перезаряді. Акумулятори на основі свинцю та нікелю також можуть розплавитися і спричинити пожежу при неправильній експлуатації. Правильно спроектоване зарядне обладнання має першочергове значення для всіх акумуляторних систем. Наявність функції контролю температури допоможе уникнути багатьох проблем.

Пристрій зарядки літій-іонних акумуляторів набагато простіше зарядки акумуляторів на основі нікелю. Немає необхідності в складному аналізі залежних від віку акумулятора змін напруги для визначення повного заряду. Процес зарядки може бути переривчастим, немає потреби в режимі насичення, як у випадку зі свинцево-кислотними акумуляторами. Ці нюанси дають велику перевагу для використання в сфері поновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі і вітряні турбіни, які не завжди можуть повністю зарядити акумулятор. Відсутність необхідності в режимі підтримки заряду значно спрощує і здешевлює зарядний пристрій. Зрівняльний заряд, який потрібно для обслуговування тих же свинцево-кислотних акумуляторів, не є необхідним для літій-іонних.

### 1.3 Схеми захисту літій-іонних акумуляторів

Електричні батареї можуть вивільняти високі показники енергії, тому логічно існування вимог безпеки. Нікелеві і літієві батареї регламентуються відповідно до стандарту IEC 62133. Цей стандарт вступив в силу в 2012 році, і в ньому вказуються вимоги до транспортування, зберігання і експлуатації батарей.

Основним пристроєм безпеки в батареї є запобіжник, який покликаний захищати від великих значень сили струму. Якість запобіжника досить важлива, так як спрацювання на малих значеннях сили струму робить батарею по суті марною, а

пропуск високих струмів призводить до пошкодження. Перемикач позитивного теплового коефіцієнта є пристроєм, який створює високий опір при надмірному струмі, і знижує опір при нормалізації струму.

Додатковим пристроєм захисту можуть виступати твердотільні перемикачі, які аналізують показники сили струму і напруги, і спрацьовують в разі їх перевищення. Такими перемикачами комплектуються всі літій-іонні акумулятори. Але все такі пристрої мають власний опір, яке додається до загального внутрішнього опору батареї і призводять до деякого падіння загального напруги.

Акумуляторні батареї з використанням літій-іонних елементів вимагають обов'язкової вбудованої системи захисту. Регламентовано стандартом IEC 62133, параметри безпеки літій-іонних елементів і акумуляторів повинні відповідати наступним вимогам:

- Наявність вбудованої системи перемикачів позитивного температурного коефіцієнта для захисту від надмірного струму.

- Наявність пристрою переривання електричного кола при перевищенні внутрішнього тиску елемента значення в 1000 кПа.

- Наявність клапана для скидання надлишкового тиску при перевищенні значення в 3000 кПа.

- Можливість плавлення сепаратора для уповільнення іонного потоку при перевищенні певного порогу температури.

Крім інструкцій, що регулюють внутрішній стан елемента, система захисту також охороняє елементи від надмірної напруги зарядки (зазвичай близько 4,30 В). Крім того, запобіжник відсікає струм, якщо температура оболонки елемента наближається до 90 °С. Присутній і захист від надмірного розряду, яка відключає живлення при значенні напруги елемента в 2,20 В.

Кожному електричному елементу в акумуляторі необхідний незалежний контроль напруги. Чим більше число елементів, тим складнішою стає система захисту. Довгий час послідовне підключення чотирьох елементів було максимальним в

споживчих пристроях, і система захисту для такого з'єднання була досить простою. Однак сучасні пристрої, такі як гібридні та електромобілі, вимагають значень напруги в кількості вольт, що має на увазі з'єднання дуже великої кількості елементів, відповідно і система захисту для такого акумулятора стає дуже складною.

Проте, апаратна система захисту здатна захистити акумулятор від стороннього впливу, такого як зовнішнє коротке замикання або несправність зарядного пристрою. Якщо ж дефект виникає всередині елемента, наприклад, в разі забруднення мікроскопічними металевими частинками, то система захисту тут мало чим допоможе. Для протидії таким внутрішнім дефектам розробляються спеціальні посилені і самовідтворювані сепаратори, які сьогодні вже використовуються в акумуляторах для електромобілів, хоча і мають досить велику вартість.

Зазвичай літій-іонний елемент розряджається до 3,0 В. Граничним нижнім значенням напруги є 2,5 В, при його подальшому зниженні спрацьовує система захисту і елемент відключається від загального ланцюга. Не рекомендується зберігати акумулятор в такому стані, так як саморозряд призведе до подальшого падіння напруги і система захисту може перевести його в "сплячий" режим. Більшість стандартних зарядних пристроїв не можуть заряджати "сплячі" елементи.

В активованому стані схема захисту має опір близько 50-100 кОм. Схема, як правило, складається з двох комутаторів, з'єднаних послідовно; один відповідає за **ВИСОКОВОЛЬТНЕ** відсічення, а другий - за низьковольтне. Великі акумуляторні системи потребують більш складних систем в порівнянні з одноелементними акумуляторами мобільних телефонів і планшетів, в яких набагато більше простіше регулювати значення струму і напруги.

Деякі недорогі зарядні пристрої можуть покладатися виключно на схему захисту акумуляторної батареї, і в випадках збоїв цієї схеми може виникнути загроза перезарядки і навіть виходу з ладу акумулятора. Використання зарядних пристроїв з належними алгоритмами зарядки є дуже важливим аспектом забезпечення безпеки.

Ще одна проблема може виникати при впливі на акумулятор статичної електрики. Ризик полягає в тому, що може вимкнутися твердотільний перемикач, і акумулятор по суті залишиться без захисту. Варто відзначити, що теплоутворення і розбухання не обов'язково є супутниками короткого замикання в акумуляторі, вибух або пожежу можуть статися і без цих симптомів.

#### 1.4 Існуючі схеми імпульсних джерел живлення

Імпульсне джерело живлення (далі ІДЖ) – це пристрій вторинного електроживлення, робота якого полягає у високочастотному перетворенні вхідної напруги. На відміну від трансформаторних джерел живлення, тут змінна мережна напруга спочатку випрямляється (в АС–DC перетворювачах), потім отримана постійна напруга перетворюється в прямокутні імпульси підвищеної частоти і певної скважності за допомогою силового ключа та подається на трансформатор (у випадку ІДЖ з гальванічною розв'язкою від мережі живлення) або безпосередньо на вихідний фільтр (в ІДЖ без гальванічної розв'язки).

В імпульсних пристроях застосовуються малогабаритні трансформатори - це пояснюється тим, що з ростом частоти підвищується ефективність роботи трансформатора і зменшуються вимоги до габаритів (перерізу) осердя, необхідного для передачі еквівалентної потужності. У більшості випадків таке осердя може бути виконане із феромагнітних матеріалів, на відміну від осердь НЧ трансформаторів, для яких використовується електротехнічна сталь. Вигляд типового ІДЖ представлено на рис 1.5.

На сьогодні стабілізація напруги в цих ДЖ забезпечується за допомогою зворотного зв'язку (ЗЗ), який дозволяє підтримувати вихідну напругу на відносно сталому рівні незалежно від коливань мережної напруги і величини навантаження. ЗЗ можна організувати різними способами. В імпульсних джерелах з гальванічною розв'язкою від живильної мережі найбільш поширеними способами є використання зв'язку за допомогою оптрона. Залежно від величини сигналу зворотного зв'язку



(залежить від вихідної напруги), змінюється скважність імпульсів на виході ШІМ-контролера. Якщо розв'язка не потрібна, то, як правило, використовується простий резистивний дільник напруги.



Рисунок 1.5 – Зарядний пристрій для мобільних телефонів – типовий представник імпульсних джерел живлення.

Розглянемо переваги ІДЖ (рівному за потужністю із лінійними):

1) Невелика вага. Досягається це за рахунок того, що з підвищенням частоти можна використовувати трансформатори менших розмірів за тієї ж потужності. Вага лінійних ДЖ залежить в основному від трансформаторів, які у потужних ДЖ є досить важкими;

2) Вищий ККД (до 90–98%). Досягається за рахунок того, що основні втрати в імпульсних стабілізаторах пов'язані з перехідними процесами в моменти перемикання ключового елемента. Оскільки основну частину часу ключові елементи знаходяться в одному зі стійких станів (або відсікання, або насичення) втрати енергії мінімальні;

3) Менша вартість. Завдяки масовому випуску уніфікованої елементної бази та розробці ключових транзисторів високої потужності, кінцева вартість ІДЖ значно нижча, ніж лінійного;

4) Вища надійність. ДЖ обчислювальної техніки, оргтехніки, побутової електроніки на сьогодні як правило імпульсні. Лінійні ДЖ малої потужності збереглися в основному тільки для живлення малопотужних систем керування високоякісної

побутової апаратури та для малопотужних керуючих пристроїв високої і надвисокої надійності, розрахованої на багаторічну безперервну експлуатацію при відсутності обслуговування або утрудненому обслуговуванні, наприклад, цифрових вольтметрах в електроцитах;

5) Широкий діапазон напруг живлення та частот. На практиці це означає можливість використання одного і того ж ДЖ для портативних цифрових пристроїв у різних країнах світу (Європа і США), у яких напруга та частота у стандартних мережних розетках відрізняється;

6) Покращений захист. Характеризується наявністю в більшості сучасних ІДЖ вбудованих систем захисту від різних аварійних ситуацій, наприклад від КЗ чи відсутності навантаження на виході;

Однак, не дивлячись на значні переваги, ІДЖ мають і суттєві недоліки, які і визначають сферу їх застосування:

1) Відсутність гальванічної розв'язки. Робота силової частини схеми без гальванічної розв'язки від мережі;

2) Випромінюють ВЧ завади. Усі без винятку ІДЖ є джерелами ВЧ завад, оскільки це пов'язано з самим принципом їх роботи. У зв'язку з цим часто неприпустимо застосування таких ДЖ для деяких завадочутливих видів апаратури;

3) Обмеження мінімальної потужності. Як правило, ІДЖ мають обмеження мінімальної потужності навантаження. Якщо потужність навантаження нижче мінімальної, пристрій або не запускається, або параметри вихідних напруг (величина, стабільність) можуть мати відхилення більші, ніж допускається.

Далі огляд існуючих рішень продовжимо із розгляду базових топологій, які використовують при проектуванні сучасних ІДЖ. Кожна топологія має свої переваги. В одній топології може бути низька вартість елементів, але при цьому вона забезпечує обмежену потужність; інша ж може давати надлишкову потужність, але бути більш дорогою і т.д. Для будь-якого ІДЖ будуть працездатні більш, ніж одна топологія, але

лише один з варіантів може забезпечити найкращі робочі характеристики за прийнятної вартості.

Отже, розглянемо базові топології сучасних імпульсних перетворювачів.

1) Понижуючий (або чоперний) імпульсний перетворювач (рис. 1.6) містить послідовно увімкнений ланцюг з комутуючого силового елемента VT, індуктивного накопичувача енергії L, опору навантаження  $R_H$  та під'єданого паралельно йому конденсатора фільтра  $C_{out}$ . Блокувальний діод VD увімкнено між точкою з'єднання ключа S із накопичувачем енергії L та загальним дротом.



Рисунок 1.6 – Понижуючий (чоперний) імпульсний перетворювач

При відкритому ключі VT діод VD закритий, енергія від джерела живлення накопичується в індуктивності L. Після того, як ключ S буде закритий (розімкнений), запасена індуктивним накопичувачем L енергія через діод VD передається в опір навантаження  $R_H$ . Конденсатор  $C_{out}$  згладжує пульсації напруги. Це типова схема сучасних DC-DC перетворювачів.

Перевагами такої схеми є значна потужність, яка може бути реалізована на такій топології (до 1 кВт), простота, невеликі розміри та невисока ціна, порівняно високий ККД (до 78%), широкий діапазон напруг живлення. Недоліки - відсутність гальванічної

розв'язки із входом (тому такі перетворювачі зазвичай використовуються у складі інших ДЖ).

Недоліки - відсутність гальванічної розв'язки із входом (тому такі перетворювачі зазвичай використовуються у складі інших ДЖ).

2) Підвищуючий (бустерний) імпульсний перетворювач (рис. 1.7) виконаний на тих же основних елементах, що і попередній перетворювач, однак вони по-іншому поєднані: до джерела живлення підключено послідовний ланцюжок з індуктивного накопичувача енергії  $L$ , діода  $VD$  та опору навантаження  $R_H$  з паралельно підключеним конденсатором фільтра  $C$ . Комутуючий елемент  $S$  включений між точкою з'єднання накопичувача енергії  $L$  з діодом  $VD$  та загальною шиною. Це типова схема сучасних DC-DC перетворювачів.



Рисунок 1.7 – Підвищуючий (бустерний) імпульсний перетворювач

При відкритому ключі  $VT$  струм від джерела живлення  $U_{in}$  протікає через котушку індуктивності  $L$ , в якій запасється енергія. Діод  $VD$  при цьому закритий, навантаження відключене від ДЖ, ключа і накопичувача енергії. Напруга на опорі навантаження  $R_H$  підтримується завдяки запасеній енергії на конденсаторі фільтра  $C_{out}$ . При розмиканні ключа ЕРС самоіндукції сумується з напругою живлення, запасена енергія передається в навантаження через відкритий діод  $VD$ . Отримана таким способом вихідна напруга перевищує напругу живлення на певну розраховану величину.

Перевагами такої схеми є досить велика потужність, яка може бути реалізована на такій топології (до 150 Вт), простота, невеликі розміри та ціна, досить високий ККД (до 80%), широкий діапазон напруг живлення.

Недоліки – відсутність гальванічної розв'язки із входом (тому такі перетворювачі зазвичай використовуються у складі інших ДЖ);

Далі розглянемо топології перетворювачів із гальванічною розв'язкою вхідних та вихідних кіл.

4) Прямоходові імпульсні перетворювачі (forward) (рис. 1.8) складаються із трансформатора TV, обмотки якого мають однакове фазування. До початку первинної обмотки підводять напругу ДЖ  $+U_{вх}$ , до іншого кінця первинної обмотки вмикається силовий ключ VT, який керується імпульсами  $U_{у}$ . До початку вторинної обмотки трансформатора послідовно увімкнено випрямний діод VD. Згладжувальний конденсатор C увімкнено паралельно навантаженню. «Землі» лівої та правої частин схеми розв'язані гальванічно.

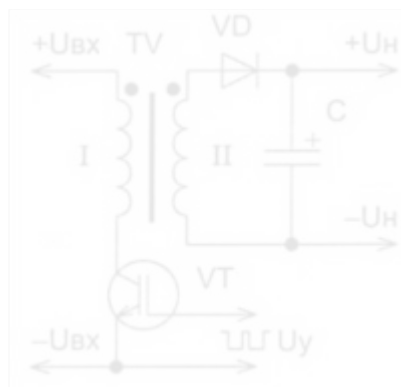


Рисунок 1.8 – Прямоходовий (forward) імпульсний перетворювач

Нехай протягом прямого ходу ключовий транзистор VT відкритий, через первинну обмотку трансформатора TV протікає струм, що створює магнітне поле в осерді. На вторинній обмотці наводиться напруга, яка випрямлена діодом VD,

згладжена конденсатором С та підведена до навантаження. Через навантаження протягом прямого ходу протікає струм. Протягом зворотного ходу полярність напруги на вторинній обмотці трансформатора TV стає протилежною. При цьому випрямний діод VD закритий, і струм через навантаження забезпечує конденсатор С.

Для того, щоб знизити залишкову індукцію і вберегти магнітопровід однотактного прямоходового перетворювача від заходу петлі гістерезиса в область насичення, в ньому на шляху магнітного потоку зазвичай створюють немагнітний зазор. Якщо цього буде недостатньо або введення зазору неприпустимо через зниження магнітної проникності, на магнітопроводі можна укласти додаткову обмотку рекуперації, підключену до ДЖ перетворювача через діод, завдяки чому протягом зворотного ходу енергія, запасені в магнітному полі, повернеться в джерело живлення.

Переваги такої схеми:

а) Наявність всього одного ключового транзистора, що спрощує конструкцію та зменшує розміри плати;

б) Магнітопровід імпульсного трансформатора має менші габарити, ніж магнітопровід трансформатора однотактного зворотноходового перетворювача за інших однакових умов експлуатації і близьких режимах роботи, простіший у виготовленні (у зворотноходових перетворювачах обов'язкове введення немагнітного зазору в серцевині трансформатора, тому виготовлення таких трансформаторів технологічно складніше);

в) Гальванічна розв'язка входу і виходу, що робить більш безпечними такі ДЖ;

Однак деякі переваги породжують і недоліки однотактної прямоходової схеми:

а) Наявність всього одного ключового транзистора. До закритого ключового транзистора прикладена подвоєна напруга живлення перетворювача і напруга індуктивного викиду, що накладає певні обмеження на вибір компонента;

б) Підмагнічування осердя, викликане несиметричним циклом перемагнічування петлі гістерезиса. Через це ККД такого перетворювача зазвичай

менший, ніж у двотактних перетворювачів із симетричним перемагнічуванням імпульсного трансформатора.

5) Зворотногоходові імпульсні перетворювачі (рис. 1.9) – різновид статичних імпульсних перетворювачів напруги з гальванічною розв'язкою первинних і вторинних кіл.

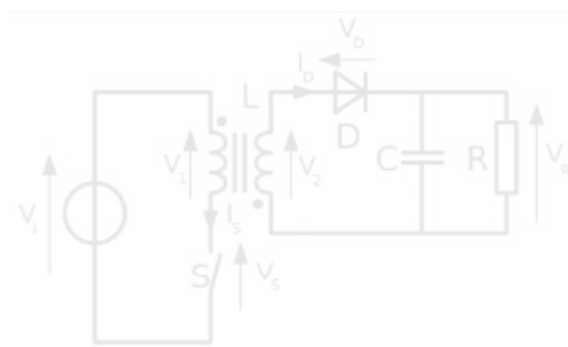


Рисунок 1.9 – Зворотногоходовий імпульсний перетворювач

При замиканні ключа  $S$ , до первинної обмотки дроселя  $L$  прикладається напруга ДЖ  $V_1$ . У дроселі починає накопичуватися енергія. При розмиканні ключа та відключенні первинної обмотки від ДЖ, струм через первинну обмотку дроселя різко зменшується, наводячи на вторинну обмотку ЕРС, що і відкриває діод  $VD$ . У вторинному колі починає протікати струм, який заряджає конденсатор  $C$  і живить навантаження  $R$ . Під час першого етапу (етапу накопичення енергії) навантаження живиться тільки за рахунок заряду, отриманого конденсатором під час другого етапу. Імпульси струму повторюються з частотою від 1 кГц до 100 кГц (в залежності від типу перетворювача). В результаті у вторинній обмотці протікає струм пилкоподібної форми.

Перевагами зворотногоходового перетворювача є:

- а) Нечутливість до КЗ у навантаженні;

б) Можливість регулювання вихідної напруги в широких межах, а також підтримання необхідної вихідної напруги в умовах зміни напруги мережі живлення;

в) У зв'язку з тим, що в зворотноходовому перетворювачі накопичувальний дросель підключений до первинної мережі і до навантаження в різні моменти часу, передача перешкод з мережі в навантаження і назад виключена, що теж є перевагою зворотноходового перетворювача.

Недоліками зворотноходових перетворювачів є:

а) Потужність обмежена енергією, що запасасться дроселем;

б) Підвищений рівень електромагнітних завад, що створюються як в мережі живлення, так і в навантаженні;

в) Великі габарити, у порівнянні з іншими імпульсними перетворювачами при тій же потужності;

г) Не працює на холостому ходу (без підключеного навантаження).

Розглянемо тепер двотактні перетворювачі.

б) Пуш-пульна (push-pull) топологія (рис. 1.10).

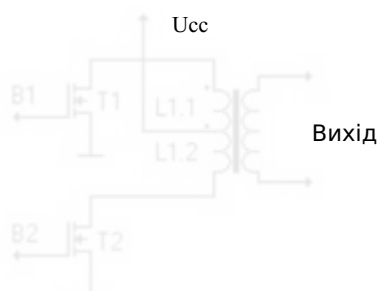


Рисунок 1.10 – Пуш-пульна (push-pull) топологія силової частини

Коли транзистор T1 відкритий, струм тече через верхню половину обмотки L1.1, потім транзистор T1 закривається і відкривається транзистор T2, струм починає протікати через нижню половину обмотки L1.2, так як верхня половина обмотки L1 включена своїм кінцем до + ЖИВ, а нижня – початком, то магнітне поле в осерді



трансформатора при відкритті T1 тече в одну сторону, а при відкритті T2 в іншу, відповідно на вторинній обмотці L2 створюється змінна напруга. Обмотки L1.1 і L1.2 виконуються ідентичними одна одній.

Переваги пуш-пульної топології:

а) Висока ефективність при роботі від низької напруги живлення (через кожен половину обмотки і транзистор протікає тільки половина необхідного струму).

Недоліки:

а) Викиди напруги на стоках транзисторів рівні подвоєній напрузі живлення (наприклад коли B1 відкритий, а B2 закритий, то струм тече через L1.1 в свою чергу в L1.2 магнітне поле створює напругу, яка рівна напрузі на L1.1, які підсумовуючись з напругою ДЖ впливають на закритий B2).

7) Напівмостовий перетворювач. Електрична схема напівмостового перетворювача представлена на рисунку 1.11. Схема містить два послідовно включених ключових транзистора, по черзі комутуваних за допомогою драйвера керованого ШІМ-контролером, два послідовно включених конденсатора. Первинна обмотка трансформатора включається між точкою з'єднання ключових транзисторів і середньою точкою конденсаторів. У процесі роботи до обмотки прикладаються різнополярні імпульси напруги амплітудою рівній половині напруги джерела живлення. Часто в схему послідовно з первинною обмоткою вводять блокуючий конденсатор, що забезпечує пропускання тільки змінного струму і запобігає підмагнічуванню осердя.

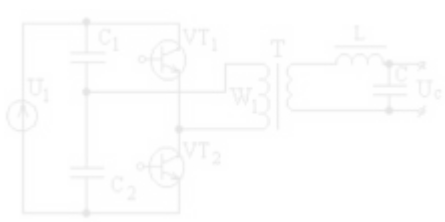


Рисунок 1.11 – Напівмостова типологія

Керуючі сигнали, що виробляються схемою ШІМ-контролера по черзі відкривають верхній (VT1) і нижній (VT2) силові ключі. Імпульси управління зміщені відносно один одного таким чином, щоб в той час коли один з транзисторів відкритий, інший був надійно закритий. Імпульси мають однакову скважність. Період повторення імпульсів -  $T$ . Додатково між імпульсами вводиться так зване мертве час  $t_{deadtime}$  необхідне для того щоб один ключ встиг надійно закритися перед тим як включиться інший. Тобто, затримка між імпульсами запобігає протікає наскрізних струмів через ключові транзистори.

#### Переваги:

а) малі пульсації на виході перетворювача, що забезпечується з одного боку за рахунок того що енергія передається в навантаження протягом кожного з тактів роботи перетворювача, з іншого за рахунок використання на виході LC-фільтра;

б) малі габарити трансформатора, що забезпечується за рахунок використання повного розмаху індукції в муздратеатрі;

в) тільки одна первинна обмотка трансформатора, що його спрощує конструкцію і знижує габарити;

г) ефективна рекуперація енергії запасастся в індуктивності розсіювання назад в джерело живлення за рахунок зворотних діодів силових ключів.

#### Недоліки:

а) Необхідність використання конденсаторного дільника напруги;

б) Високі вимоги до стабільності вхідної напруги;

в) Неможливість роботи в широкому діапазон вхідної або вихідної напруги.

7) Мостова топологія (приведена на рисунку 1.12). Коли транзистори T1 і T4 відкриті, струм тече через первинну обмотку трансформатора в одному напрямку, потім вони закриваються і відкриваються транзистори T2 і T3, струм через первинну обмотку починає текти в зворотному напрямку.



Рисунок 1.12 – Мостова топологія

Недоліки мостової схеми:

а) Необхідність використання чотирьох потужних транзисторів. Через це різко зростає вартість;

б) Подвоєне падіння напруги на транзисторах (падіння напруги на суміжних T1, T4 / T2, T3 транзисторах додаються);

Переваги:

а) Повна напруга живлення на первинній обмотці;

б) Відсутність викидів подвоєної напруги, властивих пуш-пулу;

в) Значна потужність (більше 2 кВт).

Наведемо порівняльну таблицю розглянутих топологій (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 - Порівняння топологій імпульсних джерел живлення

Топологія	Діапазон потужностей Вт	Діапазон вихідних напруг, В	Ізоляція вхід/вихід	Типовий ККД, %	Відносна вартість
1	2	3	4	5	6
Понижаюча	0 – 1000	5 – 40	немає	78	1
Підвищуюча	0– 150	5– 40	немає	80	1
Інвертуюча	0 – 350	5 – 40	немає	80	1

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
Прямоходова	0 – 350	5 – 500	є	78	1.4
Зворотноходова	0 – 350	5 – 500	є	80	1.2
Пуш-пульна	100 – 1000	5 – 1000	є	75	2
Полумостова	400 – 2000	5 – 1000	є	70	2.2
Мостова	400 – 2000	5 – 1000	є	73	2.5

Отже, розглянувши основні топології ІДЖ та знаючи основні параметри ДЖ, що проектується, оберемо топологію для нашого проекту.

Згідно завдання, пристрій повинне забезпечувати на виході 54.6 В постійної напруги за максимальної потужності навантаження 350 Вт (тобто, величина струму при цьому складатиме 6.4 А). Також нам необхідна гальванічна розв'язка низьковольтного виходу пристрою з високовольтним входом (мережна напруга живлення нашого пристрою – від 85 В до 265 В). Таким чином одразу відкидаються перші три топології (табл.1). Залишається прямоходова, зворотноходова, пуш-пульна та мостові топології.

На користь зворотноходової топології зазначимо, що вона цілком задовольняє нас за потужністю (до 350 Вт), можливістю працювати в широкому діапазоні вхідних напруг, та нечутливістю до КЗ на виході, що актуально для зарядних пристроїв при заряді в режимі CC-CV (в першу фазу заряду батарея має досить низький внутрішній опір і пристрій працює майже в режимі КЗ), а також вищим, порівняно із іншими, ККД (80%), меншою відносною вартістю порівняно с мостовими схемами.

Отже, обираємо зворотноходову топологію (рис. 1.13).

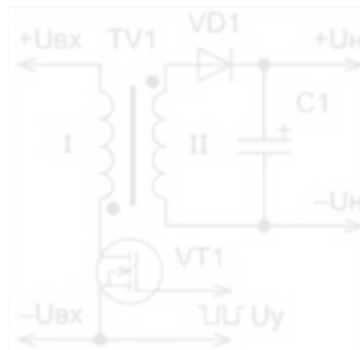


Рисунок 1.13 – Обрана топологія імпульсного ДЖ (звотноходовий)

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ

Структурна схема дозволяє розглянути принцип роботи пристрою або виробу в найзагальнішому вигляді. На структурній схемі зображують основні функціональні частини (блоки) виробу, їх призначення та лінії зв'язку між ними. Структурна схема наведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурна схема зарядного пристрою

Відповідно до технічного завдання побудуємо структурну схему пристрою для зарядки литий-іонної батареї, номінальна напруга якої у зарядженому стані дорівнює

54,6 В. Структура схема проекту зображена на рисунку 2.1 та включає в себе наступні елементи:

- Мережевий фільтр – електронний фільтр в колі живлення від електромережі. Виконаний у *LC*-фільтра (індуктивно-ємнісного) для зменшення високочастотних перешкод (диференційних та синфазних) як із пристрою у мережу, так і промислових синфазних завад із мережі у пристрій. Також цей блок носить захисну функцію – зменшує стартовий (пусковий) струм при увімкненні пристрою (застосовують термістор), захищає пристрій від стрибків напруги у мережі (застосовують варистор). У свою чергу передбачено також захист і мережі від перевантажень за аварійного режиму роботи ІДЖ (вихід з ладу силових ключів, пробій випрямних діодів чи ємностей фільтра наступного блоку). Для цього використовують запобіжник.;

- Вхідний випрямляч та фільтр – вузол, який слугує для випрямлення змінної напруги мережі та фільтрації пульсацій постійного струму. Виконаний на базі діодного моста та ємнісного фільтра;

- Силові ключі – вузол, який підсилює імпульси від блоку керування. Перетворює випрямлену мережну напругу у напругу із широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ). Складається з блоку силових MOSFET транзисторів та снабдерних ланцюгів для захисту силових ключів від комутаційних перенапруг.

- Імпульсний трансформатор – пристрій для перетворення напруги та струму однієї величини у іншу. Складається з Ш-образного осердя виконаного з ферриту марки МН3000 та трьох обмоток: первинної, вторинної та обмотки зворотного зв'язку.

- Блок керування – вузол, який забезпечує генерацію імпульсів керування підсилювачем потужності та стабільність вихідних параметрів напруги та струму. Складається з ШИМ контролера, драйверів керування силовими ключами та ланцюга зворотного зв'язку.

- Блок запуску та живлення ІМС відповідає за живлення драйверів силових ключів та блоку керування стабільною напругою як у початкові моменти при запуску, так і в установленому режимі роботи пристрою. Для живлення при запуску

30

використовується напруга, знята із виходу блоку «Вхідний випрямляч та фільтр», обмежена резистором та стабілізована лінійним стабілізатором.

- Вихідний випрямляч – вузол, який слугує для випрямлення змінної напруги вторинної обмотки імпульсного трансформатора. Складається з діодної зборки.

- Вихідний фільтр – вузол, який забезпечує фільтрацію імпульсних перешкод у вихідній напрузі. Виконаний у вигляді *LC*-фільтра.



### 3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

Даний розділ присвячено розрахунку ІДЖ. Одразу ж у ході розрахунків будуть обиратися і типи елементів, необхідних для виготовлення макету пристрою і подальшого тестування пристрою.

#### 3.1 Розрахунок імпульсного силового трансформатора

Розрахунок трансформатора може вестися різними шляхами. У нашому випадку він починається з визначення мінімального значення індуктивності, яка забезпечить режим безперервних струмів. Якщо індуктивність буде менше цього значення -- схема почне працювати з переривчастими струмами, рівень пульсацій зросте, а стабільність перетворювача опиниться під **загрозою**.

Мінімальна допустиме значення індуктивності визначається величиною необхідної енергії, що запасається при номінальному навантаженні. У свою чергу запасається енергія залежить від вхідної випрямленої напруги ( $U_{dc,in}$ ), величини струму через силовий ключ ( $I_{VT}$ ), робочої частоти ( $f_{sw}$ ) і коефіцієнта заповнення ( $T$ ). У гіршому випадку вхідна напруга приймає мінімальне значення ( $U_{dc,in,min}$ ), при цьому ключ працює при максимальному навантаженні ( $I_{VT,pick}$ ) і максимальному коефіцієнті заповнення ( $T_{on,max}$ ). Таким чином, вихідними даними для розрахунку будуть: мінімальна вхідна напруга, робоча частота, максимальний струм ключа і максимальний коефіцієнт заповнення.

Мінімальна вхідна напруга визначається параметрами мережі. Згідно завдання прилад повинен бути універсальний, та підходити для мереж 110/230 В, то, з урахуванням допустимої просадки, для розрахунків слід використовувати мінімальну чинне напруга, яке становить 85 В (мережа 110 В).

Ця напруга випрямляється і заряджає конденсатори вхідного фільтру до пікового значення яке розраховується за формулою (3.1):

$$U_{dc\_in\_min} = (U_{in\_min} - 2 \cdot U_d) \cdot \sqrt{2}, \quad (3.1)$$

де  $U_d$  – падіння напруги на випрямному діоді (для випрямних діодів на основі кремнію типове значення  $U_d = 0,5$  В).

Підставимо числові значення у вираз (3.1) та підрахуємо:

$$U_{dc\_in\_min} = (85 - 2 \cdot 0,5) \cdot \sqrt{2} = 118,8 \text{ В.}$$

Інші дані до розрахунку слід взяти з посібника користувача контролера. У нашому випадку це контролер серії TOPSwitch-HX datasheet якого наведено у Додатку А. Ключові характеристики контролера, які необхідні для розрахунку, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні характеристики контролера TOPSwitch-HX

Назва	Умове позначення	Величина	Одиниці виміру
Номінальна частота	$f_{sw}$	132	кГц
Максимальний коефіцієнт заповнення	$T_{on\_max}$	0,75	-
Споживання потужності	$P_{contr}$	600	мВт

Піковий струм **ОБМОТКИ** ( $I_{pri\_max}$ ) визначається за формулою. (3.2):

$$I_{pri\_max} = \frac{P_n}{U_{dc\_in\_min}}, \quad (3.2)$$

де  $P_n$  – номінальна потужність пристрою згідно завдання.

Підставимо числові значення у вираз (3.2) та розрахуємо:

$$I_{pri\_max} = \frac{350}{118,8} = 3 \text{ A.}$$

Мінімальна індуктивність первинної обмотки обчислюється за формулою (3.3):

$$L_{pri} = \frac{U_{dc\_in\_min} \cdot T_{on\_max}}{I_{pri\_max} \cdot f_{sw}}, \quad (3.3)$$

Підрахуємо мінімальну індуктивність, підставивши числові значення у вираз (3.3):

$$L_{pri} = \frac{118,8 \cdot 0,75}{3 \cdot 132 \cdot 10^3} = 0,23 \text{ мГн.}$$

Тут варто зазначити, що це значення припускає граничний випадок, коли струм в кінці періоду встигає опуститися до нуля. Для гарантованого забезпечення режиму безперервних струмів необхідно вибрати більшого значення. В результаті значення індуктивності вибирають на 20 - 30% більше розрахованого за формулою (3.3).

Оберемо індуктивність  $L_{pri}$  рівною 0,3 мГн.

Необмежене збільшення індуктивності має і негативні наслідки. Зокрема, це призводить до зростання накопиченої енергії і, відповідно, зростання енергії викидів напруги на силовому транзисторі при перемиканні. Наступним розрахунковим

параметром трансформатора стає коефіцієнт трансформації. Його можна розрахувати за формулою (3.4):

$$N = \frac{U_{dc\_in\_min} \cdot T_{on\_max}}{(U_{out} + U_d) \cdot (1 - T_{on\_max})} \quad (3.4)$$

де  $U_D$  – напруга на випрямному діоді, приймаємо рівною 0,5 В;

Підставимо числові значення у вираз (3.4) та підрахуємо:

$$N = \frac{118,8 \cdot 0,75}{(54,6 + 0,5) \cdot (1 - 0,75)} = 6,5.$$

Далі необхідно вибрати тип сердечника. Після цього можливо розрахувати перетин дроту і число витків первинної і вторинної обмоток.

В якості сердечника обираємо феритове Ш-образне осердя марки PC40EER42/42/20-Z datasheet якого наведено у додатку В. Ключові характеристики осердя, які необхідні для розрахунку, наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Основні характеристики осердя марки PC40EER42/42/20-Z

Назва	Умове позначення	Величина	Одиниці виміру
Номінальна габаритна потужність	$P_n$	500	Вт
Номінальна індуктивність на виток	$A_L$	5340	nH/T <sup>2</sup>
Втрата потужності	$P_{T\_lost}$	10,7	Вт

Для забезпечення режиму безперервних струмів число ВИТКІВ  $w_1$  первинної обмотки повинно перевищувати наступне значення (3.5):

$$w_1 > \sqrt{\frac{L_{prim}}{A_L}}, \quad (3.5)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.5) та підрахуємо:

$$w_1 > \sqrt{\frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{5340 \cdot 10^{-9}}} = 56.$$

Оберемо число витків  $w_1$  первинної обмотки рівним 60.

Число витків вторинною обмотки  $w_2$  знайдемо через коефіцієнт трансформації, який формула (3.6):

$$w_2 = \frac{w_1}{N}, \quad (3.6)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.6) та розрахуємо:

$$w_2 = \frac{60}{6,5} = 9,23 \approx 10.$$

Розрахуємо діаметр дроту обмоток, виходячи із того, що густина струму  $j$  для міді дорівнює 4,4 А/мм<sup>2</sup>.

Знайдемо середньоквадратичне значення струму первинної обмотки за формулою (3.7):

$$I_{pri} = I_{pri\_max} \cdot \sqrt{\frac{T_{on\_max}}{3}}, \quad (3.7)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.7) та підрахуємо:

$$I_{pri} = 3 \cdot \sqrt{\frac{0.75}{3}} = 1,5 \text{ A.}$$

Знайдемо діаметр дроту первинної обмотки за формулою (3.8):

$$d_{pri} = 1,33 \cdot \sqrt{\frac{I_{pri}}{j}}, \quad (3.8)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.8) та підрахуємо:

$$d_{pri} = 1,33 \cdot \sqrt{\frac{1,5}{4,4}} = 0,77 \text{ мм.}$$

Знайдемо значення струму вторинної обмотки за формулою (3.9):

$$I_{sec} = \frac{P_n}{U_{out} + U_d}, \quad (3.9)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.9) та підрахуємо:

$$I_{sec} = \frac{350}{54,6 + 0,5} = 6,35 \text{ A.}$$

Знайдемо діаметр дроту первинної обмотки за формулою (3.10):

$$d_{sec} = 1,33 \cdot \sqrt{\frac{I_{sec}}{j}}, \quad (3.10)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.10) та підрахуємо:

$$I_{sec} = 1,33 \cdot \sqrt{\frac{6,35}{4,4}} = 1,4 \text{ мм.}$$

У ході розрахунків було обрано силовий трансформатор з осердям марки РС40ЕЕР42/42/20-Z з первинною обмоткою яка містить 60 витків мідного дроту діаметром не менше 0,77 мм, та вторинною обмоткою яка містить 10 витків мідного дроту діаметром не менше 1,4 мм.

### 3.2 Розрахунок параметрів вхідних випрямних діодів та вхідного конденсатора

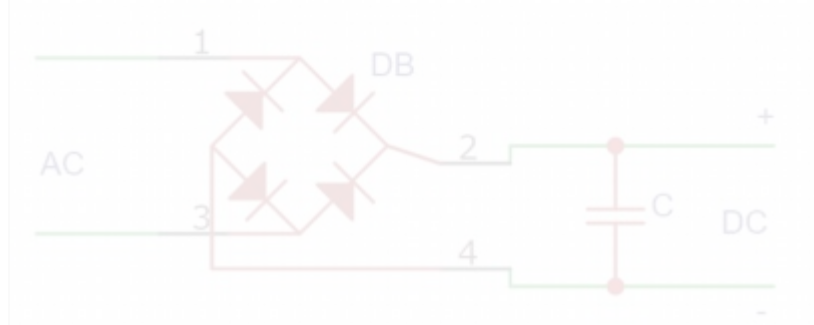


Рисунок 3.1 - Схематичне зображення вузла діодного моста та вхідного конденсатора

Максимальна зворотна напруга на діодах вхідного діодного моста дорівнює максимальній величині вхідної випрямленої напруги ( $U_D = U_{dc\_in\_max}$ ) та знаходиться за формулою (3.11):

$$U_D = U_{dc\_in\_max} = U_{in\_max} \cdot \sqrt{2}, \quad (3.11)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.11) та підрахуємо:

$$U_D = U_{dc\_in\_max} = 265 \cdot \sqrt{2} = 375 \text{ В.}$$

Максимальний струм, що буде текти крізь діод буде дорівнювати максимальному струму первинної обмотки ( $I_D = I_{VT} = 3 \text{ А}$ ).

В якості вхідних випрямних діодів обираємо діодний міст KBPC606 (BR606) datasheet якого наведено у додатку С. Ключові характеристики діодного моста, які необхідні для розрахунку, наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Основні характеристики діодного моста марки BR606

Назва	Умовне позначення	Величина	Одиниці виміру
Номінальний струм	$I_D$	6	А
Максимальна зворотня напруга	$U_{DC}$	600	В
Пряме падіння напруги на діодному мосту	$U_f$	1	В

Максимальна напруга на вхідному конденсаторі дорівнює максимальній величині вхідної напруги ( $U_{C\_in} = U_{dc\_in\_max}$ ).



Падіння напруги внаслідок розряду конденсатора  $\Delta U_{C\_in\_disch}$  та величина пульсацій на вхідному конденсаторі обумовлених його ESR  $\Delta U_{C\_in\_ESR}$  дорівнює 1-2% від величині максимальної [10] вхідної випрямленої напруги  $U_{dc\_in\_max}$  та розраховується за формулою (3.12):

$$\Delta U_{C\_in\_disch} \equiv \Delta U_{C\_in\_ESR} = U_{dc\_in\_max} \cdot 1..2\%, \quad (3.12)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.11) та підрахуємо:

$$\Delta U_{C\_in\_disch} \equiv \Delta U_{C\_in\_ESR} = 375 \cdot 0,02 = 7,5 \text{ В.}$$

Мінімальне значення ємності вхідного конденсатора розраховується за співвідношенням приведеним у формулі (3.13):

$$C_{out\_min} = \frac{\Delta I_{pri}}{2 \pi \cdot f_c \cdot \Delta U_{C\_in\_disch}} \quad (3.13)$$

де:  $\Delta I_{pri}$  – зміна вхідного струму (приймаємо рівним 6 А);

$f_c$  – частота зрізу фільтра, приймаємо рівною 100 Гц;

Підставимо числові значення у вираз (3.13) та підрахуємо:

$$C_{out\_min} = \frac{6}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 7,5} = 12,73 \text{ мкФ.}$$

Далі розрахуємо найбільш допустиме значення ESR вхідних конденсаторів за формулою (3.14).

$$R_{ESR\,in} = \frac{\Delta U_{C\,in\,ESR}}{I_{VT}}, \tag{3.14}$$

Підставимо числові значення у вираз (3.14) та підрахуємо:

$$R_{ESR\,in} = \frac{7,5}{1} = 7,5 \text{ Ом.}$$

В якості вхідного фільтра застосуємо електролітичний конденсатор марки JAMICON TK datasheet якого наведено у додатку D. Ключові характеристики діодного моста, які необхідні для розрахунку, наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Основні характеристики конденсатора JAMICON TK

Назва	Умове позначення	Величина	Одиниці виміру
Номінальна ємність	C	22	мкФ
Номінальна напруга	U <sub>n</sub>	450	В
Активний опір	R <sub>ESR</sub>	100	мОм

3.3 Розрахунок параметрів ключового транзистора, вибір типу охолоджувача та драйвера керування

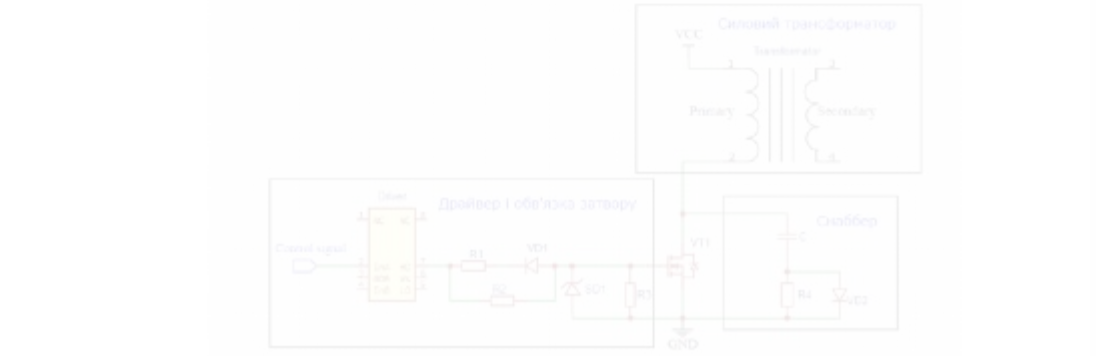


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення схеми керування ключовим транзистором

Максимальна напруга на транзисторі  $U_{VT\_max}$  вибирається виходячи з формули (3.15):

$$U_{VT\_max} = U_{dc\_in\_max} + U_{out}, \quad (3.15)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.15) та підрахуємо:

$$U_{VT\_max} = 375 + 54,6 = 429,6 \text{ В.}$$

Максимальний струм транзистора дорівнює максимальному струму первинної обмотки  $I_{VT\_max} = I_{pri\_max} = 3 \text{ А}$ , а номінальна частота роботи транзистора буде дорівнювати номінальній частоті контролера  $f_{sw}$ .

Знаючи ці данні в якості ключового транзистора вибираємо МОП транзистор марки STF6N65M2 datasheet якого наведено у додатку Е. Ключові характеристики транзистору, які необхідні для подальшого розрахунку, наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Основні характеристики транзистора марки STF6N65M2

Назва	Умовне позначення	Величина	Одиниці виміру
Номінальний струм	$I_d$	4	А
Номінальна напруга стік-витік	$V_{ds}$	650	В
Опір каналу у відкритому стані	$R_{ds(on)}$	1,2	Ом
Сумарний заряд затвору	$Q_{sum}$	16	нКл
Максимальна потужність розсіювання	$P_{tot}$	20	Вт

Для зменшення опору каналу та збільшення величини номінального струму з'єднаємо паралельно два транзистори.

В якості драйвера оберемо мікросхему IR1210 datasheet якої наведено у додатку F. Ключові характеристики драйвера, які необхідні для подальшого розрахунку, наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Основні характеристики драйвера марки IR1210.

Назва	Умовне позначення	Величина	Одиниці виміру
Номінальний вихідний струм	$I_{O\pm}$	1,5	А
Номінальна вихідна напруга	$V_{out}$	6-20	В
Тривалість перехідного процесу	$t_{on/off}$	85/65	нС

Потужність статичних втрат ( $P_{VT\_stat}$ ) на транзисторі розраховується за формулою (3.16):

$$P_{VT\_stat} = I_{pri}^2 \cdot R_{ds}, \quad (3.16)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.16) та підрахуємо:

$$P_{VT\_stat} = 1,5^2 \cdot 0,6 = 0,9 \text{ Вт.}$$

Потужність динамічних втрат в ключовому режимі транзистора визначається за формулою (3.17):

$$P_{VT\_switch} = f_{sw} \cdot \frac{I_{pri\_max} \cdot V_{dc\_in\_max}}{2} \cdot \Delta t, \quad (3.17)$$

де:  $\Delta t$  - час вимикання транзистора, залежне від умов комутації.

Оцінне значення часу перемикавання  $\Delta t$  можна оцінити за формулою (3.18):

$$\Delta t = \frac{Q_{sum}}{I_{out\_IC}}, \quad (3.18)$$

де  $I_{out\_IC}$  – вихідний струм драйвера.

Знайдемо час перемикавання скориставшись формулою (3.18):

$$\Delta t = \frac{16 \cdot 10^{-9}}{1,5} = 10,67 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Підставимо числові значення у вираз (3.17) та підрахуємо динамічні втрати:

$$P_{VT\_switch} = 132 \cdot 10^3 \cdot \frac{3 \cdot 375 \cdot 10,67 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,8 \text{ Вт.}$$

Сумарна розсіває ключовим транзистором потужність  $P_{VT\_max}$  визначається як сума статичних  $P_{VT\_stat}$  і динамічних  $P_{VT\_switch}$  втрат за формулою 3.19:

$$P_{VT\_max} = P_{VT\_stat} + P_{VT\_switch}, \quad (3.19)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.19) та підрахуємо:

$$P_{VT\_max} = 0,9 + 0,8 = 1,7 \text{ Вт.}$$

Розрахована потужність втрат менша ніж потужність, що здатен розсіяти транзистор, отже охолоджувач не потрібен.

### 3.4 Розрахунок параметрів вихідного діода та вибір типу охолоджувача

Максимальна зворотна напруга  $U_{outD\_max}$ , що прикладається до діода максимально на стадії накачування і знаходиться за формулою (3.20):

$$U_{outD\_max} = \frac{U_{dc\_in\_max}}{N} + U_{out}, \quad (3.20)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.20) та підрахуємо:

$$U_{outD\_max} = \frac{375}{6,5} + 54,6 = 112,3 \text{ В.}$$

На практиці необхідно вибирати діод з деяким запасом в 20-30%.

Середнє значення струму дорівнює вихідному току  $I_{outD} = I_{sec} = 6,35 \text{ А}$ .

Згідно з отриманими значеннями  $U_{outD\_max}$  і  $I_{outD}$  обираємо діод моделі MBR20200CTG datasheet якої наведено у додатку G. Ключові характеристики діода, які необхідні для подальшого розрахунку, наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7. Основні характеристики діода MBR20200CTG.

Назва	Умовне позначення	Величина	Одиниці виміру
Максимальна постійна зворотна напруга	$V_d$	200	В
Максимальний прямий струм	$I_d$	20	А

Продовження таблиці 3.6

Назва	Умовне позначення	Величина	Одиниці виміру
Ємність переходу	$C_T$	500	пФ
Гранична частота	$f_{max}$	5	МГц
Падіння напруги на діоді	$U_{Df}$	900	мВ

Потужність втрат  $P_d$  визначається як добуток середнього значення струму діода  $I_{outD}$  і падіння напруги на діоді  $U_{Df}$  при даному струмі за формулою (3.21):

$$P_d = U_{Df} \cdot I_{outD}, \quad (3.21)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.21) та підрахуємо:

$$P_d = 0,9 \cdot 6,35 = 5,715 \text{ Вт.}$$

В якості охолоджувача обираємо радіатор марки YB25 з розсіювальною потужністю 5 Вт.

### 3.5 Розрахунок вихідного LC-фільтра

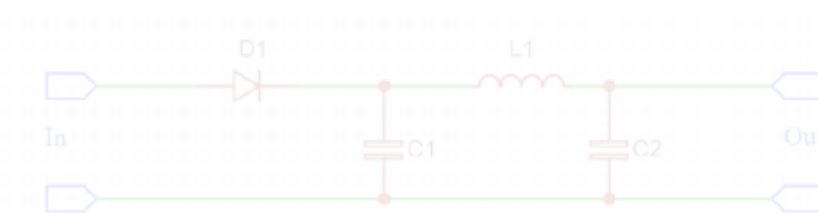


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення LC-фільтра

Розрахунок розпочнемо із вибору частоти зрізу фільтра. Типове значення  $f_c = 10$  кГц. Окрім цього, перетворювач буде підвищувати шум комутації, що вимагає більш ретельного трасування струмоведучих доріжок. Враховуючи падіння напруги, що залежить від частоти, вихідної ємності та струму навантаження, розрахуємо конденсатори вихідного фільтра. Визначимо мінімальну ємність конденсаторів ( $C_{out\_min}$ ) за формулою (3.22):

$$C_{out\_min} = \frac{\Delta I_{sec}}{2 \pi \cdot f_c \cdot \Delta U_{out}}, \quad (3.22)$$

де:  $\Delta I_{sec}$  – зміна вихідного струму (приймаємо рівним 6 А);

$f_c$  – частота зрізу фільтра, приймаємо рівною 10 кГц;

$\Delta U_{out}$  – допустиме значення падіння напруги на виході (згідно завдання).

Підставимо числові значення у вираз (3.22) та підрахуємо:

$$C_{out\_min} = \frac{6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,5} = 1910 \text{ мкФ.}$$

Далі розрахуємо найбільш допустиме значення ESR конденсаторів фільтра за формулою (3.23):

$$R_{ESR\_out} = \frac{\Delta I_{sec}}{2 \pi \cdot f_c \cdot C_{out\_min}}, \quad (3.23)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.23) та підрахуємо:



$$C_{out\_min} = 2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 1910 \text{ мкФ.}$$

Отже, було обрано два електролітичних конденсатора марки ЕСАР В43564, datasheet якої наведено у додатку Н. Ключові характеристики діода, які необхідні для подальшого розрахунку, наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Основні характеристики конденсатора марки ЕСАР В43564.

Назва	Умовне позначення	Величина	Одиниці виміру
Номінальна ємність	$C$	1500	мкФ
Номінальна напруга	$U_n$	200	В
Активний опір	$R_{ESR}$	6	МОм
Максимальний струм пульсацій	$\Delta I_{sec}$	2.1	А

Для зменшення активного опору, підвищення максимального струму пульсацій та номінальної ємності об'єднуємо паралельно три конденсатора.

Визначимо падіння напруги на конденсаторі за формулою (3.24):

$$\Delta U_{C\_out} = R_{ESR\_max} \cdot \Delta I_{sec}, \quad (3.24)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.24) та підрахуємо:

$$\Delta U_{C\_out} = 0,04 \cdot 6 = 0,24 \text{ В.}$$

Таким чином, отримане значення падіння напруги на виході менше, ніж зазначене у завданні ( $\Delta U_{C\_out} < (\Delta U_{out})$ ), що цілком нас задовольняє.

Розрахуємо тепер струм пульсацій при застосуванні даних конденсаторів (3.25).

$$\Delta I_{out\_max} = \frac{U_{ripple}}{R_{ESR\_max}}, \quad (3.25)$$

де  $U_{ripple}$  – напруга пульсацій на виході пристрою згідно завдання.

Підставимо числові значення у вираз (3.25) та підрахуємо:

$$\Delta I_{out\_max} = \frac{0,1}{0,04} = 2,5 \text{ A.}$$

Далі розрахуємо мінімальне значення індуктивності дроселя за формулою (3.26).

$$L_{react\_min} = \frac{\Delta U_{out} \cdot (1 - T_{on\_max})}{\Delta I_{out\_max} \cdot f_{sw}}, \quad (3.26)$$

Підставимо числові значення у вираз (3.26) та підрахуємо:

$$L_{react\_min} = \frac{0,24 \cdot (1 - 0,75)}{2,5 \cdot 132 \cdot 10^3} = 0,18 \text{ мкГн.}$$

Застосуємо дросель марки DPT20V-380 з номінальним струмом  $I_{react} = 8,4 \text{ A}$  та індуктивністю 37,8 мкГн.

### 3.6 Розрахунок схеми керування силовим ключем

Для розрахунку схеми керування контролером TOPSwitch-HX використовується програмне забезпечення від виробника, а саме програма для автоматичного розрахунку PI Expert.

Рисунок 3.4 – Схема керування, що згенерувала програма PI Expert

### 3.7 Проектування принципової схеми та 3D моделювання

На основі раніше розрахованих елементів та використовуючи стандартні схеми вузлів, які приведені у додатках G та F побудуємо принципову схему у кроссплатформенному середовищі розробки EasyEDA. Отриманна схема приведена на рисунку 3.5

Рисунок 3.5 – Принципова схема зарядного пристрою

Скориставшись програмою рейдингу зображення, яка входить до складу середовища EasyEDA сгенеруємо 3D модель пристрою. Отримана модель приведена на рисунку 3.6.

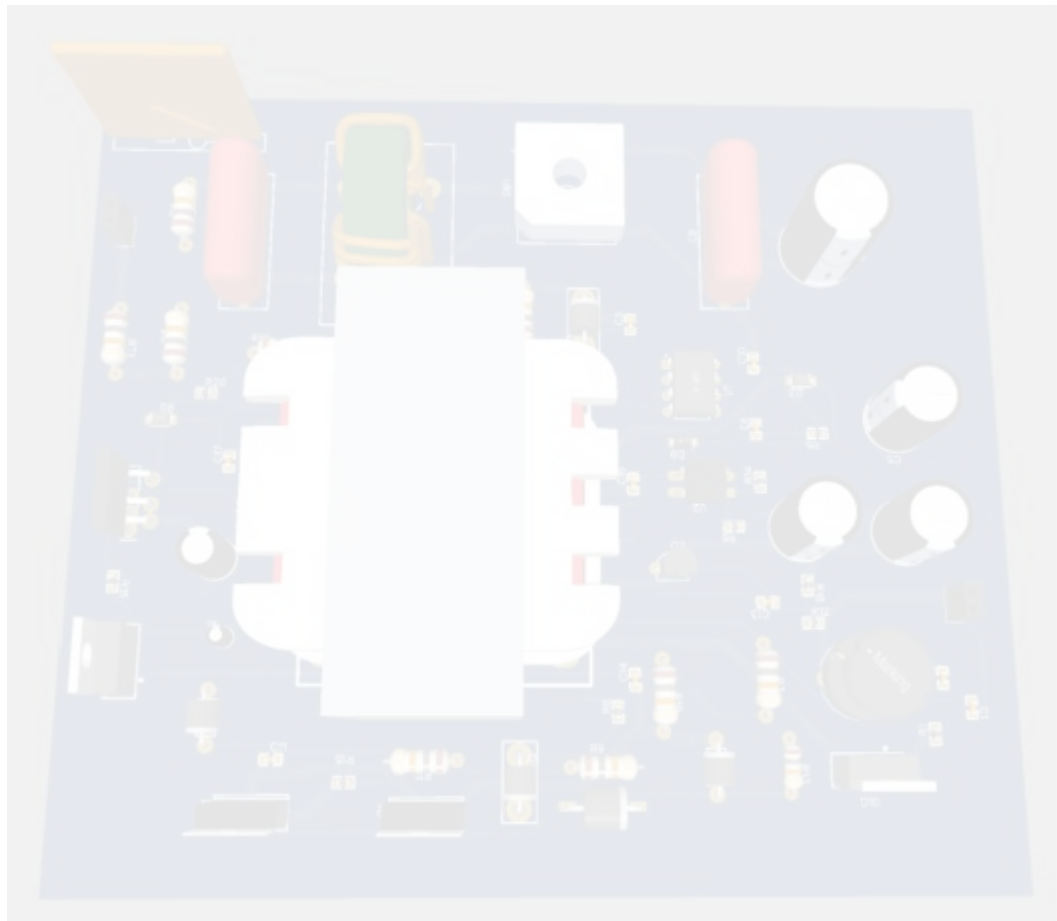


Рисунок 3.6 – 3D модель зарядного пристрою

## Matches

Library sources

41

1	External file	File ID: EF-100000128698	Institution: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»	2 Sources	1.79%
2	External file	File ID: EF-100000127300	Institution: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»	2 Sources	0.15%
3	External file	File ID: EF-100000116295	Institution: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»	34 Sources	0.11%
4	External file	File ID: EF-100000137334	Institution: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»	2 Sources	0.11%
5	External file	File ID: EF-100000126681	Institution: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»		0.1%