

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

*На правах рукопису*

**Волківський Вадим Борисович**

УДК 621.314 : 621.354.34

**НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ПІДВИЩЕНОЮ  
ЕФЕКТИВНІСТЮ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ  
ІМПУЛЬСНИМИ АСИМЕТРИЧНИМИ СТРУМАМИ**

Спеціальність 05.09.12 – Напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Дисертація на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник –  
Співак Віктор Михайлович  
кандидат технічних наук,  
доцент

Київ – 2007

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЗАСТОСУВАННЯ І СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ .....	13
1.1. Области застосування акумуляторних батарей .....	13
1.2. Основні параметри та типи акумуляторів .....	17
1.3. Дослідження впливу поляризації та імпульсних режимів заряду на якості акумуляторів .....	22
1.4 Схемні моделі заміщення електродних процесів .....	27
1.5. Методи заряду та залежність від них строку служби акумуляторів .....	31
1.5.1. Порівняння методів заряду .....	31
1.5.2. Метод заряду імпульсним асиметричним струмом та проблеми, пов'язані з його застосуванням .....	36
Висновки до першого розділу .....	40
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СХЕМНОЇ МОДЕЛІ АКУМУЛЯТОРА ТА АДАПТИВНИЙ ЗАРЯД .....	41
2.1. Вплив на характеристики акумулятора імпульсних режимів заряду .....	41
2.2. Перехідні процеси при подачі на акумуляторну батарею імпульсу струму .....	44
2.3. Ідентифікація параметрів схемної моделі акумулятора .....	52
2.4. Порівняння розрахункових кривих перехідних напруг з експериментальними .....	57
2.5. Адаптивний спосіб заряду .....	68
2.5.1. Алгоритм керування адаптивним зарядом .....	70
Висновки до другого розділу .....	72

РОЗДІЛ 3. СПОСОБИ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ ІМПУЛЬСНИМИ АСИМЕТРИЧНИМИ СТРУМАМИ З ПІДВИЩЕНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ .....	73
3.1. Способи підвищення ККД пристроїв заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами .....	73
3.2. Збереження енергії імпульсу розрядного струму в накопичувальному реактивному елементі .....	75
3.3. Використання імпульсу розрядного струму для заряду іншого акумулятора .....	83
3.4. Використання імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження .....	89
3.5. Порівняння ККД пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсними асиметричними струмами .....	92
Висновки до третього розділу .....	95
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ ІМПУЛЬСНИМИ АСИМЕТРИЧНИМИ СТРУМАМИ .....	97
4.1. Моделювання зарядного пристрою із зберіганням енергії імпульсу розрядного струму в накопичувальному реактивному елементі .....	97
4.2. Зарядний пристрій для групи акумуляторів з використанням імпульсу розрядного струму для заряду іншої акумуляторної батареї	105
4.3. Зарядний пристрій буферного акумулятора з використанням імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження .	115
Висновки до четвертого розділу .....	120

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ .....	122
5.1. Експериментальна установка для дослідження впливу заряду імпульсним асиметричним струмом на тривалість життя акумуляторів .....	122
5.2. Пристрій заряду акумуляторної батареї в експериментальній системі електроживлення з альтернативними джерелами енергії .....	138
5.3. Зарядний пристрій акумуляторної батареї в підсистемі електропостачання космічної мікроплатформи МС-Е .....	140
Висновки до п'ятого розділу .....	149
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	153
ДОДАТОК А .....	161
ДОДАТОК Б .....	162
ДОДАТОК В .....	163

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АБ	– акумуляторна батарея
АЦП	– аналогово-цифровий перетворювач
В	– випрямляч
ВДЖ	– вторинне джерело живлення
ВКС	– вимірювально-керуюча система
ГР	– глибина розряду
ДД	– додаткове джерело
ДЖ	– джерело живлення
ДН	– датчик напруги
ДС	– датчик струму
Е	– електромережа
ЕМП	– електромагнітні процеси
ЕРС	– електрорушійна сила
ЗП	– зарядний пристрій
І	– інвертор
К	– ключ комутатор
КА	– космічний апарат
ККД	– коефіцієнт корисної дії
МСК	– мікропроцесорна система керування
Н	– навантаження
НК	– накопичувальний конденсатор
НРЕ	– накопичувальний реактивний елемент
П	– перетворювач
ПЕП	– підсистема електропостачання
ПЗ	– програмне забезпечення
ПК	– персональний комп'ютер
СК	– система керування
ФБ	– фотобатарея

- ФЗІ – формувач зарядного імпульсу
- ФРІ – формувач розрядного імпульсу
- ХДС – хімічні джерела струму
- ШП – широтно-імпульсний перетворювач
- IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors – біполярний транзистор з ізольованим затвором
- MOSFET– Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor – польовий транзистор з МОН (метал-оксид-напівпровідник) структурою затвора

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку в системах електроживлення широкого застосовуються акумуляторні батареї різних типів. Для їх зарядки використовують різні зарядні пристрої – від найпростіших, в яких використовують заряд постійним струмом без контролю за зарядом, до високотехнологічних мікропроцесорних систем, де заряд контролюється за такими параметрами, як температура, напруга та струм. Однак в більшості цих пристроїв неможливо корегувати параметри заряду у процесі їх роботи, що унеможливує урахування стану, в якому знаходиться акумулятор, а також використовуються методи заряду, які досить легко реалізуються схемотехнічно, але мають недоліки у порівнянні з методами заряду імпульсним та асиметричним струмами. При імпульсному режимі заряду задається тривалість імпульсів, їхня амплітуда, скважність, форма, можна чергувати імпульси різної полярності (асиметричний заряд), тощо. Аналіз перехідних процесів при заряді акумуляторної батареї асиметричним струмом дозволяє отримати інформацію про характер явищ, що відбуваються в акумуляторі.

Вирішенню проблеми подовження строку експлуатації акумуляторів присвячено наукові дослідження вчених Жуйкова В.Я., Павлова В.Б., Подражанського Ю.М., проблемам електрохімічних джерел енергії – вчених Романова В.В., Хашева Ю.М., Сіднєєва І.М., проблемам заряду імпульсними струмами – вчених Черненко В.І., Литовченко К.П., Папанової І.І. Вирішенню проблем забезпечення енергоефективності та енергозбереження електротехнічного обладнання засобами силової електроніки, створення алгоритмів їх оптимального функціонування присвячено наукові дослідження вчених Шидловського А.К., Липківського К.А., Чехета Е.М., Юрченка М.М., Волкова І.В., Пентегова І.В., Сокола Є.І., питанням моделювання електромагнітних процесів – вчених Германа-Галкіна С.Г., Д'яконова В.П., Чорних І.В., питанням, пов'язаним з джерелами вторинного електроживлення і їх електромагнітної сумісності – вчених Найвельта Г.С., Пілінського В.В. та ін.

**Актуальність теми.** У зв'язку з широким використанням акумуляторних батарей у пристроях електроживлення на сьогоднішній день актуальною є проблема подовження їх строку експлуатації, що опосередковано приведе до зменшення забруднення навколишнього середовища та зменшить фінансові затрати на технічне обслуговування батарей та на оновлення парку батарей. Вирішення цієї проблеми може бути досягнуто шляхом вдосконалення пристроїв та способів заряду акумуляторних батарей, в тому числі заряду імпульсним асиметричним струмом, оскільки такий заряд подовжує строк їх служби. Підвищення ефективності цих способів та пристроїв надасть можливість їх більш широкому застосуванню.

Тому актуальною є задача розробки та вдосконалення пристроїв і способів заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами з підвищеною ефективністю та побудови алгоритмів ефективного керування зарядом акумуляторів.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” відповідно Закону України „Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки” по пріоритетному напрямку 5 “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі” (п. 5.1.4) на 2003-2004 р. у межах науково-дослідної роботи “Створення апаратних засобів та алгоритмів підвищення енергоефективності накопичення та перетворення сонячної енергії в складі електротехнічного комплексу на базі сучасних інтелектуальних систем керування та теорії економічної рівноваги” (№ДЗ/11-2003, ДР 0103U007646), а також державних бюджетних тем: „Розробка математичних основ алгоритмів мікропроцесорного керування силовими перетворювачами в автономних системах електроживлення” (№2518, ДР 0102U002214); “Наукові основи та алгоритми інтелектуального керування електротехнічним комплексом локального об'єкта з фотогенераторами” (№2724, ДР 0104U000130).



**Мета і задачі наукового дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка енергозберігаючих способів заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами, схем напівпровідникових перетворювачів з підвищеною ефективністю заряду і способів адаптивного керування цими перетворювачами.

Поставлена мета потребує вирішення наступних задач:

- аналіз характеристик акумуляторних батарей та методів їх заряду;
- розробка моделі акумуляторної батареї та адаптивного способу заряду;
- розробка алгоритмів адаптивного керування зарядом акумуляторних батарей;
- розробка способів та схем пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з підвищеною енергоефективністю;
- моделювання та аналіз електромагнітних процесів роботи запропонованих пристроїв.

*Об'єкт дослідження* – ефективність напівпровідникових перетворювачів заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами.

*Предмет дослідження* – способи підвищення ефективності напівпровідникових перетворювачів заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами.

*Методи дослідження* – при виконанні поставлених у роботі задач використовувалися: методи математичного і фізичного моделювання, методи обчислювальної математики, теорія електричних кіл, методи рішення диференційних рівнянь, математичні методи оцінки проведених досліджень. Основними інструментами дослідження були: пакети Matlab 6, 6.5 та 7, MathCAD 13, а також пакет розгалуження математичної системи Matlab – Simulink 4 та 5.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

- на основі аналізу електродних процесів розроблено схемну модель акумулятора, яка враховує поляризаційну складову повного внутрішнього опору та дозволяє розрахувати перехідні процеси при подачі зарядних і розрядних імпульсів струму;

- розроблений новий спосіб використання енергії розрядного імпульсу струму при заряді акумуляторів імпульсним асиметричним струмом дозволяє підвищити ККД зарядних пристроїв акумуляторних батарей на 12–34%;
- запропоновано адаптивний спосіб заряду, який шляхом зміни тривалості зарядних і розрядних імпульсів в залежності від стану акумулятора дозволяє істотно скоротити час заряду.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що наукові положення доведені до ступеню, придатного для практичного використання при розробці мікропроцесорної системи та алгоритмів адаптивного керування зарядом акумуляторів з використанням запропонованого в роботі енергозберігаючого способу заряду.

Розроблені схеми пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з підвищеною енергоефективністю, що дозволяє подовжити строк експлуатації акумуляторних батарей та зменшити енергоспоживання цих пристроїв і розроблений алгоритм керування адаптивним зарядом.

Результати роботи впроваджені в лабораторній дослідній установці на кафедрі “Промислової електроніки” НТУУ “КПІ”. Розроблена в роботі методика вибору та розрахунку акумуляторних батарей, а також схема електрична принципова передані для використання при конструюванні космічної мікроплатформи МС-Е у ДКБ „Південне” (м. Дніпропетровськ). Основні положення дисертаційної роботи застосовані у мікропроцесорній системі заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, в якій використаний розроблений алгоритм адаптивного заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, і у пристрої для формовки свинцевих акумуляторів асиметричним струмом на державному підприємстві „Науково-дослідний інститут „ХЕМЗ”, м. Харків (Додаток А). А також результати дисертаційної роботи впроваджені у системі безперебійного електроживлення гібридної лазерно-дугової технологічної установки для зварювання з мікропроцесорним

керуванням [61], розробленій відділом „Спеціалізованої високовольтної техніки і лазерної технології” Інституту електрозварювання НАН України ім. Є.О. Патона (Додаток Б). Теоретичні і практичні результати, отримані в дисертаційній роботі, використовуються при викладанні дисципліни “Сучасні напрямки електроніки” у навчальному процесі на кафедрі промислової електроніки НТУУ “КПІ” (Додаток В).

**Особистий внесок автора.** Автор самостійно виконав аналіз методів заряду акумуляторних батарей і дослідив вплив поляризації та імпульсних режимів заряду на робочі характеристики акумуляторів. Розробив енергозберігаючі способи заряду акумуляторів імпульсним асиметричним струмом і побудував схемну модель акумулятора з урахуванням електродних процесів, яка враховує поляризаційну складову повного внутрішнього опору і необхідна для організації зворотного зв'язку акумулятора із зарядною системою. Довів адаптивний спосіб заряду до ступеню, придатного для практичного використання в напівпровідникових перетворювачах заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами.

Роботи [8–10] написані особисто; в працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: в роботі [7] – запропоновані енергозберігаючі способи заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом; в роботі [53] – проведено моделювання електромагнітних процесів у пристрої для заряду енергоємних акумуляторних батарей; в роботі [54] – запропонований алгоритм роботи зарядного пристрою для проведення дослідження заряд-розрядних характеристик; в роботі [55] – запропонована структурна схема експериментальної установки для дослідження впливу на акумулятор заряду асиметричним струмом; в роботі [56] – запропоновано триланковий пристрій заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом; в роботі [57] – проведено аналіз електромагнітних процесів та оптимізація заряду накопичувального конденсатора.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідалися на семінарах наукової ради НАН України по комплексній проблемі “Наукові основи

електроенергетики” (грудень 2003 р., травень 2004 р, жовтень 2004 р., березень 2005 р., жовтень 2005 р., березень 2006 р. та вересень 2006 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Силова електроніка та енергоефективність” (2003–2006, м. Алушта); Міжнародній науково-технічній конференції “Електроенергетичні та електромеханічні системи” (2003, м. Львів); Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми сучасної електротехніки” (2004, м. Київ).

**Публікація результатів наукових досліджень.** По темі дисертації опубліковано 12 робіт, з них 9 статей в фахових наукових виданнях (з них 3 самостійно), 3 деклараційні патенти України.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 163 сторінки, у тому числі 160 сторінок основного тексту, 71 рисунок, 11 таблиць, список використаних джерел з 84 найменувань і 3 додатки.

# РОЗДІЛ 1

## ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЗАСТОСУВАННЯ І СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ

### 1.1. Області застосування акумуляторних батарей

*Застосування акумуляторних батарей у системах гарантованого (автономного) електроживлення (стаціонарні батареї).* В системах гарантованого електроживлення акумуляторні батареї використовують як буферний елемент, при цьому батареї заряджають або постійним струмом, або струмом, що змінюється при постійній напрузі. В цих системах використовують стаціонарні акумуляторні батареї, які експлуатуються у більш м'яких умовах, ніж транспортні. Вони завжди перебувають у нормальному положенні, тому можна не турбуватися про їхню ретельну герметизацію. Відсутність вібрації й інших механічних навантажень істотно спрощує вимоги до конструкції батарей, акумуляторів й електродів. У багатьох випадках стаціонарні установки розміщуються в приміщеннях і працюють в оптимальному температурному режимі. Однак у певних областях застосування, наприклад на метеостанціях, що не обслуговуються, стаціонарні установки працюють у важких кліматичних умовах, при температурах від  $-50$  до  $+50$  °С. Стаціонарні батареї часто мають більшу абсолютну ємність – тисячі ампер-годин. Розмір і маса звичайно не мають вирішального значення, тобто до джерел струму не пред'являються вимоги високих питомих характеристик. Багато стаціонарних батарей розраховані на тривалу роботу, тому вони повинні мати великий термін служби, високу надійність, а також малий саморозряд [4, 18, 28, 51].

Найпростіша структурна схема однієї з систем гарантованого електроживлення приведена на рис. 1.1.

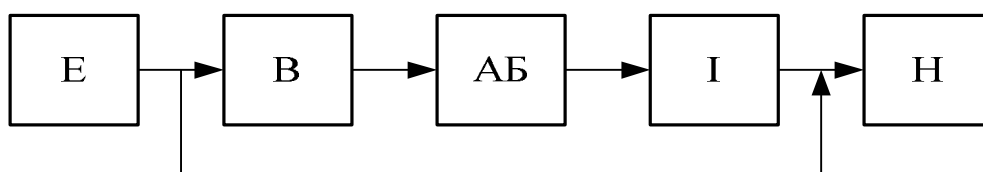


Рис. 1.1. Структурна схема системи гарантованого (автономного) електроживлення

Система містить у собі: 1) випрямляч (**В**), 2) акумуляторні батареї (**АБ**) для накопичення електроенергії, 3) інвертор (**І**), що перетворює постійну напругу в змінну, 4) навантаження (**Н**) і підключається до електромережі (**Е**). Напруга з електромережі (**Е**) використовується як для заряду акумуляторних батарей (**АБ**), так і для живлення навантаження (**Н**). У разі аварії в електромережі навантаження буде живитись від акумуляторних батарей через інвертор (**І**). Таким чином забезпечується гарантоване електроживлення.

**Застосування акумуляторних батарей у локальних об'єктах.** Локальні об'єкти являють собою відносно невеликі електротехнічні комплекси, що включають визначену кількість генераторів і навантажень, які мають або не мають зв'язки з електричною мережею і виконують єдину задачу. Застосування акумуляторних батарей у локальних об'єктах є необхідним у тому випадку, якщо немає доступу до електричної мережі або є можливість використання і накопичення сонячної і вітрової енергії.

Розрізняють автономні і гібридні системи електроживлення локальних об'єктів. *Автономні системи* використовуються у віддалених місцях, де немає доступу до мережі підприємств комунального обслуговування. Живлення навантаження в таких системах здійснюється від джерела постійного або змінного струму. *Гібридною системою* називається автономна система, що використовується в комбінації з іншим джерелом енергії, яким може служити резервний генератор (наприклад, дизельний). Така система використовуватися для забезпечення безперервного енергозабезпечення. Через те, що гібридні системи включають джерела різних типів, вони, на відміну від автономних, вимагають більш складних задач керування [19].

Структурна схема однієї з автономних систем з фотогенераторами приведена на рис. 1.2 (а). Система містить 1) фотобатареї (**ФБ**), що складаються з фотогенераторів, 2) перетворювач (**П**) для перетворення і регулювання напруги, 3) акумуляторну батарею (**АБ**) для накопичення енергії, 4) інвертор (**І**), що перетворює постійну напругу в змінну і 5) навантаження (**Н**). Якщо для роботи навантаження досить джерела постійної напруги, інвертор може бути виключений зі складу структури. Автономні системи призначені для живлення окремих споживачів, як правило, не зв'язаних з електричною мережею. До таких споживачів можна віднести системи

прийому і передачі інформації; системи живлення окремих малопотужних холодильників для збереження ліків, продуктів; малопотужні системи освітлення. Автономні системи доцільно застосовувати для роботи на постійному струмі (без інверторів), оскільки це вимагає менших витрат на перетворення енергії. Вони можуть застосовуватися також у домашніх господарствах при установці фотопанелей на дахах, і стінах будинків. Потужність таких систем як правило лежить у межах сотень ват – одиниць кіловат.

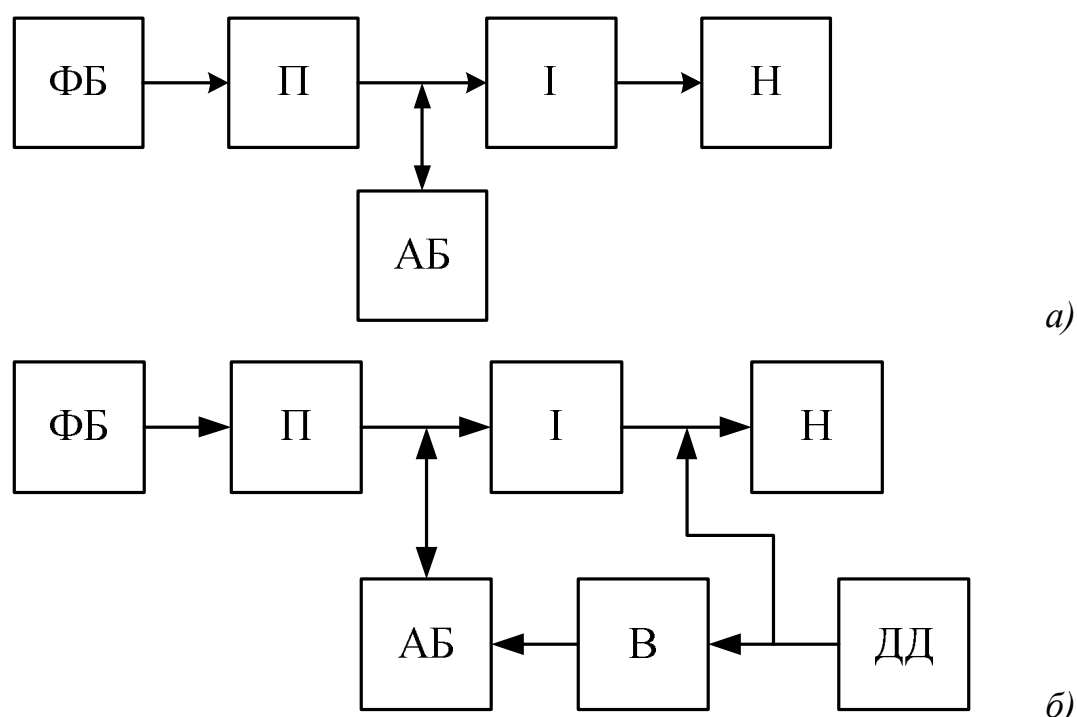


Рис. 1.2. Структурні схеми автономних систем електроживлення на основі фотобатарей: а) автономна система; б) гібридна система.

Гібридна система включає фотобатарей (ФБ), один або більш додаткових джерел (ДД) типу вітрового або дизельного генератора й одну або більшу кількість акумуляторних батарей (АБ) і інверторів (І) (рис. 1.2(б)). Хоча гібридна система вимагає більш складну систему керування, чим автономна, її надійність вище. Для забезпечення спільної роботи таких систем необхідно здійснювати перетворення постійної напруги в напругу промислової частоти 50 – 60 Гц, що дозволить використовувати типові трансформатори і комутаційну апаратуру. Ці системи в якості

накопичувачів енергії обов'язково повинні містити акумуляторні батареї. Потужність гібридних систем складає звичайно одиниці – десятки кіловат.

В зв'язку з тим, що на протязі світового дня змінюються умови роботи сонячної панелі (освітленість, температура та інші), її електричні параметри також змінюють значення. Енергія, яку віддає сонячна панель у навантаження, при різних умовах буде різною. В [39] розглянуте питання забезпечення відбору максимальної енергії у фотоелектричній автономній системі електроживлення. При відборі максимальної енергії струм заряду акумуляторних батарей змінюється в широких межах, що може істотно скоротити їхній термін служби. Тому актуальною є задача розробки зарядних пристроїв АБ в системах електроживлення локальних об'єктів.

**Застосування акумуляторних батарей на космічних об'єктах.** На космічних об'єктах, до яких відносять штучні супутники Землі, космічні кораблі й ракети, широко застосовуються енергосистеми, що складаються з напівпровідникових фотобатарей (сонячних батарей) й акумуляторних батарей, що працюють у буферному режимі. Акумуляторні батареї на штучних супутниках Землі забезпечують енергопостачання апаратури під час перебування супутника в тіні Землі, а також при більших навантаженнях, що перевищує можливості фотобатарей. В інший час акумулятори заряджаються від сонячних батарей. Типовий режим роботи таких акумуляторних батарей: 20–40 хв. розряд, 50–70 хв. заряд, тобто близько 16 зарядно-розрядних циклів (як правило, неповних) за земну добу [3, 62].

Спрощена структурна схема електроживлення супутника приведена на рис. 1.3. Система включає фотобатареї (ФБ), зарядний пристрій (ЗП), одну або більшу кількість акумуляторних батарей (АБ) і одне або більшу кількість вторинних джерел живлення (ВДЖ) навантажень (Н).

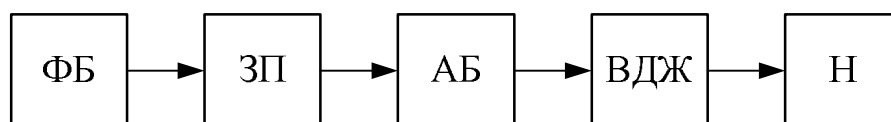


Рис. 1.3. Структурна схема системи електроживлення супутника



Розглянемо більш детально основні параметри та типи акумуляторних батарей, що можуть входити до складу розглянутих приладів і систем електроживлення, а також можливі методи їхнього заряду.

## 1.2. Основні параметри та типи акумуляторних батарей

Акумулятори – хімічні джерела електричної енергії багаторазової дії, які складаються з двох електродів (позитивного і негативного), електроліту і корпусу. Накопичення енергії в акумуляторі відбувається при протіканні хімічної реакції окислювання-відновлення електродів – на позитивному електроді проходить реакція окислювання, а на негативному – реакція відновлення. При розряді акумулятора відбуваються зворотні процеси – окисли позитивних електродів поступово відновлюються до чистого металу, а негативні електроди окисляються.

У залежності від електрохімічної системи напруга на клеммах акумулятора звичайно складає від 1,2 до 2 В. Розрізняють лужні і кислотні акумулятори. У лужних акумуляторах електролітом служить водний розчин їдкого лугу (їдкого калію або їдкого натрію з добавкою або без добавки їдкого літію), у кислотних – водний розчин сірчаної кислоти. По складу активної маси пластин лужні акумулятори розділяються на: нікель-кадмієві (*NiCd* – Nickel-Cadmium Battery), нікель-метал-гідридні (*NiMH* – Nickel Metal-Hydride Battery), літій-іонні (*Li-ion* – Lithium Ion Battery), літій-полімерні (*Li-Polimer* – Lithium Polimer Battery). У свинцево-кислотних (*Pb* – свинець) та герметичних свинцево-кислотних акумуляторах (*SLA* – Sealed Lead Acid Battery) пластини свинцеві.

При виборі акумуляторів необхідно порівняти наступні параметри:

- напругу на клеммах акумулятора або акумуляторної батареї;
- номінальну ємність акумулятора;
- орієнтовану відносну вартість 1 Вт·г енергії, отриману від різних типів акумуляторів однакової ємності;
- довговічність акумулятора – кількість циклів заряду-розряду;
- коефіцієнт віддачі – відношення кількості електрики в кулонах (або в ампер-годинах  $A \cdot g$  ( $1 A \cdot g = 3600 Кл$ )), відданого акумулятором при повному розряді, до кількості електрики, отриманій при заряді;

– коефіцієнт корисної дії акумулятора – відношення кількості електрики, що він віддає споживачеві, розряджаючись до встановленої межі для продовження нормальної роботи останнього, до кількості електрики, отриманої їм при заряді. Значення коефіцієнта корисної дії завжди менше значення коефіцієнта віддачі.

При виборі акумуляторної батареї для конкретного споживача необхідно довідатися або спрогнозувати режим роботи (постійний або періодичний), характер зміни навантаження (плавний або східчастий), діапазон зміни сили струму і напруги, температуру навколишнього середовища й ін. [18].

Параметри найбільш розповсюджених типів акумуляторів приведені в табл. 1.1 [18].

В акумуляторах, що знаходяться в експлуатації безупинно повторюється послідовність електрохімічних перетворень. Період заряду-розряду акумулятора називають циклом. З кожним циклом акумулятори зношуються. Довговічність акумулятора оцінюють кількістю циклів. Цей параметр різний для різних типів акумуляторів. В одних акумуляторах при нормальних умовах експлуатації вона складає не більш ніж 10 циклів, в інших досягає 100 і 1000 циклів. Погіршення параметрів акумулятора і вихід з ладу обумовлені в першу чергу корозією ґратки й оповзанням активної маси позитивного електрода.

Довговічність акумуляторів залежить від:

- ресурсу закладеного в електрохімічну систему і конструкцію акумулятора;
- умов введення в експлуатацію;
- умов експлуатації.

## Параметри найбільш розповсюджених типів акумуляторів

Параметр	Тип електрохімічної системи				
	Свинцево-кислотний	Нікель-кадмієвий	Нікель-метал-гідридний	Літій-іонний	Літій-полімерний
Умовне позначення	Pb, SLA	NiCd	NiMH	Li-ion	Li-Polimer
Щільність енергії, $Вт \cdot з / кг$	30	40 ÷ 60	60 ÷ 80	100 ÷ 150	150 ÷ 200
Напруга на елемент, $V$	2,0	1,25 <sup>(1)</sup>	1,25 <sup>(1)</sup>	3,6	2,7 <sup>(2)</sup>
Струм навантаження, $A$	0,2 · C <sup>(3)</sup>	>2 · C	(0,5 ÷ 1,0) · C	<1 · C	0,2 · C
Кількість робочих циклів заряду/розряду (зменшення ємності до 80%)	200 ÷ 500 <sup>(4)</sup>	1500 <sup>(5)</sup>	500 <sup>(4)</sup>	500 ÷ 1000 <sup>(2)</sup>	100 ÷ 150 <sup>(4)</sup>
Діапазон робочих температур <sup>(6)</sup> , °C	-20...60	-40...60	-20...60	-20...60	Немає даних
Мінімальний час заряду, $z$	8 ÷ 16	1 ÷ 2	2 ÷ 4	3 ÷ 4	8 ÷ 15
Стійкість до перезаряду	Висока	Середня	Низька	Дуже низька	Немає даних
Саморозряд за місяць	5–15 %	20 % <sup>(7)</sup>	30 % <sup>(7)</sup>	10 % <sup>(8)</sup>	Немає даних
Періодичність обслуговування, $днів$	90 ÷ 180	30	60 ÷ 90	Непотрібно	Немає даних
Відносна вартість	1 ÷ 10	4 ÷ 12	14	10 ÷ 20	60

**Примітки до таблиці 1.1:**

1. 1,25 вольт – значення напруги одного елемента, 1,2 вольт – часто зустрічається в літературі й описах. Обидва значення відносяться до одного типу елемента.
2. 2,5 – 3,0 вольт залежно від матеріалу позитивного електрода.
3.  $C$  – ємність акумулятора в  $A \cdot z$ , а коефіцієнт перед  $C$  –  $z^{-1}$ ;
4. Число робочих циклів залежить від глибини розряду. Мала глибина розряду забезпечує більшу кількість циклів.
5. При правильному й регулярному обслуговуванні число робочих циклів заряду/розряду може досягати 4000 замість 1500 циклів, що гарантує виробник. Без проведення тренувальних циклів число робочих циклів може зменшитися більш ніж у три рази.
6. Відноситься тільки до розряду; діапазон температур заряду більш обмежений.
7. Саморозряд практично припиняється на другу добу після повного заряду акумулятора. Саморозряд *NiCd* акумуляторів становить 10% від енергії акумулятора протягом перших 24 годин, потім знижується до 10% на місяць. Саморозряд збільшується при збільшенні температури.
8. Вбудована в акумулятор схема захисту споживає близько 3% енергії акумулятора на місяць.

При виборі акумуляторів необхідно враховувати залежність питомої енергії від температури навколишнього середовища, що приведена в табл. 1.2. З табл. 1.2 видно, що вагова питома енергія срібно-цинкових акумуляторів у значно більшій степені залежить від температури. Приблизно так само залежить від температури об'ємна питома енергія акумуляторів.

Залежність питомої енергії від температури навколишнього середовища

Акумулятор	Питома енергія, $Вт \cdot г/кг$ , при температурі, $^{\circ}C$				Вплив на апаратуру і людей
	20	0	-20	-40	
<i>Свинцево-кислотний</i>	36	29	18	8	<i>Найбільш шкідливі з усіх акумуляторів</i>
<i>Нікель-кадмієвий, ламельний</i>	20	16	11	5	<i>Менш шкідливі, ніж кислотні</i>
<i>Нікель-кадмієвий, безламельний</i>	38	33	26	19	<i>Менш шкідливі, ніж кислотні</i>
<i>Залізонікелевий</i>	18	13	9	–	<i>Менш шкідливі, ніж кислотні</i>
<i>Срібно-цинковий</i>	90	75	35	6	<i>Найменш шкідливі з усіх акумуляторів</i>

Важливою характеристикою акумуляторів є орієнтована відносна вартість 1  $Вт \cdot г$  енергії, отриманої від різних типів акумуляторів приблизно однакової ємності (табл. 1.1).

Як видно з табл. 1.1 дорожче всього обходиться енергія, одержувана від літій-іонних (*Li-ion*) і літій-полімерних (*Li-Polimer*) акумуляторів, і дешевше від свинцево-кислотних, прийнятих у даному випадку за одиницю (для герметичних свинцево-кислотних відносна вартість може доходити до 10 одиниць).

Найбільш широке застосування, як більш дешеві, одержали свинцеві акумулятори. Вони забезпечують термін служби до 20 років, що обумовлено відповідним конструктивним виконанням.

Коли в системах електроживлення масогабаритні властивості акумулятора не грають великої ролі, як, наприклад, в автономних фотоелектричних системах живлення, то доцільно вибрати герметичні свинцево-кислотні акумуляторні батареї, через їхню дешевизну і довговічність. Крім того, герметичні свинцеві акумулятори не вимагають доливання води при експлуатації, не мають газовиділення і кислотного туману. У випадках, коли масогабаритні властивості

акумулятора суттєво впливають на властивості системи, як, наприклад, у електромобілях, тоді доцільно використовувати акумуляторні батареї з більшою питомою енергією – такі як паливні елементи та літій-іонні акумуляторні батареї.

### 1.3. Дослідження впливу поляризації та імпульсних режимів заряду на якості акумуляторів

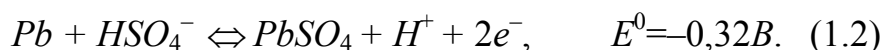
У процесі заряду/розряду акумулятора, незважаючи на стрибок напруги на ньому, що виникає через опір електродів, пластин, електроліту й сепараторів, є присутнім падіння напруги, що виникає через поляризацію (або перенапругу). Щоб забезпечити необхідний зарядний струм зарядний пристрій повинен забезпечувати необхідну напругу на акумуляторі з урахуванням поляризаційної складової. Оскільки зарядний пристрій буде втрачати енергію за рахунок поляризаційних процесів, це – ключовий момент для зменшення напруги поляризації, що збільшить ефективність заряду. Якщо намагатися зменшити вплив поляризації, необхідно розібратися в причинах її виникнення. Поляризаційні ефекти містять у собі концентраційну поляризацію, електрохімічну поляризацію й резистивну поляризацію [12, 29, 84].

**Концентраційна поляризація.** Як видно з рівнянь (1.1) і (1.2) під час заряду  $PbSO_4$  використовується на обох електродах для утворення сірчаної кислоти.

Позитивний електрод:



Негативний електрод:



Завдяки сповільненості дифузії, концентрація сірчаної кислоти біля електродів буде вище, ніж в інших областях. З рівняння Нернста (1.3) потенціал реакції електрода позитивний і пропорційний концентрації сірчаної кислоти, стрибок напруги на обох електродах вище, ніж у сталому стані, і він називається **концентраційною поляризацією**.

Рівняння Нернста: 
$$E = E_0 + \frac{RT}{F} \ln \left( a_{H_2SO_4} \right), \quad (1.3)$$

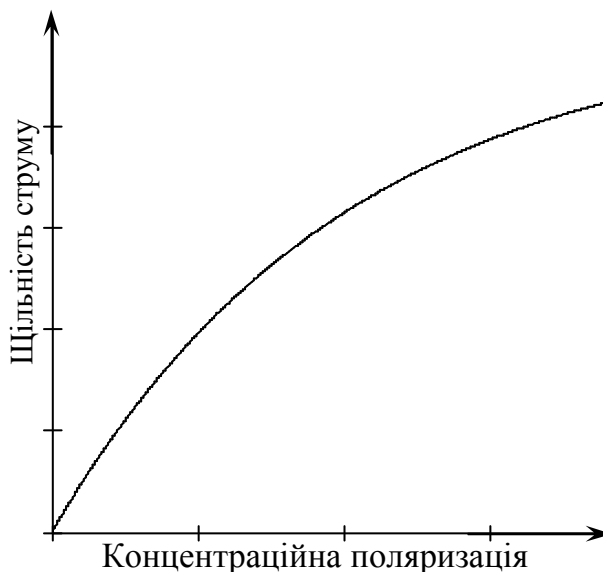


Рис. 1.4. Відношення концентраційної поляризації до щільності струму

де  $a_{H_2SO_4}$  – активність сірчаної кислоти;

$E_0$  – стандартний електродний потенціал;

$R$  – універсальна газова стала,  $8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ;

$T$  – температура,  $\text{К}$ ;

$F$  – постійна Фарадея,  $96\,485,3383(83) \text{ Кл}\cdot\text{моль}^{-1}$ .

Концентраційна поляризація залежить від рівня дифузії й струму заряду – чим вище рівень дифузії, або чим нижче струм заряду, тим менше буде концентраційна поляризація. З іншого боку, під час розряду сірчана кислота споживається обома електродами й концентрація біля електродів нижче, ніж в інших областях. Отже, виникає падіння потенціалу в порівнянні зі станом рівноваги. Це також викликано інерційністю дифузії й різницею концентрації. Подібно зарядному, розрядний струм також залежить від концентраційної поляризації. Концентраційна поляризація пов'язана експоненціально із щільністю струму, як показано на рис. 1.4. На додаток, концентраційну поляризацію можна послабити перемішуванням електроліту, або збільшивши його температуру, але повністю її усунути не вдасться.

**Електрохімічна поляризація.** Всі хімічні реакції складаються з декількох процесів. Швидкості реакцій при цьому різні, вони будуть протікати зі швидкістю самої повільної з них. Щоб перебороти інерційність реакції, зарядний пристрій повинен віддавати більше енергії для збереження швидкості протікання реакції. Це значить для заряду акумулятора потрібно забезпечити більш високу зарядну напругу. Ця додаткова напруга й називається *електрохімічною поляризацією*. Робочий струм акумулятора прямо залежить від швидкості реакції. Електрохімічна поляризація прямо залежить від струму, як показано на рис. 1.5. Пунктирна лінія представляє окислювання й зменшення струму хімічної реакції на електроді; суцільною лінією зображена залежність струму мережі від ступеню електрохімічної поляризації. Залежність можна апроксимувати експонентною функцією, тобто рівнянням Батлера-Вольмера:

$$i = i_0 \left[ \exp\left(\frac{\alpha Z F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\beta Z F \eta}{RT}\right) \right], \quad (1.4)$$

де  $i$  – це щільність струму,  $i_0$  – струм обміну,  $\alpha$  і  $\beta$  – коефіцієнти переносу, сума яких  $\alpha + \beta = 1$ ,  $Z$  – коефіцієнт переносу заряду,  $F$  – постійна Фарадея,  $R$  – постійна ідеального газу,  $\eta$  - ступінь електрохімічної поляризації.

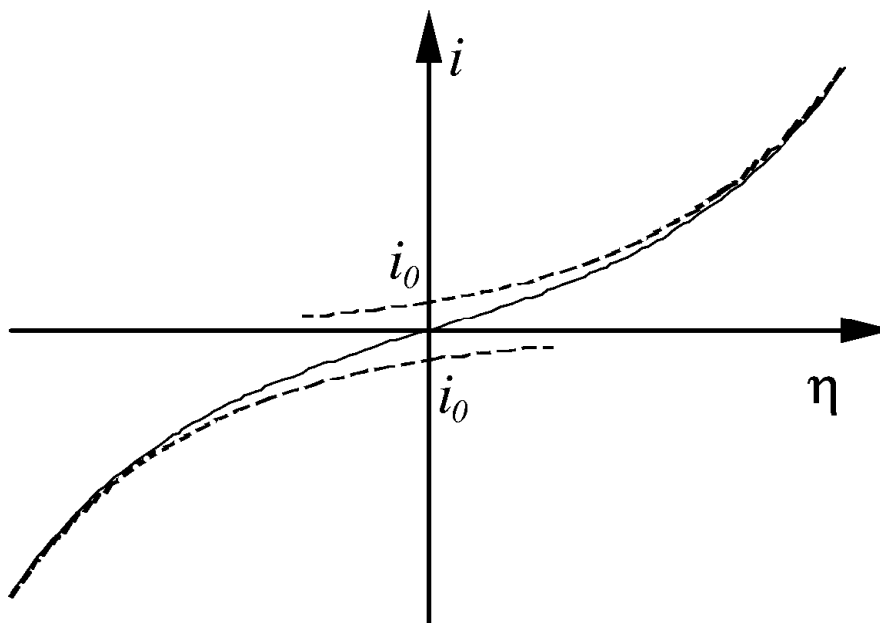


Рис. 1.5. Залежність струму електрода від ступеню електрохімічної поляризації

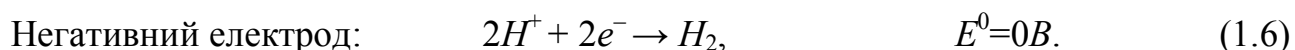
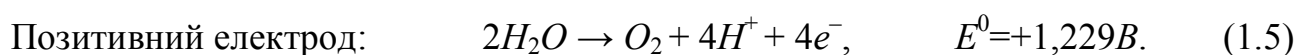


**Резистивна або хімічна поляризація.** На поверхні електрода можуть бути присутніми домішки, окислені оболонки, або навіть пухирці газу, які не проводять електричний струм. Струм протікає через ці області і вони формують спад напруги, що і називається *резистивною поляризацією* (або хімічною поляризацією).

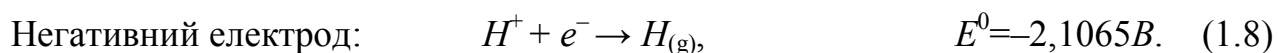
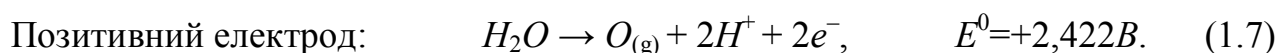
При заряді або розряді поляризація неминуча і це важливий фактор, що впливає на ефективність заряду: електрохімічна поляризація - внутрішня характеристика реакції в акумуляторі, що пов'язана з величиною зарядного/розрядного струму; резистивна поляризація пов'язана із процесами при виробництві й чистотою електроліту.

Зарядний пристрій повинен віддавати більше енергії для подолання ефекту поляризації, ніж акумулятор одержує під час процесу заряду. Отже, для того щоб збільшити ефективність заряду необхідно зменшити вплив поляризації. Головним чином концентраційна поляризація перешкоджає дифузії іонів в електроліті і якщо допускається більше часу на дифузію, її вплив можна знизити.

Іншим фактором, що впливає на ефективність заряду, є виділення газу. Під час заряду кисень і водень виділяються на позитивному й негативному електродах як описано формулами (1.5) і (1.6) окремо:



Хоча потенціали цих двох реакцій показують, що для протікання реакції на позитивному електроді потрібний більш високий потенціал – це не відповідає дійсності. Це тому, що наведені реакції мають проміжні кроки для їхнього завершення:



З потенціалів цих двох проміжних кроків і реакцій (1.1) й (1.2), потенціал реакції (1.8) перевищує потенціал негативного електрода на 1,7865V, у той час як потенціал реакції (1.7) тільки на 0,672V вище потенціалу позитивного електрода.

Отже, кисень значно легше виділити на позитивному електроді, ніж водень на негативному. Ці реакції виділення газу споживають енергію заряду й воду з електроліту. Крім того, маленькі пухирці газу, що виділяються, легко чіпляються до пористих електродів й ізолюють активну масу електродів від електроліту. Це збільшує резистивну поляризацію й отже збільшується повний опір. Безумовно, ці дві реакції виділення газу сильно пов'язані з потенціалом електрода – чим вище потенціал позитивного електрода й нижче потенціал негативного електрода, тим вище швидкості протікання реакцій. Тому необхідно зменшити перенапругу на обох електродах.

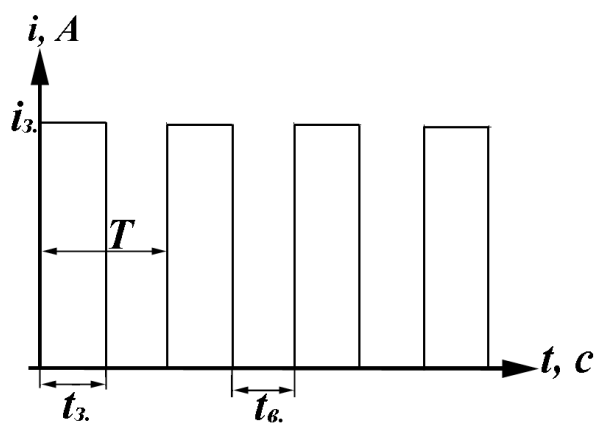


Рис. 1.6. Часова діаграма імпульсного зарядного струму

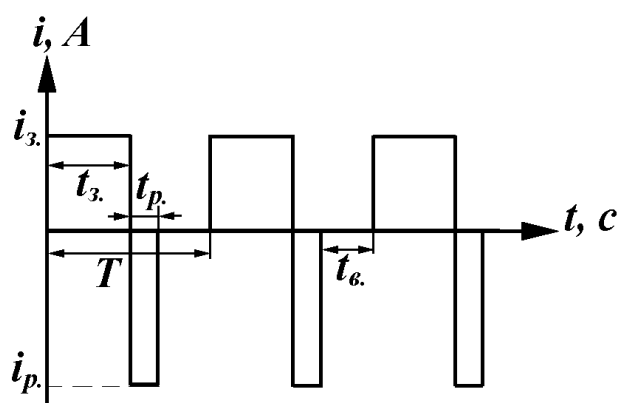


Рис. 1.7. Часова діаграма імпульсного асиметричного зарядного струму

Зменшити негативний вплив концентраційної, електрохімічної та резистивної (хімічної) поляризацій вдається шляхом використання імпульсного заряду. Ідея

імпульсного заряду, діаграма струму якого зображена на рис. 1.6, забезпечує між зарядними імпульсами короткі періоди відпочинку для переривання зарядного струму [42, 59, 63, 67, 72]. Ці паузи повинні надавати іонам в акумуляторі більше часу для дифундування до протилежної сторони для того, щоб знизити концентраційну поляризацію. Заряд імпульсним асиметричним струмом, діаграма якого зображена на рис. 1.7, додатково забезпечує імпульс розрядного струму, що призначений для прискорення руху іонів [40, 59, 71, 75, 78, 81]. Між іншим, при застосуванні цих методів заряду, оскільки перенапряга на електроді виявляється меншою, виділення газу відбувається повільніше. Отже, резистивна поляризація також зменшиться [84]. Однак параметри (тривалість та амплітуда) імпульсів фіксовані і не враховують тип, стан зарядженості та вік акумуляторів.

#### **1.4. Схемні моделі заміщення електродних процесів**

При вимірюванні внутрішнього опору джерела струму на постійному й змінному струмі отримують різні значення, причому результат вимірів на змінному струмі звичайно залежить від його частоти. Це означає, що акумуляторна батарея не може бути представлена як джерело постійної ЕРС із послідовно включеним активним опором, а її схемна модель заміщення повинна містити реактивні елементи [47].

У більшості випадків поляризаційна (або реактивна) складова повного внутрішнього опору акумуляторної батареї є ємнісною й пов'язана із природою електрохімічних й інших фізико-хімічних процесів, що протікають у джерелі струму. Одна із причин появи ємнісної складової – звичайна ємність подвійного електричного шару на границі розділу електрода з електролітом; ця ємність викликана зміною щільності зарядів у подвійному шарі при зміні потенціалу електрода й становить  $0,1\text{--}0,4 \text{ Ф/м}^2$  (при розрахунку на площу дійсної поверхні). У схемній моделі заміщення електрода ємність подвійного шару  $C_{\text{п.ш.}}$  включена паралельно з активним опором реакції  $R_{\text{ф}}$ , що відображує проходження фарадеївського струму (тобто струму, обумовленого протіканням електрохімічної реакції) через границю розділу електрод-електроліт (рис. 1.8, а) [3, 5, 13, 47].

Для деяких акумуляторних батарей ємність границі розділу електрод – електроліт набагато перевищує зазначені значення, досягаючи 4–10 Ф/м<sup>2</sup>. Це так звана адсорбційна псевдоємність, пов'язана із процесами електрохімічної адсорбції, наприклад, кисню або водню:



Адсорбційна псевдоємність  $C_{\text{адс}}$  у схемних моделях заміщення включається паралельно з ємністю подвійного шару. Однак процеси електрохімічної адсорбції протікають набагато повільніше, ніж релаксація подвійного шару. Тому адсорбційна псевдоємність уже при низьких частотах (сотні або десятки герців) починає зменшуватися з ростом частоти. У схемній моделі заміщення з ємністю  $C_{\text{адс}}$  сповільненість адсорбційних процесів відбивається включенням послідовно з ємністю деякого активного опору  $R_{\text{адс}}$  (рис. 1.8, б).

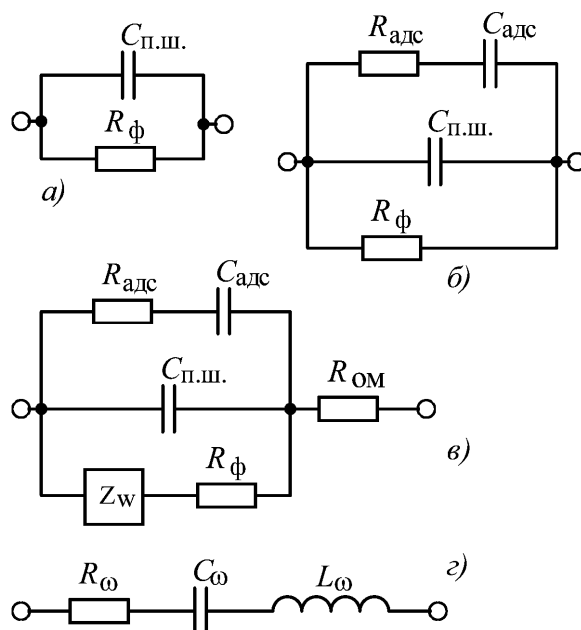


Рис. 1.8. Схемні моделі заміщення електродних процесів

Ще одна причина виникнення ємнісного опору – це сповільненість дифузії. Поки джерело струму не працює, концентрації всіх компонентів електроліту у всіх точках однакові. При включенні постійного струму концентрація в приелектродному шарі починає змінюватися й розподіл концентрації стає

нерівномірним. Ця зміна триває доти, поки не наступить деякий стаціонарний розподіл концентрацій. Час установлення стаціонарного розподілу концентрацій, тобто перехідний час дифузійного процесу  $\tau_{\text{п.диф}}$ , визначається коефіцієнтом дифузії  $D$  і товщиною  $\delta$  шару, у якому відбувається зміна концентрації:

$$\tau_{\text{п.диф}} \approx \delta^2/D. \quad (1.11)$$

При проходженні змінного струму через електродну систему, у якій можлива дифузія, розподіл концентрацій має також періодичний характер, тобто виникає так звана «концентраційна хвиля». Математично такий дифузійний процес описується так званим повним опором Варбурга, що складається з послідовно з'єднаних опору  $R_W$  й ємності  $C_W$ , що залежать від частоти  $\omega$ :

$$R_W = \frac{A_W}{\sqrt{\omega}}, \quad (1.12)$$

$$C_W = \frac{1}{A_W \sqrt{\omega}}, \quad (1.13)$$

де  $A_W = \frac{RT}{n^2 F^2 c \sqrt{2D}}$  – постійна Варбурга;

$R$  – універсальна газова стала, 8,31441 Дж/(моль·К);

$T$  – температура, К;

$F$  – постійна Фарадея, 96 485,3383(83) Кл·моль<sup>-1</sup>;

$D$  – коефіцієнт дифузії.

У схемних моделях заміщення повний опір  $Z_W$  Варбурга включено послідовно з опором реакції  $R_{\text{ф}}$ , як показано на рис. 1.8, в.

Омічний опір електроліту, струмовідводів і т.д.  $R_{\text{ом}}$  (активний опір) включено в схемних моделях заміщення послідовно із загальним комплексним опором, що відображає процеси на поверхні й поблизу поверхні електродів (рис. 1.8, в).

Індуктивна складова повного опору акумуляторної батареї обумовлена поверхневим ефектом при проходженні струму через масивні металеві деталі. В основному індуктивна складова проявляється у великогабаритних джерелах струму з великою розрядною потужністю.

Таким чином, загальна схемна модель заміщення акумуляторної батареї являє собою складну комбінацію великої кількості активних опорів, ємностей і в окремих випадках індуктивностей. Такий характер схемної моделі визначається розмаїттям процесів, що протікають у акумуляторній батареї, а також їхнім розподіленим характером. У результаті параметри схемної моделі заміщення акумуляторної батареї не піддається поки розрахунку, а може бути визначена лише прямими вимірами. Іноді її зображують у вигляді послідовної комбінації одного активного опору  $R_\omega$ , однієї ємності  $C_\omega$  і однієї індуктивності  $L_\omega$  (рис. 1.8, з); всі особливості поведінки реального елемента виражаються в цьому випадку через залежність величин  $R_\omega$ ,  $C_\omega$  і  $L_\omega$  від частоти  $\omega$ .

При різних співвідношеннях ємнісної й індуктивної складових повного опору спостерігається й різна залежність його від частоти. При невеликій індуктивності схемна модель заміщення джерела струму практично містить у собі тільки активні і ємнісні елементи, так що повний опір зменшується із частотою. При низькому ємнісному опорі й помітній індуктивності повний опір має активно-індуктивний характер і збільшується з ростом частоти. Така залежність характерна для стаціонарних свинцевих акумуляторів великої ємності. У акумуляторної батареї із зрівняними значеннями ємнісної й індуктивної складових залежність повного опору від частоти проходить через мінімум, що відповідає умові резонансу, тобто рівності ємнісної й індуктивної складових. До таких джерел струму відносяться свинцеві акумулятори малої й середньої ємності.

Найбільш точним методом виміру активної й реактивної складових повного опору хімічних джерел струму є метод виміру за допомогою моста змінного струму [51]. Параметри еквівалентної схемної моделі можна визначити також шляхом подачі на акумуляторну батарею невеликих прямокутних імпульсів струму й реєстрації на осцилографі кривих зміни напруги в часі. Цей метод дозволяє безпосередньо вимірювати та реєструвати значення перехідного часу [47].

## 1.5. Методи заряду та залежність від них строку служби акумуляторів

### 1.5.1. Порівняння методів заряду.

У таблиці 1.3 наведені еквівалентні схеми, параметри контролю, основні переваги й особливості методів заряду [76, 79]. Обґрунтування вибору методу заряду проведемо шляхом порівняння їхніх основних характеристик.

**Метод квазі-усталеного струму** (п. 1, табл. 1.3) характеризується тим, що на початку заряду напруга батареї  $u$  (див. табл. 1.3) має мінімальне значення, струм заряду  $i$  максимальний і в міру заряду батареї напруга зростає, а струм заряду  $i$  зменшується. Величина обмежуючого опору  $R$  визначає максимальний струм заряду батареї на початку періоду на рівні  $0,1 \cdot C$  (де  $C$  – ємність акумулятора в  $A \cdot z$ , а  $0,1$  – коефіцієнт у  $z^{-1}$ ) [76, 79].

**Двоінтервальні методи заряду** (п. п. 2–4, табл. 1.3) характеризуються розбивкою часу заряду на два інтервали. Відмінність методів полягає в організації контролю закінчення першого інтервалу, у той час як на другому інтервалі у всіх методах здійснюється компенсація саморозряду батареї струмом  $0,05 \cdot C \div 0,033 \cdot C$ . **У методі заряду за часом** (п. 2, табл. 1.3) на першому жорстко заданому інтервалі відбувається основний заряд батареї струмом  $0,2 \cdot C$  і тривалість інтервалів контролюється таймером, що входить до складу системи. **У методі заряду з контролем спаду напруги** (п. 3, табл. 1.3) на першому інтервалі заряд здійснюється постійним струмом  $0,5 \cdot C \div 1 \cdot C$  і ознакою його закінчення є спад напруги батареї, що становить  $15 \div 20$  мВ на один елемент і визначається за допомогою компаратора. **У методі контролю градієнта температури батареї** (п. 4, табл. 1.3) на першому інтервалі відбувається основний заряд струмом  $0,5 \cdot C \div 1 \cdot C$ , ознакою закінчення якого є зростання градієнта температури батареї в наслідок електролізу води, що супроводжується виділенням тепла й контроль над яким здійснюється за допомогою датчика температури  $T$ , що входить до складу системи [76, 79].

**Метод з безперервною підзарядкою батареї, або метод заряду батареї в буферному режимі** (п. 5, табл. 1.3) характеризується безперервним зарядом невеликим струмом, що не здатний викликати ефект перезарядження й підтримує

батарею в максимально зарядженому стані. Величина струму заряду вибирається виходячи з періодичності використання батареї – при частому використанні контролер, що веде статистику періодичності використання батареї, установлює струм заряду  $0,033 \cdot C \div 0,05 \cdot C$ , а при рідкому використанні  $0,02 \cdot C \div 0,033 \cdot C$ . При зникненні зовнішнього живлення заряджена батарея підключається до навантаження за допомогою реле, що включається системою керування [76, 79]. Даний метод також відноситься до двоінтервальних, але, на відміну від попередніх, у ньому жорстко обмежується час розряду.

*У методі імпульсного заряду* батарея заряджається імпульсами струму з постійною амплітудою, рівної  $2 \cdot C$ . Між імпульсами струму є короткі паузи (rest-періоди), протягом яких батарея перебуває в стані спокою, і які дозволяють хімічним реакціям у батареї рівномірно розподілятися по всій поверхні електродів. Така форма струму частково запобігає ефекту пам'яті, що проявляється в зменшенні реальної ємності акумулятора в процесі експлуатації [66, 82].

*Метод заряду імпульсним асиметричним струмом* [4, 9, 10, 14, 15, 57], або *метод імпульсного заряду зі зворотним викидом* [66, 74, 82] характеризується зарядом батареї імпульсами струму з постійною амплітудою, рівної  $2 \cdot C$ , між якими є короткі паузи, а також імпульси розрядного струму з амплітудою  $10 \cdot C$ . Завдяки таким імпульсам розряду кисень, що виділяється в процесі заряду батареї, віддаляється з реагуючої пластини, що запобігає її окислюванню й продовжує термін служби батареї [66, 68, 82].

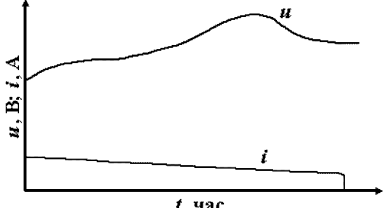
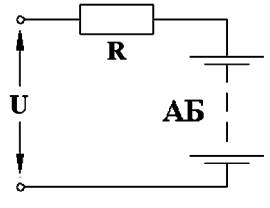
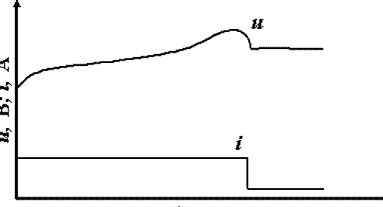
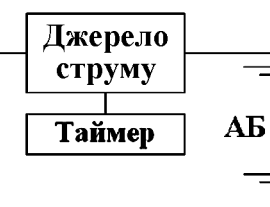
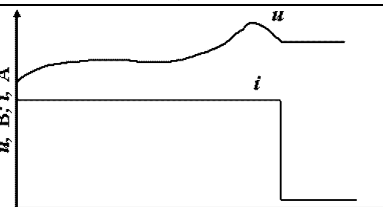
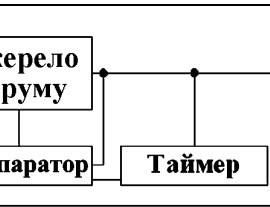
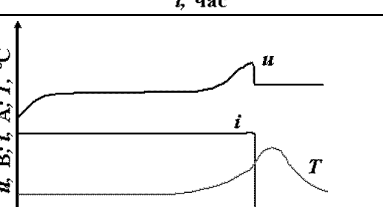
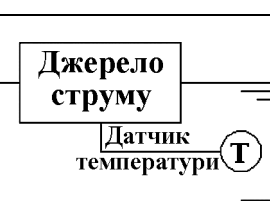
Для визначення закінчення заряду батареї в останніх двох методах може використатися ознака спаду напруги та (або) ознака градієнта температури.

На рис. 1.9 представлена діаграма залежності ємності батареї від кількості циклів заряду/розряду при різних методах заряду батареї [74], розглянувши яку, можна зробити висновок, що при кількостях циклів заряду/розряду до 150 – метод контролю граничної температури, у якому процес заряду кінчається з досягненням температури батареї  $45^{\circ}\text{C}$ , має гарні показники номінальної ємності [74].

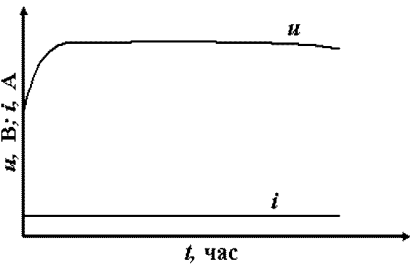

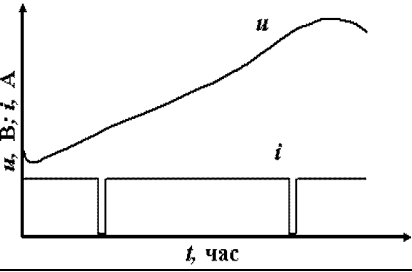
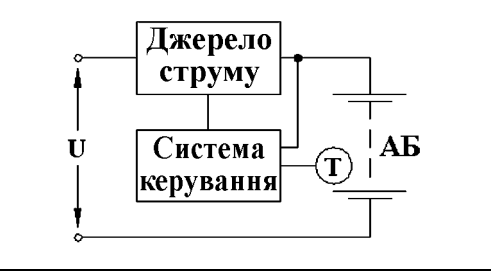
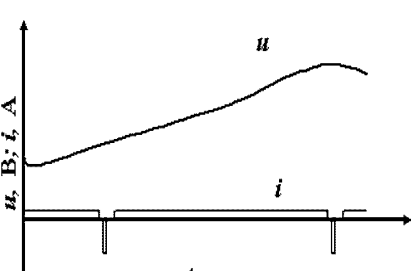
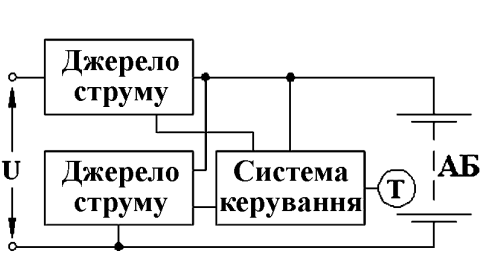


Таблиця 1.3

Криві заряду, еквівалентні схеми і їхні основні переваги й недоліки

№ п. п.	Метод	Криві заряду	Еквівалентна схема	Параметр контролю	Переваги	Недоліки	
1	2	3	4	5	6	7	
1	Квазі-усталеного струму			Немає	<ul style="list-style-type: none"> <li>проста конструкція системи заряду.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>тривалий час заряду;</li> <li>більші втрати на обмежуючому резисторі <math>R</math>.</li> </ul>	
2	Двоінтервальні методи	Заряд за часом			Час	<ul style="list-style-type: none"> <li>проста конструкція системи заряду.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>не враховується ступінь первісного рівня розряду батареї.</li> </ul>
3		Контроль спаду напруги			Напруга, час	<ul style="list-style-type: none"> <li>висока швидкість заряду.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>можливі помилки при визначенні часу завершення заряду, в наслідок чого можливий значний перезаряд акумулятора.</li> </ul>
4		Контроль градієнта температури			Температура	<ul style="list-style-type: none"> <li>висока швидкість заряду;</li> <li>надійність визначення закінчення заряду.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>необхідність убудованого в батарею датчика температури.</li> </ul>

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7
5	Двоїнтервальні 3 безперервною підзарядкою батареї			Немає	<ul style="list-style-type: none"> <li>• простота конструкції;</li> <li>• низька вартість системи заряду;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• відсутність контролю за зарядом</li> </ul>
6	Імпульсний заряд батареї			Напруга та (або) температура	<ul style="list-style-type: none"> <li>• значне зниження ефекту пам'яті батареї.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• складна конструкція системи заряду.</li> </ul>
7	Заряд асиметричним струмом (імпульсний заряд зі зворотним імпульсом)				<ul style="list-style-type: none"> <li>• значне зниження ефекту пам'яті батареї;</li> <li>• зниження пікових значень температури й внутрішнього тиску батареї при заряді.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• складна конструкція системи заряду.</li> </ul>

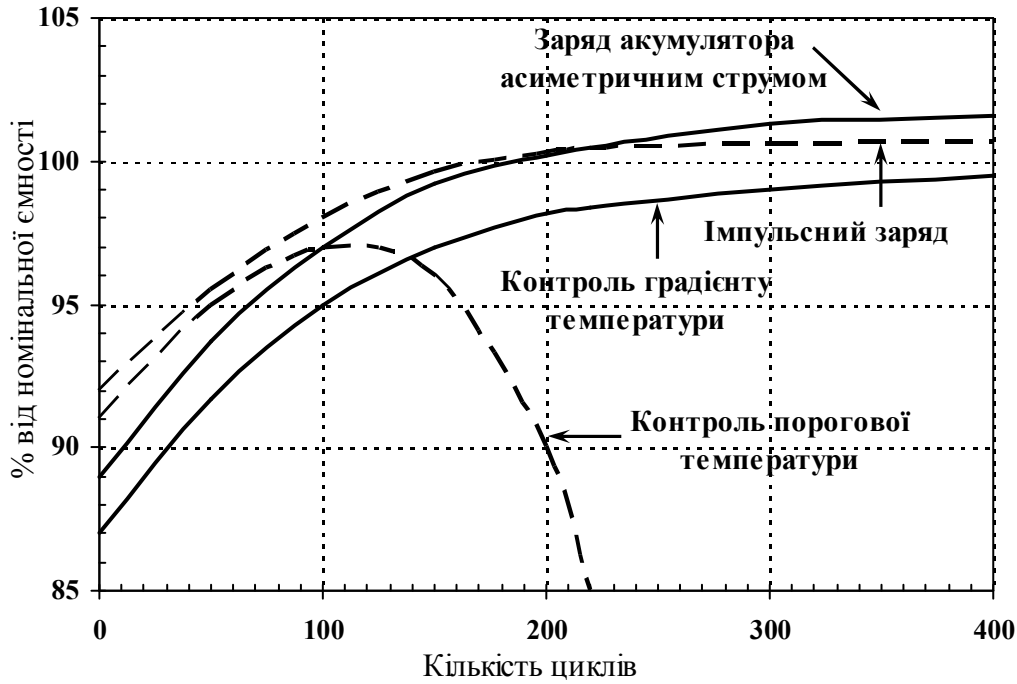


Рис. 1.9. Залежність ємності акумулятора від кількості циклів заряду/розряду

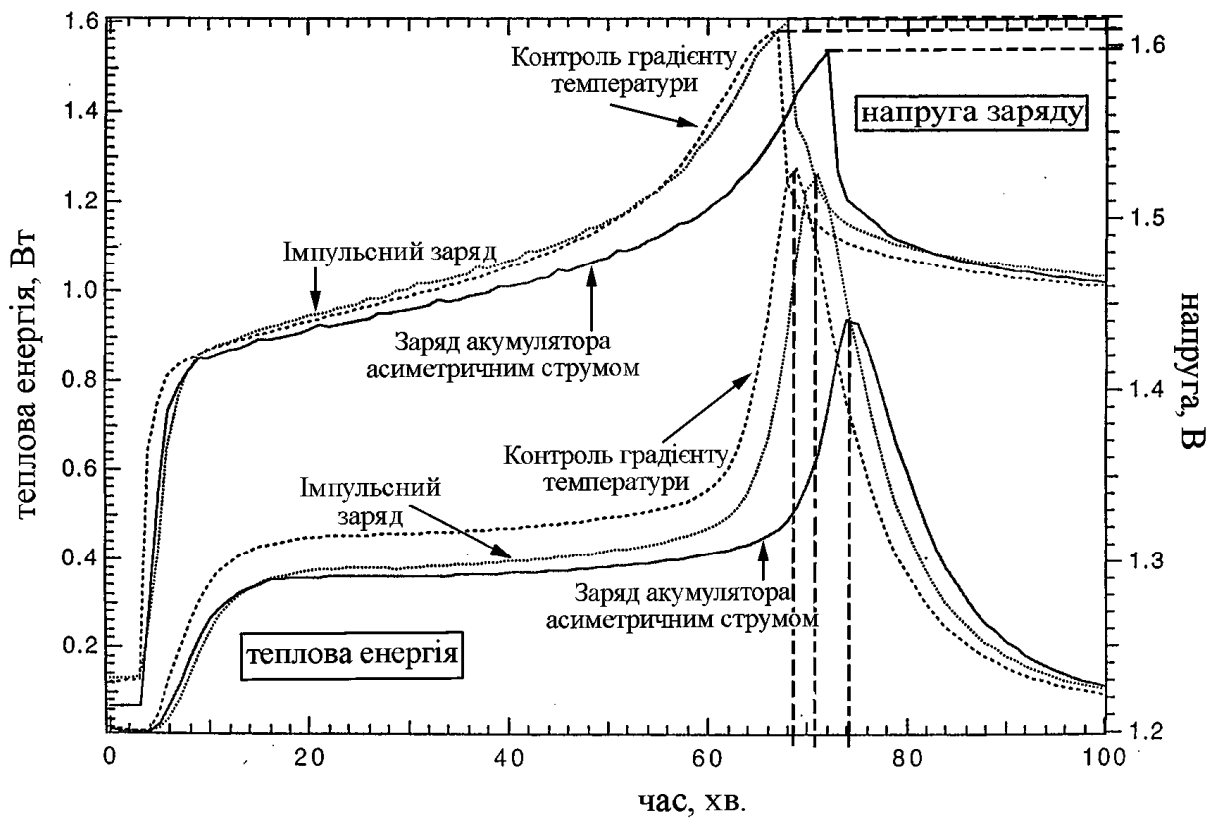


Рис. 1.10. Залежність теплової енергії, яка виділяється акумулятором під час заряду, і напруги від часу заряду

При кількості циклів до 200–250 імпульсний метод заряду має найкращі показники номінальної ємності. Метод контролю градієнта температури є добрим варіантом по співвідношенню номінальної ємності до складності системи. При кількості циклів понад 250 метод заряду імпульсним асиметричним струмом дозволяє отримати найбільшу номінальну ємність. На рис. 1.10 представлена діаграма залежності теплової енергії, яка виділяється акумулятором під час заряду, і напруги батареї від часу при різних методах заряду [74].

З діаграми видно, що в методі заряду імпульсним асиметричним струмом напруга наприкінці заряду нижче на 12% і виділення тепла – на 25%, у порівнянні з методом контролю градієнта температури й імпульсним методом, хоча час заряду більше на 8–13%. З огляду на вищесказане й те, що при заряді з використанням методу імпульсним асиметричним струмом номінальна ємність батареї найбільша, можна зробити висновок, що даний метод перевершує за якісними показниками розглянуті раніше. При цьому зменшується внутрішній тиск у батареї при заряді, усувається ефект пам'яті, завдяки чому відпадає необхідність у періодичному тренуванні батареї і збільшується номінальна ємність, а також збільшується термін служби батареї в 1,5–3 рази [3, 4, 42].

### ***1.5.2. Метод заряду імпульсним асиметричним струмом та проблеми, пов'язані з його застосуванням***

Методи заряду постійним струмом мають ряд недоліків таких, як необоротна сульфатація негативних пластин свинцевих батарей і необхідність у контрольно-тренувальних циклах. Те, що при заряді кислотних акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом необоротна сульфатація негативних пластин не виникає, а отже відпадає необхідність у контрольно-тренувальних циклах, на даний момент є загальновизнаним фактом [3, 4, 18, 42, 45, 51]. Такий спосіб заряду забезпечує рівномірний об'ємний розподіл концентрації електроліту, включаючи область пір усередині активної маси,

оскільки фронт дифузії не встигає віддалитися на помітну відстань від поверхні електрода при періодичній зміні напрямків струму. У результаті досягається збільшення зарядної ємності  $q_3$  на 10-15% [47], скорочення часу заряду  $t_3$  на 10-15% (у порівнянні з зарядом постійним струмом) [47, 51], а також підвищення ресурсу акумуляторної батареї у 1,5 – 3 рази [42]. Заряд імпульсним асиметричним струмом дозволить подовжити строк експлуатації акумуляторних батарей у системах електроживлення, забезпечить зменшення забруднення навколишнього середовища та зменшить фінансові затрати на технічне обслуговування батарей та на оновлення парку батарей. Але навіть сучасні відомі схеми зарядних пристроїв імпульсним асиметричним струмом мають невисокий ККД, що стає на заваді до використання імпульсного асиметричного струму для заряду кислотних акумуляторних батарей, хоча він і має переваги у порівнянні з зарядом постійним струмом.

Найпростіший пристрій для одержання імпульсного асиметричного струму – це діод, шунтований опором. Такий пристрій (рис. 1.11,а) включається послідовно із акумулятором, що заряджається, у ланцюг змінного струму. Два амперметри дозволяють роздільно контролювати значення постійної й змінної складових у зарядному ланцюзі. Такий пристрій застосовують тільки для заряду невеликих батарей; він має низький КПД, тому що велика кількість енергії даремно витрачається у опорі, що шунтує діод. Практично для заряду акумуляторів імпульсним асиметричним струмом застосовують більш складні пристрої, що мають більш високий ККД. На рис. 1.11,б показана схема одного з таких пристроїв для одержання імпульсного асиметричного струму від джерела змінного струму. У цій схемі використовується трансформатор із двома вторинними обмотками. У колі однієї з них є діод, що забезпечує однонапівперіодне випрямлення струму. Коли через це коло проходить струм, транзистор  $VT$  замкнений. У другому напівперіоді струм через діод не проходить, а через другу обмотку і транзистор проходить струм зворотного

напрямку, обмежений опором  $R_2$  (опір  $R_1$  регулює базовий струм транзистора) [3].

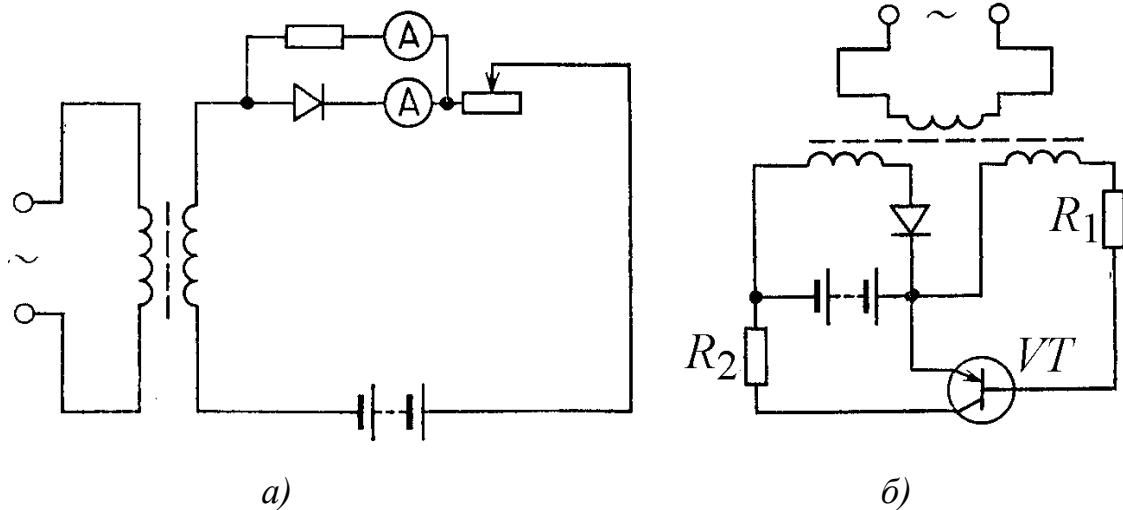


Рис. 1.11. Схеми для отримання імпульсного асиметричного струму від мережі змінного струму

На рис. 1.12, як приклад, представлена одна з схем заряду акумуляторів імпульсним асиметричним струмом (співвідношення зарядної і розрядної складової струму 10:1 і відношення довжин імпульсів цих складових 1:2), що розрахована на роботу з 12 В акумулятором і забезпечує імпульсний зарядний струм 5 А і розрядний  $-0,5$  А [4]. Вона являє собою регулятор струму, зібраний на транзисторах VT1...VT3. Живиться пристрій змінним струмом напругою 22 В (амплітудна напруга 30 В). При номінальному зарядному струмі напруга на зарядженому акумуляторі змінюється в межах 13...15 В (середня напруга 14 В).

За час одного періоду змінної напруги формується один імпульс зарядного струму (кут відсічення  $\alpha = 60^\circ$ , рис. 1.13). У проміжку між зарядними імпульсами формується розрядний імпульс через резистор  $R_3$ , підбором якого встановлюється амплітуда розрядного струму.

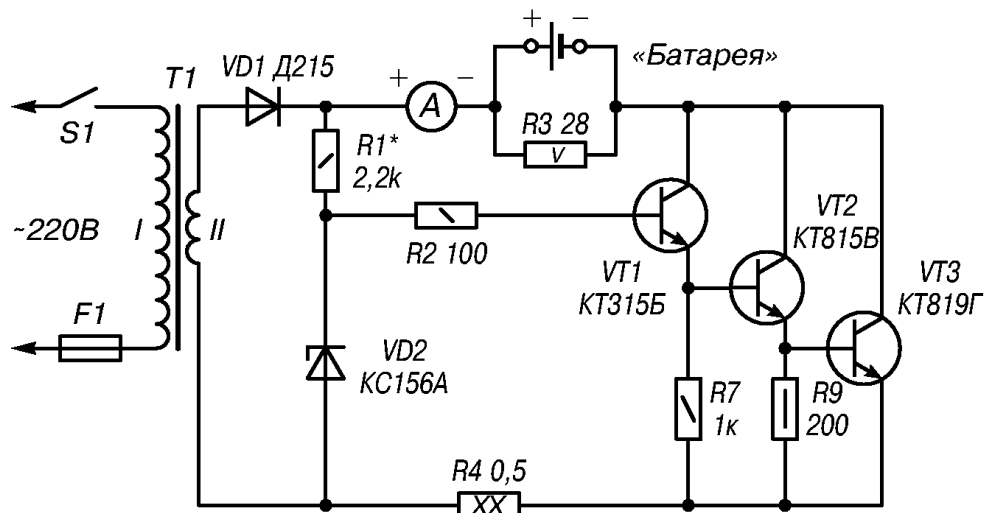


Рис. 1.12. Схема заряду акумулятора імпульсним асиметричним струмом

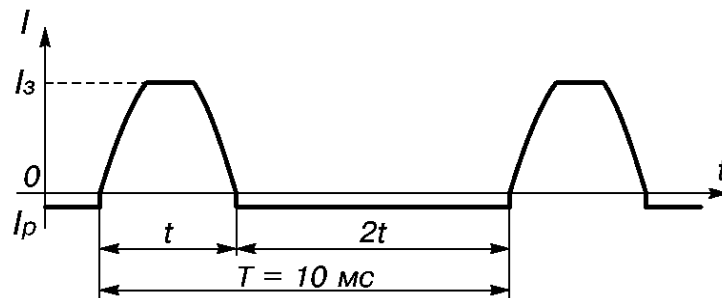


Рис. 1.13. Діаграма зарядного імпульсного асиметричного струму

Необхідно враховувати, що сумарний струм зарядного пристрою повинний дорівнювати 1,1 частині струму заряду акумулятора, тому що при заряді резистор  $R3$  підключений паралельно акумуляторові [4].

Приведена схема заряду акумулятора асиметричним струмом має ККД не більше 60 %. Інші існуючі схеми зарядних пристроїв імпульсним асиметричним струмом також мають ККД близький до даного. Низький ККД пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом стоїть на заваді його використання, хоча його застосування дозволяє подовжити термін служби батареї в 1,5–3 рази.

Отже, актуальною є розробка і вдосконалення систем, схем пристроїв, методів та способів заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом, що забезпечать високий ККД.

### **Висновки до першого розділу**

1. Коли в системах електроживлення масогабаритні властивості акумулятора не грають великої ролі, то доцільно вибрати герметичні свинцево-кислотні акумуляторні батареї через їхню дешевизну і довговічність, а у випадках, коли масогабаритні властивості акумулятора суттєво впливають на властивості системи, як, наприклад, у електромобілях, тоді доцільно використовувати акумуляторні батареї з більшою питомою енергією – такі як паливні елементи, або літій-іонні акумуляторні батареї.
2. Загальна схемна модель заміщення акумуляторної батареї являє собою складну комбінацію активних опорів, ємностей і в окремих випадках індуктивностей, а тому у більшості випадків може бути визначена лише прямими вимірами.
3. Проведений аналіз методів заряду показав, що метод заряду імпульсним асиметричним струмом перевершує за якісними показниками інші і дозволяє збільшити термін служби батареї в 1,5–3 рази.
4. Огляд пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом показав, що їх низький ККД стоїть на заваді використання заряду імпульсним асиметричним струмом, хоча такий спосіб заряду дозволяє значно подовжити термін служби батарей, суттєво зменшити забруднення навколишнього середовища та зменшити фінансові затрати на оновлення парку батарей.
5. Задача розробки та вдосконалення пристроїв і способів заряду акумуляторних батарей імпульсними асиметричними струмами з підвищеною ефективністю та побудови алгоритмів ефективного керування зарядом акумуляторних батарей є актуальною.



## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА СХЕМНОЇ МОДЕЛІ АКУМУЛЯТОРА ТА АДАПТИВНИЙ ЗАРЯД

#### **2.1. Вплив на характеристики акумулятора імпульсних режимів заряду**

Імпульсні режими заряду акумуляторів давно застосовуються при заряді акумуляторів. Наприклад, для нікель-кадмієвих акумуляторів такі режими вважаються більше ефективними, ніж режими постійного струму [47, 73].

Існує три основних фактори [42], пов'язані із застосуванням імпульсних режимів заряду акумуляторів. Перший стосується можливості прискорення процесу заряду за рахунок застосування імпульсного струму. Другий пов'язаний із впливом імпульсних режимів заряду на структуру електродів. Третій обумовлений можливістю використання імпульсних режимів заряду для одержання інформації про поточний стан акумулятора, що заряджається, яку у свою чергу можна використати для керування процесом заряду. Для підвищення ефективності заряду і подовження тривалості життя акумулятора розглянемо більш детально ці фактори (рис. 2.1).

Перший фактор (прискорення заряду, рис. 2.1) специфічний для систем з пористими електродами. Пористі електроди принципово відрізняються від гладких, на яких застосування імпульсного струму дає досить широкі можливості впливати на умови проведення електрохімічних процесів у кінетичній області [24, 31, 33, 35]. Це дозволяє, наприклад, регулювати структуру гальванічних осадів [30, 43, 77], осаджувати сплави із заданою пропорцією компонентів [32] і т.д. Разом з тим, якщо електрохімічний процес протікає в умовах дифузійних обмежень, то використання імпульсного струму не дає можливості перебороти ці обмеження по величині середньої за часом щільності струму. На відміну від цього на пористих електродах, які звичайно використовують в акумуляторах, застосування імпульсного струму може дати більш різноманітні можливості. У тому числі можливо й підвищення ефективної щільності струму, якщо електрод працює у внутрішньодифузійному або

внутрішньокінетичному режимі, що в більшості випадків і має місце в джерелах струму.

Товщина й швидкість росту шарів на електродах залежать не тільки від умов, але й від природи відновлюваного металу й знаходиться у межах  $0,1 \div 1$  мкм/с. Так, олово виявляє при кристалізації на катоді виразні шари, що поширюються зі швидкістю  $\sim 0,8 \cdot 10^{-6}$  м/с. Мідь утворює шари не ясно виражені, які поширюються повільніше – зі швидкістю  $\sim 0,2 \cdot 10^{-6}$  м/с [49, 51]. Причому однорідність слоїв залежить від прикладеного струму – чим більше струм, тим чіткіше виражені зародки кристалів, що призводить до неоднорідного подальшого росту кристалів на поверхні, результатом чого буде утворення осаду з надмірно „довгих” кристалів. Причиною цього є те, що струм протікає по найкоротшому шляху, який пролягає до найбільших зародків кристалів. При імпульсному заряді зародки утворюються рівномірно на поверхні електроду, що дозволяє значно підвищити зарядний струм без утворення осаду.

Другий фактор (вплив на структуру електродів, рис. 2.1) дуже специфічно пов'язаний з конкретною хімічною системою акумулятора. При імпульсному режимі заряду, особливо при заряді складними імпульсами з періодами прямого й зворотного напрямку струму (імпульсним асиметричним струмом), умови фазових перетворень активних компонентів можуть істотно відрізнятись від умов, що мають місце при режимі заряду постійним струмом. Тому вплив імпульсних режимів на структуру активних матеріалів електродів у деяких випадках буває істотним (наприклад, у свинцевих акумуляторах), у той час як в інших воно майже не проявляється (як у літій-іонних акумуляторах).

Третій фактор (одержання інформації про стан акумулятора, рис. 2.1), пов'язаний з одержанням інформації про стан об'єкта імпульсного впливу, не є специфічним. У цьому факторі акумулятор, що заряджається, є просто «чорним ящиком», що дає якийсь відгук на зовнішній вплив. Характер відгуку визначається внутрішнім станом «чорного ящика». Використовуючи інформацію, що несе в собі відгук, для керування фактором впливу можна через систему зворотного зв'язку активно направити розвиток «чорного ящика»

убік досягнення заданого цільового стану акумулятора, що заряджається. У принципі для цього навіть немає необхідності знати в деталях внутрішній пристрій «чорного ящика» і механізми процесів, що протікають у ньому. Однак знання того й іншого створює додаткові можливості для підвищення ефективності заряду і подовження життя акумулятора.

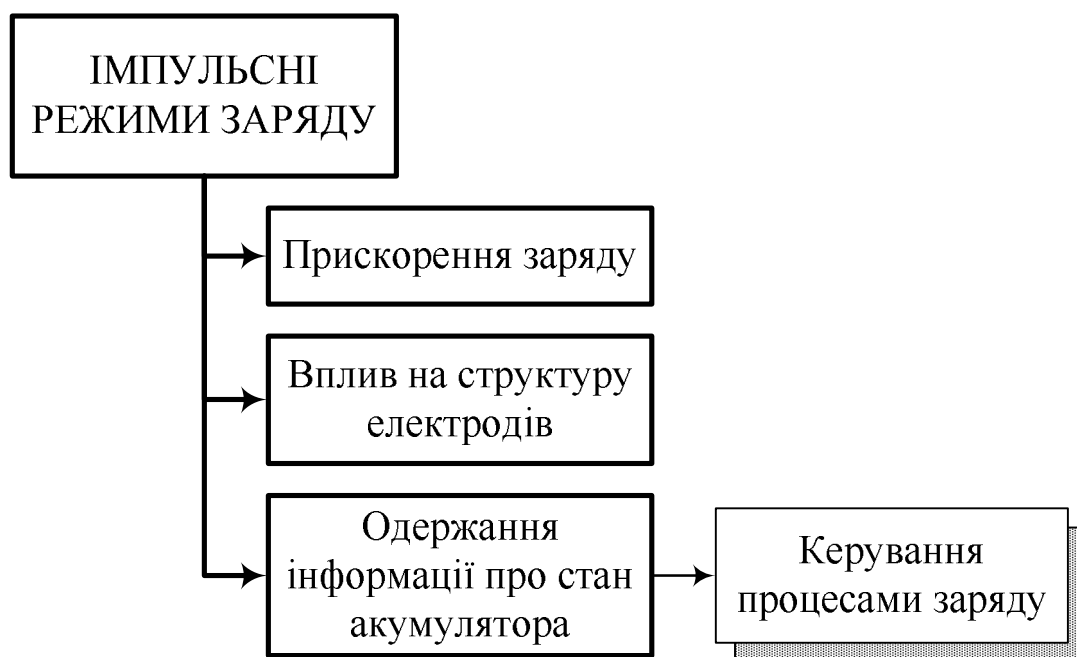


Рис. 2.1. Вплив імпульсних режимів заряду на процеси заряду і якості акумуляторної батареї

При використанні імпульсних режимів виникає велике різноманіття можливих варіантів. Може мінятися тривалість імпульсів, їхня амплітуда, шпаруватість, всіляким образом можуть чергуватися імпульси різного напрямку й т.д. Для того, щоб досить раціонально підійти до вибору параметрів імпульсів, варто виходити хоча б із самих загальних оцінок динаміки процесів, що відбуваються в акумуляторі при зарядці. Так наприклад, при занадто коротких імпульсах через акумулятор буде проходити, в основному, нефарадеєвський ємнісний струм, що не дає приросту заряду. При дуже тривалих імпульсах процес буде наближатися до умов звичайного режиму заряду постійним

струмом. У цьому випадку застосування імпульсного режиму з надмірно тривалими імпульсами втрачає сенс.

Таким чином, для раціонального вибору тривалості імпульсів є цілком об'єктивний критерій – постійна часу перехідного процесу. Тривалість зарядних імпульсів повинна бути сумірна з часом виходу об'єкта на квазістаціонарний режим. Що стосується амплітуди імпульсів зарядного струму, то вона повинна певним чином корелювати з їхньою тривалістю для того, щоб за час імпульсу напруга на акумуляторі, що заряджається, не встигала вийти за припустимі межі. Оскільки параметри перехідного процесу змінюються по мірі заряду акумулятора, параметри імпульсів зарядного струму також не можуть залишатися незмінними. Ці параметри потрібно адаптувати до стану акумулятора у даний момент часу. Для цього потрібна адаптивна система імпульсного асиметричного заряду, яка повинна функціонувати таким чином, щоб на всьому протязі процесу заряду параметри імпульсів, що подаються, залишалися в необхідній відповідності зі змінними параметрами перехідного процесу.

## **2.2. Перехідні процеси при подачі на акумуляторну батарею імпульсу струму**

При подачі на акумулятор одиночного імпульсу струму виникає відповідний імпульс напруги. Форма цього імпульсу може бути різною залежно від типу акумулятора, ступеня його зарядженості, а також від тривалості й амплітуди струмового імпульсу. У всіх випадках імпульс напруги складається із двох складових – миттєвого викиду напруги в момент включення й, відповідно, вимикання струму, і ділянки, що відносно повільно змінюється в часі. Миттєва компонента являє собою омічне спадання напруги в електроліті між електродами. Повільна компонента відображує процеси, що відбуваються безпосередньо на електродах акумулятора. При подачі струмового імпульсу більш-менш швидке наростання поляризаційної складової, після вимикання струму – поступовий спад поляризації. На рис. 2.2 показані осцилограми імпульсів напруги, що виникають як відгук на однократний струмовий імпульс [42].

Як видно, у кислотному акумуляторі величина омичного компонента досить мала (рис. 2.2, крива *a*). Поляризаційний компонент наростає досить повільно майже за лінійним законом, а при вимиканні струму настільки ж повільно спадає. У нікель-кадмієвому акумуляторі (Ni-Cd) омичний компонент набагато більший, а розвиток поляризаційного компонента відбувається майже по тій же динаміці, що й у випадку кислотного акумулятора (рис. 2.2, крива *б*). Омичний компонент у імпульсів напруги на літій-іонних акумуляторах (Li-ION) переважає, а поляризаційна складова істотно менше (рис. 2.2, крива *г*), так само як і у нікель-метал-гідридного (Ni-MH) акумулятора (рис. 2.2, крива *в*).

Треба відзначити, що форма імпульсів напруги не залишається незмінною в процесі заряду акумулятора, а зазнає певних змін. Таким чином, осцилограми імпульсів напруги, наведені на рисунках, не є абсолютно характерними для відповідних типів акумуляторів. Всі вони відносяться до конкретних стадій заряду й у ході його можуть істотно змінюватися.

Омична складова імпульсів напруги не представляє інтересу, оскільки має тривіальне походження. Потрібно розглянути поляризаційну компоненту і хід її розвитку на протязі дії імпульсу струму.

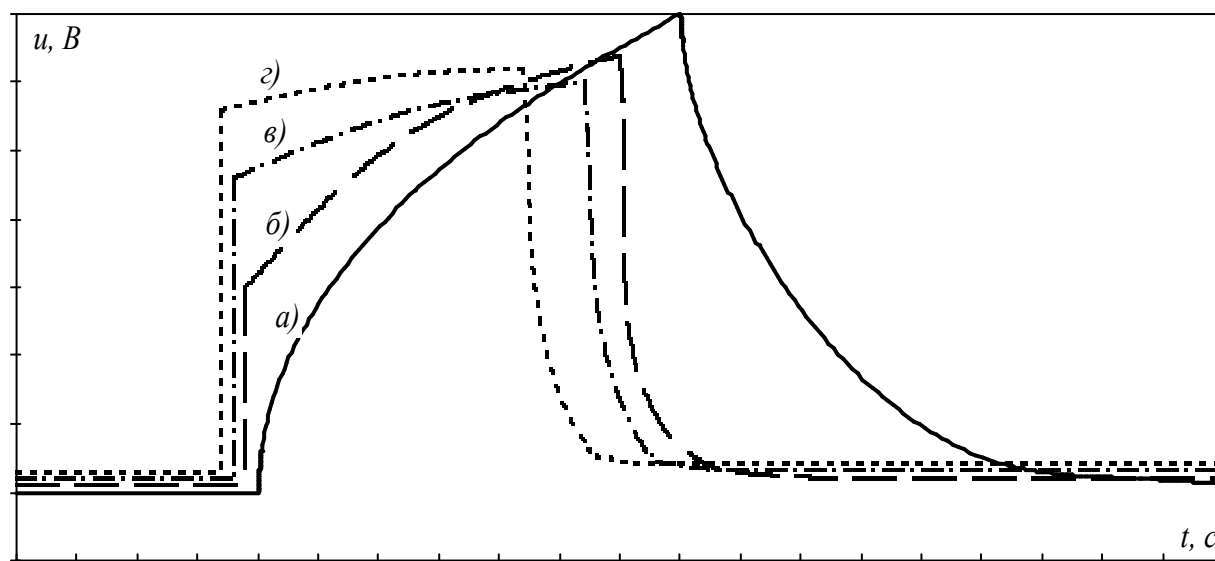


Рис. 2.2. Осцилограми імпульсів напруги на кислотному (*a*), Ni-Cd (*б*), Ni-MH (*в*) та Li-ION (*г*) акумуляторах.

Процеси в акумуляторі при заряді періодичними імпульсами струму, або імпульсним асиметричним струмом, можна розглядати тільки з урахуванням ємності подвійного шару, оскільки вона впливає на перехідні процеси в акумуляторі. Коли постійний струм переривається, не дивлячись на те, що струм у колі дорівнює нулю, подвійний шар залишається зарядженим, впливаючи на локальні струми в пористих електродах. Ці струми спричинені розрядом подвійного шару на електрохімічну реакцію, в наслідок чого напруга при заряді досягає стану рівноваги за кінцеву константу часу. Цю часову константу можна розрахувати прирівнявши зарядний струм подвійного шару до фарадеєвського струму. Використовуючи лінійну кінетику, приблизний вираз буде наступним [83]:

$$\tau_{п.з.} = \frac{RTC}{Fi_0} = 0,059 \cdot \frac{C}{i_0} \quad (2.1)$$

де  $\tau_{п.з.}$  – постійна часу процесу переносу заряду;

$R$  – універсальна газова стала,  $8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;

$T$  – температура,  $\text{К}$ ;

$C$  – питома ємність,  $\text{Ф}/\text{см}^2$ ;

$F$  – постійна Фарадея,  $96\,485,3383(83) \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;

$i_0$  – щільність струму обміну,  $\text{А}/\text{см}^2$ .

З рівняння (2.1) видно, що постійна часу для процесу змінюється по лінійному закону із питомою ємністю  $C$ , та оберненопропорційно щільності струму обміну ( $i_0$ ). Іншими словами результатом кінетично-пасивних реакцій буде відносно велика постійна часу, в той час як у реакцій, що легко протікають, постійна часу буде менша. Наприклад, реакція цинкового електроду протікає легко і перехідний час складає приблизно  $50 \text{ мкс}$ , при щільності струму обміну  $i_0$  порядку  $10^{-2} \text{ А}/\text{см}^2$  і ємністю подвійного шару  $20 \text{ мкФ}/\text{см}^2$  при кімнатній температурі, в той час коли перехідний час нікель-гідро-оксидного електроду становить  $5 \text{ мс}$ , при щільності струму обміну  $i_0$  порядку  $10^{-4} \text{ А}/\text{см}^2$ . Мале значення постійної часу було причиною того, що в більшості випадків дослідниками вона ігнорувалась в більшості математичних моделей акумуляторів. Також слід

відмітити, що кінетика реакції двоокису свинцю дуже інертна і постійна перехідного часу становить порядку секунд при щільності струму обміну  $i_0$  порядку  $10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , що приводить до висновку про важливість урахування постійної перехідного часу у динаміці.

При розробці математичних моделей акумуляторів впливом ємності подвійного шару на процеси в більшості випадків нехтують, оскільки розглядають загальний випадок заряду постійним струмом. При заряді імпульсним та імпульсним асиметричним струмом в моделях потрібно враховувати ємність подвійного шару, оскільки тривалість застосовуваних зарядних імпульсів повинна бути сумірна з часом виходу об'єкта на квазістаціонарний режим. Як вже зазначалось, при занадто коротких імпульсах через акумулятор буде проходити, в основному, нефарадеевський ємнісний струм, що не дає приросту заряду, а при дуже тривалих імпульсах процес буде наближатися до умов звичайного режиму заряду постійним струмом і у цьому випадку застосування імпульсного режиму з надмірно тривалими імпульсами втрачає зміст.

При розгляді кінетики електродних процесів можна обмежитись випадком плоского електроду, у якому потенціал змінюється лише впродовж однієї вісі ( $x$ ), яка орієнтована нормально до зовнішньої поверхні електроду. Прийmemo спочатку, що концентраційна поляризація відсутня (далі буде показано, як її можна врахувати). При вказаних умовах процеси у пористому електроді описуються рівнянням [34]:

$$\sigma_{\text{еф.}} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - C \frac{\partial \eta}{\partial t} - S \cdot i_0 \cdot f(\eta) = 0 \quad (2.2)$$

де  $\eta$  – поляризація,  $V$ ;

$C$  – питома ємність подвійного шару на пористому електроді,  $F/cm^2$ ;

$\sigma_{\text{еф.}}$  – ефективна провідність електроліту в порах електроду,  $\text{Om}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ;

$S$  – питома поверхня електроду;

$i_0$  – струм обміну електродного процесу,  $A$ ;

$f(\eta)$  – функція, яка визначає струм розряду в залежності від поляризації.

Для випадку малої поляризації приймаємо  $f(\eta)=2\eta/b$ , де  $b$  – постійна порядку  $RT/F$  ( $b=0,059$ ), з урахуванням граничних умов для даного випадку:  $(\partial\eta/\partial x)_{0,l}=-I_s/\sigma_{ef}$ . – на поверхні, до якої струм підводиться через електроліт,  $(\partial\eta/\partial x)_{l,t}=0$  – на зворотній поверхні ( $x=l$ ,  $l$  – товщина електроду). Початкова умова:  $\varphi_{x,0}=0$ . Ввівши безрозмірні величини для поляризації, поляризаційного струму, лінійного розміру і часу:  $\psi=\eta/b$ ;  $J=I/I_0$ ;  $X=x/x_l$ ;  $\theta=t/\tau$ ; де  $x_l=\sqrt{\sigma_{ef}b/2Si_0}$ ;  $I_0=\sigma_{ef}b/x_l=\sqrt{2Si_0\sigma_{ef}b}$ ;  $\tau=bC/2Si_0=bC'/2i_0$  ( $C'$  – ємність подвійного шару на  $1\text{ см}^2$  поверхні), отримуємо рівняння (2.2) в безрозмірних величинах [34]:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial X^2}-\frac{\partial\psi}{\partial\theta}-\psi=0 \quad (2.3)$$

Розв'язавши рівняння (2.3) при граничних початкових умовах  $(\partial\psi/\partial X)_{0,\theta}=-J_s$  (індекс  $s$  має відношення до зовнішньої поверхні електроду);  $(\partial\psi/\partial X)_{\delta,\theta}=0$ ,  $\psi_{X,0}=0$  ( $\delta=l/x_l$  – приведена безрозмірна товщина електроду), отримуємо для двох крайніх випадків приведеної товщини наступні рівняння [34]:  
– для електроду необмеженої товщини (при  $\delta \rightarrow \infty$ ):

$$\psi_{0,\theta}=J_s \operatorname{erf}\sqrt{\theta}. \quad (2.4)$$

– для електроду з малою приведеною товщиною маємо звичайне рівняння кривої заряду плоского електроду (при  $\delta \rightarrow 0$ ):

$$\psi_{0,\theta}=\psi_\infty [1-\exp(-\theta)]. \quad (2.5)$$

На рис. 2.3 зображені криві заряду пористих електродів для крайніх випадків товщини ( $\delta \rightarrow \infty$  і  $\delta \rightarrow 0$ ), розраховані за формулами (2.4) та (2.5). Для проміжних випадків приведеної товщини криві заряду будуть знаходитись у проміжку між кривими крайніх випадків.

Рис. 2.3 показує різницю між електродами різної приведеної товщини, але не дає досить наочного уявлення про те, як впливає на структуру перехідного процесу зміна опору на електродній поверхні. Для того, щоб отримати наочне



уявлення, потрібно перерахувати графіки перехідних процесів для умов постійного поляризуючого імпульсу, але різної величини опору на електродній поверхні [34].

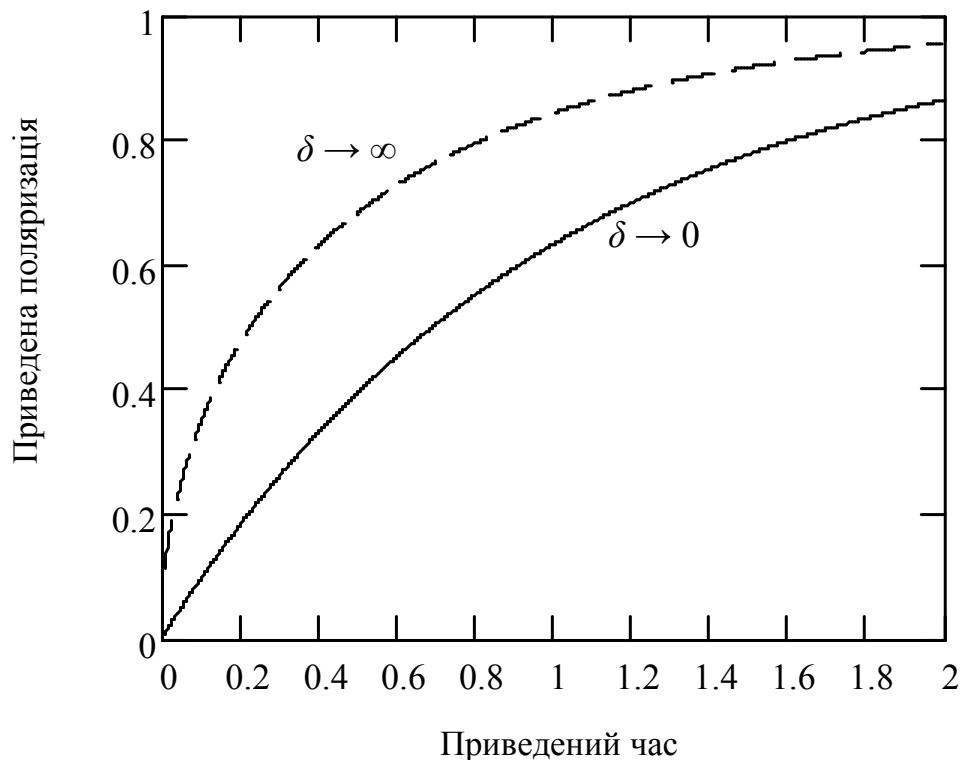


Рис. 2.3. Криві заряду пористих електродів великої і малої товщини імпульсом постійного струму. Поляризація вказана у долях від значення, що встановилося

Вираз, що описує криву заряду пористого електрода для певної приведеної товщини при подачі на акумуляторну батарею імпульсу струму, має наступний вигляд [42]:

$$E = I \cdot l \rho \cdot \left\{ \frac{\coth \delta}{\delta} - \frac{1}{\delta^2} \exp(-T\delta^2) - \frac{2}{\delta^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( 1 + \frac{\pi^2 n^2}{\delta^2} \right)^{-1} \exp \left[ - \left( 1 + \frac{\pi^2 n^2}{\delta^2} \right) \cdot T\delta^2 \right] \right] \right\}, \quad (2.6)$$

де  $\rho$  – опір електроліту в порах електрода, Ом·м;

$\delta$  – приведена товщина електрода;

$I$  – щільність струму через електрод, А/м<sup>2</sup>;

$l$  – довжина електрода, м.

Безрозмірна приведена товщина електрода ( $\delta$ ) є мірою нерівномірності розподілу інтенсивності процесу по товщині реального електрода. Якщо наведена товщина  $\delta$  мала й дорівнює приблизно 0.1 і менше, то в такому електроді процес заряду поширюється практично рівномірно на всю його товщину. Навпроти, якщо  $\delta$  велика й становить кілька одиниць, то усередині такого електрода процес локалізується переважно в поверхневому шарі, а внутрішня поверхня поляризується дуже нерівномірно.

Приведена (безрозмірна) товщина електрода  $\delta$  обернено пропорційна кореню квадратному з величини поверхневого опору електродного матеріалу  $R$ :

$$\delta = l \cdot \sqrt{2S\rho/R}, \quad (2.7)$$

де  $S$  – питома поверхня матеріалу електрода;

$R$  – опір плівки поверхні електродного матеріалу;

$C$  – електрична ємність на поверхні електродного матеріалу;

$\rho$  – опір електроліту в порах електрода.

Приведений час  $\theta$  пропорційний квадрату приведеної товщини:

$$\theta = T \cdot \delta^2,$$

де  $T = t / (\rho C S l^2)$ .

Результати розрахунків по формулі (2.6) показані нижче на рис. 2.4. Криві розраховані для наступних значень параметрів:  $S = 10^5 \text{ м}^{-1}$ ,  $C = 0.2 \text{ Ф/м}^2$ ,  $l = 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $I = 10 \text{ А/м}^2$ ,  $R$ , відповідно, для кривих *a)*, *б)*, *в)*, *г)*: 50, 2, 0.5, 0.125 Ом·м<sup>2</sup>; значення приведеної товщини електродів  $\delta$  для кривих *a)*, *б)*, *в)*, *г)* відповідно: 0.2, 1, 2, 4. Як видно, зі зміною величини поляризаційного опору й, відповідно, приведеної товщини електрода, форма кривої заряду істотно змінюється. На електродах з великою приведеною товщиною, яким відповідає малий поляризаційний опір матеріалу електрода, поляризація швидко досягає стаціонарного значення й далі вже не змінюється – крива проходить горизонтально. При відносно великих величинах поляризаційного опору (при малих  $\delta$ ) крива виходить на майже прямолінійну похилу ділянку.

Порівнюючи теоретичні криві заряду з осцилограмами, наведеними вище на рис. 2.2, можна бачити безсумнівну подібність. Форми кривих заряду дозволяють якісно характеризувати режими роботи електродів для різних типів акумуляторних батарей. Так, осцилограми на рис. 2.2 для свинцевого (крива *a*) й нікель-кадмієвого (крива *б*) акумуляторів показують, що поляризаційний опір у цих випадках порівняно великий й приведена товщина електродів відносно мала. У випадку літій-іонних акумуляторів (рис. 2.2, крива *з*) поляризаційний опір порівняно малий, а приведена товщина значна. На нікель-метал-гідридному акумуляторі (рис. 2.2, крива *в*) реалізується проміжний випадок.

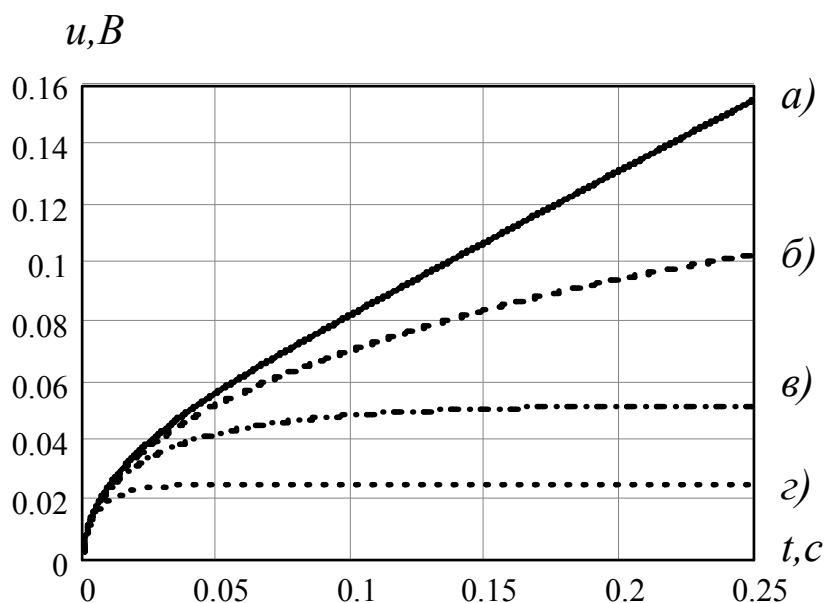


Рис. 2.4. Теоретичні криві заряду пористих електродів при включенні поляризуючого імпульсу

Форма кривої наростання поляризації при подачі струмового імпульсу дає досить істотну інформацію про характер процесів, що протікають в електродах акумулятора. Коли поляризаційний опір на поверхні часток електродного матеріалу відносно малий й, відповідно, мала ефективна глибина поширення процесу, то може спостерігатися «пошаровий» режим заряду. Область заряду в цьому режимі поширюється фронтально від поверхні в глибину електрода. Пошаровому режиму заряду відповідає крива заряду, що характеризується

швидким виходом на стаціонарний рівень поляризації (рис. 2.4, крива *г*). Інший крайній випадок спостерігається, якщо поверхневий опір на частках активного матеріалу порівняно великий. При цьому ефективна глибина проникнення процесу велика й значно перевищує реальну товщину електрода. У цих умовах інтенсивність процесу усередині електрода розподіляється практично рівномірно. Електрод працює в «об'ємному» режимі. Крива заряду в цьому режимі характеризується безперервним наростанням потенціалу приблизно за лінійним законом (рис. 2.4, крива *а*). В умовах, коли поляризаційний опір на частках електродного матеріалу у порівнянні з крайніми випадками має проміжне значення, то можуть реалізуватися будь-які проміжні варіанти (рис. 2.4, крива *б* та *в*).

Форми кривих заряду дозволяють скласти уявлення про реальний режим роботи електродів в акумуляторі в кожному конкретному випадку.

### 2.3. Ідентифікація параметрів схемної моделі акумулятора

**Схемна модель акумулятора.** На теперішньому етапі розвитку електрохімії накопичено досить багато теоретичних і практичних відомостей про процеси, що відбуваються при різних методах заряду і розряду акумуляторів, і на їх основі створено багато математичних, електрохімічних і електричних еквівалентних моделей, які в певній мірі відображують ці процеси [45, 47]. В запропонованій у роботі схемній моделі, яка зображена на рис. 2.5, враховані основні необхідні параметри для моделювання швидких перехідних процесів, що відбуваються в акумуляторі при подачі на нього імпульсу струму. Схеми складається з двох увімкнених паралельно гілок: до першої входить джерело напруги з внутрішнім опором ( $E_{AB}$ ,  $R_{вн.}$ ), до другої – опір та ємність ( $R_{e.п.}$ ,  $C_{e.п.}$ ), які враховують електродні процеси, що відбуваються при подачі імпульсу струму на акумулятор, а також у випадку, коли стала часу перехідного процесу при подачі зарядного імпульсу більша за сталу часу перехідного процесу при вимкненні зарядного імпульсу, у схемну модель вводиться додатковий опір розряду  $R_p$ , який вмикається ключем  $S$  паралельно опорам  $R_{e.п.}$  та  $R_{вн.}$  після вимкнення зарядного

імпульсу.

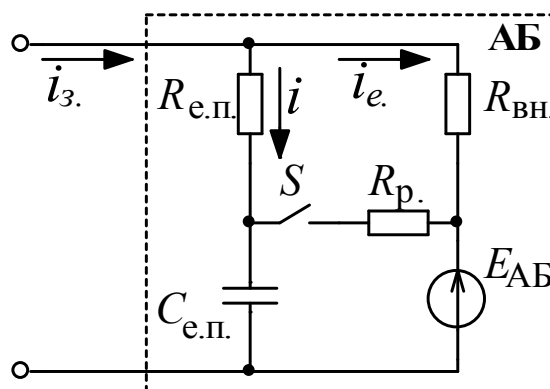


Рис. 2.5. Схемна модель акумулятора з урахуванням електродних процесів

Схемна модель акумулятора з урахуванням електродних процесів необхідна для організації зворотного зв'язку акумулятора із зарядною системою, що дозволить точно і оптимально керувати процесом заряду, а саме – змінювати довжини імпульсів зарядного струму в залежності від стану акумулятора.

**Знаходження сталої часу перехідного процесу.** Для знаходження параметрів моделі потрібно знати сталу часу перехідного процесу. Перехідний процес у колі закінчується тоді, коли вільне значення напруги (або струму) буде дорівнювати нулю, тобто при  $t=\infty$ . Перехідний процес прийнято вважати таким, що закінчився при досягненні функцією 0,95...0,98 усталеного значення [36], що відповідає інтервалу часу  $(3...4)\cdot\tau$ , де  $\tau$  – стала часу перехідного процесу. Оскільки схема заміщення акумулятора залежить від його типу, стану зарядженості та віку, то аналітично визначити усталене значення складно. Тому для визначення моменту завершення перехідного процесу доцільно користуватися методами чисельного диференціювання з урахуванням особливостей схем заміщення електродних процесів.

Для визначення моменту завершення перехідного процесу доцільно користуватися виразом для знаходження відношень приростів:

$$\delta = \frac{u(k \cdot T) - u[(k-1) \cdot T]}{u(T) - u_{(0)}}, \quad (2.8)$$

де  $T$  – період квантування,  $c$ ; а  $k \in Z$ .

При відношенні приростів  $\delta \leq 0,05$  перехідний процес можна вважати таким, що закінчився.

Оскільки:

$$\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = \delta \Rightarrow -\frac{t}{\tau} = \ln \delta \Rightarrow \tau = -\frac{t}{\ln \delta},$$

то постійну часу знаходять із виразу:

$$\tau = -\frac{k \cdot T}{\ln \delta}. \quad (2.9)$$

Визначивши значення постійної часу проводимо ідентифікацію параметрів схемної моделі акумулятора, зображеної на рис. 2.5.

**Ідентифікація параметрів схемної моделі акумулятора і усталеного значення напруги.** Для розрахунку параметрів схемної моделі, зображеної на рис. 2.5, при подачі імпульсу струму необхідно вимірювати напругу на акумуляторі на початку та в кінці перехідного процесу ( $u_{(0)}$ ,  $u_{(\infty)}$ ), напругу холостого ходу акумулятора (або напругу на акумуляторі, що знаходиться у спокої  $u_{\text{сп.}} = E_{\text{АБ}}$ ), зарядний струм ( $i_3$ ) і сталу часу перехідного процесу  $\tau$ . За виконання умови закінчення перехідного процесу знаходимо всі параметри моделі акумулятора.

Спочатку знаходимо внутрішній опір ( $R_{\text{вн.}}$ ):

$$R_{\text{вн.}} = \frac{u_{(\infty)} - E_{\text{АБ}}}{i_3}. \quad (2.10)$$

Наступним знаходимо еквівалентний струм  $i_{e.(0)}$  у гілці з джерелом напруги і внутрішнім опором ( $E_{\text{АБ}}$ ,  $R_{\text{вн.}}$ ):

$$i_{e.(0)} = \frac{u_{(0)} - E_{\text{АБ}}}{R_{\text{вн.}}}. \quad (2.11)$$

Знаходимо струм  $i_{e.п.}$  у початковий момент подачі імпульсу струму у гілці з опором та ємністю ( $R_{e.п.}$ ,  $C_{e.п.}$ ), які враховують електродні процеси:

$$i_{(0)} = i_3 - i_{e.(0)}. \quad (2.12)$$

Визначаємо опір електродних процесів  $R_{e.п.}$ :

$$R_{\text{е.п.}} = \frac{u_{(0)} - E_{\text{АБ}}}{i_{(0)}}. \quad (2.13)$$

Отже, можна знайти ємність:

$$C_{\text{е.п.}} = \frac{\tau}{R_{\text{вн.}} + R_{\text{е.п.}}}. \quad (2.14)$$

У випадку, коли стала часу перехідного процесу при подачі зарядного імпульсу більша за сталу часу перехідного процесу при вимкненні зарядного імпульсу у модель вводиться додатковий опір розряду, який вмикається ключем  $S$  паралельно опорам  $R_{\text{е.п.}}$  та  $R_{\text{вн.}}$  після вимкнення зарядного імпульсу і розраховується за формулою:

$$R_p = \frac{\frac{\tau_{p.}}{C_{\text{е.п.}}} \cdot (R_{\text{е.п.}} + R_{\text{вн.}})}{R_{\text{е.п.}} + R_{\text{вн.}} - \frac{\tau_{p.}}{C_{\text{е.п.}}}}. \quad (2.15)$$

Визначені параметри моделі дозволяють прогнозувати час завершення перехідного процесу, побудувати теоретичні графіки перехідних процесів на акумуляторній батареї і порівняти їх із значеннями, отриманими на практиці. Для оптимізації ресурсів обчислювальної системи також можна корегувати період

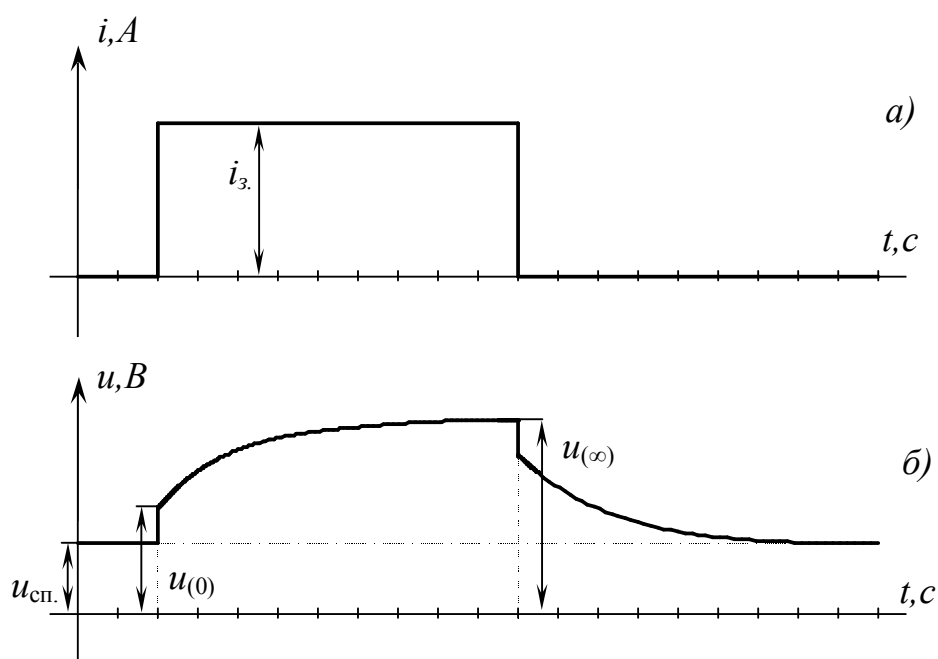


Рис. 2.6. Форма імпульсу зарядного струму (а), що подається на акумулятор, та форма імпульсу напруги (б), що виникає при цьому на акумуляторі

квантування  $T$  в залежності від часу перехідного процесу  $\tau$ , значення якого ми отримуємо слідкуючи за закінченням перехідного процесу.

У випадку, коли імпульс струму перервали до того, як перехідний процес закінчився, значення напруги в усталеному режимі  $u_{(\infty)}$  не буде отримано, а отже буде неможливо скористатися запропонованою вище методикою розрахунку параметрів схемної моделі акумулятора. Отже, значення напруги в усталеному режимі  $u_{(\infty)}$  потрібно розрахувати методами обчислювальної математики.

Для визначення перехідної напруги можна записати рішення у такому вигляді:

$$u(t) = u_{(\infty)} + [u_{(0)} - u_{(\infty)}] e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2.16)$$

де  $u_{(\infty)}$  – значення напруги в усталеному режимі;

$u_{(0)}$  – початкове значення напруги в момент комутації ( $t = 0$ );

З рівняння (2.16) значення напруги в усталеному режимі  $u_{(\infty)}$  визначається як:

$$u_{(\infty)} = \frac{u(t) - u_{(0)} e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}}. \quad (2.17)$$

В рівнянні (2.17) заміняємо неперервний час  $t$  на дискретний час  $kT$ , де  $T$  – період квантування,  $c$ ; а  $k \in \mathbb{Z}$ :

$$u_{(\infty)} = \frac{u(kT) - u_{(0)} e^{-\frac{kT}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{kT}{\tau}}}. \quad (2.18)$$

У (2.18) підставляємо рівняння (2.9) і отримуємо:

$$u_{(\infty)} = \frac{u(kT) - u_{(0)} \delta}{1 - \delta}. \quad (2.19)$$

У рівняння (2.19) підставляємо (2.8) і отримуємо рівняння для знаходження значення усталеної напруги у випадку, коли перехідний процес не закінчився:



$$u_{(\infty)} = \frac{u(kT) - u_{(0)} \frac{u(kT) - u[(k-1)T]}{u(T) - u_{(0)}}}{1 - \frac{u(kT) - u[(k-1)T]}{u(T) - u_{(0)}}}. \quad (2.20)$$

Спростивши вираз (2.20) отримуємо наступне рівняння:

$$u_{(\infty)} = \frac{u(T)u(kT) - 2u_{(0)}u(kT) + u_{(0)}u[(k-1)T]}{u(T) - u_{(0)} - u(kT) + u[(k-1)T]}. \quad (2.21)$$

Отримане рівняння (2.21) дозволяє розрахувати параметри моделі, зображеної на рис. 2.5, у випадку, коли імпульс струму перервали до того, як перехідний процес встиг закінчитися і значення усталеної напруги у кінці перехідного процесу ( $u_{(\infty)}$ ) не було виміряне.

#### 2.4. Порівняння розрахункових кривих перехідних напруг з експериментальними

Як вже зазначалося в п. 2.2 при подачі на акумулятор одиночного імпульсу струму виникає відповідний імпульс напруги, форма якого може бути різною залежно від типу акумулятора, ступеня його зарядженості, а також від тривалості й амплітуди струмового імпульсу. За допомогою отриманих схемної моделі акумулятора та розрахункових формул побудовані графіки форми імпульсів напруги для різних типів акумуляторів при дії на них імпульсу струму, а також проведено порівняння з експериментальними даними відгуків напруги для різних типів акумуляторів при дії на них імпульсу струму, отриманими в [42]. Результати представлені на рис. 2.7–2.12.

На рис. 2.7, *а* зображена осцилограма відгуку напруги на імпульс струму на свинцево-кислотному акумуляторі [42]. Із осцилограми (рис. 2.7, *а*) визначені сталі часу перехідного процесу і усталене значення напруги, з яких за методикою, запропонованою в п. 2.3, розраховані параметри схемної моделі свинцево-кислотного акумулятора. На рис. 2.7, *б* зображена розрахована форма імпульсу відгуку напруги на імпульс струму. Для порівняння розрахованої форми імпульсу

напруги і осцилограми відгуку напруги на імпульс струму криві були накладені одна на одну і зображені на рис. 2.7, в. В табл. 2.1 зведені розраховані і експериментальні значення напруг та розраховано їхні відхилення.

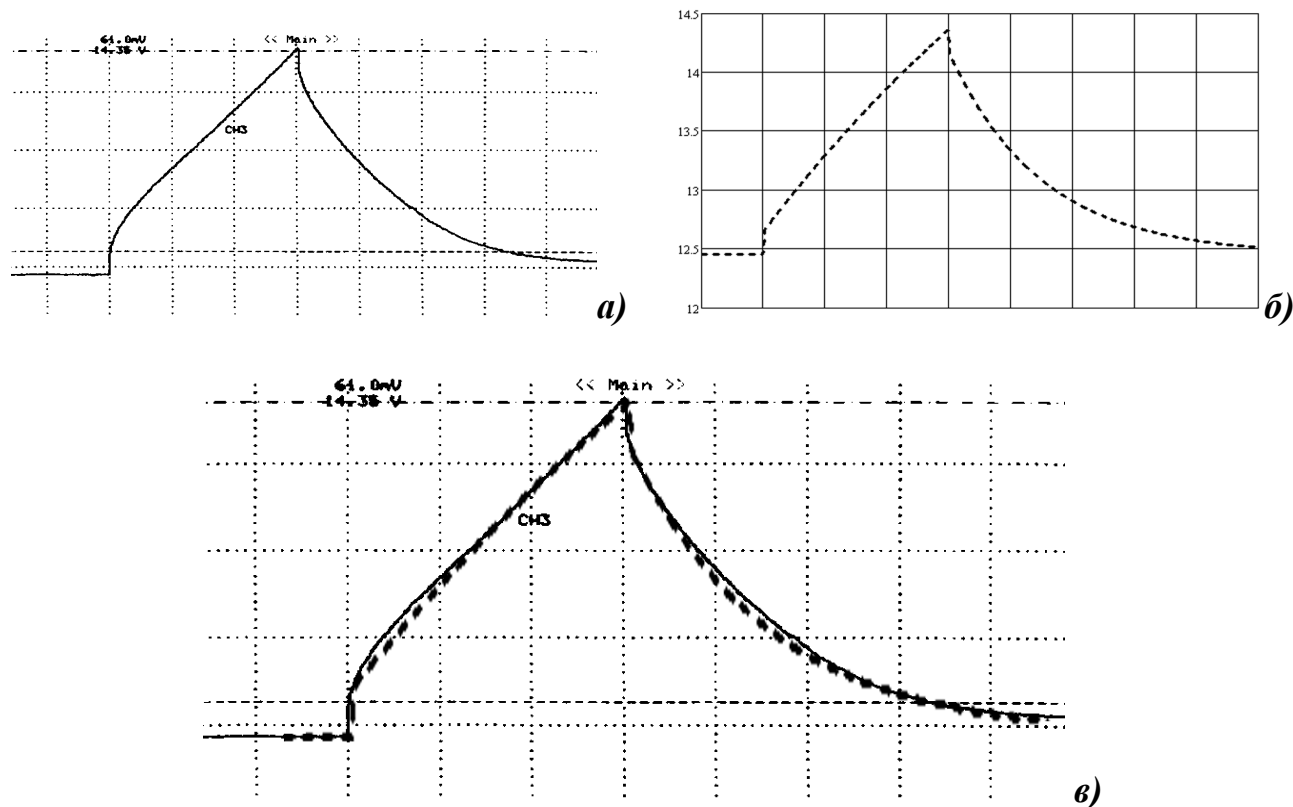


Рис. 2.7. Осцилограма імпульсу напруги (а), розрахована форма імпульсу (б) та накладена розрахована форма на осцилограму імпульсу напруги (в) на свинцево-кислотному акумуляторі

Сталі часу перехідного процесу, визначені із осцилограми на рис. 2.7, а:

- стала часу зарядного імпульсу:  $\tau_z = 1,035 \text{ мс}$ ;
- стала часу розрядного імпульсу:  $\tau_p = 0,2 \text{ мс}$ .

Параметри схемної моделі свинцево-кислотного акумулятора, розраховані за методикою, запропонованою в п. 2.3:

- напруга на акумуляторі у стані спокою:  $E_{AB} = 12,45 \text{ В}$ ;
- внутрішній опір:  $R_{вн.} = 1,11 \text{ Ом}$ ;
- опір електродних процесів:  $R_{e.п.} = 0,041 \text{ Ом}$ ;

- ємність електродних процесів:  $C_{e.п.} = 898,7 \text{ мкФ};$   
 – опір розряду:  $R_p = 0,276 \text{ Ом}.$

Таблиця 2.1

Розраховані і експериментальні значення напруг та їх відхилення для свинцево-кислотного акумулятора

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$u_p.$	12.45	12.833	13.01	13.18	13.345	13.504	13.658	13.806	13.95	14.088	14.222	14.351	13.912	13.671	13.47	13.303	13.162	13.045	12.947	12.865	12.797	12.74	12.692	12.652	12.619	12.591	12.568	12.549	12.532	12.519	12.508
$u_e.$	12.45	12.9	13.1	13.2	13.3	13.5	13.7	13.8	14	14.1	14.2	14.38	13.9	13.7	13.5	13.4	13.3	13.2	13.1	13	12.9	12.8	12.75	12.7	12.65	12.6	12.6	12.55	12.5	12.5	12.5
$\Delta u = \frac{u_p. - u_e.}{u_p.}$	0	-5.221e-3	-6.918e-3	-1.517e-3	3.372e-3	2.962e-4	-3.075e-3	4.346e-4	-3.584e-3	-8.518e-4	1.547e-3	-2.021e-3	8.626e-4	-2.121e-3	-2.227e-3	-7.292e-3	-0.01	-0.012	-0.012	-0.01	-8.049e-3	-4.71e-3	-4.57e-3	-3.794e-3	-2.457e-3	-7.148e-4	-2.546e-3	-7.969e-5	2.553e-3	1.518e-3	6.396e-4

З даних, які знаходяться в табл. 2.1, розраховано наступні параметри, необхідні для оцінки точності проведених розрахунків і запропонованої методики ідентифікації параметрів схемної моделі:

– середнє арифметичне всіх визначень:  $\Delta u_c = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta u_i = -3,071 \cdot 10^{-3};$

– середньоквадратичне відхилення:  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (\Delta u_i - \Delta u_c)^2}{n-1}} = 4,223 \cdot 10^{-3};$

– коефіцієнт варіації:  $V = \left| \frac{S}{\Delta u_c} \cdot 100\% \right| = 1,375\%;$

– максимальне абсолютне відхилення:  $\Delta u_{\max} = 0,012;$

– максимальне відхилення у відсотках:  $\Delta u_{\max} = 1,2\%.$

На рис. 2.8, *а* зображена осцилограма відгуку напруги на імпульс струму на Ni-Cd акумуляторі [42]. Із осцилограми (рис. 2.8, *а*) визначені сталі часу перехідного процесу і усталене значення напруги, та розраховані параметри схемної моделі Ni-Cd акумулятора. На рис. 2.8, *б* зображена розрахована форма імпульсу відгуку напруги на імпульс струму. Для порівняння розрахованої форми імпульсу напруги і осцилограми відгуку напруги на імпульс струму криві були накладені одна на одну і зображені на рис. 2.8, *в*. В табл. 2.2 зведені розраховані і експериментальні значення напруг та їх розраховані відхилення.

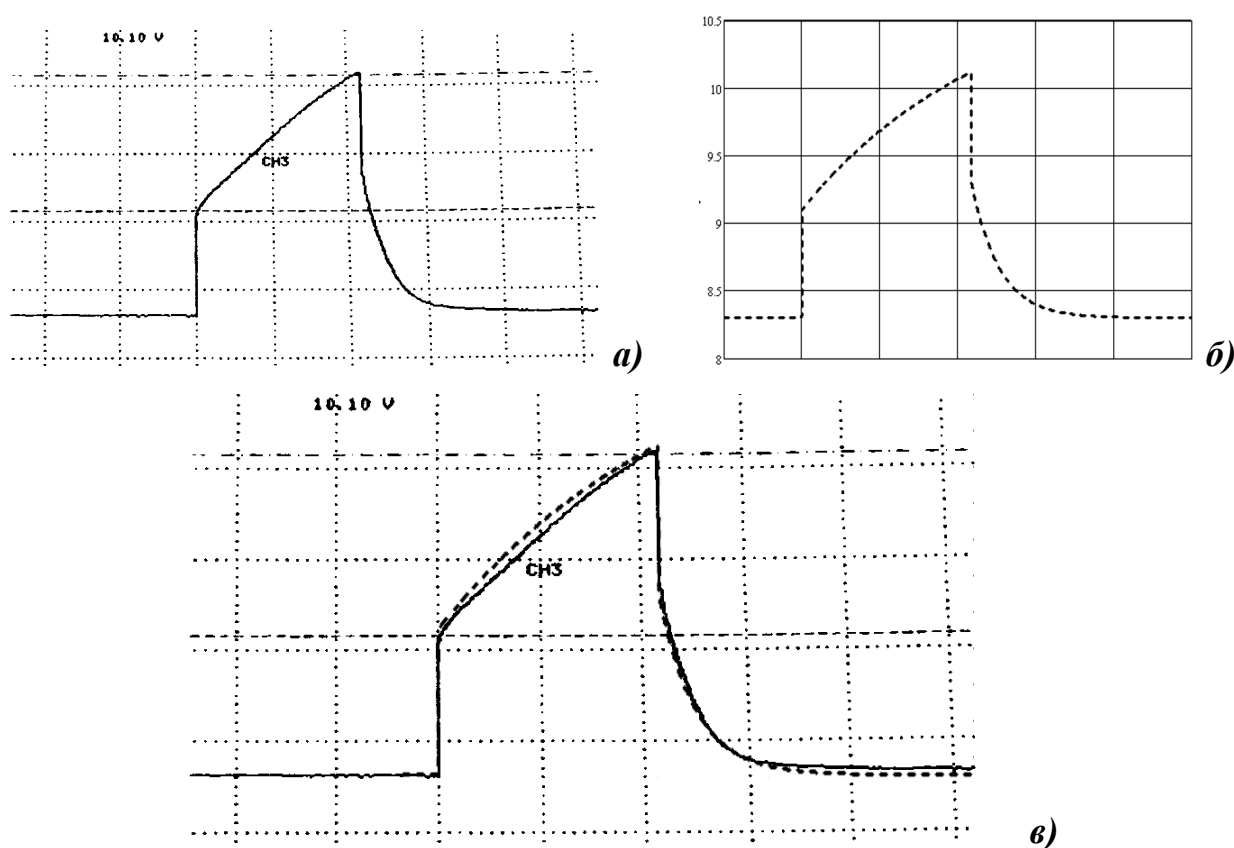


Рис. 2.8. Осцилограма імпульсу напруги (*а*), розрахована форма імпульсу (*б*) та накладена розрахована форма на осцилограму імпульсу напруги (*в*) на Ni-Cd акумуляторі

Сталі часу перехідного процесу, визначені із осцилограми на рис. 2.8, *а*:

- стала часу зарядного імпульсу:  $\tau_z = 438,3 \text{ мкс}$ ;
- стала часу розрядного імпульсу:  $\tau_p = 66,06 \text{ мкс}$ .

Розраховані параметри схемної моделі Ni-Cd акумуляторної батареї:

- напруга на акумуляторі у стані спокою:  $E_{AB} = 8,3 \text{ В};$
- внутрішній опір:  $R_{вн.} = 0,5 \text{ Ом};$
- опір електродних процесів:  $R_{e.п.} = 0,235 \text{ Ом};$
- ємність електродних процесів:  $C_{e.п.} = 596,1 \text{ мкФ};$
- опір розряду:  $R_p = 0,13 \text{ Ом}.$

Таблиця 2.2

Розраховані і експериментальні значення напруг та їх відхилення для Ni-Cd акумулятора

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$u_p.$	8.3	9.234	9.358	9.471	9.576	9.673	9.761	9.843	9.919	9.988	10.052	10.111	8.927	8.663	8.511	8.422	8.371	8.341	8.324	8.314	8.308	8.305	8.303	8.302	8.301	8.301
$u_e.$	8.3	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	9.95	10	10.1	10.15	8.9	8.7	8.5	8.4	8.4	8.35	8.35	8.3	8.3	8.3	8.3	8.25	8.25	8.25
$\Delta u = \frac{u_p. - u_e.}{u_p.}$	0	-7.147e-3	-4.488e-3	-3.062e-3	-2.506e-3	-2.791e-3	-3.995e-3	-5.791e-3	-3.125e-3	-1.201e-3	-4.775e-3	-3.857e-3	3.025e-3	-4.271e-3	1.292e-3	2.612e-3	-3.464e-3	-1.079e-3	-3.123e-3	1.684e-3	9.629e-4	6.02e-4	3.613e-4	6.264e-3	6.144e-3	6.144e-3

Середнє арифметичне всіх визначень:  $\Delta u_c. = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta u_i = -9,842 \cdot 10^{-4}.$

Середньоквадратичне відхилення:  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (\Delta u_i - \Delta u_c.)^2}{n-1}} = 3,718 \cdot 10^{-3}.$

Коефіцієнт варіації:  $V = \left| \frac{S}{\Delta u_c.} \cdot 100\% \right| = 3,778\%.$

Максимальне абсолютне відхилення:  $\Delta u_{\max} = 7,147 \cdot 10^{-3}.$

Максимальне відхилення у відсотках:  $\Delta u_{\max} = 0,72\%.$

На рис. 2.9, *а* зображена осцилограма відгуку напруги на імпульс струму на Li-ION акумуляторі фірми Motorola [42]. Із осцилограми (рис. 2.9, *а*) визначені сталі часу перехідного процесу і усталене значення напруги, та розраховані параметри схемної моделі Li-ION акумулятора фірми Motorola. На рис. 2.9, *б* зображена розрахована форма імпульсу відгуку напруги на імпульс струму. Для порівняння розрахованої форми імпульсу напруги і осцилограми відгуку напруги на імпульс струму криві були накладені одна на одну і зображені на рис. 2.9, *в*. В табл. 2.3 зведені розраховані і експериментальні значення напруг та їх розраховані відхилення.

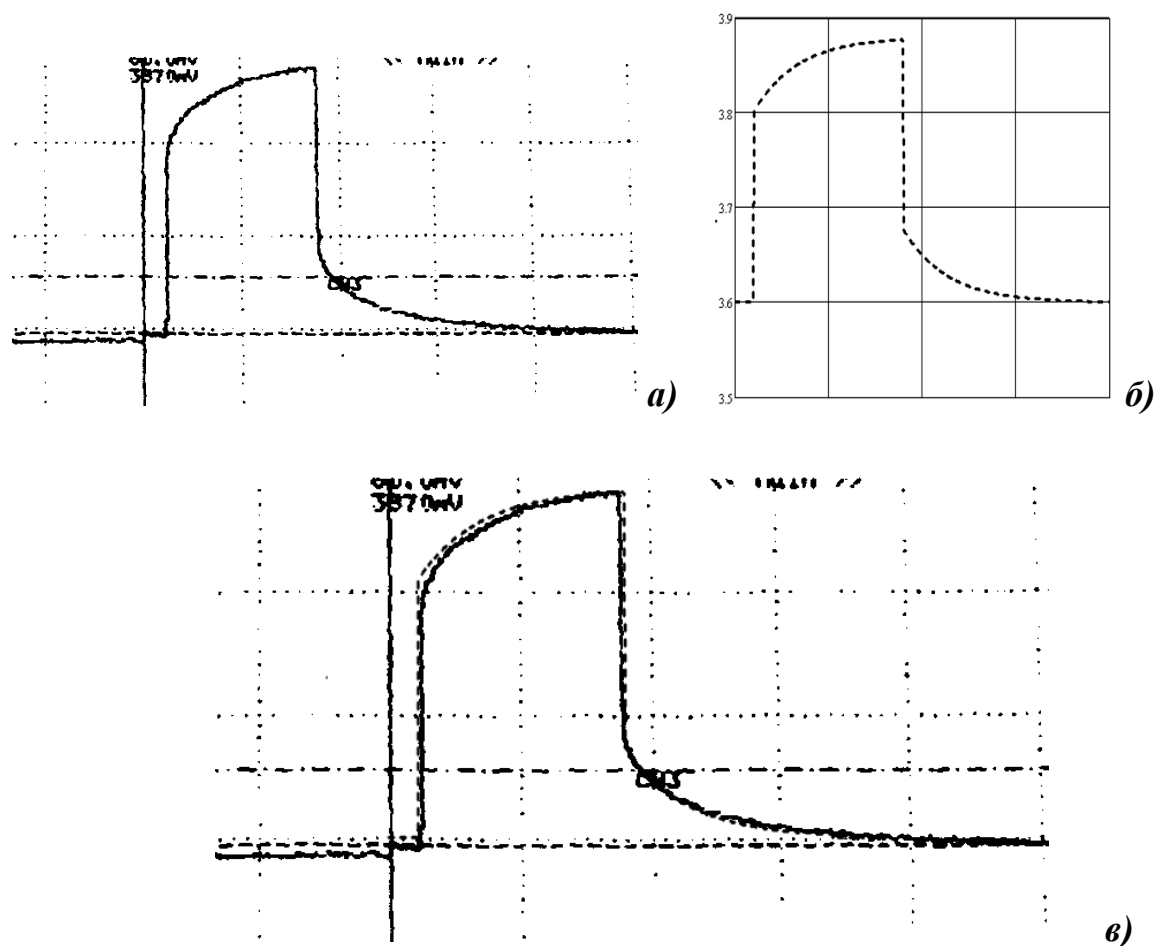


Рис. 2.9. Осцилограма імпульсу напруги (*а*), розрахована форма імпульсу (*б*) та накладена розрахована форма на осцилограму імпульсу напруги (*в*) на Li-ION акумуляторі фірми Motorola

Сталі часу перехідного процесу, визначені із осцилограми на рис. 2.9, *а*:

- стала часу зарядного імпульсу:  $\tau_z = 116,8 \text{ мкс};$
- стала часу розрядного імпульсу:  $\tau_p = 116,8 \text{ мкс}.$

Розраховані параметри схемної моделі Li-ION акумулятора фірми Motorola:

- напруга на акумуляторі у стані спокою:  $E_{AB} = 3,6 \text{ В};$
- внутрішній опір:  $R_{вн.} = 0,056 \text{ Ом};$
- опір електродних процесів:  $R_{e.п.} = 0,14 \text{ Ом};$
- ємність електродних процесів:  $C_{e.п.} = 596,1 \text{ мкФ}.$

Таблиця 2.3

Розраховані і експериментальні значення напруг та їх відхилення для Li-ION акумулятора фірми Motorola

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$u_p.$	3.6	3.828	3.845	3.855	3.861	3.865	3.867	3.657	3.634	3.62	3.612	3.607	3.604	3.603	3.602	3.601
$u_e.$	3.55	3.8	3.84	3.85	3.86	3.86	3.87	3.7	3.7	3.63	3.625	3.62	3.615	3.61	3.605	3.6
$\Delta u = \frac{u_p. - u_e.}{u_p.}$	0.014	7.315e-3	1.3e-3	1.297e-3	2.59e-4	1.294e-3	-7.758e-4	-0.012	-0.018	-2.762e-3	-3.599e-3	-3.604e-3	-3.052e-3	-1.943e-3	-8.329e-4	2.777e-4

Середнє арифметичне всіх визначень:  $\Delta u_c. = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta u_i = -1.304 \cdot 10^{-3}.$

Середньоквадратичне відхилення:  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (\Delta u_i - \Delta u_c.)^2}{n-1}} = 7,026 \cdot 10^{-3}.$

Коефіцієнт варіації:  $V = \left| \frac{S}{\Delta u_c.} \cdot 100\% \right| = 5,39\%.$

Максимальне абсолютне відхилення:  $\Delta u_{\max} = 0,018.$

Максимальне відхилення у відсотках:  $\Delta u_{\max} = 1,8\%.$

На рис. 2.10, *а* зображена осцилограма відгуку напруги на імпульс струму на Li-ION акумуляторі фірми Toshiba [42]. Із осцилограми (рис. 2.10, *а*) визначені сталі часу перехідного процесу і усталене значення напруги, та розраховані параметри схемної моделі Li-ION акумулятора фірми Toshiba. На рис. 2.10, *б* зображена розрахована форма імпульсу відгуку напруги на імпульс струму. Для порівняння розрахованої форми імпульсу напруги і осцилограми відгуку напруги на імпульс струму криві були накладені одна на одну і зображені на рис. 2.10, *в*. В табл. 2.4 зведені розраховані і експериментальні значення напруг та їх розраховані відхилення.

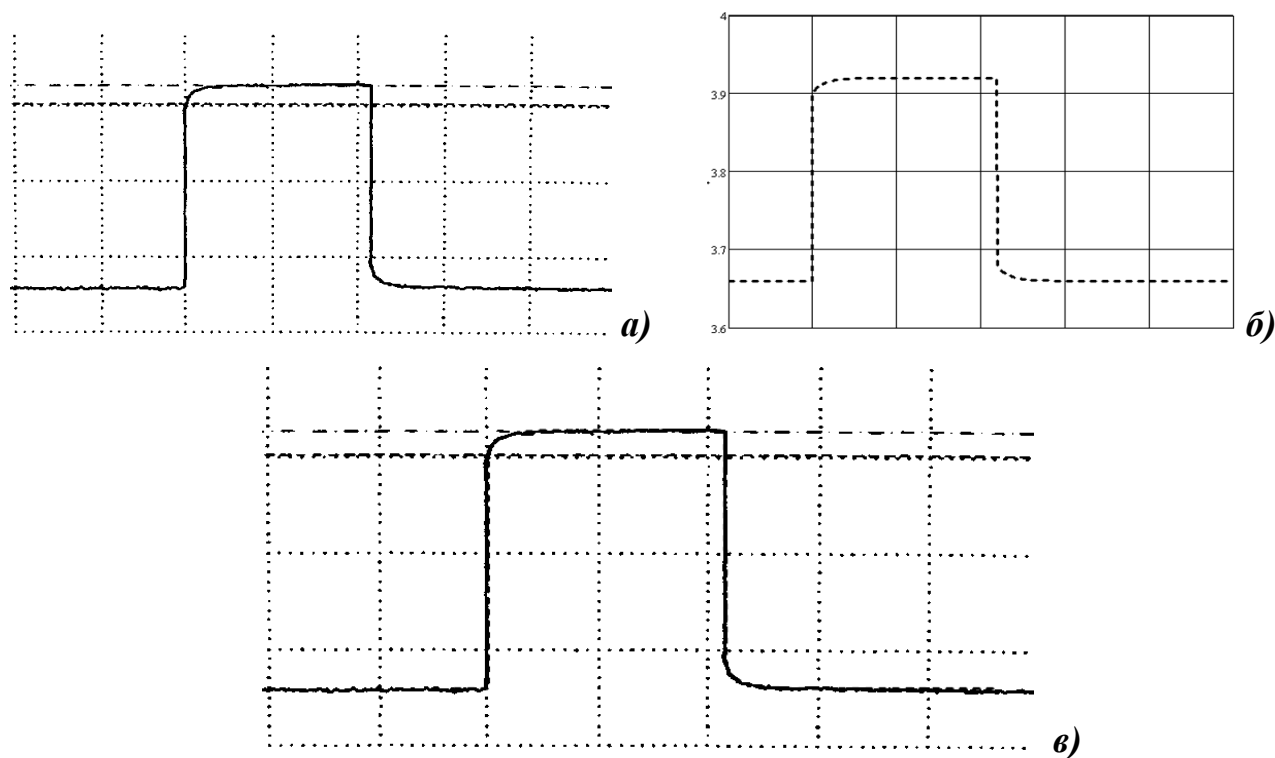


Рис. 2.10. Осцилограма імпульсу напруги (*а*), розрахована форма імпульсу (*б*) та накладена розрахована форма на осцилограму імпульсу напруги (*в*) на Li-ION акумуляторі фірми Toshiba

Сталі часу перехідного процесу, визначені із осцилограми на рис. 2.10, *а*:

– стала часу зарядного імпульсу:  $\tau_3 = 25,33 \text{ мкс}$ ;

– стала часу розрядного імпульсу:  $\tau_p = 25,33 \text{ мкс}$ .



Параметри схемної моделі Li-ION акумулятора фірми Toshiba:

- напруга на акумуляторі у стані спокою:  $E_{AB} = 3,66 \text{ В};$
- внутрішній опір:  $R_{вн.} = 0,052 \text{ Ом};$
- опір електродних процесів:  $R_{e.п.} = 0,624 \text{ Ом};$
- ємність електродних процесів:  $C_{e.п.} = 37,48 \text{ мкФ}.$

Таблиця 2.4

Розраховані і експериментальні значення напруг та їх відхилення для Li-ION акумулятора фірми Toshiba

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$u_p.$	3.66	3.918	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.669	3.661	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66
$u_e.$	3.65	3.91	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.68	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.65	3.65	3.65
$\Delta u = \frac{u_p. - u_e.}{u_p.}$	2.732e-3	2.042e-3	0	0	0	0	0	-2.998e-3	2.731e-4	0	0	0	0	2.732e-3	2.732e-3	2.732e-3

Середнє арифметичне всіх визначень:  $\Delta u_c. = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta u_i = 6.404 \cdot 10^{-4}.$

Середньоквадратичне відхилення:  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (\Delta u_i - \Delta u_c.)^2}{n-1}} = 1,561 \cdot 10^{-3}.$

Коефіцієнт варіації:  $V = \left| \frac{S}{\Delta u_c.} \cdot 100\% \right| = 2,437\%.$

Максимальне абсолютне відхилення:  $\Delta u_{\max} = 2,998 \cdot 10^{-3}.$

Максимальне відхилення у відсотках:  $\Delta u_{\max} = 0,3\%.$

На рис. 2.11, *а* зображена осцилограма відгуку напруги на імпульс струму на Ni-MH акумуляторі [42]. Із осцилограми (рис. 2.11, *а*) визначені сталі часу перехідного процесу і усталене значення напруги, та розраховані параметри схемної моделі Ni-MH акумулятора. На рис. 2.11, *б* зображена розрахована форма імпульсу відгуку напруги на імпульс струму. Для порівняння розрахованої форми імпульсу напруги і осцилограми відгуку напруги на імпульс струму криві були накладені одна на одну і зображені на рис. 2.11, *в*. В табл. 2.5 зведені розраховані і експериментальні значення напруг та їх розраховані відхилення.

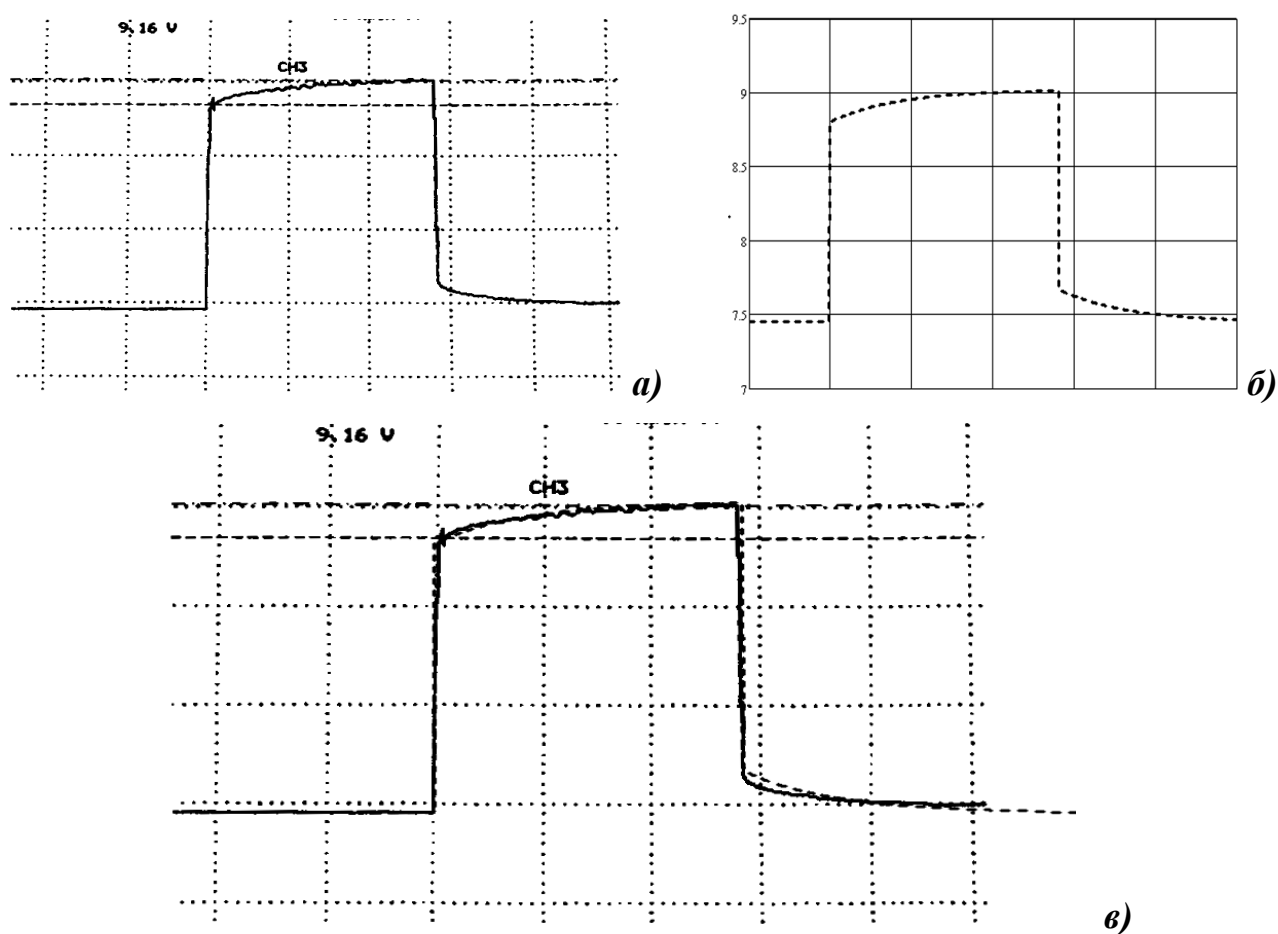


Рис. 2.11. Осцилограма імпульсу напруги (*а*), розрахована форма імпульсу (*б*) та накладена розрахована форма на осцилограму імпульсу напруги (*в*) на Ni-MH акумуляторі

Сталі часу перехідного процесу, визначені із осцилограми на рис. 2.11, *а*:

- стала часу зарядного імпульсу:  $\tau_z = 116,8 \text{ мкс}$ ;
- стала часу розрядного імпульсу:  $\tau_p = 116,8 \text{ мкс}$ .

Розраховані параметри схемної моделі Ni-MH акумуляторної батареї:

- напруга на акумуляторі у стані спокою:  $E_{AB} = 7,45 \text{ В}$ ,
- внутрішній опір:  $R_{вн.} = 0,314 \text{ Ом}$ ,
- опір електродних процесів:  $R_{e.п.} = 1,927 \text{ Ом}$ ,
- ємність електродних процесів:  $C_{e.п.} = 52,14 \text{ мкФ}$ .

Таблиця 2.5

Розраховані і експериментальні значення напруг та їх відхилення для Ni-MH акумулятора

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$u_p$	7.45	8.858	8.901	8.933	8.956	8.973	8.985	8.995	9.001	9.006	9.01	9.013	7.617	7.573	7.54	7.516	7.499	7.486	7.476	7.469
$u_e$	7.45	8.85	8.9	8.93	8.96	8.97	8.99	9	9	9.01	9.015	9.02	7.6	7.55	7.52	7.51	7.5	7.49	7.48	7.47
$\Delta u = \frac{u_p - u_e}{u_p}$	0	9.031e-4	1.123e-4	3.358e-4	-4.466e-4	3.343e-4	-5.565e-4	-5.559e-4	1.111e-4	-4.441e-4	-5.549e-4	-7.767e-4	2.232e-3	3.037e-3	2.653e-3	7.983e-4	-1.334e-4	-5.343e-4	-5.35e-4	-1.339e-4

Середнє арифметичне всіх визначень:  $\Delta u_c = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta u_i = 2,923 \cdot 10^{-4}$ .

Середньоквадратичне відхилення:  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (\Delta u_i - \Delta u_c)^2}{n-1}} = 1,118 \cdot 10^{-3}$ .

Коефіцієнт варіації:  $V = \left| \frac{S}{\Delta u_c} \cdot 100\% \right| = 3,827\%$ .

Максимальне абсолютне відхилення:  $\Delta u_{\max} = 3,037 \cdot 10^{-3}$ .

Максимальне відхилення у відсотках:  $\Delta u_{\max} = 0,3\%$ .

З проведеного порівняння розрахункових кривих перехідних напруг з експериментальними видно, що запропонована схемна модель акумулятора дозволяє отримати розрахункові криві перехідних напруг, значення яких відрізняються не більше ніж на 2% і коефіцієнт варіації (відтворюваність методу, що перевіряється) знаходиться у межах 2-6%, у порівнянні з експериментальними.

Потрібно зауважити, що параметри схемних моделей акумуляторів

змінюються у процесі зарядження, а отже розраховані параметри дійсні тільки для певного нетривалого проміжку часу.

## 2.5. Адаптивний спосіб заряду

Для поліпшення експлуатаційних характеристик акумуляторів різних типів, в залежності від стану зарядженості та віку, доцільно використовувати адаптивний режим заряду [8, 16].

Для забезпечення адаптивного заряду акумуляторної батареї потрібно стежити за перехідним процесом та з його завершенням припиняти формування зарядного (розрядного) імпульсу струму і починати формування розрядного (зарядного) імпульсу струму (рис. 2.12).

Це пояснюється тим, що якщо тривалість імпульсу зарядного струму ( $t_3$ ) істотно коротше часу перехідного процесу на електроді ( $t_{п.п.з.}$ ), то через електрод буде протікати в основному нефарадеєвський ємнісний струм, що не дає приросту запасу хімічної енергії в електроді. У випадку, коли імпульс зарядного струму буде набагато триваліше  $t_{п.п.з.}$  всі передбачувані переваги будуть тією чи іншою мірою втрачатися і імпульсний режим буде наближатися до звичайного

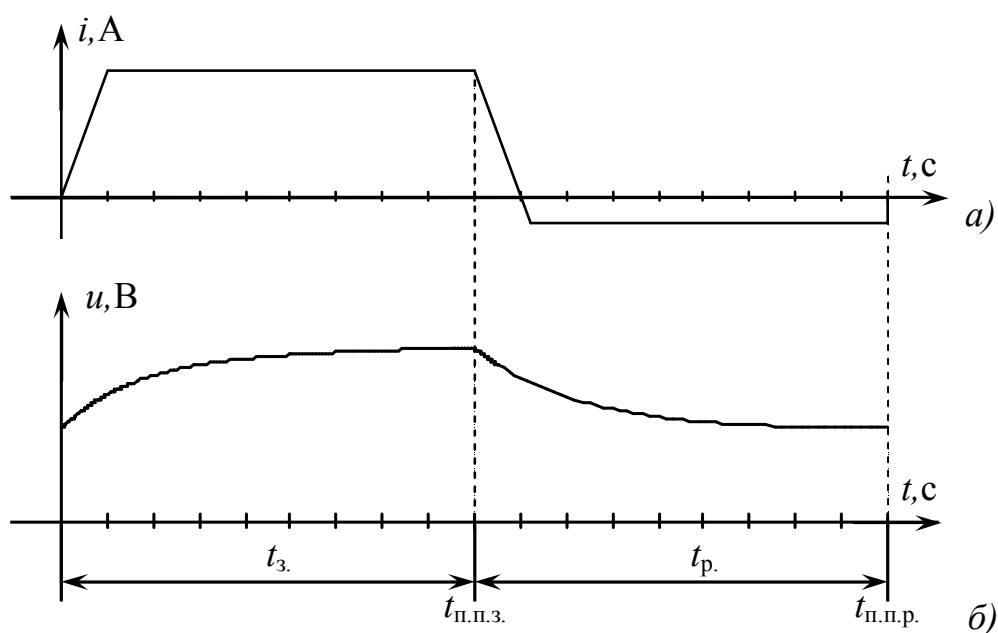


Рис. 2.12. Струм заряду акумуляторної батареї (а)

та напруга на ній (б)

постійнострумового. Тривалість імпульсу розрядного струму ( $t_p$ ) не повинна бути істотно коротше часу перехідного процесу на електроді ( $t_{п.п.р.}$ ), тому що в цьому випадку буде проявлятися ефект нагромадження залишкової напруги, в результаті якого напруга на акумуляторі, що заряджається, буде постійно наростати аж до досягнення неприпустимої межі. З іншого боку, імпульс розрядного струму не повинен бути набагато триваліше часу  $t_{п.п.р.}$ , тому що в цьому випадку будуть наявні втрати корисної енергії, накопиченої в акумуляторі. Тривалості імпульсів зарядного/розрядного струму повинні постійно корегуватися в залежності від тривалості перехідних процесів на електроді, які в залежності від типу, стану зарядженості та віку акумуляторної батареї будуть постійно змінюватись. Амплітуда імпульсу зарядного струму повинна вибиратися таким чином, щоб поляризаційна напруга або ж загальна напруга на акумуляторі за час імпульсу не встигала виходити за певні припустимі межі, конкретні для кожного типу акумуляторів, при виході за які створюються умови для протікання небажаних побічних процесів на електродах або істотного їх прискорення. Такими процесами можуть бути, наприклад, у свинцевому акумуляторі виділення кисню на позитивному електроді. Обмеження по величині загальної напруги на акумуляторі можуть бути крім того пов'язані з тепловим режимом через можливість перегріву [8, 16].

Перехідний процес прийнято вважати таким, що закінчився при досягненні перехідною функцією 95% від усталеного значення [36]. Аналітично визначити усталене значення викликає труднощі, оскільки схема заміщення акумулятора, як вже було розглянуто, залежить від його типу, стану зарядженості та віку. Тому для визначення моменту завершення перехідного процесу доцільно користуватися методами чисельного диференціювання з урахуванням особливостей схем заміщення електродних процесів. В п. 2.3 були розглянуті способи визначення моменту завершення перехідного процесу та знаходження параметрів схемної моделі акумулятора.

### 2.5.1. Алгоритм керування адаптивним зарядом

Для керування адаптивним зарядом розроблений алгоритм, блок схема якого зображена на рис. 2.13.

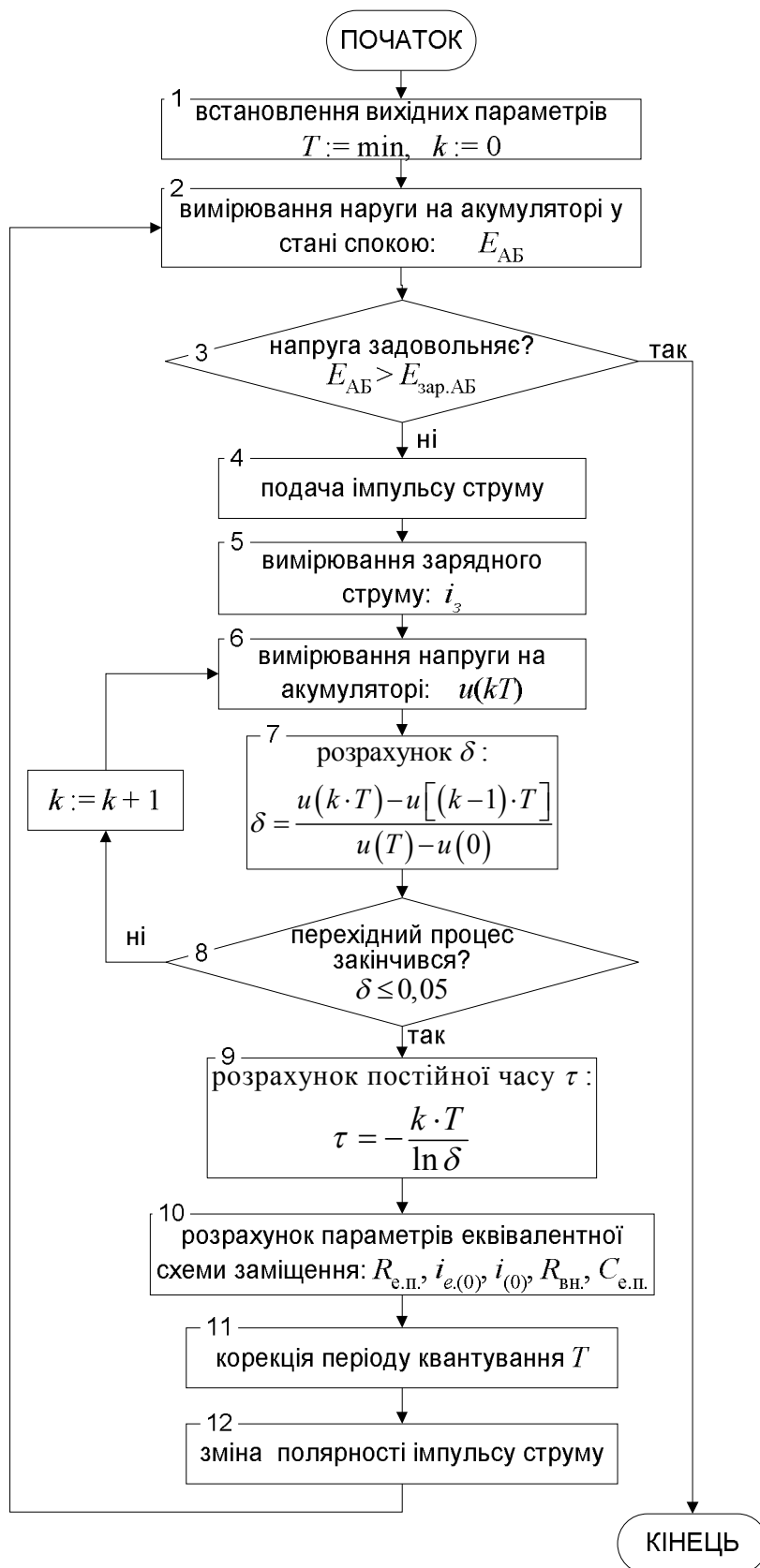


Рис. 2.13. Блок-схема алгоритму керування адаптивним зарядом

При встановленні вихідних параметрів спочатку задається період квантування  $T$  (рис. 2.13, блок 1), мінімальне значення якого повинно бути меншим від часу перехідного процесу за оцінками у 20-100 разів. Час перехідного процесу, як вже зазначалось, залежить не тільки від хімічної системи акумулятора, а й від його віку, стану та степені зарядженості. Скориставшись формулою (2.1) отримуємо оціночний час перехідного процесу для вибору періоду квантування, який на наступних кроках алгоритму буде скорегованим. У стані спокою вимірюється напруга на акумуляторі ( $E_{AB} = u_{сп.}$ ) (блок 2). Якщо вона більше значення зарядженої батареї ( $E_{AB} > E_{зар.АБ}$ ), то заряд закінчено, а у іншому випадку заряд продовжують (блок 3). Наступним кроком є подача імпульсу струму на акумулятор (зарядного, або розрядного – в залежності від попереднього випадку, блок 4). Вимірювання значення амплітуди імпульсу зарядного струму (блок 5) потрібно для подальшого розрахунку параметрів моделі. Далі виконується цикл визначення завершення перехідного процесу згідно п. 2.3 (блок 6–8). Після завершення перехідного процесу визначається час перехідного процесу (блок 9), розраховуються параметри моделі, як описано у п. 2.3 (блок 10), корегується період квантування  $T$  (блок 11) і змінюється полярність імпульсу струму (блок 12), який подаватиметься на акумулятор на наступному етапі виконання програми.

Потрібно зазначити, що цей алгоритм потрібно корегувати та доповнювати в залежності від типу акумулятора, типу зарядного пристрою і методу заряду (імпульсного, або імпульсного асиметричного).

### **Висновки до другого розділу**

1. Розроблена схемна модель акумулятора, створена на основі проведеного аналізу перехідних процесів, що виникають при подачі імпульсу струму на акумулятор, враховує поляризаційну складову повного внутрішнього опору і необхідна для організації зворотного зв'язку акумулятора із зарядною системою, дозволяє керувати процесом заряду – змінювати довжини імпульсів в залежності від стану акумулятора.
2. Розроблено алгоритм розрахунку параметрів схемної моделі акумулятора, що дозволило проводити моделювання схем пристроїв заряду з урахуванням процесів, які відбуваються в акумуляторі під час його заряду імпульсним асиметричним струмом.
3. Порівняння розрахункових кривих перехідних напруг з експериментальними довело, що запропонована модель акумулятора дозволяє отримати розрахункові криві перехідних напруг, значення яких відрізняються не більше ніж на 2% і коефіцієнт варіації знаходиться у межах 2-6%, у порівнянні з експериментальними.
4. Запропонований адаптивний спосіб заряду та обґрунтований підбір тривалості зарядних і розрядних імпульсів струму дозволяють підвищити ефективність заряду акумуляторних батарей імпульсним та імпульсним асиметричним струмом.
5. Для забезпечення адаптивного заряду акумуляторної батареї потрібно стежити за перехідним процесом та з його завершенням припиняти формування зарядного (розрядного) імпульсу струму і починати формування розрядного (зарядного) імпульсу струму.



## РОЗДІЛ 3

СПОСОБИ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ ІМПУЛЬСНИМИ АСИМЕТРИЧНИМИ  
СТРУМАМИ З ПІДВИЩЕНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ**3.1. Способи підвищення ККД пристроїв заряду акумуляторів  
імпульсними асиметричними струмами**

Для підвищення ККД пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсними асиметричними струмами потрібно розглянути можливі способи і систематизувати їх. Після цього створити певну стратегію по підвищенню ККД пристроїв заряду. Можливі способи підвищення ККД пристроїв заряду були систематизовані і приведені на рис. 3.1. Умовно їх можна розділити на способи, пов'язані з вибором параметрів та режимів роботи схеми, з вибором режиму заряду в залежності від стану акумулятора та схмотехнічні способи. Способи, пов'язані з вибором параметрів та режимів роботи схеми і з вибором режиму заряду в залежності від стану акумулятора можна реалізувати використовуючи змінні параметри імпульсів – адаптивний спосіб заряду. Схмотехнічні – пов'язані з використанням енергії імпульсу розрядного струму:

- шляхом збереження її в накопичувальному елементі для подальшого заряду акумулятора;
- використання для заряду іншого акумулятора при заряді групи акумуляторів;
- для живлення корисного навантаження;
- для повернення в мережу.

В відомих пристроях заряду акумуляторних батарей імпульсними асиметричними струмами імпульс розрядного струму формується активним навантаженням і, як наслідок, енергія імпульсу розрядного струму втрачається [3, 4, 7]. Зберегти енергію імпульсу розрядного струму можливо шляхом її накопичення в реактивних елементах з наступним використанням при заряді, або шляхом її передачі до навантаження чи іншої батареї, що заряджається.

Сутність запропонованого способу полягає у збереженні енергії імпульсу розрядного струму в процесі заряду і подальшим її використанням для



Рис. 3.1. Способи підвищення ККД пристроїв для заряду акумуляторів асиметричним струмом

формування імпульсу зарядного струму, або використанні енергії імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження, чи заряду іншої батареї. Зберегти енергію імпульсу розрядного струму можливо шляхом передачі його у якийсь накопичувальний елемент – конденсатор, чи індуктивність. Оскільки в конденсаторі менші втрати, то накопичена енергія може зберігатись довше, ніж в індуктивності, і доцільно використовувати саме його в якості накопичувального елемента. Якщо до системи, що розробляється, повинно входити декілька ланок із зарядними пристроями та акумуляторними батареями,

то доцільно передавати енергію розрядного імпульсу під час його формування з одної ланки до іншої ланки під час формування в ній імпульсу зарядного струму. Таким чином енергія розрядного імпульсу не буде втрачена. При розробці системи заряду імпульсним асиметричним струмом акумулятора в буферному режимі не втратити енергію розрядного імпульсу можливо шляхом передачі її до корисного навантаження, яке підключене на виході буферної системи.

В залежності від місця використання пропонуються наступні способи реалізації енергозберігаючого способу заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом:

- спосіб заряду акумулятора зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму в накопичувальному реактивному елементі [7, 14, 57];
- спосіб заряду групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншої акумуляторної батареї [7, 10, 15, 56];
- спосіб заряду акумуляторної батареї в буферному режимі з використанням енергії імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження [7, 9, 16].

Енергозберігаючий спосіб заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом дозволяє підвищити ККД пристроїв заряду внаслідок збереження, або використання енергії імпульсу розрядного струму [7, 9, 10, 14–16, 57].

### **3.2. Збереження енергії імпульсу розрядного струму в накопичувальному реактивному елементі**

Спосіб, в якому енергія розрядного імпульсу зберігається в накопичувальному реактивному елементі (НРЕ) – в конденсаторі, чи в дроселі, полягає в наступному: при формуванні зарядним пристроєм імпульсу розрядного струму, його енергія накопичується до певного значення у НРЕ (наприклад, у накопичувальному конденсаторі) і потім знову використовується при формуванні пристроєм імпульсу зарядного струму. Таким чином енергія імпульсу розрядного

струму не втрачається, а тимчасово зберігається у накопичувачі і потім повторно використовується, зменшуючи споживання енергії з мережі живлення.

Схема зарядного пристрою, у якому використовується *спосіб заряду акумулятора зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму в накопичувальному реактивному елементі*, представлена на рис. 3.2 [7, 14, 57].

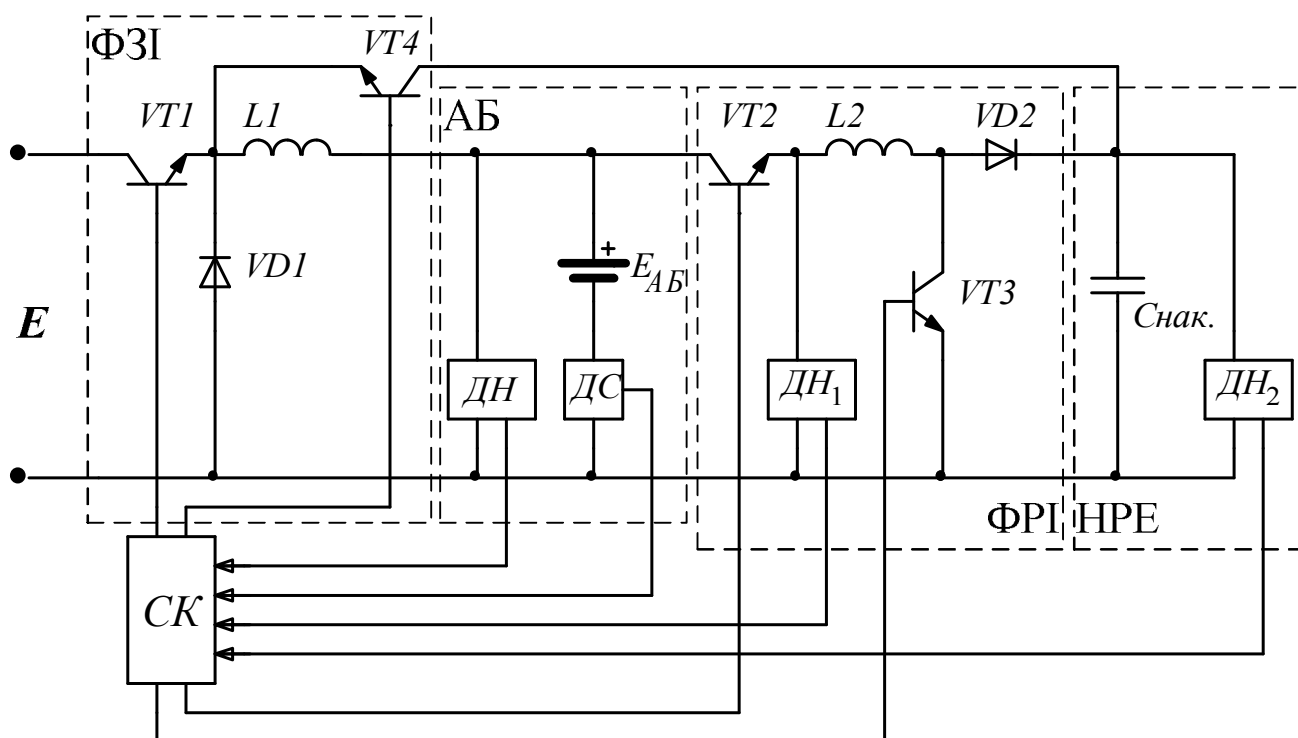


Рис. 3.2. Схема зарядного пристрою з використанням способу заряду акумулятора зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму в накопичувальному реактивному елементі

Напруга ( $E$ ) надходить на формувач зарядного імпульсу (ФЗІ), що створює імпульс струму необхідної амплітуди. Як приклад на рис. 3.3 показані результати моделювання системи заряду батареї ємністю  $50 \text{ А}\cdot\text{г}$ . Амплітуда зарядних імпульсів  $i_3$  не перевищувала  $5 \text{ А}$  (рис. 3.3, а). У проміжках між зарядними імпульсами формувачем розрядного імпульсу (ФРІ) (рис. 3.2) створюється імпульс розрядного струму (рис. 3.3, а, інтервал часу  $t_1-t_2$ ), енергія якого накопичується в накопичувальному реактивному елементі (НРЕ)  $C_{\text{нак}}$  (рис. 3.3, б, інтервал часу  $t_1-t_2$ ), з якого потім (рис. 3.3, після моменту часу  $t_3$ )

передається через ФЗІ під час формування імпульсу зарядного струму (рис. 3.3, б, в, інтервал часу  $t_3-t_4$ ) в акумуляторну батарею (АБ) (рис. 3.3, а, інтервал часу  $t_3-t_4$ ).

Розглянемо більш детально схему, зображену на рис. 3.2., та її принцип роботи.

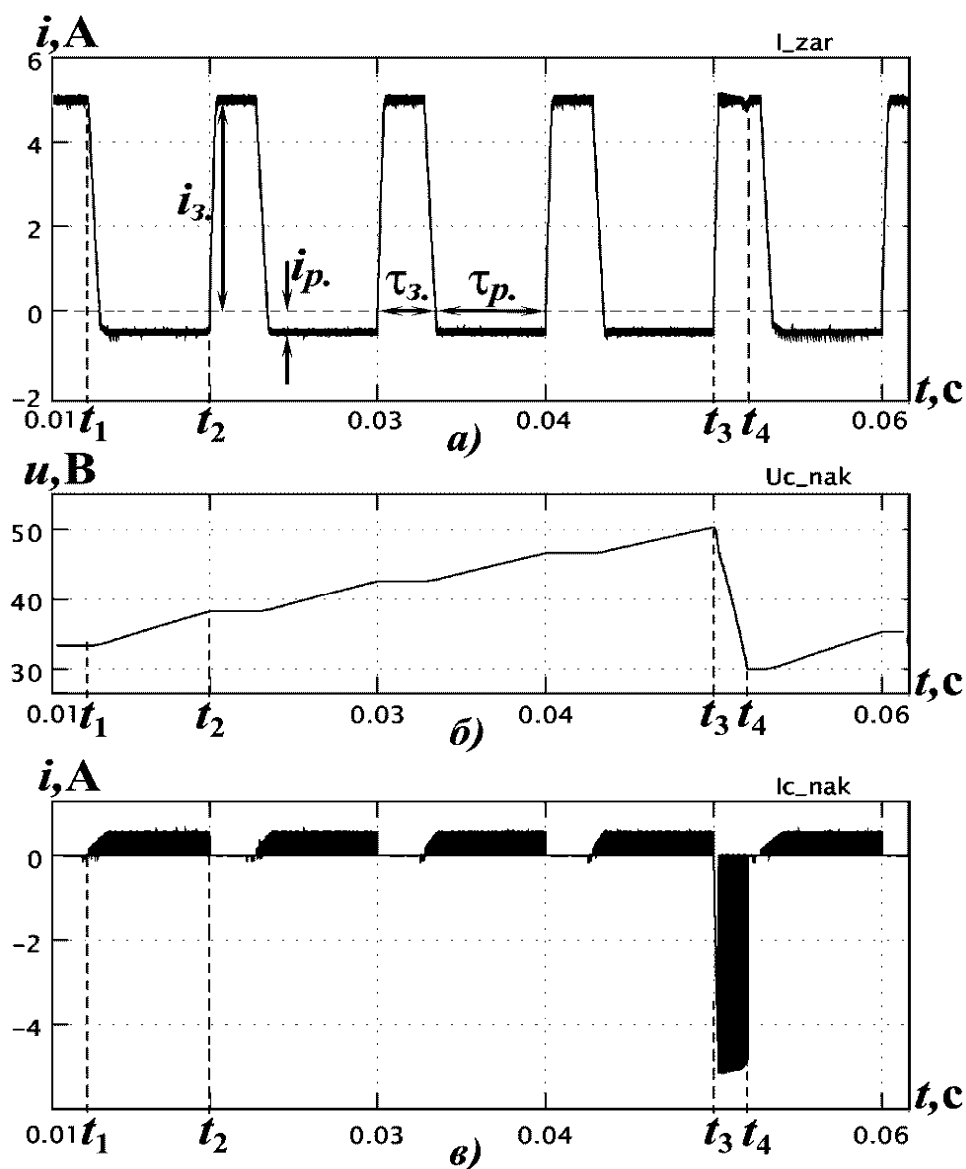


Рис. 3.3. Струм заряду акумуляторної батареї (а), напруга на накопичувальному конденсаторі (б) і струм у ньому (в)

Схема складається з двох ШПП. Перший – понижуючого типу на елементах  $VT1, VD1, L1, E_{AB}$ , формує зарядний імпульс  $i_z$  (рис. 3.3, а). Другий ШПП –

підвищуючого типу на елементах  $L2$ ,  $VT3$ ,  $VD2$ ,  $C_{нак.}$ , формує розрядний імпульс  $i_p$  (рис. 3.3, *а*, інтервал часу  $t_1-t_2$ ), енергія якого зберігається у накопичувальному конденсаторі  $C_{нак.}$  (рис. 3.3, *б*, інтервал часу  $t_1-t_2$ ). Транзистор  $VT2$  використовується для підключення акумуляторної батареї ( $АБ$ ) до підвищуючого ШПП. При досягненні на накопичувальному конденсаторі  $C_{нак.}$  визначеної напруги його потрібно розрядити на  $АБ$  (рис. 3.3, *б, в*, інтервал часу  $t_3-t_4$ ). Розряд накопичувального конденсатора проводить ШПП понижуючого типу на елементах  $VT4$ ,  $VD1$ ,  $L1$ ,  $E_{АБ}$ , під час формування зарядного імпульсу (рис. 3.3, *а*, інтервал часу  $t_3-t_4$ ).

Пристрій працює наступним чином. Напруга мережі ( $E$ ) надходить на вхід понижуючого ШПП, який формує імпульс зарядного струму необхідної амплітуди. В проміжках між зарядними імпульсами формується розрядний імпульс акумуляторної батареї через транзистор  $VT2$ . Останній використовується для підключення  $АБ$  до підвищуючого ШПП, який формує імпульс розрядного струму, енергія якого зберігається на накопичувальному конденсаторі  $C_{нак.}$ . При досягненні необхідної напруги на накопичувальному конденсаторі він використовується як джерело напруги замість основного ( $E$ ) у ШПП понижуючого типу ( $VT4$ ,  $VD1$ ,  $L1$ ,  $E_{АБ}$ ), який формує імпульс зарядного струму. Розрядивши накопичувальний конденсатор до зазначеної напруги для формування імпульсу зарядного струму знову використовується основне джерело напруги  $E$ , а накопичувальний конденсатор знову заряджається до необхідної напруги під час формування розрядних імпульсів. Таким чином, пристрій забезпечує заряд  $АБ$  імпульсним асиметричним струмом.

За рахунок того, що енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі забезпечується підвищення ККД зарядного пристрою. Перевагою запропонованого пристрою також є те, що в ньому використовується імпульсний метод регулювання, на відміну від відомих пристроїв [3, 4], в яких використовується безперервне регулювання. Головна перевага імпульсного методу регулювання – високий ККД, який, як правило, перевищує 80 – 90% [38].

Важливим питанням є вибір величини ємності накопичувального конденсатора  $C_{нак.}$  і його заряд за мінімальний час, оскільки це дозволить ефективно зберегти енергію імпульсу розрядного струму.

**Заряд накопичувального конденсатора за мінімальний час та вибір величини його ємності.** Для заряду конденсатора за мінімальний час в даній схемі потрібно максимально ефективно використовувати енергію розрядного імпульсу акумулятора. Згідно [44] для того, щоб втрати енергії розрядного імпульсу були мінімальними, потрібно розрахувати закон, за яким буде змінюватись коефіцієнт заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПП.

Звичайно для розрахунку коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПП користуються формулою:

$$\gamma = \frac{U_H - U_{вх.}}{U_H}, \quad (3.1)$$

де  $U_H$  – напруга на навантаженні, а  $U_{вх.}$  – напруга живлення.

Згідно [37] втрати мінімальні, коли приріст напруги  $\Delta U_{C_{нак.}}$  для кожної з ступенів заряду величина постійна і дорівнює:

$$\Delta U_{C_{нак.}} = \frac{I \cdot t_{зар.}}{C_{нак.}}, \quad (3.2)$$

де  $I$  – струм розрядного імпульсу;

$t_{зар.}$  – час заряду  $C_{нак.}$ ;

$C_{нак.}$  – ємність накопичувального конденсатора.

Час заряду однієї ступені:

$$t_{зар.} = \frac{1}{f} \gamma. \quad (3.3)$$

де  $f$  – частота перетворювача;

$\gamma$  – шпаруватість імпульсів.

Враховуючи втрати у елементах схеми, перехідні процеси та інерційність зміни напруги на виході підвищуючого ШПП, у формулі для  $t_{зар.}$  коефіцієнт  $\gamma$  можна прирівняти одиниці та приріст напруги  $\Delta U_{C_{нак.}}$  потрібно вибирати в 2...5

разів більший. З урахуванням того, що  $\gamma = 1$ , формулу для розрахунку приросту напруги  $\Delta U_{C_{\text{нак.}}}$  запишемо наступним чином:

$$\Delta U_{C_{\text{нак.}}} \approx \frac{I \frac{1}{f}}{C_{\text{нак.}}}, \quad (3.4)$$

Тоді коефіцієнт заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШП, що використовується для заряду накопичувального конденсатора, буде наступний:

$$\gamma(U_{C_{\text{нак.}}}, U_{\text{вх.}}) = \frac{U_{C_{\text{нак.}}} + \Delta U_{C_{\text{нак.}}} - U_{\text{вх.}}}{U_{C_{\text{нак.}}} + \Delta U_{C_{\text{нак.}}}}. \quad (3.5)$$

Значення напруги живлення підвищуючого ШП ( $U_{\text{вх.}}$ ) і напруги на накопичувальному конденсаторі ( $U_{C_{\text{нак.}}}$ ), необхідні для розрахунку коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШП, отримують за допомогою датчиків напруги.

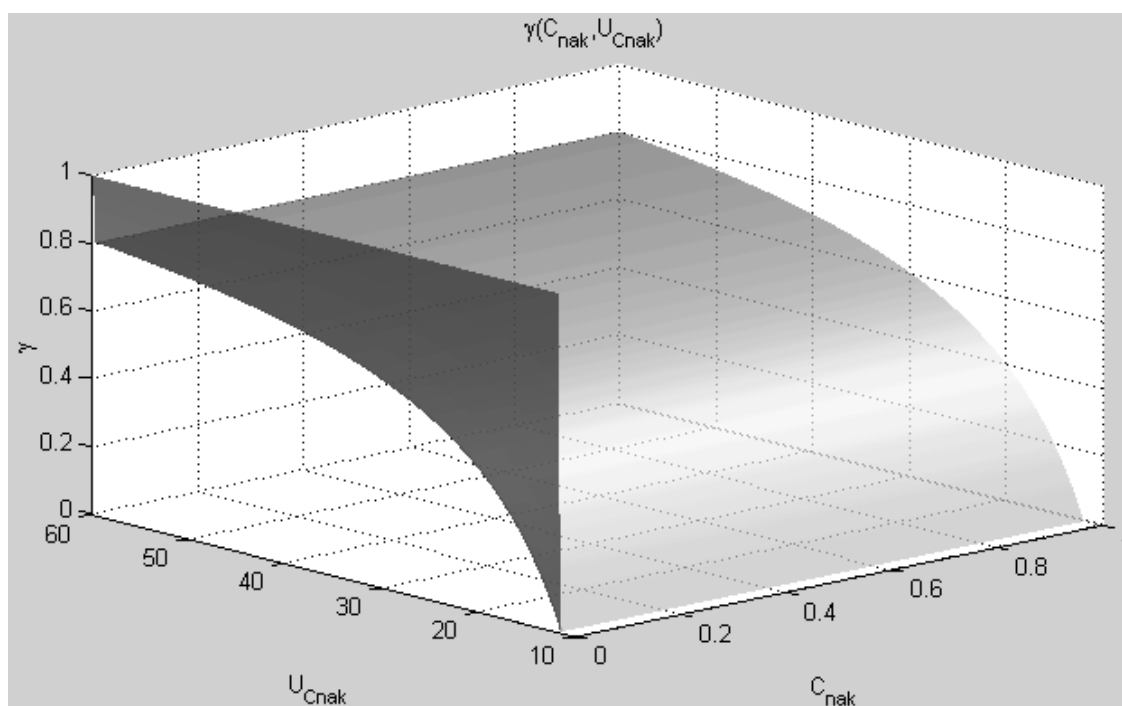


Рис. 3.4. Графік залежності коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШП від величини ємності накопичувального конденсатора та напруги на ньому (при  $C_{\text{нак.}} = 0 \dots 1 \Phi$ )



Дослідивши залежність коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПП від величини ємності накопичувального конденсатора та напруги на ньому  $\gamma(C_{\text{нак.}}, U_{C_{\text{нак.}}})$ , графіки якої зображені на рис. 3.4 та рис. 3.5, можна зробити висновок, що величина коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПП на вибір величини ємності накопичувального конденсатора не впливає. Отже, єдиним фактором, який можна прийняти до уваги при виборі величини ємності накопичувального конденсатора, є час його розряду на акумуляторну батарею, який проводиться понижуючим ШПП на елементах  $VT4$ ,  $VD1$ ,  $L1$ ,  $E_{\text{АБ}}$ , під час формування зарядного імпульсу.

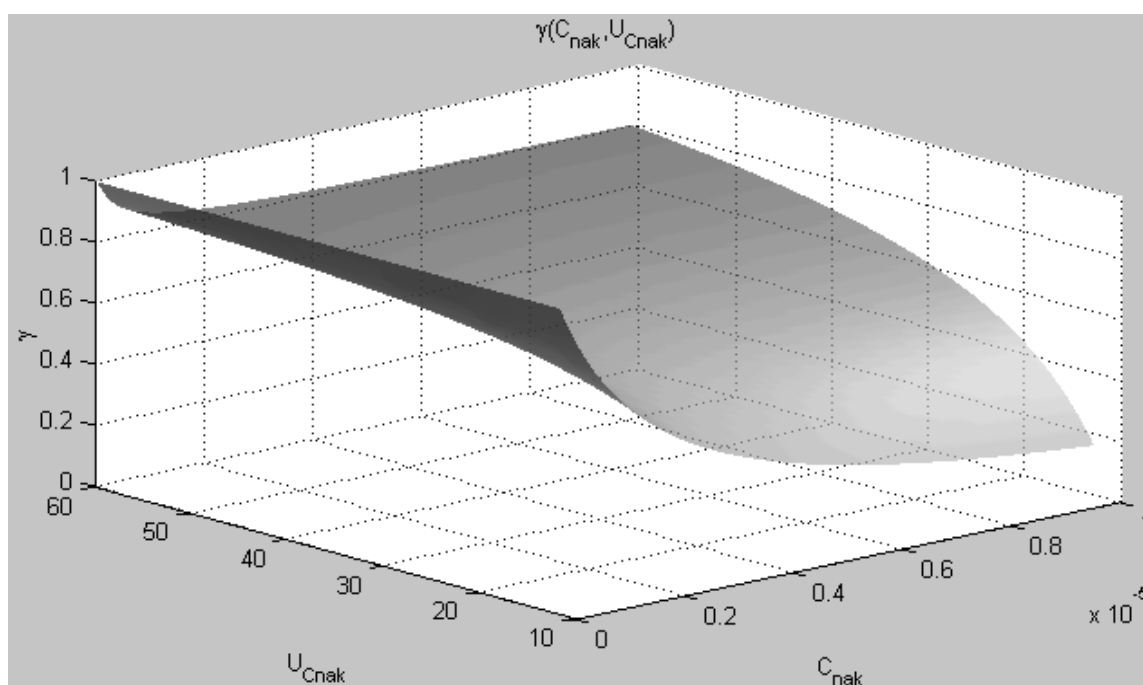


Рис. 3.5. Графік залежності коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПП від величини ємності накопичувального конденсатора та напруги на ньому (при  $C_{\text{нак.}} = 0 \dots 10 \text{ мкФ}$ )

Наближена оцінка величини ємності накопичувального конденсатора ( $C_{\text{нак.}}$ ), що використовується в якості накопичувача у пристрої [57], яку потрібно розрядити за час формування зарядного імпульсу, визначається наступним виразом:

$$\begin{aligned}
C_{\text{нак.}} &\approx \frac{I_{\text{зар.}} \cdot t_{\text{зар.}}}{U_{\text{Снак.мак}} - U_{\text{Снак.мін}}} \gamma_{\text{пон.ШПП}} = \\
&= \frac{I_{\text{зар.}} \cdot t_{\text{зар.}}}{U_{\text{Снак.мак}} - U_{\text{Снак.мін}}} \cdot \frac{E_{\text{АБ}}}{\frac{U_{\text{Снак.мак}} + U_{\text{Снак.мін}}}{2}}; \quad (3.6)
\end{aligned}$$

де  $I_{\text{зар.}}$  – значення струму зарядного імпульсу;

$t_{\text{зар.}}$  – час заряду акумуляторної батареї від накопичувального конденсатора, що рекомендується вибирати не більше тривалості імпульсу зарядного струму;

$U_{\text{Снак.мак}}$  – максимальне рекомендоване значення напруги, до якого буде заряджатися накопичувальний конденсатор:

$$U_{\text{Снак.мак}} \approx E + 10\%; \quad (3.7)$$

$U_{\text{Снак.мін}}$  – мінімальне рекомендоване значення напруги, до якого буде розряджатися накопичувальний конденсатор:

$$U_{\text{Снак.мін}} \approx E - 10\%; \quad (3.8)$$

$E$  – напруга мережі живлення;

$\gamma_{\text{пон.ШПП}}$  – коефіцієнт заповнення імпульсного циклу понижуючого ШПП, що формує імпульс зарядного струму;

$E_{\text{АБ}}$  – напруга на акумуляторній батареї при впливі на неї імпульсу зарядного струму.

Можна використати також інший вираз для наближеної оцінки величини ємності накопичувального конденсатора ( $C_{\text{нак.}}$ ), що використовується в якості накопичувача, коли його потрібно зарядити за час формування розрядного імпульсу:

$$\begin{aligned}
C_{\text{нак.}} &\approx \frac{I_{\text{роз.}} \cdot t_{\text{роз.}} \cdot \frac{U_{\text{Снак.мін}}}{U_{\text{Снак.мак}} - U_{\text{Снак.мін}}}}{U_{\text{Снак.мак}} - U_{\text{Снак.мін}}} \gamma_{\text{підв.ШПП}} = \frac{I_{\text{роз.}} \cdot t_{\text{роз.}} \cdot U_{\text{Снак.мін}}}{(U_{\text{Снак.мак}} - U_{\text{Снак.мін}})^2} \gamma_{\text{підв.ШПП}} = \\
&= \frac{I_{\text{роз.}} \cdot t_{\text{роз.}} \cdot U_{\text{Снак.мін}}}{(U_{\text{Снак.мак}} - U_{\text{Снак.мін}})^2} \left( 1 - \frac{E_{\text{АБ}}}{\frac{U_{\text{Снак.мак}} + U_{\text{Снак.мін}}}{2}} \right); \quad (3.9)
\end{aligned}$$

де  $I_{\text{роз.}}$  – значення струму розрядного імпульсу;

$t_{роз.}$  – час розряду акумуляторної батареї на накопичувальний конденсатор, що рекомендується вибрати не більше тривалості імпульсу розрядного струму;

$\gamma_{підв.ШП}$  – коефіцієнт заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШП, що формує імпульс розрядного струму;

$E_{AB}$  – напруга на акумуляторній батареї при впливі на неї імпульсу розрядного струму.

### 3.3. Використання імпульсу розрядного струму для заряду іншого акумулятора

Зміст запропонованого способу полягає у використанні енергії імпульсу розрядного струму шляхом її передачі до іншого акумулятора, що належить до іншої ланки багатоланкового зарядного пристрою і заряджається у момент формування імпульсу розрядного струму.

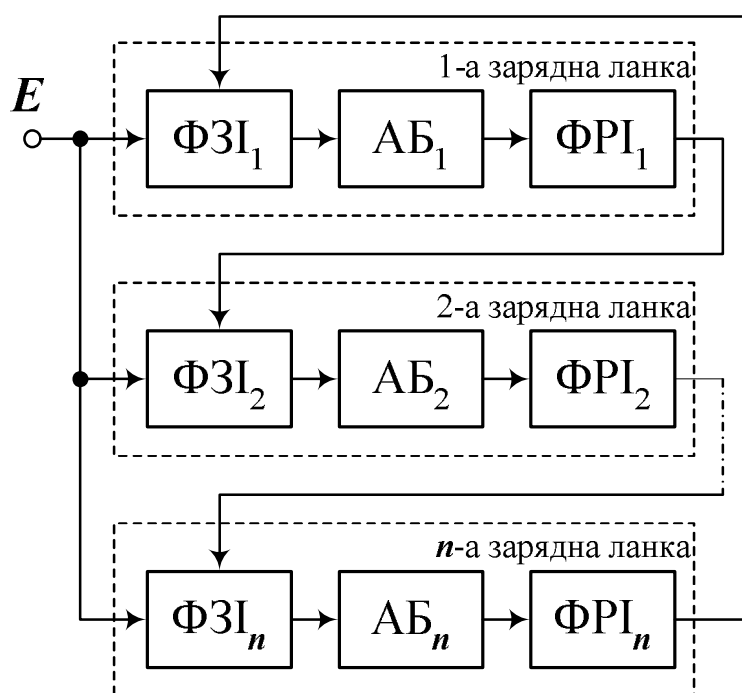


Рис. 3.6. Структурна схема зарядного пристрою, у якому використовується спосіб заряду групи акумуляторів зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму шляхом її передачі в один з акумуляторів

Структурна схема, що реалізує *спосіб заряду групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншої акумуляторної батареї* під час формування для нього зарядного імпульсу, наведена на рис. 3.6 [7, 10, 15, 56]. Енергія імпульсу розрядного струму АБ<sub>n</sub>, для якого ФРІ<sub>n</sub> формує розрядний імпульс, доповнює струм, отриманий з мережі живлення  $E$ , і використовується ФЗІ<sub>1</sub> для формування імпульсу зарядного струму для АБ<sub>1</sub>. Таким чином, енергія струму розрядного імпульсу не втрачається, а передається в наступні ланки.

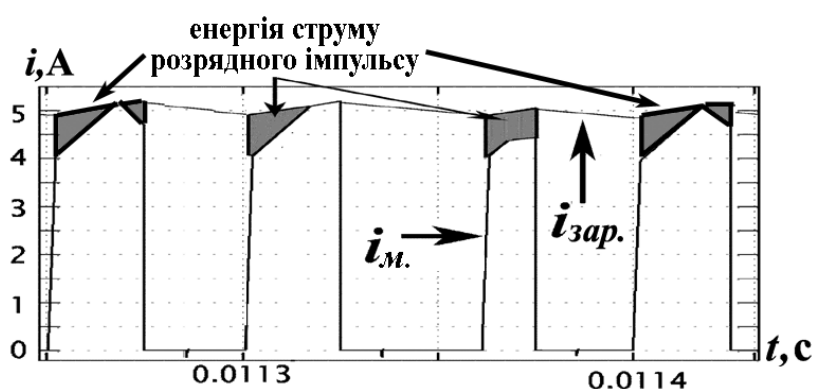


Рис. 3.7. Струм заряду акумуляторної батареї ( $i_{\text{зар.}}$ ), споживаний струм з мережі живлення ( $i_{\text{м.}}$ ) і енергія струму розрядного імпульсу, отримана з попередньої ланки

На рис. 3.7 як приклад представлені результати моделювання, що пояснюють роботу пристрою, з яких видно, що для формування струму заряду акумуляторної батареї ( $i_{\text{зар.}}$ ) широтно-імпульсним перетворювачем, струм мережі живлення ( $i_{\text{м.}}$ ) доповнюється струмом розрядного імпульсу акумулятора, для якого формується в цей момент імпульс розрядного струму. На рис. 3.7 заштриховані області, що відповідають додатковому струму розрядного імпульсу, які відповідають 10-12% енергії, споживаної із джерела живлення.

Електрична схема зарядного пристрою, у якому використовується спосіб заряду групи акумуляторів зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму шляхом її передачі в один з акумуляторів, показана на рис. 3.8.

Принцип дії пристрою базується на передачі енергії імпульсу розрядного струму кожної з ланок у наступну ланку, в якій в цей час формується імпульс

зарядного струму. Енергія імпульсу розрядного струму ланки додається до струму, отриманого із мережі живлення і використовується для формування імпульсу зарядного струму в наступній ланці. Таким чином, як вже зазначалось, енергія імпульсу розрядного струму не втрачається.

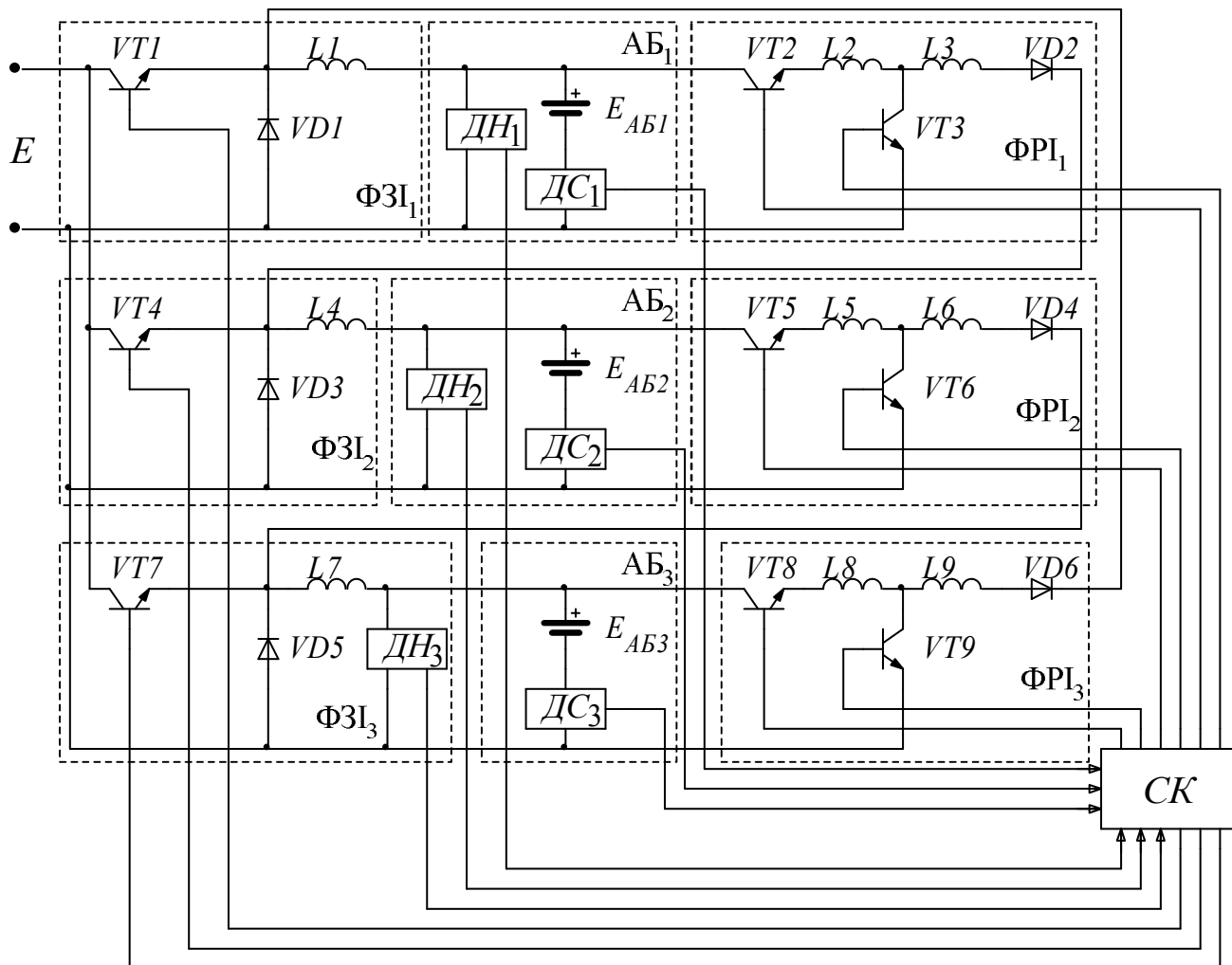


Рис. 3.8. Схема триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом

Для того щоб сформувати імпульси зарядного та розрядного струму необхідних параметрів, пристрій заряду акумуляторних батарей містить три зарядні ланки, кожна з яких складається з двох ШПП. Перші – понижуючого типу, формують імпульс зарядного струму необхідної амплітуди у кожній з ланок (перша ланка –  $VT1$ ,  $VD1$ ,  $L1$ ,  $E_{AB1}$ ; друга –  $VT4$ ,  $VD3$ ,  $L4$ ,  $E_{AB2}$ ; третя –  $VT7$ ,  $VD5$ ,  $L7$ ,  $E_{AB3}$ ). Розрядний імпульс акумуляторних батарей формується ШПП підвищуючого типу (перша ланка –  $L2$ ,  $VT3$ ,  $L3$ ,  $VD2$ ; друга –  $L5$ ,  $VT6$ ,  $L6$ ,  $VD4$ ;

третя –  $L8$ ,  $VT9$ ,  $L9$ ,  $VD6$ ). Транзистори  $VT2$ ,  $VT5$  і  $VT8$  підключають акумуляторні батареї ( $AB1$ ,  $AB2$  та  $AB3$ ) до підвищуючих ШПП [76]. На рис. 3.9 представлені діаграми зарядного імпульсного асиметричного струму у трьох ланках пристрою відповідно. Співвідношення зарядної і розрядної складової струму 10:1 і довжини імпульсів цих складових рівні, а перед кожним зарядним імпульсом йде, рівний по тривалості зарядному і розрядному імпульсу, рест-імпульс, або так званий імпульс „відпочинку”.

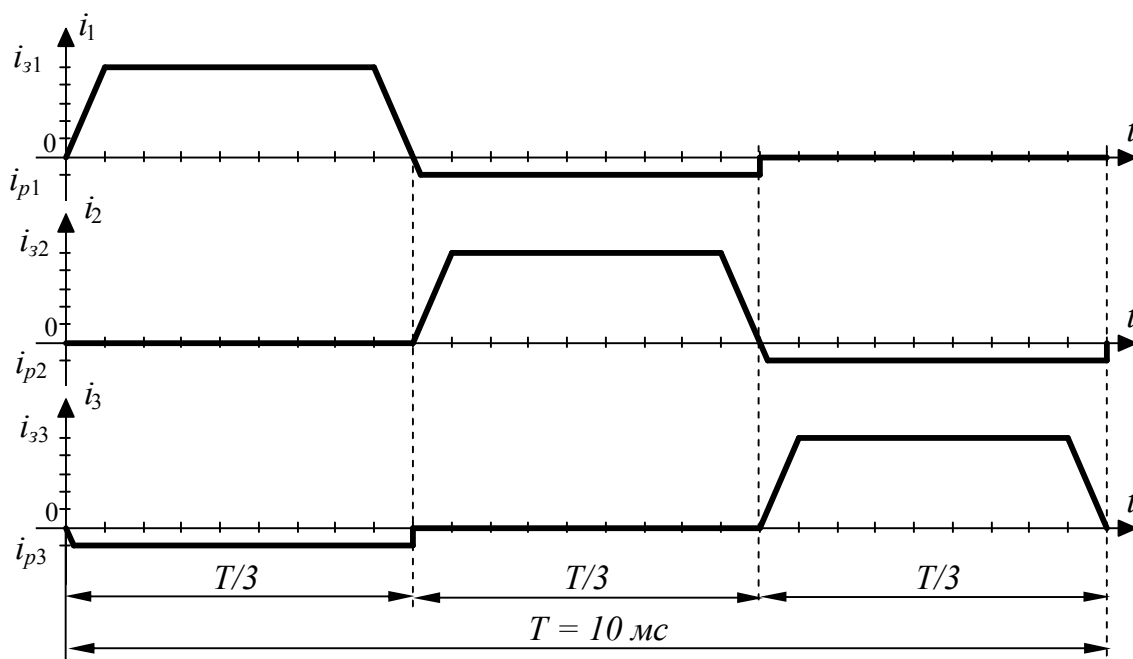


Рис. 3.9. Діаграми зарядного імпульсного асиметричного струму у трьох ланках пристрою

Період роботи пристрою складається з трьох інтервалів, на кожному з яких проходять подібні процеси але у різних ланках схеми. В табл. 3.1 приведені інтервали роботи силових ключів схеми та характер процесів, які відбуваються в ланці в ці інтервали періоду. На рис. 3.10 зображені результати моделювання, з яких видно, що пристрій забезпечує імпульсний асиметричний зарядний струм необхідних параметрів у трьох ланках.

Для того, щоб відкрити діод ( $VD2$ ,  $VD4$ , або  $VD6$  – в залежності від того у

якій ланці формується розрядний імпульс струму АБ) і забезпечити необхідну величину імпульсу розрядного струму, підвищуючий ШПП перед діодом містить додатковий накопичувальний дросель ( $L3$ ,  $L6$  та  $L9$ ). Замість основного та додаткового накопичувальних дроселів в підвищуючому ШПП можна використати накопичувальний дросель з відпайкою. Величина індуктивності додаткового дроселя розраховується за формулою:

$$L_{3(6,9)} = \frac{n \cdot L_{2(5,8)}}{1-n}, \quad (3.10)$$

де  $L_{2(5,8)}$  і  $L_{3(6,9)}$  – величини індуктивностей дроселів  $L2$ ,  $L5$ ,  $L8$  і  $L3$ ,  $L6$ ,  $L9$  відповідно;

$n = \frac{i_p}{i_z - i_p}$  – коефіцієнт трансформації дроселів підвищуючих ШПП;

$i_p$  – амплітуда імпульсу зарядного струму;

$i_z$  – амплітуда імпульсу розрядного струму.

Таблиця 3.1

Інтервали роботи силових ключів схеми та характер процесів, які відбуваються в ланці в ці інтервали періоду

Інтервали періоду роботи схеми	Силові ключі, розділені по належності до ланок та процес, який відбувається в ланці в даний інтервал періоду роботи схеми		
	Перша ланка	Друга ланка	Третя ланка
$kT \dots \left(\frac{1}{3} + k\right)T, k \in Z$	$VT1, VD1$ заряд АБ1	–	$VT8, VT9, VD6$ розряд АБ3
$\left(\frac{1}{3} + k\right)T \dots \left(\frac{2}{3} + k\right)T, k \in Z$	$VT2, VT3, VD2$ розряд АБ1	$VT4, VD3$ заряд АБ2	–
$\left(\frac{2}{3} + k\right)T \dots (1+k)T, k \in Z$	–	$VT5, VT6, VD4$ розряд АБ2	$VT7, VD5$ заряд АБ3

Величини індуктивностей накопичувальних дроселів у зарядних ланках

повинні відповідати наступним умовам:

$$L1 = L4 = L7; \quad L2 = L5 = L8; \quad L3 = L6 = L9.$$

Рекомендується щоб величина індуктивності накопичувального дроселя понижуючого ШПІ була рівна величині індуктивності основного накопичувального дроселя підвищуючого ШПІ:

$$L1 = L2; \quad L4 = L5; \quad L7 = L8.$$

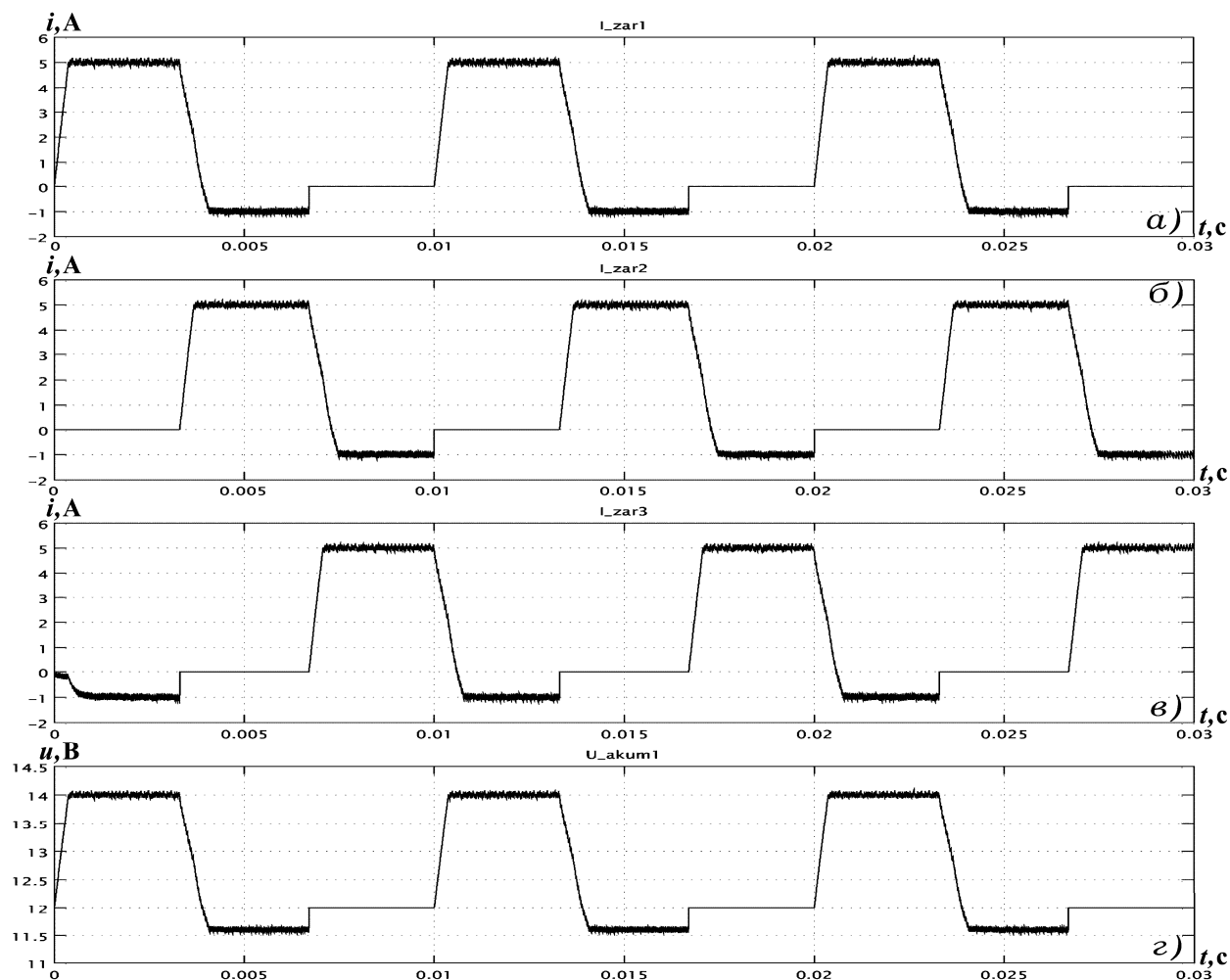


Рис. 3.10. Струми заряду акумуляторних батарей у трьох ланках пристрою (а–в) та напруга на АБ1 (г) під час їх заряду

Коефіцієнт заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПІ знаходиться по формулі:

$$\gamma = \frac{U_{вих.} - U_{вх.}}{U_{вих.}}, \quad (3.11)$$



де  $U_{вх.}$  – напруга живлення,

а  $U_{вих.}$  – напруга на виході підвищуючого ШПІ, яка у свою чергу дорівнює:

$$U_{вих.} = U_{VD}^{np.} + E, \quad (3.12)$$

де  $U_{VD}^{np.}$  – падіння напруги на діоді у відкритому стані;

$E$  – напруга джерела живлення схеми.

Коефіцієнт заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПІ бажано корегувати в процесі роботи приладу в залежності від величини імпульсу розрядного струму.

### **3.4. Використання імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження**

Зміст запропонованого способу полягає у збереженні енергії імпульсу розрядного струму шляхом її передачі до навантаження разом з енергією від мережі живлення.

Схема зарядного пристрою з використанням *способу заряду акумуляторної батареї в буферному режимі з використанням енергії імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження*, наведена на рис. 3.11 [7, 9, 16]. Імпульс розрядного струму, сформованого ФРІ, додається до струму, отриманого з мережі живлення через ФЗІ, і використовується для живлення навантаження (Н). Таким чином, акумуляторна батарея (АБ), працюючи в буферному режимі, заряджається імпульсним асиметричним струмом й одночасно забезпечує живлення навантаження.

Як приклад на рис. 3.12, *а* наведена діаграма струму заряду акумуляторної батареї. Як видно з рис. 3.12, *в* (інтервал часу  $t_2-t_3$ ), споживання струму з мережі живлення знижується під час формування імпульсу розрядного струму (рис. 3.12, *а*, інтервал часу  $t_2-t_3$ ), тому що енергія імпульсу розрядного струму передається в навантаження, тим самим зменшуючи споживання енергії від основного джерела живлення. Напруга навантаження *u* (рис. 3.12, *б*) залишається стабільною як під час формування імпульсів зарядного (інтервал часу  $t_1-t_2$ ) і розрядного струмів (інтервал часу  $t_2-t_3$ ), так і під час відключення основного джерела живлення

(момент часу  $t_4$ ), після якого живлення навантаження здійснюється від акумуляторної батареї.

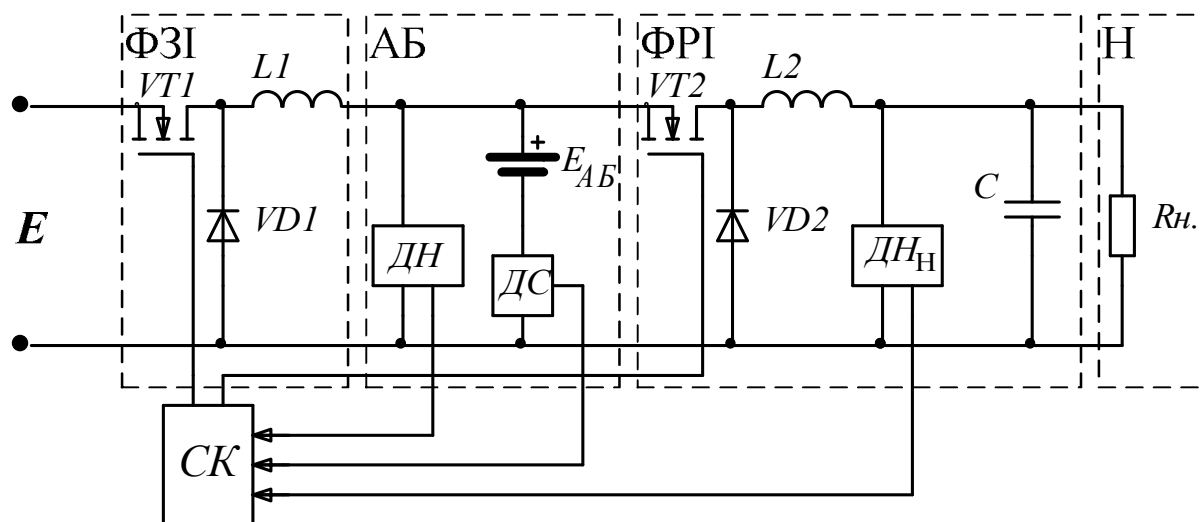


Рис. 3.11. Схема зарядного пристрою з використанням способу заряду акумуляторної батареї в буферному режимі зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму шляхом передачі її в навантаження

Принцип дії пристрою для заряду імпульсним асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі (рис. 3.11) базується на передачі енергії імпульсу розрядного струму у навантаження. Струм розрядного імпульсу додається до струму, отриманого із мережі живлення і використовується для живлення навантаження [7, 9, 16].

Для того щоб сформувати імпульси зарядного та розрядного струму необхідних параметрів, пристрій для заряду імпульсним асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі, містить два перетворювача. Перший перетворювач – ШПП понижуючого типу ( $VT1$ ,  $VD1$ ,  $L1$ ,  $E_{AB}$ ), який формує імпульс зарядного струму необхідної амплітуди, а також живить перетворювач, який під'єднаний до його виходу і акумуляторної батареї.

Другий перетворювач може бути одним з трьох видів ШПП (підвищуючий, понижуючий, або полярно-інвертуючий), або будь-який інший перетворювач електроенергії, який забезпечить належне живлення навантаження ( $R_n$ ). У якості

приклад для другого перетворювача було обрано ШПП понижуючого типу ( $VT2$ ,  $VD2$ ,  $L2$ ,  $C$ ,  $R_n$ ). Другий перетворювач формує імпульс розрядного струму необхідної амплітуди, а недостачу енергії компенсує за рахунок енергії, отриманої від першого перетворювача. Таким чином акумуляторна батарея, працюючи у буферному режимі, заряджається імпульсним асиметричним струмом і одночасно забезпечується живлення навантаження.

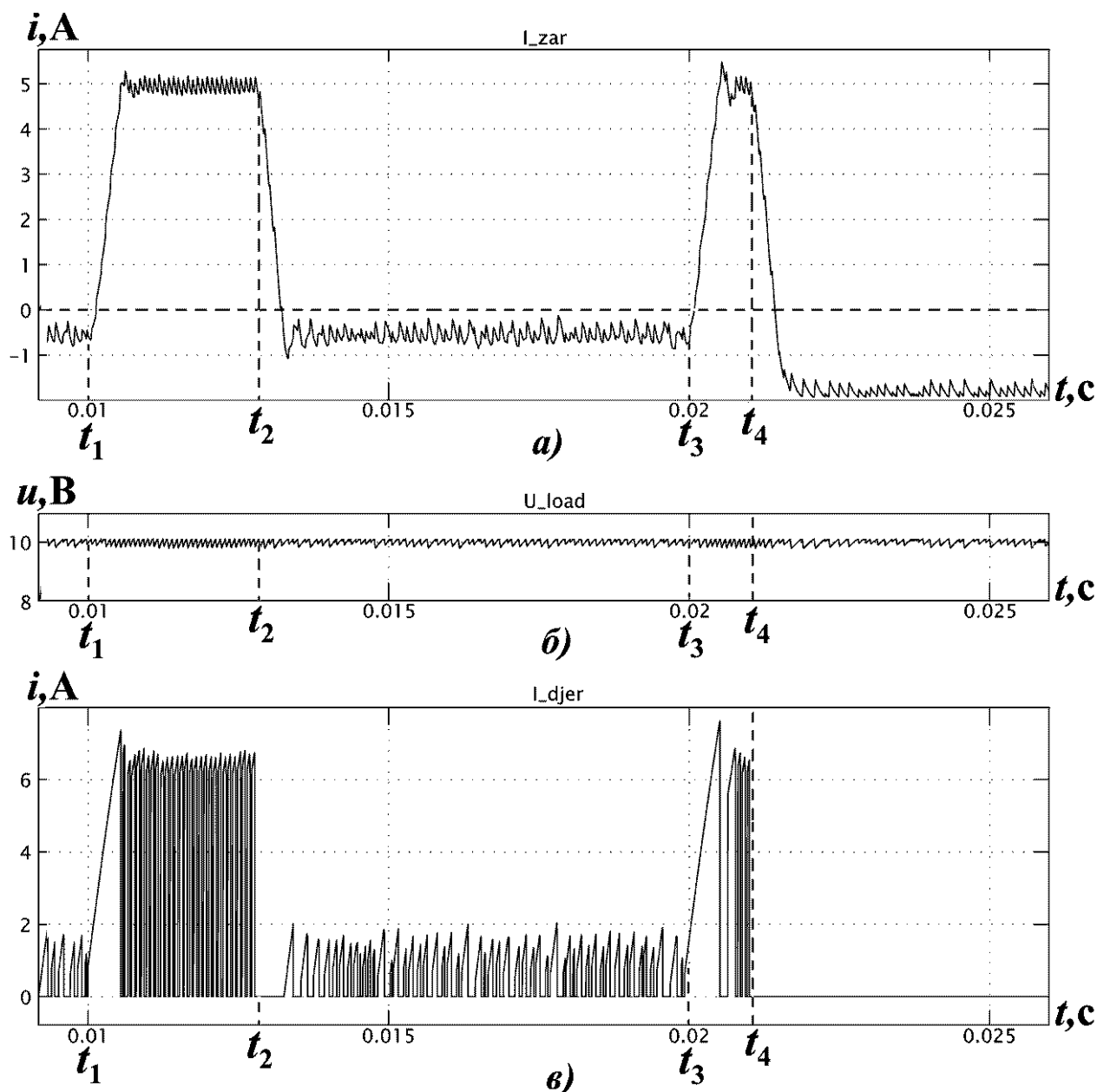


Рис. 3.12. Струм заряду акумуляторної батареї (а), напруга на навантаженні (б) і споживаний струм з мережі живлення (в)

У разі припинення з якихось причин живлення від основного джерела, система гарантованого електроживлення автоматично перейде на живлення навантаження від акумуляторної батареї.

Отже, використання даного пристрою дає можливість здійснювати заряд імпульсним асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі.

### 3.5. Порівняння ККД пристроїв заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами

Для обґрунтування доцільності використання нових енергозберігаючих способів заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом та пристроїв з їх використанням було проведено порівняльний аналіз ККД відомих пристроїв з тими, що пропонуються. Оскільки ККД пристроїв з неперервним регулюванням досить низьке і не перевищує 70% [26, 38] (у більшості випадків ККД пристроїв з неперервним регулюванням знаходиться взагалі у межах 40–55% [25, 26, 27]), то можна стверджувати, що у зарядних пристроїв із неперервним регулюванням ККД також не буде вищим за це значення [3]. Якщо враховувати втрати при формуванні імпульсу розрядного струму за допомогою резистора, ввімкненому паралельно акумулятору і необхідності забезпечувати сумарний струм зарядного пристрою 1,1 від струму заряду акумулятора, тому що при заряді резистор підключений паралельно акумуляторові [4], то ККД такого пристрою буде взагалі не більше 60%:

$$\eta_{3Пн.р.} = \eta_{н.р.} \cdot k_{з.і.} \cdot k_{р.і.} = 0,7 \frac{1}{1,1} (1 - 0,1) = 0,57, \quad (3.13)$$

де  $\eta_{3Пн.р.}$  – ККД ЗП із неперервним регулюванням та формуванням імпульсу розрядного струму за допомогою резистора, ввімкненому паралельно акумулятору;

$\eta_{н.р.}$  – ККД перетворювача з неперервним регулюванням;

$k_{з.і.}$  – коефіцієнт, що враховує втрати при формуванні імпульсу зарядного струму з урахуванням резистора, увімкненого паралельно акумулятору [4];

$k_{p.i.}$  – коефіцієнт, що враховує втрати при формуванні імпульсу розрядного струму на резисторі [4].

У запропонованих пристроях використовуються імпульсні перетворювачі, ККД яких досить високе. ЗП зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму в НРЕ складається з двох перетворювачів – понижуючого типу, ККД яких  $\eta_{\text{пон}}=0,95\div 0,97$ , і підвищуючого типу  $\eta_{\text{підв}}=0,93\div 0,95$  [26, 38]. Тангенс кута втрат сучасних конденсаторів, що використовуються у імпульсних перетворювачах, знаходиться у межах  $\text{tg}\delta=0,06\div 0,1$  [50] (на даний момент існують конденсатори і з меншими втратами). Отже, ККД пристрою зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму в НРЕ:

$$\eta_{\text{НРЕ}} = \eta_{\text{пон}} \eta_{\text{підв}} (1 - \text{tg}\delta). \quad (3.14)$$

ЗП групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншого акумулятора також складається з двох типів перетворювачів – понижуючого і підвищуючого типу, і його ККД буде наступним:

$$\eta_{\text{ГА}} = \eta_{\text{пон}} \eta_{\text{підв}}. \quad (3.15)$$

ЗП акумуляторної батареї в буферному режимі з використанням енергії імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження містить у собі два перетворювачі понижуючого типу. ККД цього ЗП пристрою буде:

$$\eta_{\text{Б}} = \eta_{\text{пон}} \eta_{\text{пон}}. \quad (3.16)$$

Приведені формули розрахунку ККД доцільно використовувати для попередньої оцінки енергоспоживання зарядних пристроїв. Результати розрахунків, отриманих при проведенні порівняльного аналізу ККД пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом зведені до табл.3.2.

Порівняння ККД пристроїв заряду акумуляторів імпульсним асиметричним струмом

Тип зарядного пристрою (ЗП)	ККД зарядного пристрою, %
ЗП із неперервним регулюванням та формуванням імпульсу розрядного струму за допомогою резистора, ввімкненому паралельно акумулятору [4]	не більше 60
Інші відомі ЗП асиметричним струмом [3]	не більше 70
ЗП зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму в НРЕ	82 ÷ 88
ЗП групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншого акумулятора	86 ÷ 92
ЗП акумуляторної батареї в буферному режимі з використанням енергії імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження	90 ÷ 94

Із результатів проведеного порівняльного аналізу ККД пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом видно, що загальне збільшення ККД пристроїв, в яких використовуються запропоновані енергозберігаючі способи заряду асиметричним струмом і імпульсні методи регулювання, у порівнянні з існуючими пристроями [3, 4], сягає 12–34%. Також запропоновані в даному розділі пристрої заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом мають на даному етапі розвитку сучасних систем заряду досить високий показник ККД, який складає за попередніми оцінками 82–94%.

### **Висновки до третього розділу**

1. Розроблений новий спосіб використання енергії розрядного імпульсу струму при заряді акумуляторів імпульсним асиметричним струмом дозволяє підвищити ККД зарядних пристроїв акумуляторних батарей.
2. Зменшено енергоспоживання в запропонованих схемах пристроїв для заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом за рахунок використання енергії розрядного імпульсу: шляхом збереження її в накопичувальному елементі для подальшого заряду акумулятора; для заряду іншого акумулятора при заряді групи акумуляторів; для живлення корисного навантаження.
3. Для способу заряду зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму в накопичувальному реактивному елементі отримано залежність коефіцієнту регулювання заповнення імпульсного циклу підвищуючого широтно-імпульсного перетворювача від величини напруги на вході перетворювача і напруги на накопичувальному конденсаторі, яка дозволяє заряджати конденсатор за мінімальний час і максимально ефективно використовувати енергію розрядного імпульсу струму акумулятора сталої величини.
4. Використання триланкового пристрою заряду, створеного на основі способу заряду групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншого акумулятора, дозволяє ефективно використовувати енергію, оскільки її споживання рівномірно рознесено у часі.
5. Зарядний пристрій, створений на основі способу заряду акумуляторної батареї в буферному режимі з використанням енергії імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження, забезпечує зменшення споживання електроенергії від джерела живлення, а також має всі переваги заряду імпульсним асиметричним струмом.
6. Проведене порівняння ККД пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом показало, що пристрої, в яких використовуються запропоновані енергозберігаючі способи заряду

імпульсним асиметричним струмом і імпульсні методи регулювання, на даному етапі розвитку сучасних систем заряду імпульсним асиметричним струмом мають високий ККД, який складає 82–94%, а загальне збільшення ККД у порівнянні з існуючими пристроями, сягає 12–34%.



## РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З  
ПІДВИЩЕНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ  
ІМПУЛЬСНИМИ АСИМЕТРИЧНИМИ СТРУМАМИ**4.1. Моделювання зарядного пристрою із зберіганням енергії імпульсу  
розрядного струму в накопичувальному реактивному елементі**

Отримані рівняння [57] дозволяють провести розрахунок електромагнітних процесів в схемі. При використанні в схемі розробленої схемної моделі акумулятора потрібно вивести нові рівняння для розрахунку електромагнітних процесів (ЕМП), які будуть мати вже вищий за другий порядок. Це значно ускладнить процеси розрахунку, тому для вирішення задачі дослідження ЕМП доцільно використовувати один з прикладних комп'ютерних пакетів. Особливим чином потрібно відмітити пакет розгалуження математичної системи MATLAB – Simulink, який представляє користувачу зручні засоби візуального моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем [11, 22, 23, 53, 60] і за допомогою якого було проведено моделювання електромагнітних процесів роботи пристроїв.

Електрична схема запропонованого пристрою показана на рис. 3.2. Принцип роботи пристрою детально описано в п. 3.2.

За рахунок того, що енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі і довжини зарядних та розрядних імпульсів струму адаптовані до стану акумулятора забезпечується підвищення ККД зарядного пристрою і акумулятора. Обґрунтований підбір тривалості зарядних і розрядних імпульсів струму адаптивного способу заряду дозволяє підвищити ефективність заряду акумуляторів, оскільки із мережі споживається тільки необхідна енергія для заряду, тому що розрядний імпульс асиметричного заряду не буде розряджати акумулятор більше необхідного обґрунтованого рівня, що дозволяє подовжити ресурси акумулятора і можна твердити, що енергія, необхідна для заряду, буде використовуватись оптимально і за рахунок цього буде підвищено ККД.

В MOSFET-транзисторах паралельно транзистору технологічно вбудований зворотній діод [48] і тому використовувати їх в якості силових ключів  $VT1$  і  $VT4$  можна тільки із зустрічно увімкненим діодом технологічно вбудованому, оскільки при формуванні зарядного імпульсу понижуючим ШПІ накопичувальний конденсатор буде заряджатися від мережі живлення  $E$  із-за наявності вбудованого зворотного діоду у транзистор  $VT4$ , а при його розряді на АБ значна частина накопленої в ньому енергії буде передаватися через вбудований у транзистор  $VT1$  зворотній діод у мережу живлення. У якості силових ключів  $VT2$  та  $VT3$  були обрані MOSFET-транзистори, оскільки вони мають більш низьке значення напруги у включеному стані при номінальних напругах менше 200 В [46], а в якості  $VT1$  та  $VT4$  вибирати IGBT-транзистори, оскільки вони, на відміну від MOSFET, не мають паралельно транзистору технологічно вбудований зворотній діод [48].

Модель пристрою для адаптивного заряду акумуляторної батареї імпульсним асиметричним струмом зображена на рис. 4.1 [14, 53]. Модель складається з силової частини та системи керування (СК) – Control System.

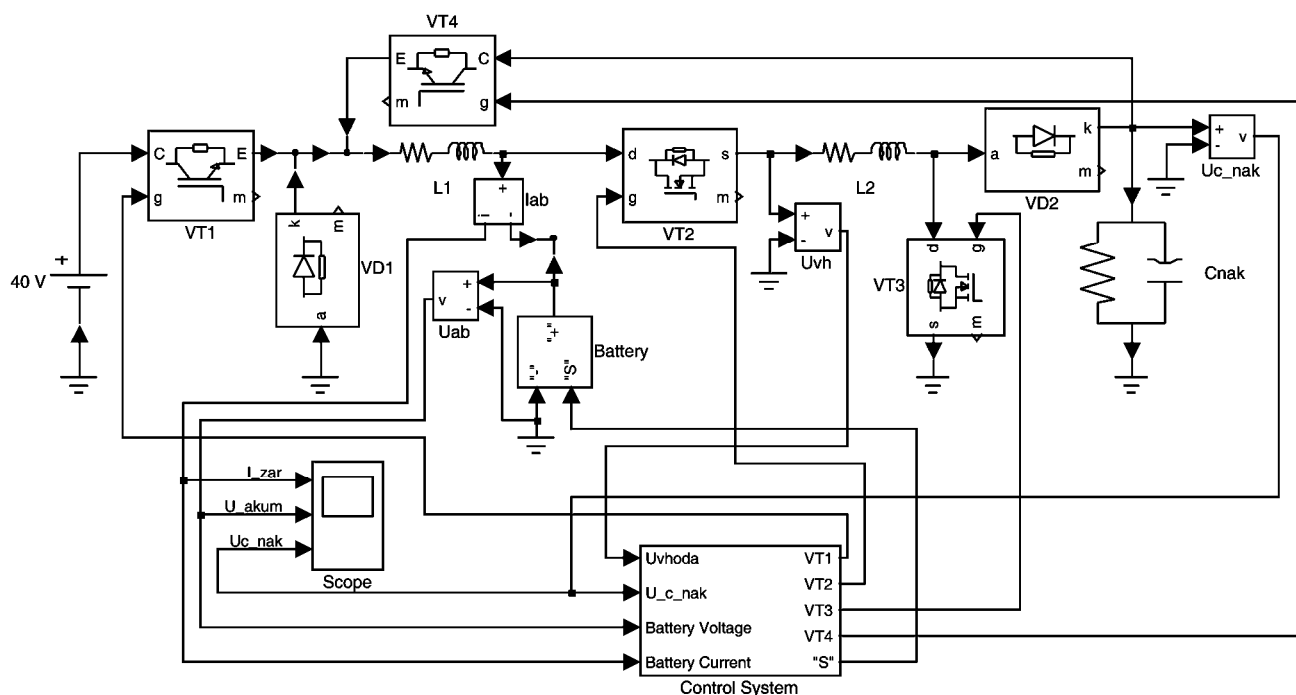


Рис. 4.1. Модель пристрою для адаптивного заряду акумуляторної батареї імпульсним асиметричним струмом

Силова частина моделі, зображеної на рис. 4.1, складається з наступних елементів (модулів):

- джерело постійної напруги (40 V);
- силові транзисторні модулі на IGBT-транзисторах (VT1, VT4) та MOSFET-транзисторах із зворотним діодом (VT2, VT3);
- діоди (VD1, VD2);
- схемна модель акумуляторної батареї (Battery);
- накопичувальні індуктивності (дроселі) (L1, L2);
- накопичувальний конденсатор (C<sub>nak</sub>);
- вимірювач миттєвого струму у акумуляторній батареї (I<sub>ab</sub>);
- вимірювачі миттєвих напруг на акумуляторній батареї (U<sub>ab</sub>), на вході підвищувачого ШІП (U<sub>vh</sub>) і на накопичувальному конденсаторі (U<sub>c\_nak</sub>);
- блок Score – для спостереження (вимірювання) миттєвих значень струму у АБ та напруги на ній, а також напруги на накопичувальному конденсаторі.

Модель системи керування зображена на рис. 4.2. До СК входять: PWM – підсистема широтно-імпульсного модулятора (ШІМ); Capacitor Charge Control – підсистема керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищувачим ШІМ; Commutation Control – підсистема керування комутацією транзисторів [14, 53]; Transient Control Subsystem – підсистема визначення закінчення перехідного процесу напруги на акумуляторі.

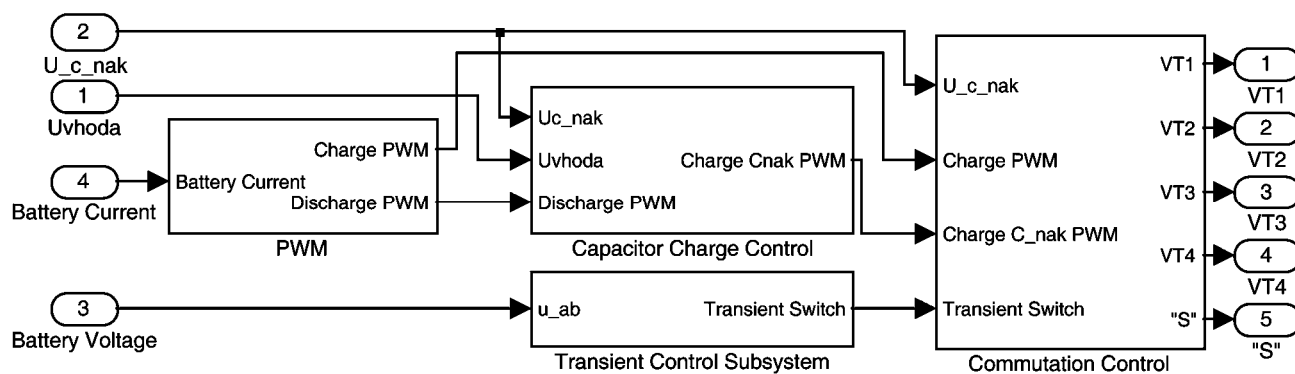


Рис. 4.2. Модель системи керування

Параметри схемної моделі акумуляторної батареї, зображеної на рис. 4.3, розраховуються згідно методики, розробленої в п. 2.3.

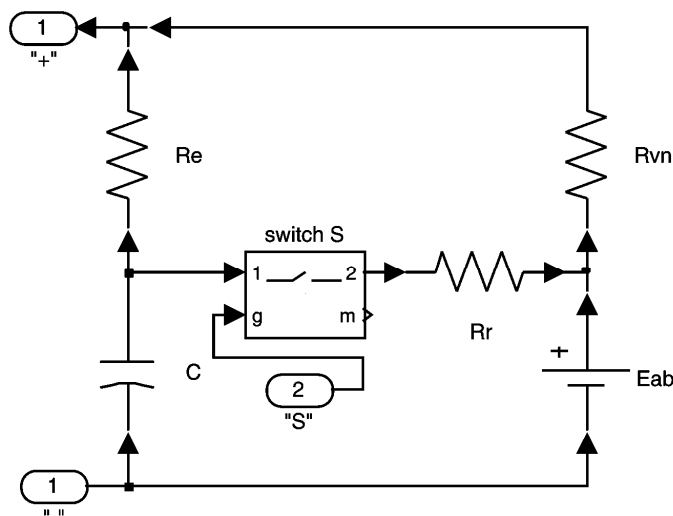


Рис. 4.3. Схемна модель акумуляторної батареї

Підсистема ШІМ, модель якої зображена на рис. 4.4, генерує сигнали керування транзисторами понижуючих ШПІ, які формують імпульс зарядного струму від джерела постійної напруги (транзистор VT1) і накопичувального конденсатора (транзистор VT4), а також корегуючі сигнали керування для корекції коефіцієнта заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПІ, що використовується для заряду накопичувального конденсатора, які передаються у підсистему керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШПІ.

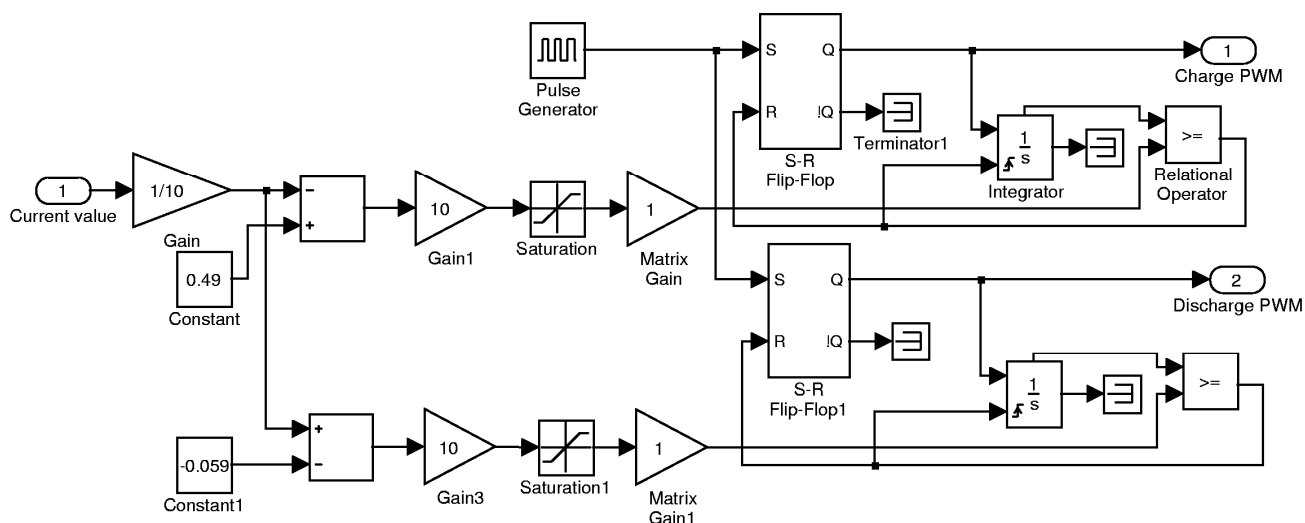


Рис. 4.4. Модель підсистеми ШІМ

В підсистемі керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШПП, модель якої зображена на рис. 4.5, виконується розрахунок і генерація коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПП, що використовується для заряду накопичувального конденсатора, за формулою (3.5), а також проводиться корекція цього коефіцієнта заповнення у разі відхилення струму розрядного імпульсу від заданого значення.

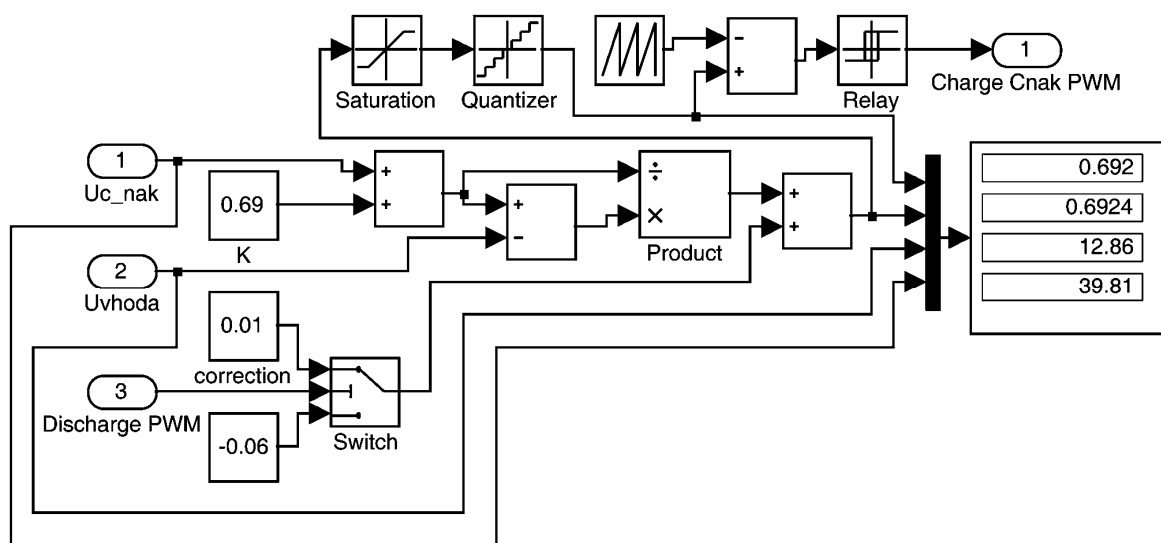


Рис. 4.5. Модель підсистеми керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШПП

Підсистема визначення закінчення перехідного процесу, яка зображена на рис. 4.6, потрібна для реалізації адаптивного способу заряду, для забезпечення якого потрібно стежити за перехідним процесом та з його завершенням припинити формування зарядного (розрядного) імпульсу струму і починати формування розрядного (зарядного) імпульсу струму.

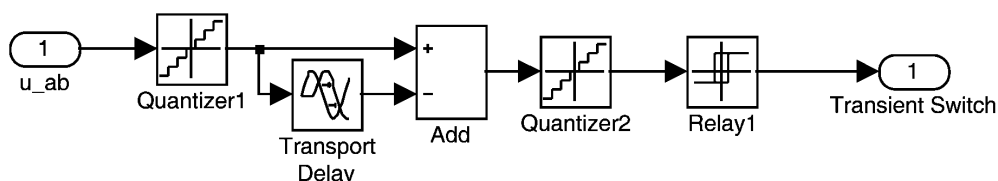


Рис. 4.6. Модель підсистеми визначення закінчення перехідного процесу

Підсистема керування комутацією транзисторів, модель якої зображена на рис. 4.7, складається з генератора, який задає довжини зарядного та розрядного імпульсів, та набору логічних елементів, які, в залежності від сигналу на виході генератора та напруги на накопичувальному конденсаторі, вмикають або понижуючі ШП: подається сигнал ШІМ на транзистор VT1 або VT4, що, у свою чергу, залежить від напруги на конденсаторі (якщо напруга на конденсаторі досягає  $U_{Снак.} \geq 45B$  – працює VT4, а якщо понижується до  $U_{Снак.} \leq 35B$  – знову починає працювати VT1); або коли приходить сигнал з підсистеми визначення закінчення перехідного процесу про те, що перехідний процес на акумуляторі закінчився, вмикають транзистор VT2 і починається розряд АБ на накопичувальний конденсатор, який переривається також по сигналу з підсистеми визначення закінчення перехідного процесу.

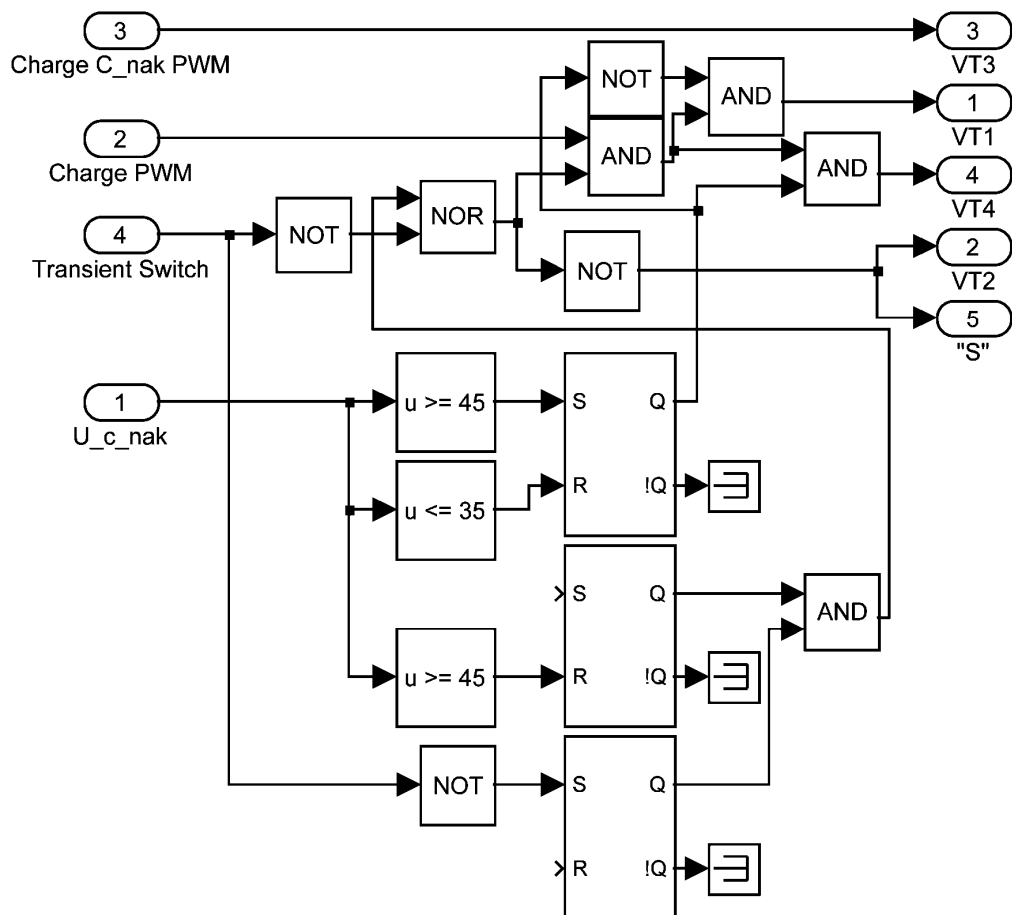


Рис. 4.7. Модель підсистеми керування комутацією транзисторів

Результати моделювання зображені на рис. 4.8.

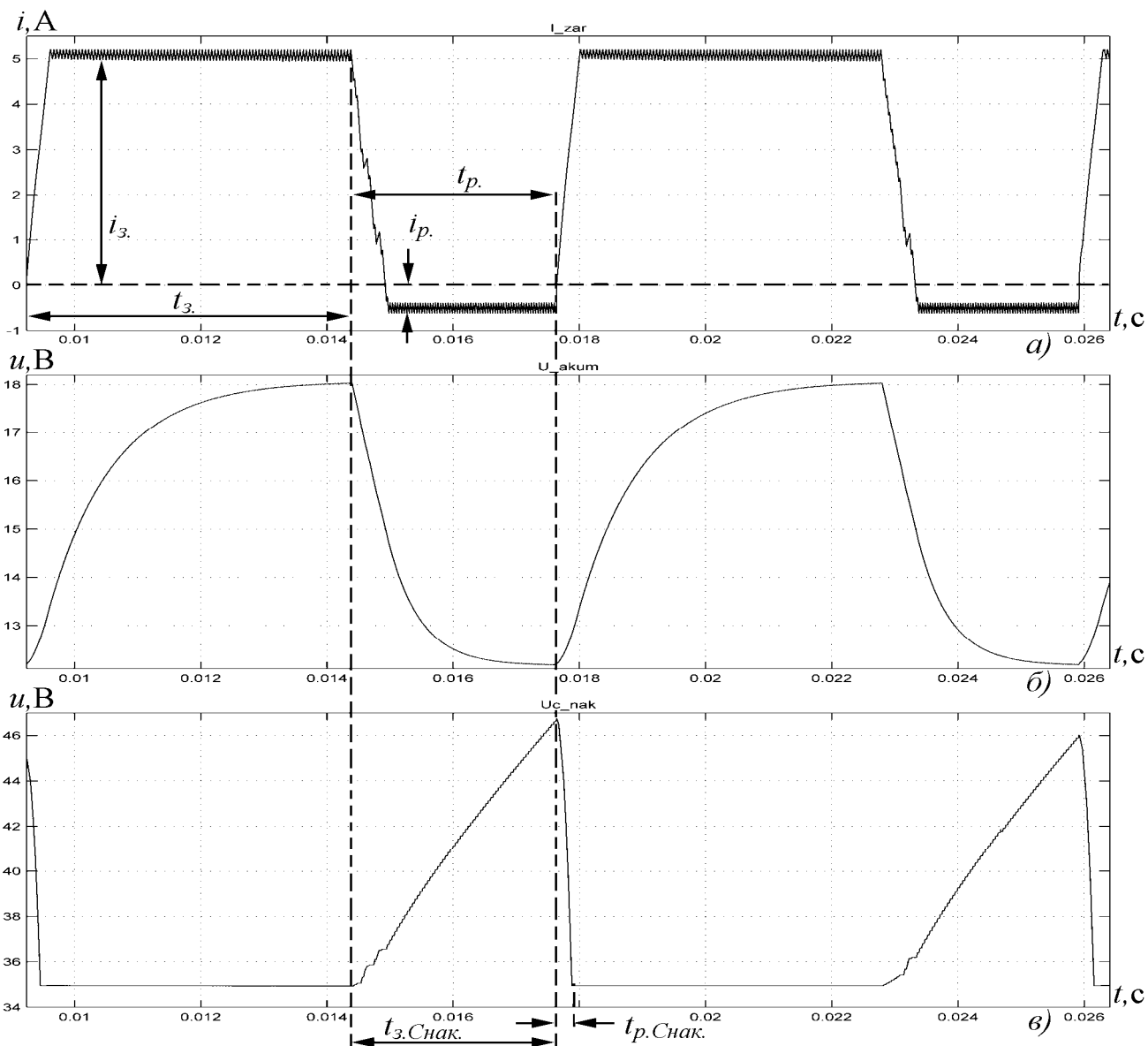


Рис. 4.8. Струм заряду АБ (а) та напруга на АБ під час її заряду (б) та напруга на накопичувальному конденсаторі (в) під час його заряду та розряду

Як видно з результатів моделювання (рис. 4.8), пристрій забезпечує адаптивний заряд АБ імпульсним асиметричним струмом необхідних параметрів. При цьому енергія розрядного імпульсу зберігається накопичувальним конденсатором (рис. 4.8, в) і потім знову передається АБ під час зарядного імпульсу (рис. 4.8, в).

За рахунок того, що енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі і також відпадає необхідність у сумарному

струмі зарядного пристрою рівному 1,1 від струму заряду акумулятора, зменшується споживання енергії мережі на 10-12% у порівнянні з пристроєм для заряду акумуляторів імпульсним асиметричним струмом, схема якого запропонована в [4].

Тривалість імпульсів зарядного і розрядного струмів корегується в залежності від стану акумулятора. В даному випадку параметри схемної моделі акумулятора розраховані виходячи з експериментальних даних, отриманих в [42]. Таким чином можна стверджувати, що схемна модель відповідає дійсності, що і було доведено в п. 2.4. Отже, порівнюючи тривалість імпульсів зарядних і розрядних струмів з запропонованими в [4], можна твердити для випадку, що розглядається, про додаткове підвищення ККД заряду, оскільки тривалість зарядного імпульсу струму при адаптивному заряді більше у 1,55 рази, ніж у запропонованому пристрої, а розрядного – у 2,12 рази менше. Отже енергія розрядного імпульсу не втрачається при проходженні через підвищуючий ШПІ у накопичувальний конденсатор і у зворотному напрямку в акумулятор через понижуючий ШПІ, оскільки КПД цих перетворювачів не більше за 93-97%. Також зменшується час заряду в 2,2 рази. Для знаходження співвідношення часів заряду потрібно прирівняти ємності, що надаються акумулятору. Прирівнявши ємності, отримуємо формулу:

$$\frac{i_3 t_3 - i_p t_p}{T} t = \frac{i_3 t_{3.a} - i_p t_{p.a}}{T_a} \cdot t_a, \quad (4.1)$$

З рівняння (4.1) отримуємо формулу для знаходження співвідношення часів заряду:

$$\frac{t}{t_a} = \frac{\frac{i_3 t_{3.a} - i_p t_{p.a}}{T_a}}{\frac{i_3 t_3 - i_p t_p}{T}} \quad (4.2)$$

де  $i_3$  – амплітуда імпульсу зарядного струму ( $i_3=5A$ );

$i_p$  – амплітуда імпульсу розрядного струму ( $i_p=0,5A$ );

$i_3=10i_p$  – співвідношення амплітуд імпульсів зарядного і розрядного струмів;

$t_3$  – час імпульсу зарядного струму ( $t_3=3,33мс$ );



$t_p$  – час імпульсу розрядного струму ( $t_p=6,67мс$ );

$t_{3.a}$  – час імпульсу зарядного струму при адаптивному заряді ( $t_{3.a}=5,15мс$ );

$t_{p.a}$  – час імпульсу розрядного струму при адаптивному заряді ( $t_{p.a}=3,15мс$ );

$T$  – тривалість періоду ( $T= t_3+ t_p=10мс$ );

$T_a$  – тривалість періоду при адаптивному заряді ( $T_a= t_{3.a}+ t_{p.a}=8,3мс$ );

$t$  – час заряду;

$t_a$  – час заряду адаптивним способом.

Підставивши всі значення у вираз (4.2), отримуємо співвідношення часу заряду до часу заряду адаптивним способом, яке відображає у скільки разів скоротився час заряду:

$$\frac{t}{t_a} = 2,2.$$

Значне скорочення часу заряду (в 2,2 рази) досягається за рахунок того, що під час формування розрядного імпульсу акумулятор не буде розряджатися більше необхідного обґрунтованого рівня і, відповідно, непотрібно відновлювати енергію, яка втрачається у випадку розряду більше зазначеного необхідного обґрунтованого рівня.

#### **4.2. Зарядний пристрій для групи акумуляторів з використанням імпульсу розрядного струму для заряду іншої акумуляторної батареї**

Електрична схема зарядного пристрою показана на рис. 3.8. Принцип дії пристрою детально описано в п. 3.3 [10, 15].

Моделювання електромагнітних процесів роботи пристрою проводилося за допомогою пакету розгалуження математичної системи MATLAB – Simulink.

Модель триланкового пристрою для адаптивного заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом зображена на рис. 4.9. Модель складається з силової частини та системи керування (СК) – Control System.

Силова частина моделі, зображеної на рис. 4.9, складається з наступних елементів (модулів):

– джерело постійної напруги (40 V);

- силові транзисторні модулі на MOSFET-транзисторах із зворотним діодом (VT1 – VT9);
- діоди (VD1 – VD6);
- схемні моделі акумуляторних батарей (Battery 1, Battery 2, Battery 3);
- накопичувальні дроселі (L1 – L9);
- вимірювачі миттєвого струму у акумуляторних батареях ( $I_{ab1}$ ,  $I_{ab2}$ ,  $I_{ab3}$ ), та струму джерела постійної напруги ( $I_{juv}$ );
- вимірювач миттєвої напруги на акумуляторній батареї ( $U_{ab1}$ );
- блок Demux – для розділення сигналів;
- блок Mux1 – для збирання сигналів;

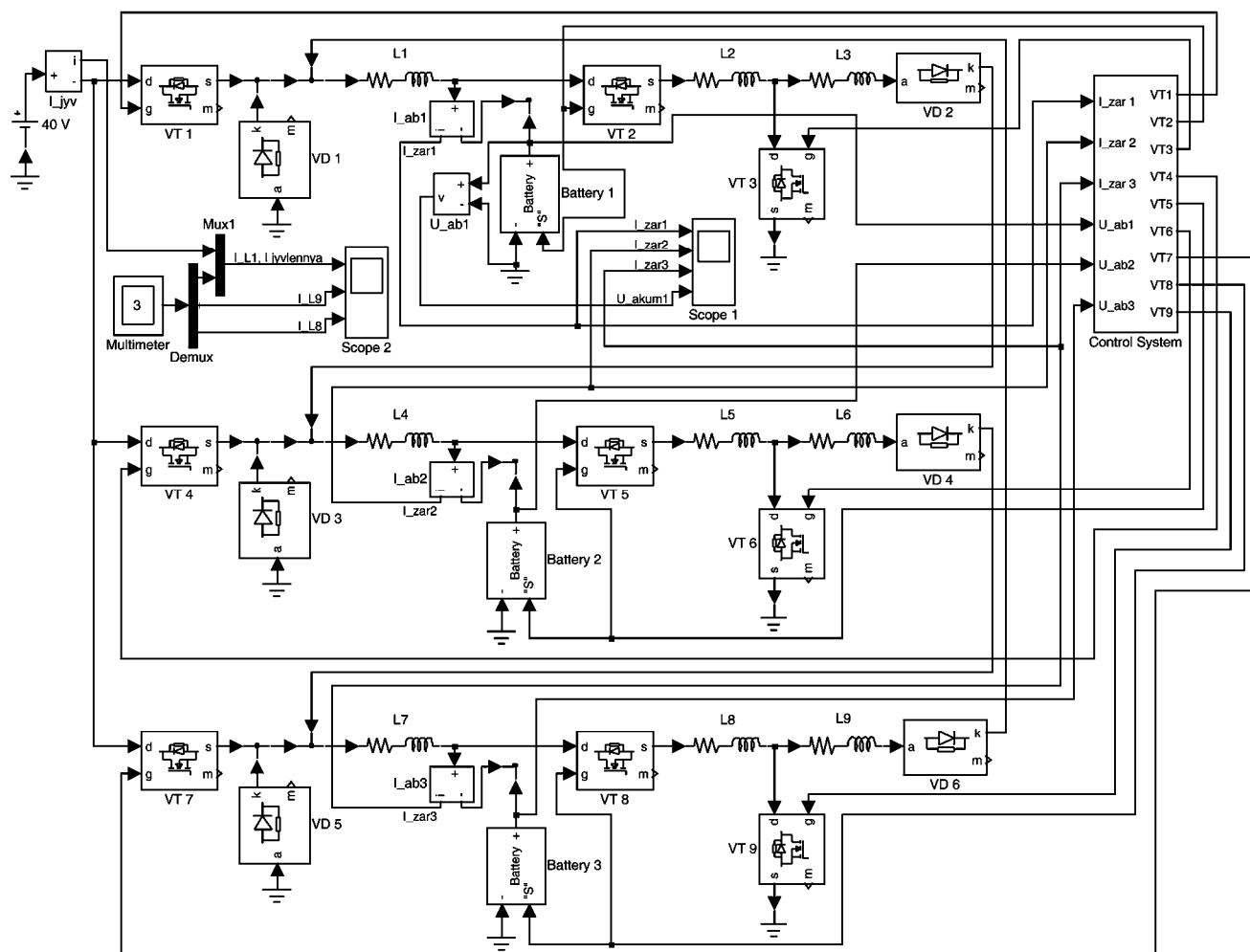


Рис. 4.9. Модель триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом

- Multimeter – блок для спостереження (вимірювання) миттєвих значень величин, які вибрані у полі Measurement відповідних блоків (у нашому випадку це струм у дроселях L1, L8, L9);
- блок Score 1 – для спостереження (вимірювання) миттєвих значень струмів у акумуляторних батареях та напруги на одній з них;
- блок Score 2 – для спостереження (вимірювання) миттєвих значень струмів у джерелі постійної напруги та дроселях L1, L8 та L9.

СК зображена на рис. 4.10. До СК (блок Control System) входять такі підсистеми: Current Impulse Selector for PWM Subsystem – підсистема вибору імпульсів струму; PWM Subsystem – підсистема широтно-імпульсного модулятора (ШІМ); Commutation Control – підсистема керування комутацією транзисторів і вибором імпульсів струму; 3 ch. Transient Control Subsystem – триканальна підсистема визначення закінчення перехідного процесу напруги на акумуляторах.

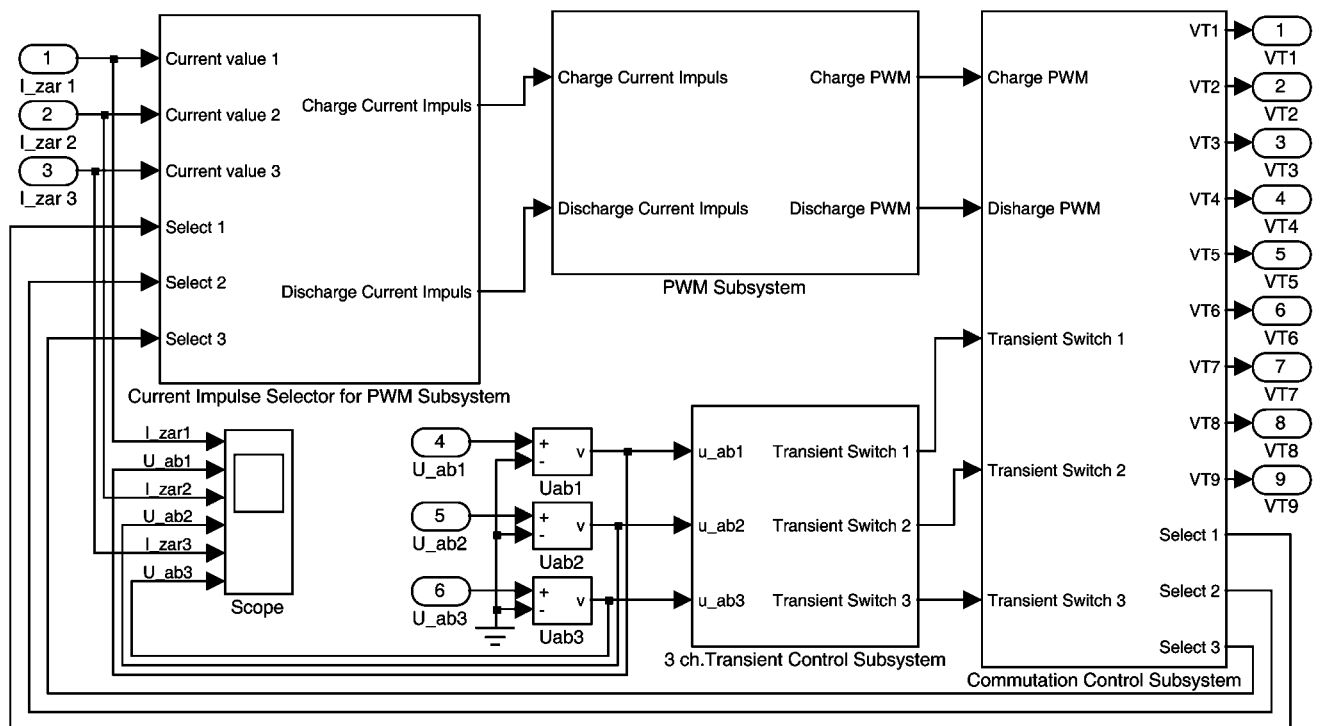


Рис. 4.10. Модель системи керування

Підсистема вибору імпульсів струму, модель якої зображена на рис. 4.11, складається з керованих перемикачів, які комутують сигнали з вимірювачів миттєвого струму у акумуляторних батареях ( $I_{ab1}$ ,  $I_{ab2}$ ,  $I_{ab3}$ ) для підсистеми ШІМ (рис. 4.12) в залежності від періоду роботи схеми. Керує підсистемою вибору імпульсів струму підсистема керування комутацією транзисторів і вибором імпульсів струму (рис. 4.14).

Підсистема визначення закінчення перехідного процесу, яка зображена на рис. 4.12, потрібна для реалізації адаптивного способу заряду, для забезпечення якого потрібно стежити за перехідним процесом та з його завершенням припинити формування зарядного (розрядного) імпульсу струму і починати формування розрядного (зарядного) імпульсу струму. Для триланкового пристрою для адаптивного заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом потрібно три ідентичних канали.

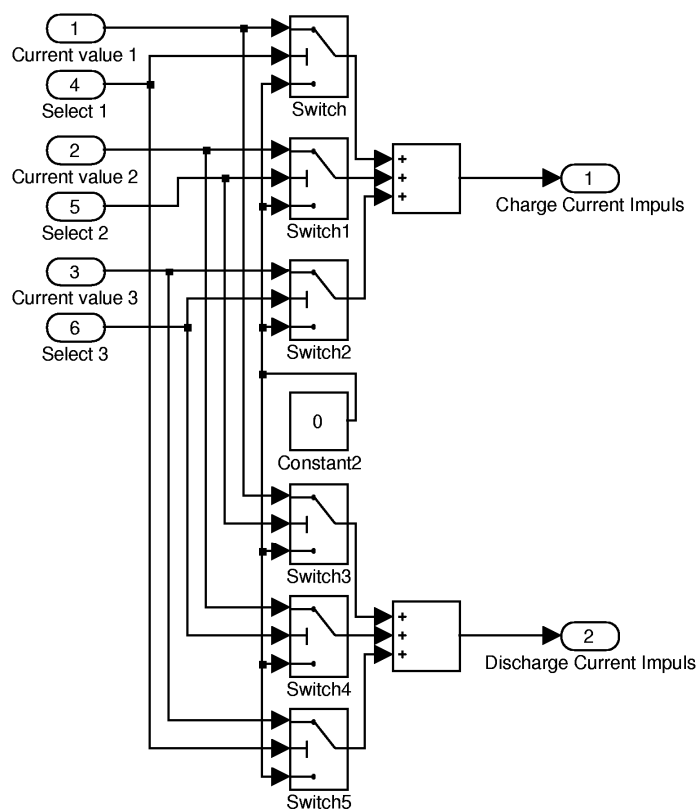


Рис. 4.11. Модель підсистеми вибору імпульсів струму

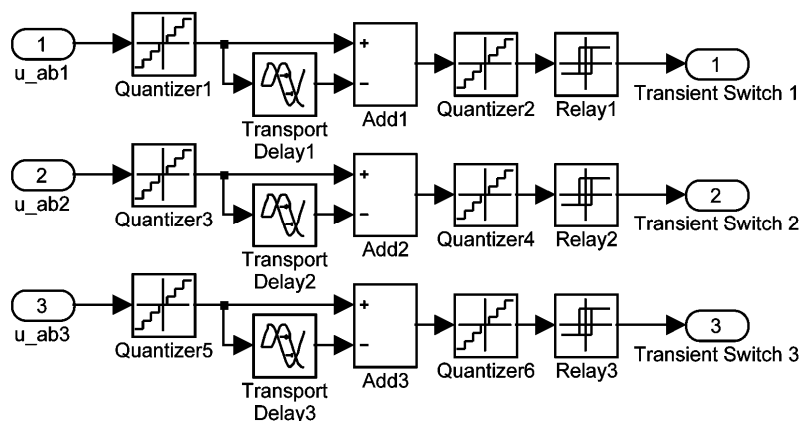


Рис. 4.12. Модель підсистеми визначення закінчення перехідного процесу

Підсистема ШПМ, модель якої зображена на рис. 4.13, генерує сигнали керування транзисторами понижуючих ШП, які формують імпульс зарядного струму від джерела постійної напруги (транзистори VT1, VT4 та VT7), формує корегуючі сигнали керування для корекції коефіцієнта заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШП, а також формує сигнали керування транзисторами підвищуючих ШП (транзистори VT3, VT6 та VT9).

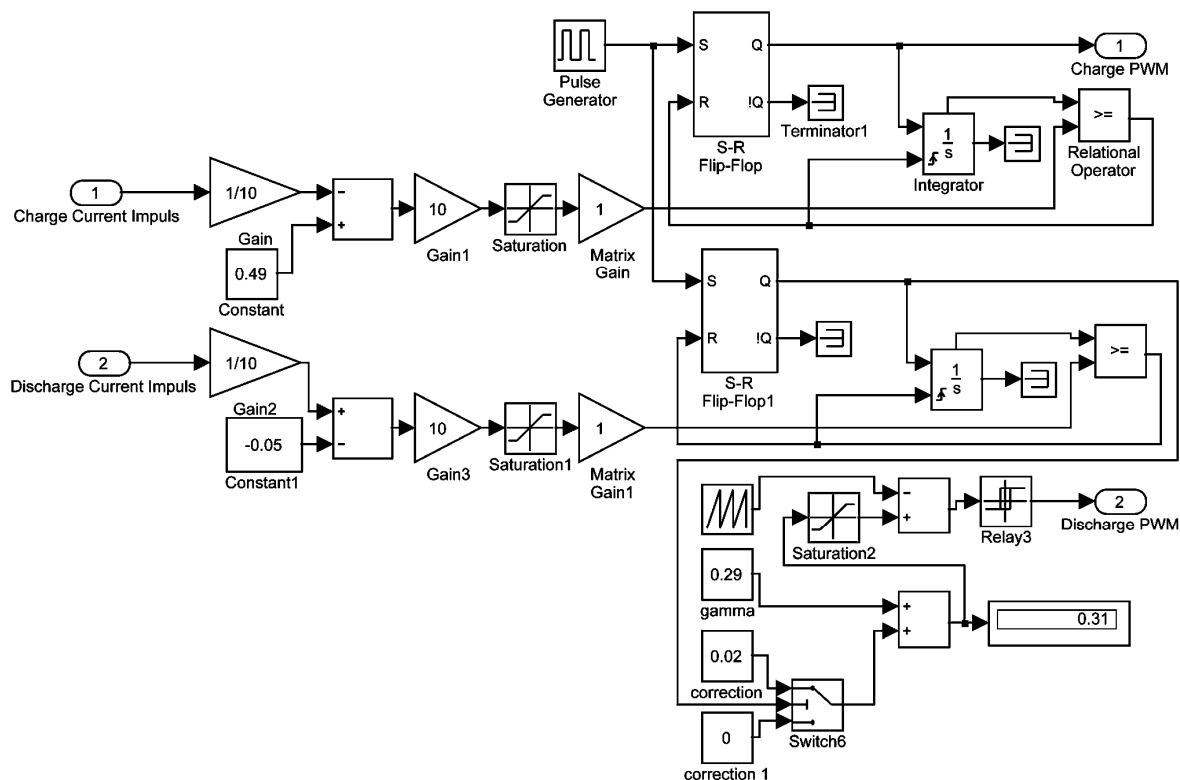


Рис. 4.13. Модель підсистеми ШПМ

Підсистема керування комутацією транзисторів і вибором імпульсів струму, модель якої зображена на рис. 4.14, складається з набору логічних елементів, які, в залежності від сигналу на виході триканальної підсистеми визначення закінчення перехідного процесу напруги на акумуляторах (3 ch. Transient Control Subsystem), комутують сигнал ШІМ для понижуючого ШІП на транзистор VT1, або VT4, або VT7, вмикають транзистор VT8, або VT2, або VT5, і комутують сигнал ШІМ для підвищуючого ШІП на транзистор VT9, або VT3, або VT6. Порядок вмикання транзисторів наведено у табл. 2.1, в якій приведені періоди роботи силових ключів схеми та процеси, які відбуваються в ланці в ці періоди. Періоди роботи будуть відрізнятися від наведених у табл.2.1, оскільки в пристрої реалізовано адаптивний заряд і перемикання імпульсів струму буде проходити після закінчення перехідного процесу на акумуляторі.

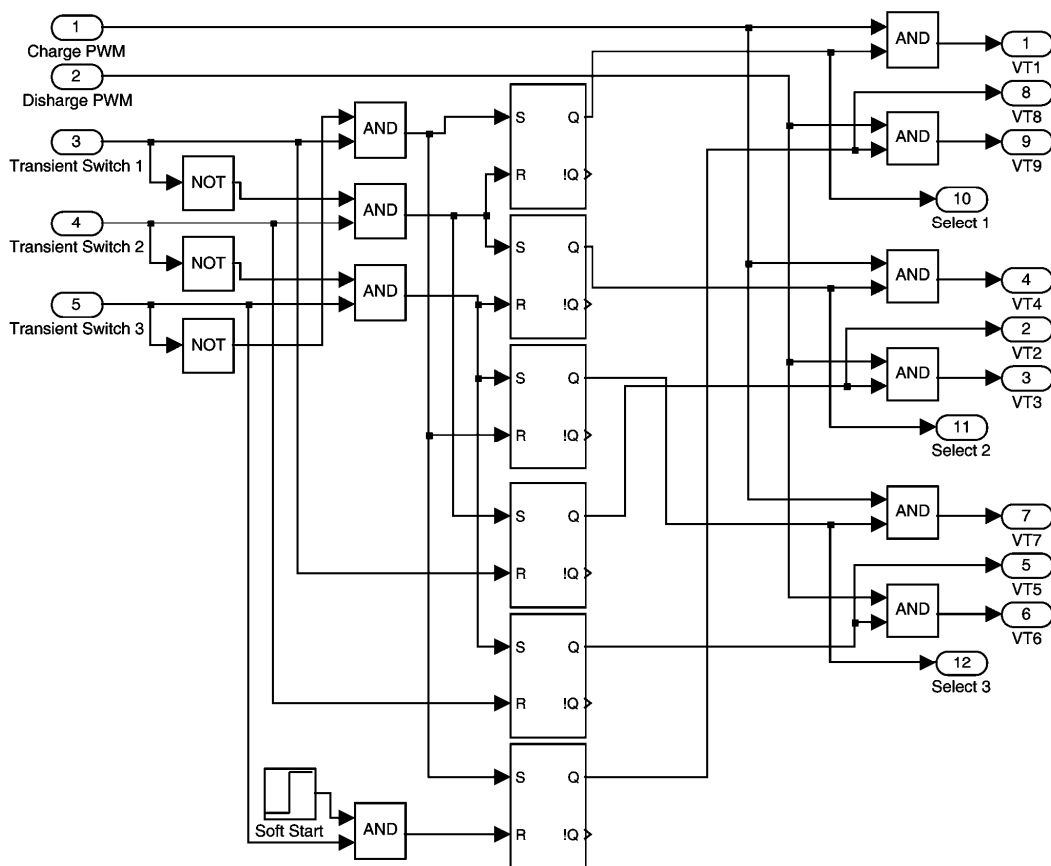


Рис. 4.14 – Модель підсистеми керування комутацією транзисторів і вибором імпульсів струму

Результати моделювання зображені на рис. 4.15.

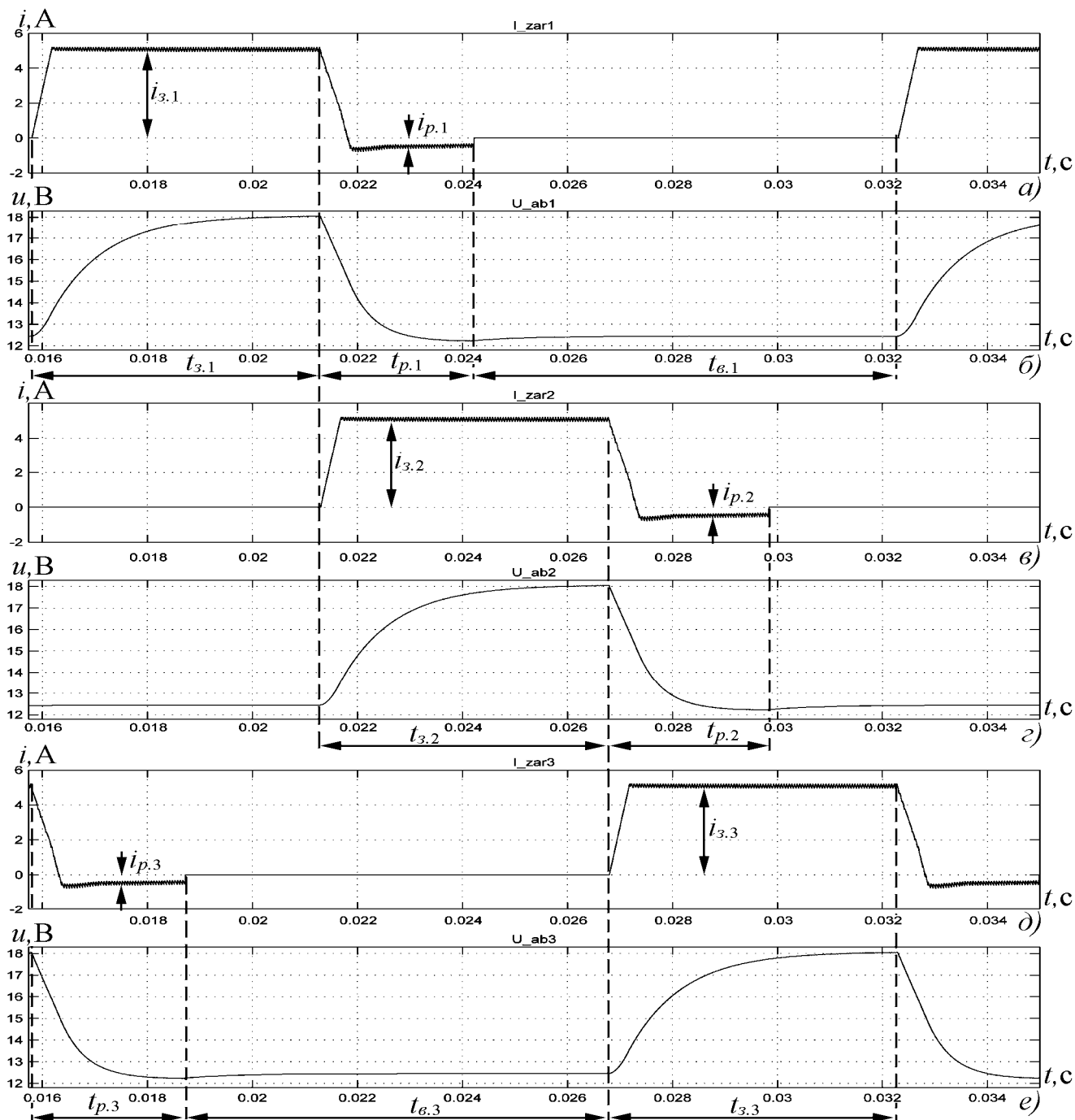


Рис. 4.15. Струми заряду акумуляторних батарей (а,в,д)  
та напруга на них (б,г,е) під час заряду

Як видно з результатів моделювання (рис. 4.15, а, в, д), пристрій забезпечує заряд акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом необхідних параметрів. При цьому струм розрядного імпульсу додається до струму зарядного імпульсу наступної ланки (рис. 3.7), причому струм розрядного імпульсу

останньої ланки додається до струму зарядного імпульсу першої ланки. Виділені ділянки на рис. 3.7 (для прикладу виділено лише 2 з багатьох ділянок) наглядно демонструють економію при споживанні струму від мережі живлення, який доповнюється струмом, отриманим при розряді АБ попередньої ланки, який, у свою чергу, зберігається у додатковому дроселі.

За рахунок того, що струм розрядного імпульсу додається до струму зарядного імпульсу наступної ланки і також відпадає необхідність у сумарному струмі зарядного пристрою рівному 1,1 від струму заряду акумулятора, зменшується споживання енергії мережі приблизно на 10-12% у порівнянні з пристроєм для заряду акумуляторів імпульсним асиметричним струмом, схема якого запропонована в [4]. А також використання запропонованого пристрою дозволяє зменшити спотворення форми струму мережі живлення, оскільки споживання енергії рівномірно рознесено у часі на періоді напруги мережі живлення, що також дозволяє більш ефективно використовувати енергію, отриману, наприклад, від сонячних панелей або вітрогенераторів.

Як і в попередньому пристрої, тривалість імпульсів зарядного і розрядного струмів корегується в залежності від стану акумулятора. В даному випадку параметри схемної моделі акумулятора такі ж самі, як і в попередньому, і розраховані виходячи з експериментальних даних, отриманих в [42]. Порівнюючи тривалість імпульсів зарядних і розрядних струмів з запропонованими в [10], можна твердити для випадку, що розглядається, про додаткове підвищення ККД заряду, оскільки тривалість зарядного імпульсу струму при адаптивному заряді більше у 1,65 рази, ніж у запропонованому пристрої, розрядного – у 1,11 рази менше, а час відпочинку (рест-період) – у 2,4 рази більше. Також зменшується час заряду в 1,2 рази. Для знаходження співвідношення часів заряду потрібно прирівняти формули для знаходження ємності, що надається акумулятору. Формула для знаходження співвідношення часів заряду для триланкового пристрою заряду наступна:

$$\frac{i_3 t_3 - i_p t_p}{T} = \frac{i_3 t_{3,a} - i_{p,a} t_{p,a}}{T_a} \cdot t_a, \quad (4.3)$$



З рівняння (4.3) отримуємо формулу для знаходження співвідношення часів заряду:

$$\frac{t}{t_a} = \frac{\frac{i_3 t_{3,a} - i_{p,a} t_{p,a}}{T_a}}{\frac{i_3 t_3 - i_p t_p}{T}} \quad (4.4)$$

де  $i_3$  – амплітуда імпульсу зарядного струму ( $i_3=5A$ );

$i_p$  – амплітуда імпульсу розрядного струму ( $i_p=1A$ );

$i_{p,a}$  – амплітуда імпульсу розрядного струму при адаптивному заряді ( $i_{p,a}=0,5A$ );

$i_3=5i_p$  – співвідношення амплітуд імпульсів зарядного і розрядного струмів;

$i_3=10i_{p,a}$  – співвідношення амплітуд імпульсів зарядного і розрядного струмів при адаптивному заряді;

$t_3$  – час імпульсу зарядного струму ( $t_3=3,33мс$ );

$t_p$  – час імпульсу розрядного струму ( $t_p=3,33мс$ );

$t_{3,a}$  – час імпульсу зарядного струму при адаптивному заряді ( $t_{3,a}=5,5мс$ );

$t_{p,a}$  – час імпульсу розрядного струму при адаптивному заряді ( $t_{p,a}=3мс$ );

$T$  – тривалість періоду ( $T= t_3+ t_p+ t_6=10мс$ );

$T_a$  – тривалість періоду при адаптивному заряді ( $T_a= t_{3,a}+ t_{p,a} + t_{6,a}=16,5мс$ );

$t_6$  – час відпочинку (рест-періоду) ( $t_6=3,33мс$ );

$t_{6,a}$  – час відпочинку (рест-періоду) при адаптивному заряді ( $t_{6,a}=8мс$ );

$t$  – час заряду;

$t_a$  – час заряду адаптивним способом.

Підставивши всі значення у вираз (4.4), отримуємо співвідношення часу заряду до часу заряду адаптивним способом:

$$\frac{t}{t_a} = 1,2.$$

Час заряду адаптивним способом не суттєво покращився (тільки у 1,2 рази) із-за наявності відносно довгого інтервалу відпочинку ( $t_6$ ). Для того, щоб скоротити час відпочинку пропонується дволанкова система заряду імпульсним асиметричним струмом, в якій теж використовується спосіб

заряду імпульсним асиметричним струмом групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншої акумуляторної батареї. Модель дволанкового пристрою створена на основі моделі триланкового – вилучена одна ланка у силовій частині і в системі керування, а також скорегований алгоритм функціонування пристрою. Результати моделювання зображені на рис. 4.16.

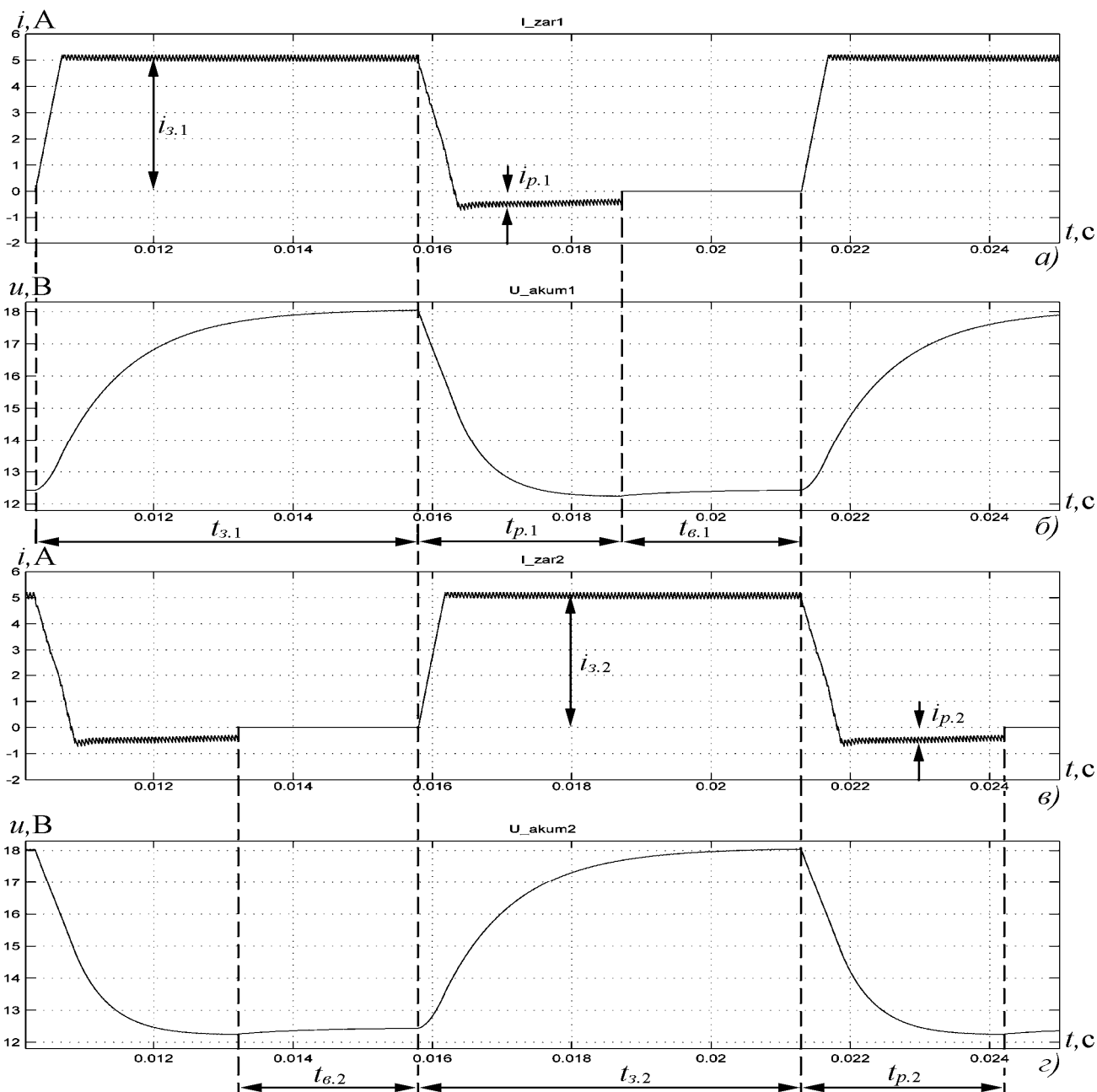


Рис. 4.16. Струми заряду акумуляторних батарей (а,в)  
та напруга на них (б,г) під час заряду

Час відпочинку (рест-періоду) при адаптивному заряді скоротився до  $t_{e.a.}=2,5\text{мс}$ . З формули (4.4) знаходимо співвідношення часів заряду:

$$\frac{t}{t_a}=1,8.$$

Триланковий та дволанковий пристрої були створені у якості прикладу реалізації способу заряду імпульсним асиметричним струмом групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншої акумуляторної батареї. При створенні багатоланкових пристроїв на основі запропонованого способу потрібно враховувати тип акумуляторів і співвідношення часу перехідних процесів при формуванні зарядного імпульсу струму і розрядного, а також можливість реалізації у конкретній системі.

#### **4.3. Зарядний пристрій буферного акумулятора з використанням імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження**

Принцип дії пристрою для заряду імпульсним асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі (рис.3.11) базується на передачі енергії імпульсу розрядного струму у навантаження і детально описаний в п. 3.4 [9, 16].

У разі припинення з якихось причин живлення від основного джерела, система гарантованого електроживлення автоматично перейде на живлення навантаження від акумуляторної батареї.

Отже, використання даного пристрою дає можливість здійснювати заряд імпульсним асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі.

Дослідження електромагнітних процесів (ЕМП) проводилось за допомогою пакету розгалуження математичної системи MATLAB – Simulink [11, 22].

Метою моделювання було підтвердження працездатності запропонованої схеми, вибір співвідношення частот перетворювачів та визначення часу затримки включення силового ключа  $VT2$  відносно моменту включення  $VT1$ .

Модель пристрою для заряду імпульсним асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі, зображена на рис. 4.17. Модель складається з силової частини та системи керування (СК) – Control System.

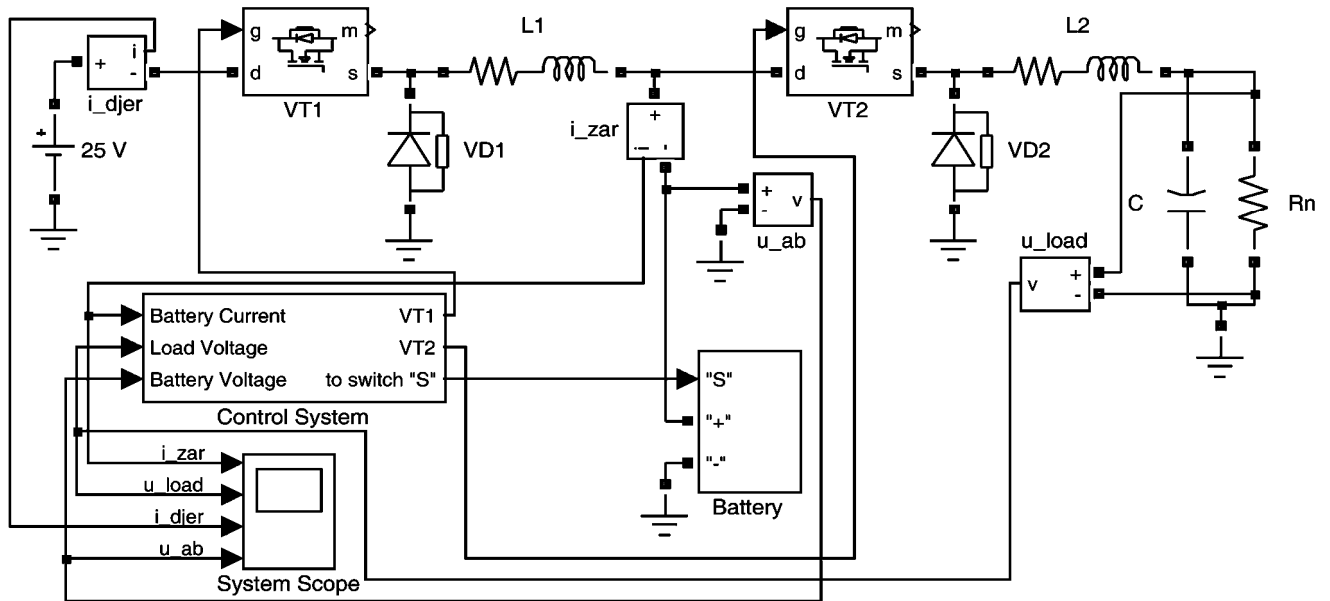


Рис. 4.17. Модель пристрою для заряду імпульсним асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі

Силова частина моделі, зображеної на рис. 4.17, складається з наступних елементів (модулів):

- джерело постійної напруги (25 V);
- силові транзисторні модулі на MOSFET-транзисторах із зворотним діодом (VT1, VT2);
- діоди (VD1, VD2);
- схемна модель акумуляторної батареї (Battery);
- накопичувальні дроселі (L1, L2);
- вимірювач миттєвого струму у акумуляторній батареї ( $i_{zar}$ ), та струму джерела постійної напруги ( $i_{djer}$ );
- вимірювач миттєвої напруги на акумуляторній батареї ( $u_{ab}$ ) та вимірювач миттєвої напруги на навантаженні (U);
- блок Score – для спостереження і вимірювання миттєвих значень струму у

аккумуляторній батареї, напруги на ній, напруги на навантаженні і струму у джерелі постійної напруги.

Система керування, модель якої зображена на рис. 4.18, генерує сигнали керування транзисторами понижуючих ШП, які формують імпульси зарядного і розрядного струму, а також забезпечують живлення навантаження. В СК є підсистема визначення закінчення перехідного процесу напруги на аккумуляторах (Transient Control Subsystem), яка потрібна для реалізації адаптивного способу заряду, для забезпечення якого потрібно стежити за перехідним процесом та з його завершенням припинити формування зарядного (розрядного) імпульсу струму і починати формування розрядного (зарядного) імпульсу струму. Також в моделі СК реалізована функція переходу в аварійний режим роботи.

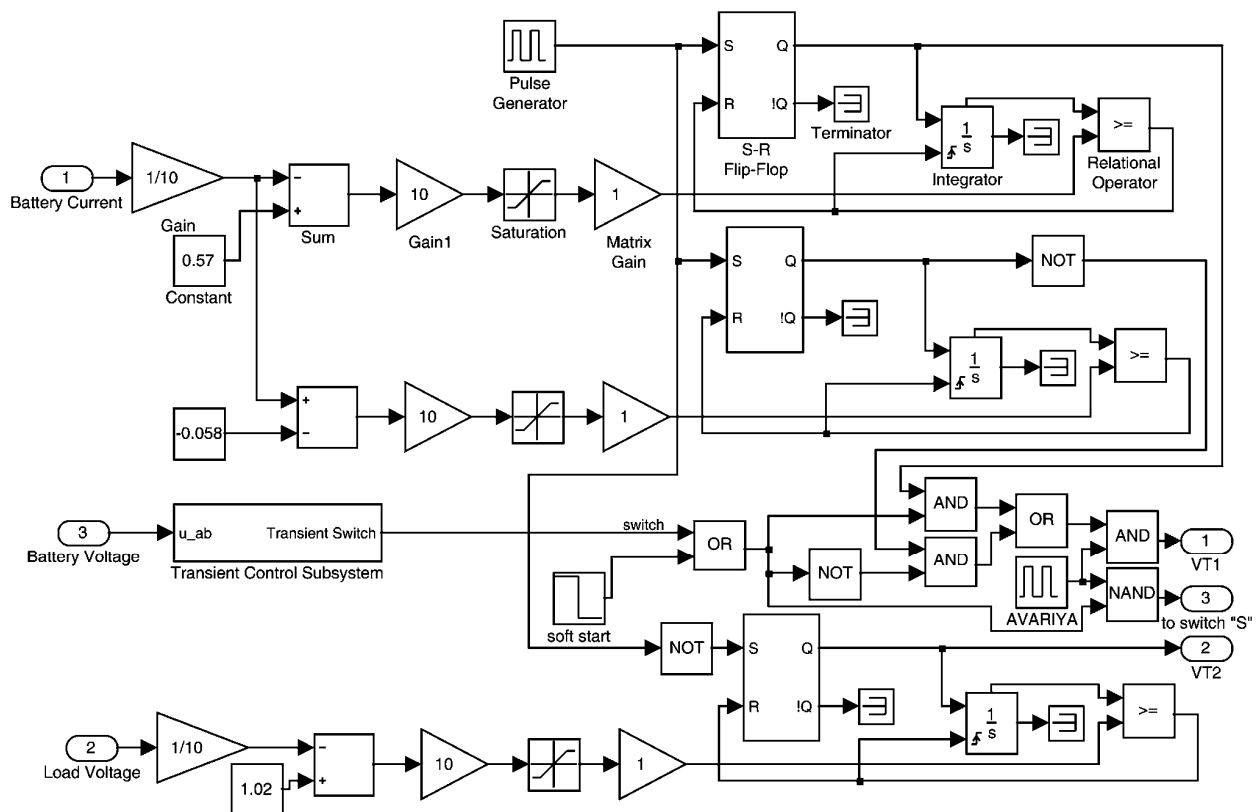


Рис. 4.18. Модель системи керування

Результати моделювання показали, що для зменшення пульсацій струму навантаження доцільно використовувати один задаючий генератор (Pulse Generator) для обох перетворювачів.

Діаграми роботи у робочому режимі та у випадку раптового вимкнення основного джерела живлення показано на рис. 4.19.

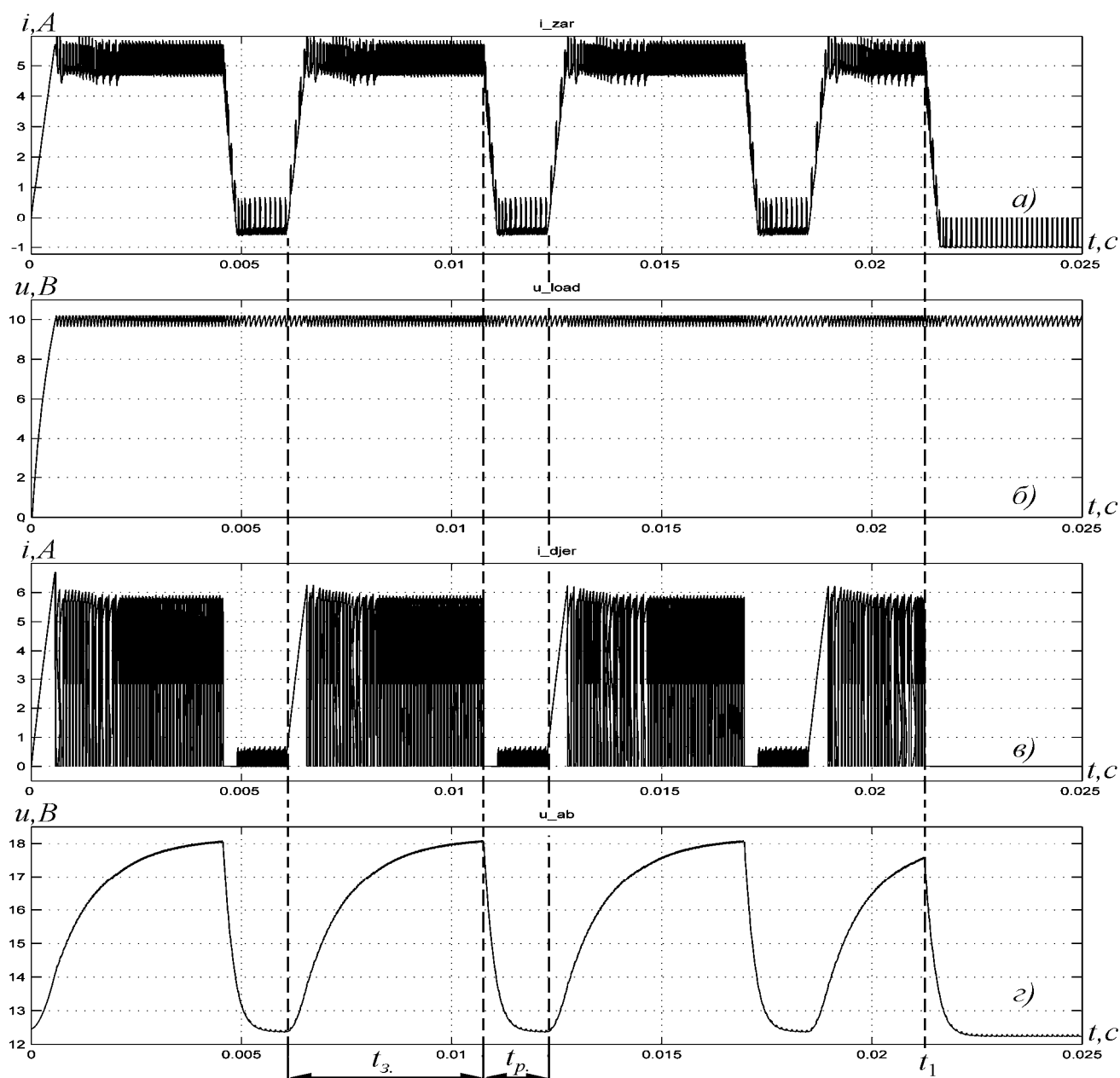


Рис. 4.19. Струм заряду АБ (а), напруга на навантаженні (б) та струм, споживаний від джерела живлення (в) ( $t_1$  – час раптового вимкнення основного джерела живлення)

Як видно з рис. 4.19 (а) пристрій забезпечує заряд акумуляторної батареї імпульсним асиметричним струмом необхідних параметрів (співвідношення зарядної і розрядної складової струму 10:1). Також на рис. 4.19 (в) спостерігається зменшення

споживання струму від джерела живлення під час формування імпульсу розрядного струму. Це пояснюється тим, що енергія імпульсу розрядного струму, до якої додається енергія з джерела живлення, використовується для формування необхідної напруги на навантаженні. Тобто енергія імпульсу розрядного струму передається у навантаження, тим самим зменшуючи споживання енергії від основного джерела енергії. З рис. 4.19 (б) видно, що пристрій здатен забезпечити стабільну напругу на навантаженні.

У випадку, коли основне джерело живлення раптово вимкнулось, навантаження живиться тільки від акумуляторної батареї. Такий випадок був змодельований і результати відображені на рис. 4.19 ( $t_1$  – час раптового вимкнення основного джерела живлення). Як видно з результатів моделювання, пристрій забезпечує живлення навантаження від акумуляторної батареї при вимкненому джерелі живлення (рис. 4.19, графіки роботи пристрою після моменту часу  $t_1$ ). На рис. 4.19 (в) можна спостерігати момент, коли раптово зникає струм джерела живлення (момент часу  $t_1$ ). З рис. 4.19 (а) видно, що навіть якщо вимкнення джерела живлення станеться під час формування імпульсу зарядного струму, система стабільно відпрацює цей режим і без перебоїв у роботі забезпечить живлення навантаження від акумуляторної батареї (рис. 4.19 (б)).

Як і в попередніх пристроях, тривалість імпульсів зарядного і розрядного струмів корегується в залежності від стану акумулятора. В даному випадку параметри схемної моделі акумулятора такі ж самі і розраховані виходячи з експериментальних даних, отриманих в [42]. Порівнюючи тривалість імпульсів зарядних і розрядних струмів з запропонованими в [4], можна твердити для випадку, що розглядається, про додаткове підвищення ККД заряду, оскільки тривалість зарядного імпульсу струму при адаптивному заряді більше у 1,4 рази, ніж у запропонованому пристрої, а розрядного – у 4,3 рази менше. Також зменшується час заряду в 2,7 рази. Для знаходження співвідношення часів заряду для буферного пристрою заряду використовувалась формула (4.2).

### **Висновки до четвертого розділу**

1. Проведене моделювання схем пристроїв, створених на основі енергозберігаючих способів заряду з використанням створеної схемної моделі акумулятора, довело, що дані схеми забезпечують заряд акумуляторних батарей струмом необхідної форми, причому енергія імпульсу розрядного струму не втрачається, а використовується, або повторно, або для заряду іншої батареї, чи для живлення корисного навантаження.
2. В схемі пристрою, створеній на основі способу заряду зі збереженням енергії імпульсу розрядного струму в НРЕ, енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі і тому зменшується споживання енергії мережі на 10-12% у порівнянні з відомим пристроєм для заряду акумуляторів імпульсним асиметричним струмом, а також за рахунок використання адаптивного заряду зменшується час заряду в 2,2 рази.
3. Моделювання схеми пристрою заряду, створеного на основі способу заряду групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншого акумулятора, довело, що за рахунок того, що струм розрядного імпульсу сумується з струмом зарядного імпульсу наступної ланки, зменшується споживання енергії мережі на 10-12% у порівнянні з відомим пристроєм, зменшується спотворення форми струму мережі живлення, оскільки споживання енергії рівномірно рознесено у часі на періоді напруги мережі живлення, що дозволяє більш ефективно використовувати енергію, отриману, наприклад, від сонячних панелей або вітрогенераторів, і використання адаптивного способу заряду зменшує час заряду в 1,2 рази.
4. Запропоновано дволанковий пристрій адаптивного заряду імпульсним асиметричним струмом, створений на основі способу заряду групи акумуляторів з використанням енергії імпульсу розрядного струму для заряду іншого акумулятора, час заряду якого в 1,8 разів менше у порівнянні з триланковим пристроєм і у 1,5 рази менше, ніж у запропонованого триланкового пристрою з адаптивним зарядом.



5. В схемі зарядного пристрою, створеній на основі способу заряду акумуляторної батареї в буферному режимі з використанням енергії імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження, зменшено споживання електроенергії від джерела живлення і час заряду зменшується в 2,7 рази.
6. Використання енергозберігаючих способів заряду дозволяє значно підвищити ККД пристроїв заряду імпульсним асиметричним струмом, а використання адаптивного способу заряду, який змодельовано з використанням створеної схемної моделі акумулятора, дозволяє скоротити час заряду до 2,7 разу і ефективно використовувати електроенергію для заряду та ресурси акумулятора.

## РОЗДІЛ 5

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРІВ

**5.1. Експериментальна установка для дослідження впливу заряду****імпульсним асиметричним струмом на тривалість життя акумуляторів**

Актуальною задачею є підтвердження теоретичних розрахунків та припущень, зроблених при розробці пристрою заряду акумуляторних батарей [14, 53, 57], в якому використовувався метод заряду імпульсним асиметричним струмом зі збереженням енергії розрядного імпульсу у реактивному елементі – накопичувальному конденсаторі. Тому потрібно провести експериментальні дослідження впливу заряду імпульсним асиметричним струмом на тривалість життя акумуляторних батарей [54, 55].

Для досліджень обрано *NiCd* акумулятори серійного виробництва, які характеризуються масовими масштабами випуску і високою стандартизацією. Це дає підставу вважати, що будь-які ефекти підвищення експлуатаційних характеристик акумуляторів, що спостерігаються при використанні розроблювального пристрою [14, 53, 57], обумовлені саме режимом і способом заряду, а не випадковими факторами.

***Структурна та електрична принципова схеми експериментальної установки*** зображена на рис.5.1.

Експериментальна установка [55] складається з наступних функціональних елементів:

*ДЖ* – джерело живлення;

*ШП1– ШП3* – широтно–імпульсні перетворювачі;

*ДС* – датчик струму;

*ДН1, ДН2* – датчики напруги;

*АБ* – акумуляторна батарея;

*К* – ключ комутатор;

*НК* – накопичувальний конденсатор;

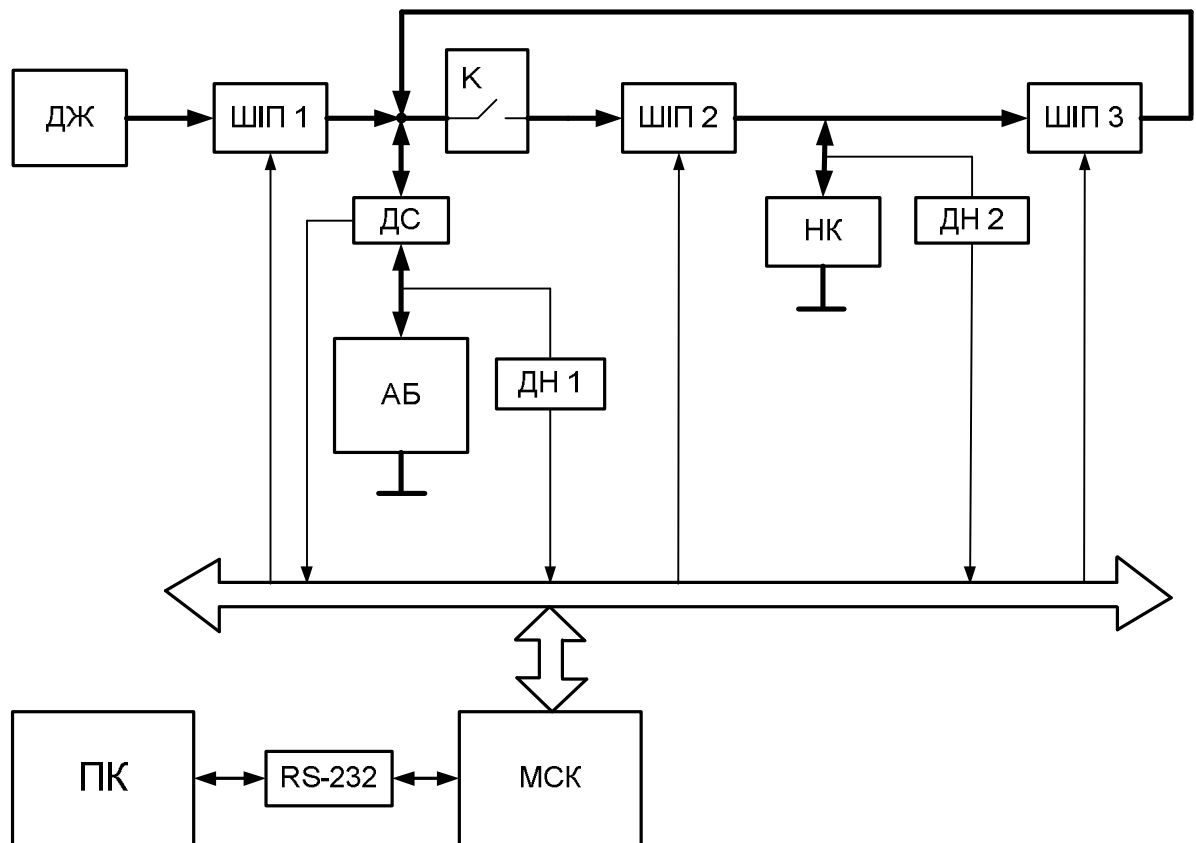


Рис. 5.1. Структурна схема експериментальної установки для дослідження заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом

*МСК* – мікропроцесорна система керування;

*ПК* – персональний комп'ютер.

Джерело живлення (*ДЖ*) перетворює напругу та струм мережі живлення до стабілізованих значень на виході відповідно  $9V$  і  $1,3A$ . Електроенергія від *ДЖ* надходить на вхід зарядного пристрою. На вході пристрою знаходиться широтно-імпульсний перетворювач *ШП1* понижуючого типу, який забезпечує задані параметри електроенергії, необхідні для заряду акумуляторної батареї (*АБ*). З *ШП1* енергія поступає в *АБ* через датчик струму *ДС*, який необхідний для підрахунку *Ампер-год*, відданих *АБ*, та контролю струму заряду. Датчик напруги *ДН1* призначений для контролю напруги на *АБ*. *ШП1* формує зарядний імпульс. В інтервали часу між зарядними імпульсами енергія від *АБ* надходить до підвищуючого широтно-імпульсного перетворювача *ШП2*, який формує розрядний імпульс, енергія якого накопичується в накопичувальному

конденсаторі (*НК*). Датчик напруги *ДН2* призначений для контролю за напругою на конденсаторі. В моменти, коли напруга на *НК* досягає певного значення, він розряджається через понижуючий широтно-імпульсний перетворювач *ШППЗ*, який має всі спільні елементи з *ШПП1*, окрім ключа. Енергія, накоплена на *НК*, надходить на вхід *АБ*. Збір інформації з датчиків, обробка даних та керування зарядним пристроєм виконується мікропроцесорною системою керування (*МСК*).

Персональний комп'ютер (*ПК*) виконує функції реєстрації та відображення інформації. Обмін даними з мікропроцесорною системою керування відбувається за допомогою інтерфейсу RS-232.

На рис. 5.2 зображена схема електрична принципова силової частини експериментальної установки, принцип дії якої детально описано в п. 3.2. *ШПП1* – понижуючого типу на елементах *VT1*, *VD1*, *L1*, *E<sub>АБ</sub>* формує зарядний імпульс. *ШПП2* – підвищуючого типу на елементах *L2*, *VT3*, *VD2*, *Снак.* формує розрядний імпульс, енергія якого зберігається у накопичувальному конденсаторі *Снак.* Транзистор *VT2* використовується для підключення акумуляторної батареї до підвищуючого *ШПП2*. Розряд накопичувального конденсатора проводиться *ШППЗ* понижуючого типу на елементах *VT4*, *VD1*, *L1*, *E<sub>АБ</sub>* під час формування зарядного імпульсу. До складу схеми входить прецизійний датчик струму *DD1*. В MOSFET-транзисторах паралельно транзистору технологічно вбудований зворотній діод [48] і тому використовувати їх в якості силових ключів *VT1* і *VT4* можна тільки із зустрічно увімкненим діодом *VDz* технологічно вбудованому, оскільки при формуванні зарядного імпульсу понижуючим *ШПП* накопичувальний конденсатор буде заряджатися від мережі живлення *E* із-за наявності вбудованого зворотного діоду у транзистор *VT4*, а при його розряді на *АБ* значна частина накопленої в ньому енергії буде передаватися через вбудований у транзистор *VT1* зворотній діод у мережу живлення. Датчик напруги на акумуляторі реалізований за допомогою опірної ділянки на резисторах *R4* і *R5*, а на накопичувальному конденсаторі на резисторах *R8* і *R9*.

На рис. 5.3 зображена схема електрична принципова системи керування зарядним пристроєм.

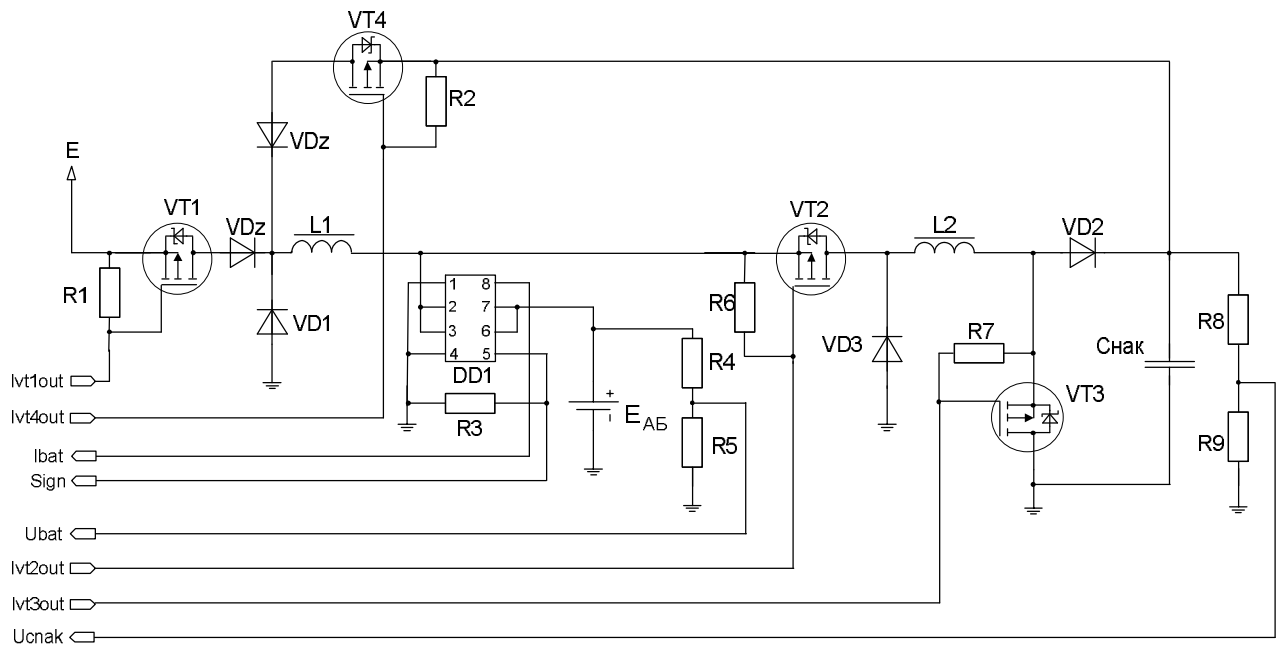


Рис. 5.2. Схема електрична принципова силової частини експериментальної установки

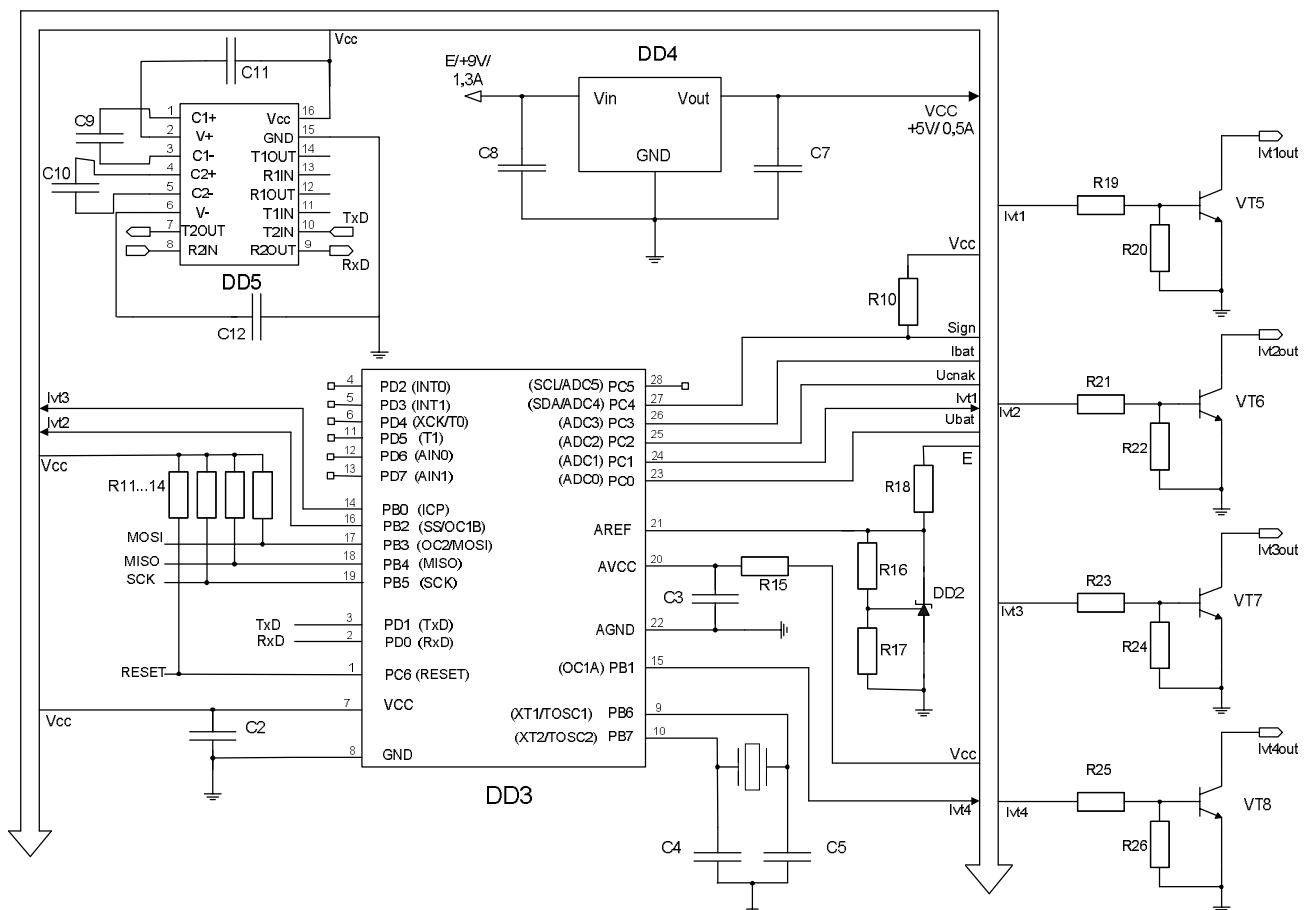


Рис. 5.3. Схема електрична принципова системи керування зарядним пристроєм  
Задачі, які виконує МК:

- керування широтно-імпульсними перетворювачами згідно заданому алгоритму;
- контроль за струмом зарядного і розрядного імпульсів;
- контроль за напругою на *АВ*;
- контроль за напругою на *НК*.

Система керування на мікроконтролері Atmel ATmega8 (*DD3*) підтримує на акумуляторі необхідні параметри заряду, виконує алгоритм заряду імпульсним асиметричним струмом та керує процесом заряду в цілому. Інформація з датчиків струму та напруг надходить до портів вводу *PC0*, *PC2*, *PC3*, *PC4*. Мікроконтролер має внутрішній аналогово-цифровий перетворювач, який перетворює вхідні сигнали в двійкові коди. Для обробки сигналів в мікропроцесорній системі керування використовується зовнішнє джерело опорної напруги *DD2*. Мікроконтролер обробляє отримані дані згідно з занесеної до пам'яті програми і виробляє відповідні керуючі сигнали, які через порти керування силовими ключами *PB0*, *PB1*, *PB2*, *PC1* надходять до драйверів силових ключів *VT1–VT4* (рис. 5.2). Драйвери зібрані на транзисторах *VT5–VT8* і використовуються для підсилення вихідних керуючих сигналів для узгодження вихідної логіки мікропроцесорної системи керування з силовими ключами.

З персональним комп'ютером обмін інформацією відбувається за допомогою інтерфейсу RS-232, який реалізується на мікросхемі узгоджувача рівнів *DD5*. Напруга живлення для мікросхем надходить від основного джерела живлення за допомогою мікросхеми лінійного стабілізатора *DD4*.

Дослідження процесів в зарядному пристрої проводиться за допомогою віртуального осцилографу на персональному комп'ютері [41]. В комп'ютері отримана з датчиків інформація передається в файл результату, який містить масив значень струму в залежності від часу, а програма візуалізації розрахунків зчитує результати та відображає їх на екрані монітору в графічному вигляді або у вигляді числа, що залежить від типу даних. Застосування віртуального лабораторного стенду вимірювальної апаратури дозволяє автоматизувати експериментальне дослідження та значно спрощує експериментальну установку.

Віртуальний осцилограф дозволяє фіксувати швидкоплинні процеси заряду/розряду акумуляторної батареї.

В табл.5.1 приведено режими роботи силових ключів.

Таблиця 5.1

Режими роботи силових ключів

<i>VT1</i>	працює в режимі <i>ШПП</i>	закритий	закритий	закритий
<i>VT2</i>	закритий	відкритий	закритий	відкритий
<i>VT3</i>	закритий	працює в режимі <i>ШПП</i>	закритий	працює в режимі <i>ШПП</i>
<i>VT4</i>	закритий	закритий	працює в режимі <i>ШПП</i>	закритий

Автоматичне перезавантаження мікроконтролера виконується шляхом підключення входу RESET через опір *R11* до напруги живлення. Одразу після скиду завантажується програма роботи мікроконтролера. Після обробки даних з датчиків напруги і струму мікроконтролером виробляються сигнали керування силовими ключами. З виходу керуючих портів *PB0*, *PB1*, *PB2*, *PC1* сигнали керування надходять на зовнішні драйвери, які виконані на підсилюючих транзисторах *VT5–VT8*. Завдяки опорам *R19–R26* задається необхідний струм бази і напруга база-емітер підсилюючих транзисторів *VT5–VT8*.

Мікроконтролер живиться напругою  $+5B$ , яка формується мікросхемою лінійного стабілізатора *DD4* від зовнішнього джерела живлення  $+9B$ .

В початковий момент часу силові ключі *VT2–VT4* закриті, а *VT1* працює в режимі *ШПП*. Стабілізована напруга мережі *E* надходить на вхід понижуючого *ШПП1*, який формує імпульс зарядного струму необхідної амплітуди. Значення амплітуди зарядного струму і напруги з акумуляторної батареї знімаються за допомогою датчика струму, функції якого виконує мікросхема *MAX471 (DD1)*, і напруги, реалізованого за допомогою опірної ділянки *R4*, *R5*. Зняті данні надходять до портів *PC0*, *PC2*, *PC3*, *PC4* які пов'язані з внутрішнім аналого-

цифровим перетворювачем мікроконтролера. Після перетворення отриманих сигналів у двійковий код вони порівнюються з даними, які записані у пам'яті мікроконтролера. Для отримання опорної напруги використовується зовнішнє джерело опорної напруги на мікросхемі TL431 (*DD2*) і опорах *R16*, *R17*.

Після порівняння мікроконтролер, якщо існують розбіжності між отриманими даними і записаними, виробляє керуючі сигнали і підтримує на акумуляторній батареї необхідні значення струму і напруги.

В проміжках між зарядними імпульсами формується розрядний імпульс акумуляторної батареї. В цей момент *VT2* відкривається, *VT3* працює в режимі *ШП*. Силові ключі *VT1*, *VT4* закриті. Через транзистор *VT2*, який використовується для підключення *АВ* до підвищувача *ШП2*, формується імпульс розрядного струму, енергія якого зберігається у накопичувальному конденсаторі *Снак*. Розрядний струм поступово заряджає накопичувальний конденсатор. Для контролю за розрядним струмом і напругою на конденсаторі використовуються датчики струму і напруги. При досягненні необхідної напруги на накопичувальному конденсаторі мікроконтролер виробляє відповідні керуючі імпульси, і силові ключі *VT2*, *VT3* закриваються, а ключ *VT4* працює в режимі *ШП*. В цей момент часу накопичувальний конденсатор використовується як джерело напруги замість основного *E* у *ШП3* понижуючого типу, який формує імпульс зарядного струму. Після розряду накопичувального конденсатора до зазначеної напруги для формування імпульсу зарядного струму знову використовується основне джерело напруги *E*, а накопичувальний конденсатор заряджається до необхідної напруги під час формування розрядних імпульсів.

В роботі розроблено експериментальну установку для дослідження заряду акумуляторної батареї імпульсним асиметричним струмом на основі схеми, в якій енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі. Зовнішній вигляд друкованої плати зарядного пристрою з електронними компонентами зображено на рис. 5.4.



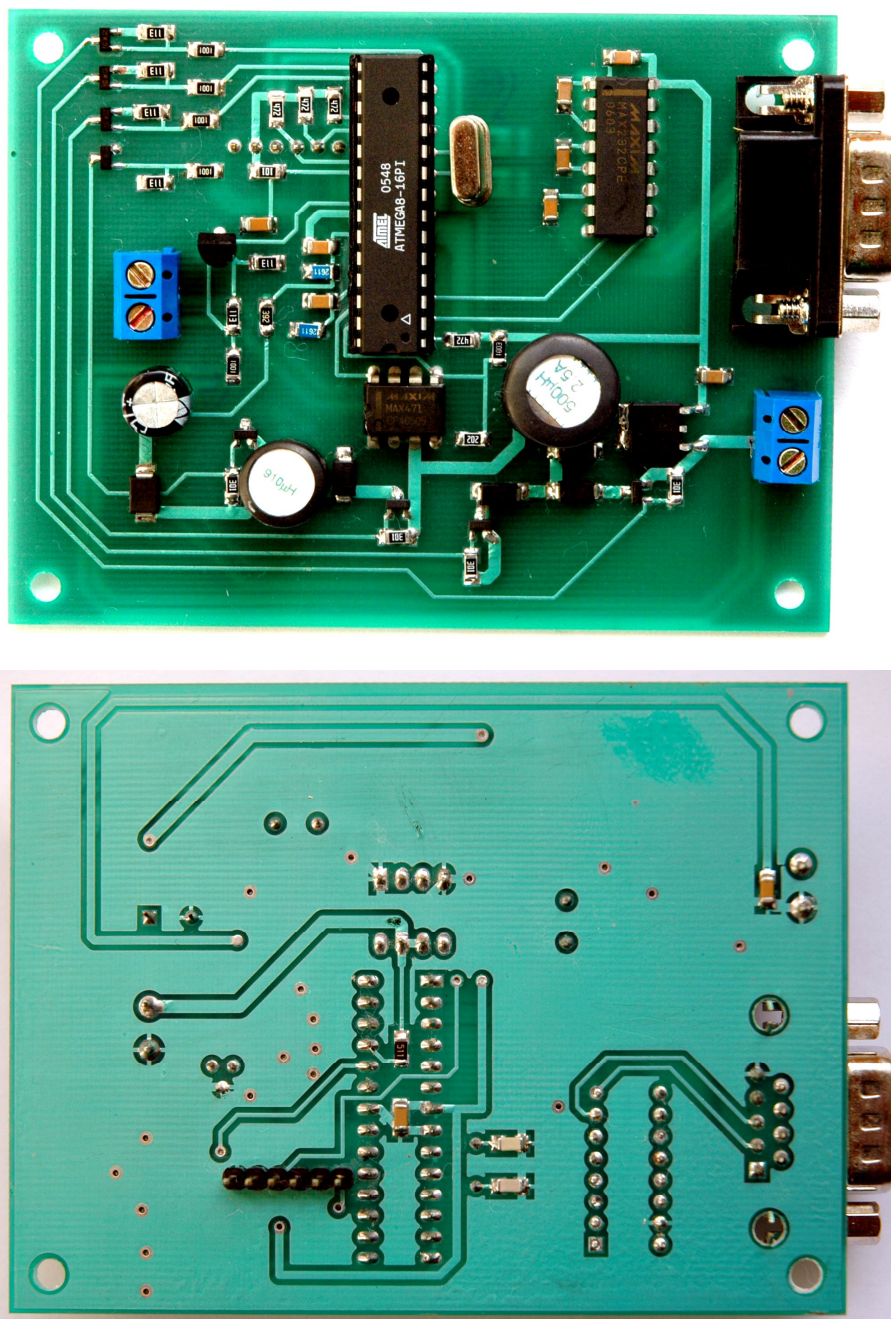


Рис. 5.4. Зовнішній вигляд друкованої плати зарядного пристрою

Запропонований зарядний пристрій було розраховано і підібрано відповідні електронні компоненти для його реалізації. Розведення та підготовку відповідних креслень для виготовлення друкованої плати було реалізовано за допомогою спеціалізованого програмного продукту Protel DXP.

**Алгоритм роботи зарядного пристрою для проведення дослідження заряд-розрядних характеристик.** Згідно з визначеними задачами розроблено алгоритм програмного забезпечення мікропроцесорної системи керування зарядним пристроєм [54]. З вихідних даних та документації на мікроконтролер Atmega8 відомі наступні технічні параметри:

- тактова частота мікроконтролера 7,3728 МГц;
- швидкість одного перетворення АЦП 130 мкс;
- період імпульсного асиметричного струму 10 мс;
- частота широтно-імпульсних перетворювачів 40 кГц.

Алгоритм основної програми зображено на рис. 5.10.

Робота з програмним забезпеченням починається з блоку ініціалізації (блок 1), в якому встановлюється:

- швидкість роботи АЦП на 130 мкс;
- режим одиночних вимірювань АЦП;
- опорна напруга;
- значення констант  $E_{AB}$ ,  $I_3$ ,  $I_p$ ,  $U_{Cnak}$ ,  $\gamma_{SHIP}$ ,  $f_{SHIP}$ ;
- швидкість обміну даними через UART (universal asynchronous receiver/transmitter – універсальний асинхронний прийомопередавач).

В блоці 2 (рис. 5.5) відбувається опитування порта PC2, до якого підключено датчик напруги на акумуляторній батареї. Блок 3 виконує порівняння отриманого значення з порта PC2 з заданою константою. Якщо отриманий з порта PC2 результат менше чи дорівнює константі, то здійснюється перехід до блоку 2. Тобто, до вихідних клем не підключена акумуляторна батарея. Якщо значення, отримане з порта PC2, більше константи, то відбувається перехід до блоку 4, в якому реалізується процедура опрацювання переривань одиночних вимірювань АЦП (рис. 5.6).

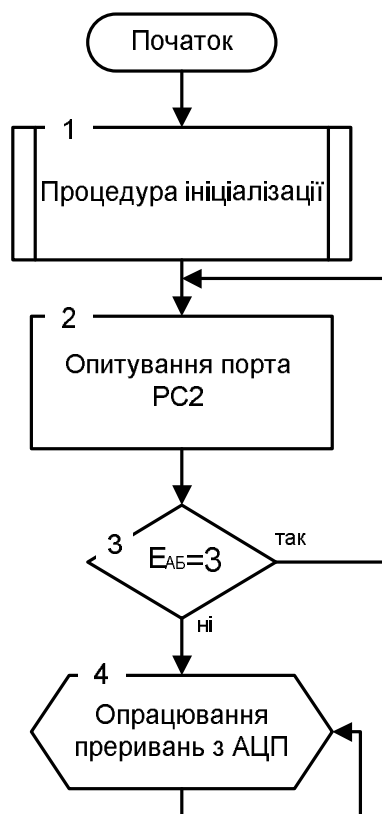


Рис. 5.5. Блок схема алгоритму основної програми

За період  $T = 10 \text{ мс}$  відбувається  $N = 76$  вимірювань АЦП. В процедурі обробки переривань, яка відбувається при кожному вимірюванні, дані з АЦП спочатку записуються в пам'ять мікроконтролера (блок 1), потім порівнюється значення лічильника переривань АЦП з заданими константами. Якщо  $N = 0, 11$  або  $24$  (блок 2), то в блоці 3 порт вимірювання АЦП перемикається на РС2, до якого під'єднано датчик напруги на акумуляторній батареї, і запускається АЦП в блоці 7. В тому випадку, коли має місце інше значення  $N$ , програма переходить до блоку 4. В цьому блоці відбувається порівняння лічильника з іншою константою. Якщо  $N = 76$ , то порт вимірювання перемикається на РС0 (блок 5), до якого під'єднано датчик напруги на накопичувальній ємності, і запускається АЦП. Якщо  $N$  не дорівнює жодній з заданих констант, відбувається перехід до блоку 6, в якому порт вимірювання АЦП перемикається на РС3, до якого під'єднано датчик струму, і відбувається

запуск АЦП. Після запуску АЦП мікроконтролер здійснює перехід до процедури заряду акумуляторної батареї в блок 8.

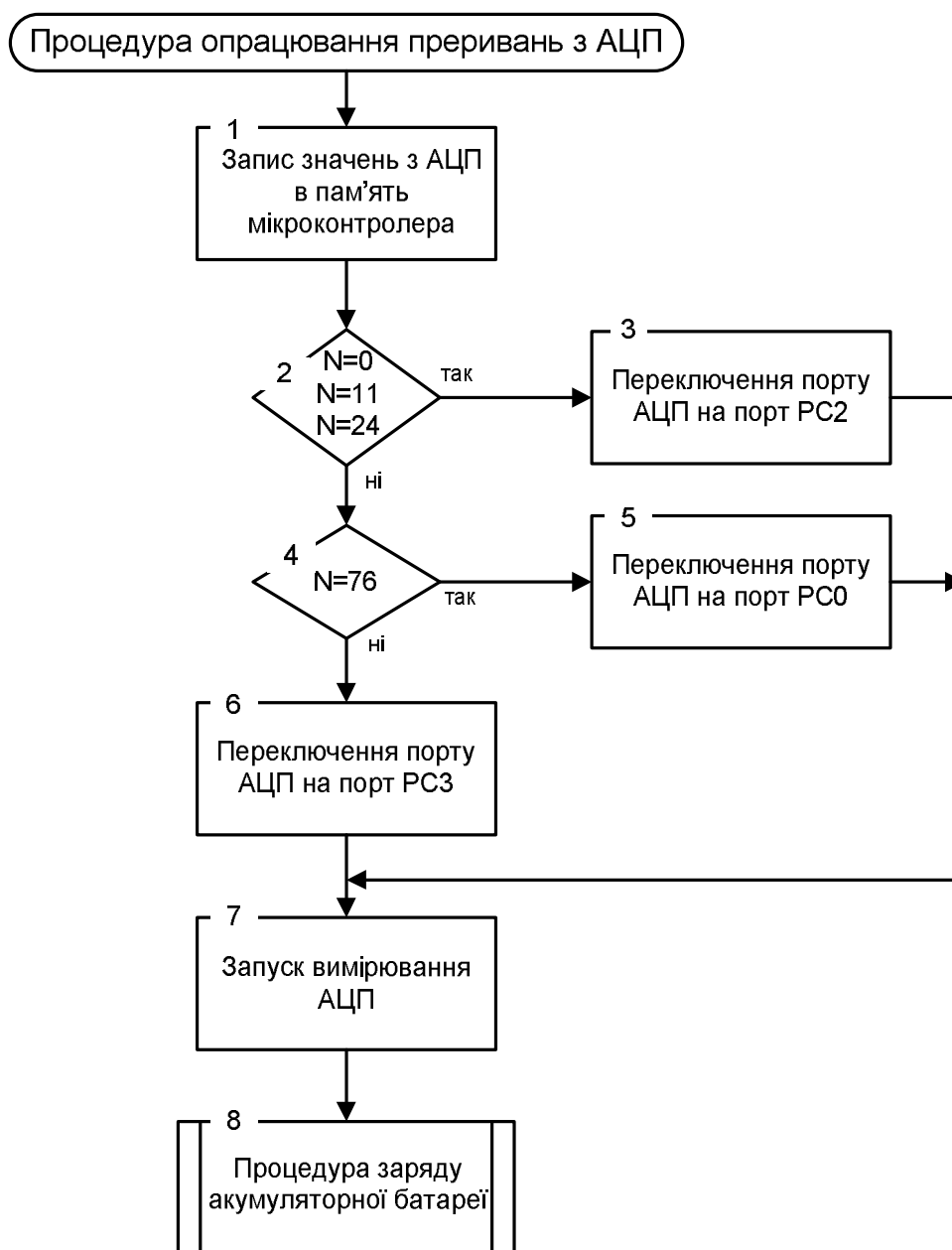


Рис. 5.6. Блок схема процедури обробки преривань АЦП

Детально процедуру заряду акумуляторної батареї зображено на рис.5.7.

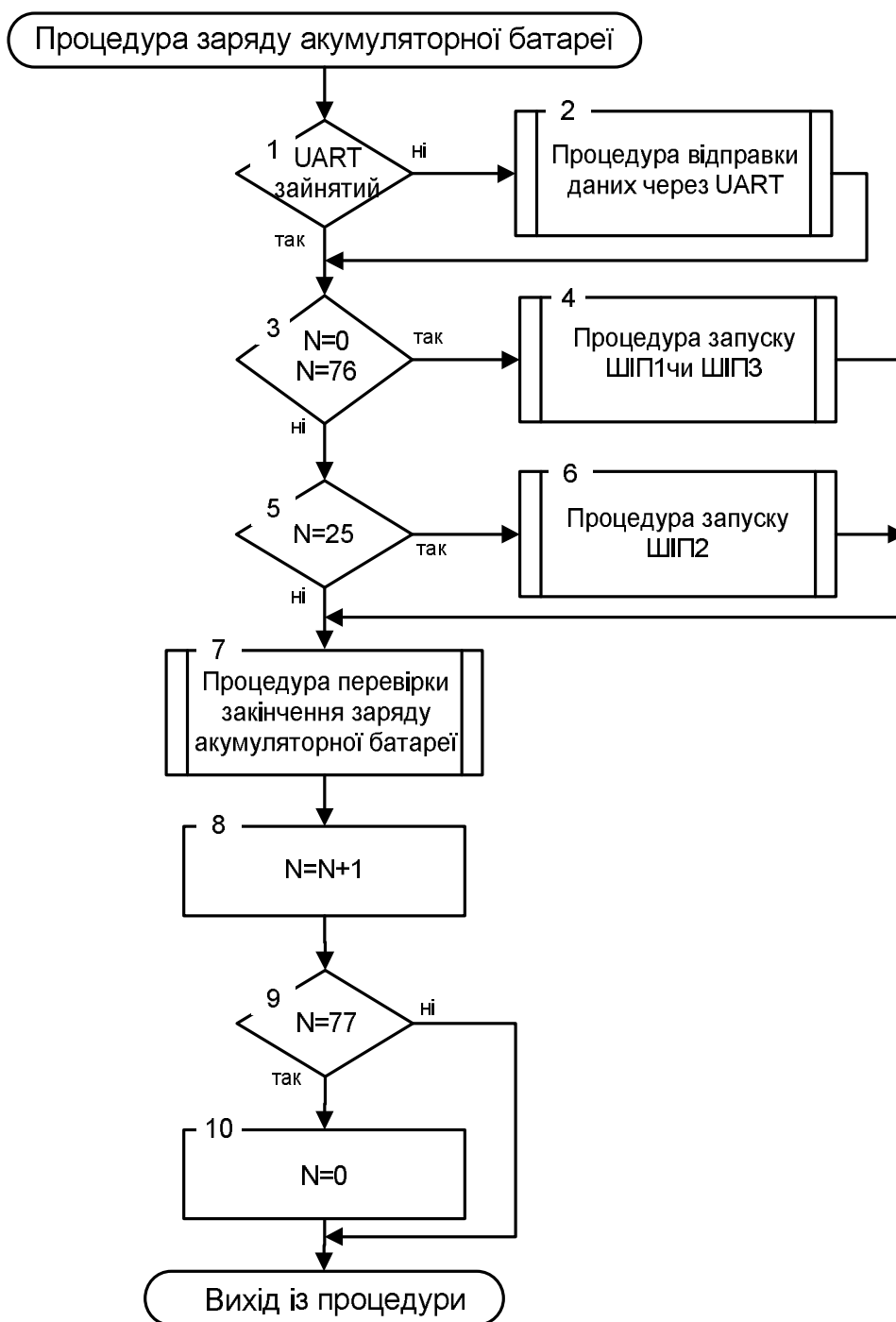


Рис. 5.7. Блок схема процедури заряду акумуляторної батареї

Блок 1 перевіряє, чи зайнятий UART. Якщо ні, то відбувається процедура передачі даних (блок 2). В іншому випадку відбувається перехід до блоку 3. В ньому значення лічильника переривань порівнюється з константами. Якщо  $N = 0$  або  $76$ , то перехід до процедури запуску ШІП1 чи ШІП3 (блок 4). В процедурі запуску ШІП здійснюється занесення значення частоти роботи перетворювача до відповідного таймера, і він запускається. В інший вільний таймер

заноситься значення частоти, з якою необхідно здійснювати процедуру коригування коефіцієнта заповнення імпульсами  $\gamma_{SHIP}$ . В процедуру коригування автоматично заносяться відповідне максимальне і мінімальне значення зарядного струму. З цього моменту, паралельно з основною програмою і роботою ШПП буде здійснюватися коригування з заданою частотою. Для роботи інших ШПП здійснюється аналогічна процедура коригування  $\gamma_{SHIP}$  після їх запуску. Якщо  $N$  не дорівнює 0 або 76, то його значення порівнюється в блоці 5 з константою 25, і в разі рівності виконується перехід до блоку 6, в якому запускається ШПП2. Процедура запуску аналогічна ШПП1 з тією лише різницею, що до процедури коригування заноситься максимальне і мінімальне значення розрядного струму. Після запуску ШПП запускається процедура перевірки закінчення заряду акумуляторної батареї (блок 7). В блоці 8 лічильник переривань АЦП збільшується на одиницю  $N = N + 1$  і здійснюється перехід до блоку 9, в якому значення лічильника  $N$  порівнюється з константою 77. Якщо  $N = 77$ , то лічильник обнуляється, мікроконтролер виконує вихід із процедури заряду і чекає на наступне переривання АЦП.

На рис. 5.8 зображено блок-схему процедури перевірки закінчення заряду акумуляторної батареї.

Блок 1 порівнює значення лічильника переривань АЦП з заданими константами. Якщо рівності немає, то здійснюється вихід з процедури. В іншому разі відбувається перехід до блоку 2, в якому з пам'яті мікроконтролера зчитується виміряне значення напруги на акумуляторній батареї. В блоці 3 це значення порівнюється з заданою величиною напруги і в разі невиконання рівності здійснюється вихід з процедури перевірки. Якщо виміряна напруга менше чи дорівнює заданій, мікроконтролер переходить до блоку 4, в якому вимикається ШПП. Після вимкнення ШПП формується повідомлення для користувача про закінчення заряду акумуляторної батареї і надсилається на персональний комп'ютер за допомогою UART.

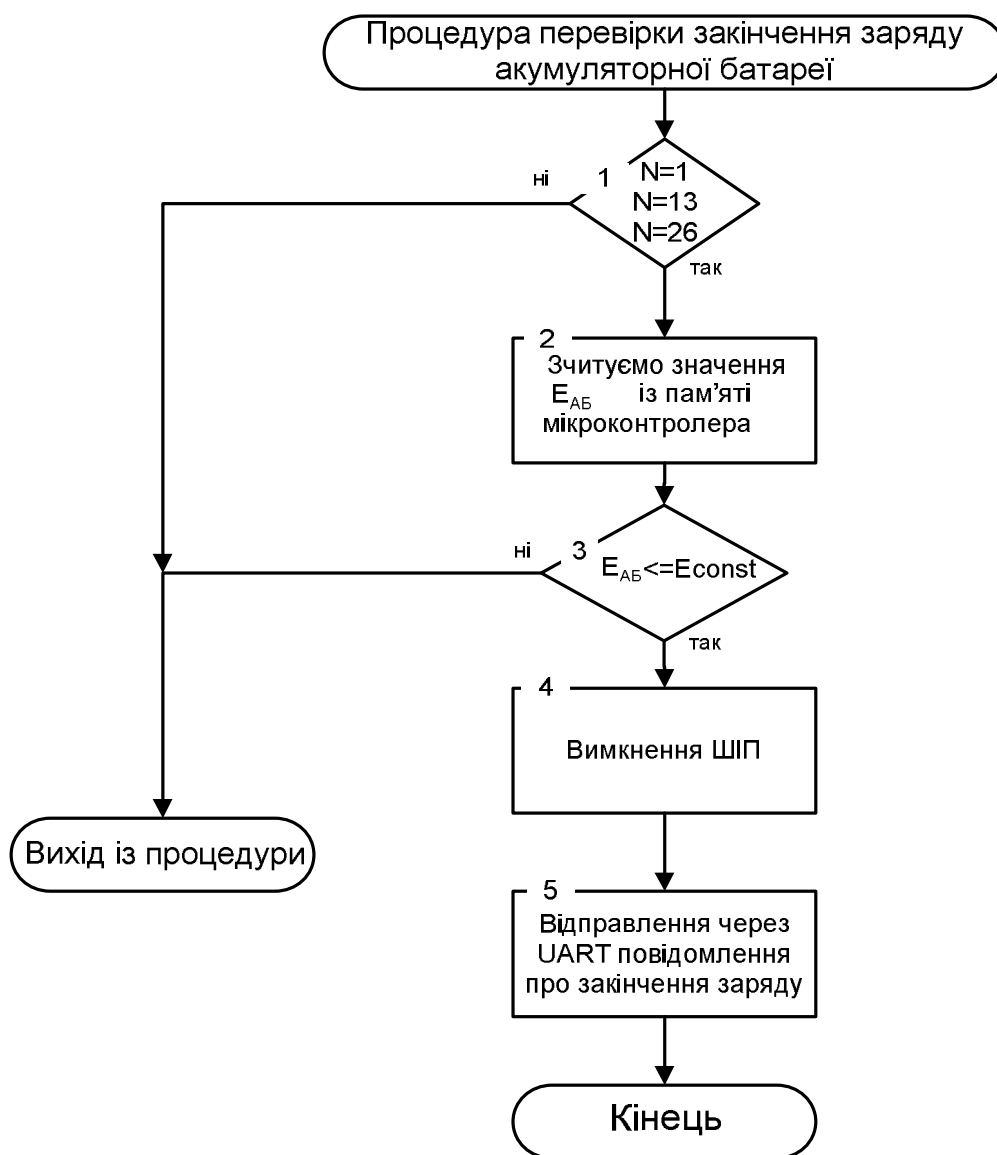


Рис. 5.8. Блок-схема процедури перевірки закінчення заряду акумуляторної батареї

**Обробка експериментальних даних.** В досліджуваному зарядному пристрої [14, 53, 57] тривалість одного періоду імпульсного асиметричного струму складає  $T = 10$  мс. Експериментальна установка розроблена таким чином, що для отримання інформації про значення струму використовується датчик струму, який надає сигнал в аналоговій формі. Для подальшої обробки та використання цей сигнал за допомогою вбудованого в мікроконтролер аналогово-цифрового перетворювача перетворюється в цифрову форму. Для керування експериментальною установкою цифрова форма перетворюється на аналогову.

З датчиків напруги та струму (див. рис. 5.1) з певною частотою знімаються дані і після перетворення в двійковий код записуються в пам'ять мікроконтролера. З пам'яті мікроконтролера зняті дані, за допомогою UART через послідовний інтерфейс RS-232 передаються на персональний комп'ютер.

Для відображення результатів експерименту застосовуємо віртуальний осцилограф (рис. 5.9), розроблений в [40].

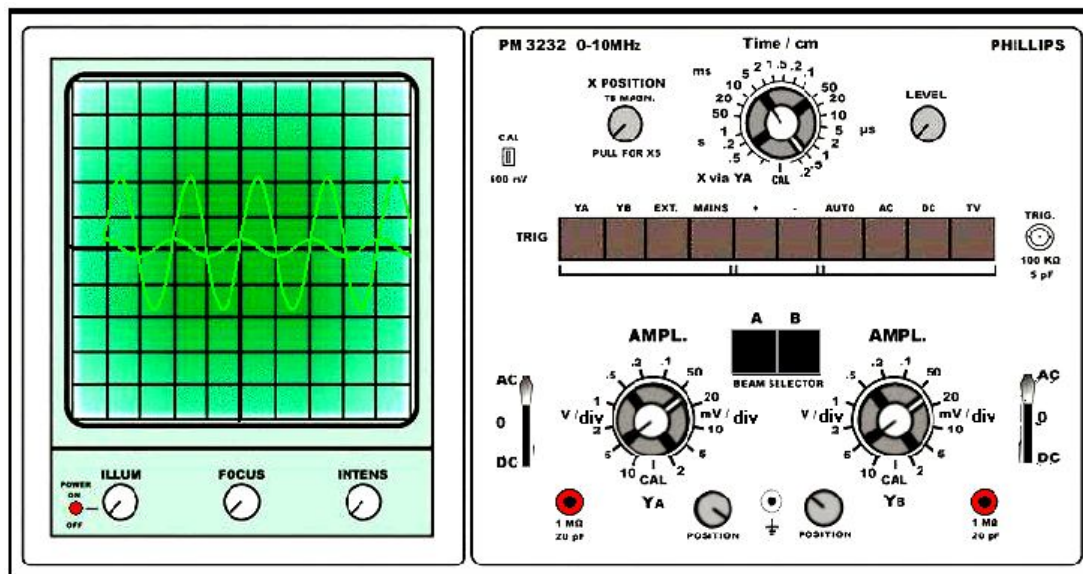


Рис. 5.9. Вікно осцилографа у використаному програмному забезпеченні

Програма розрахунку електричних схем читає файл схеми, проводить розрахунки та створює файл результату, який містить масив значень напруги та струму в залежності від часу. Програми візуалізації розрахунків зчитує результати та відображає їх на екрані монітору в графічному або чисельному вигляді, що залежить від типу даних.

Вимірювальні прилади даного віртуального стенду можна використовувати також для візуалізації зовнішнього сигналу. Для перетворення цього сигналу у форму текстового файлу використовується мікроконтролер ATmega8.

Для досягнення поставленої задачі візуалізації отриманих з датчиків даних необхідно створити додатковий програмний модуль для виведення отриманих результатів на віртуальний осцилограф.



Програма віртуального стенду складається з семи модулів, один з яких – головний модуль програми, другий – модуль завантаження та обробки даних з файлу – результатів досліджень змодельованої електричної схеми, третій – додатковий модуль, на якому відображується екран осцилографа у збільшеному вигляді, інші чотири модулі необхідні для досліджень параметрів схем віртуальні прилади: мультиметр, осцилограф, частотомір, фазометр. Взаємодія всіх модулів схематично зображена на структурній схемі рис. 5.10.

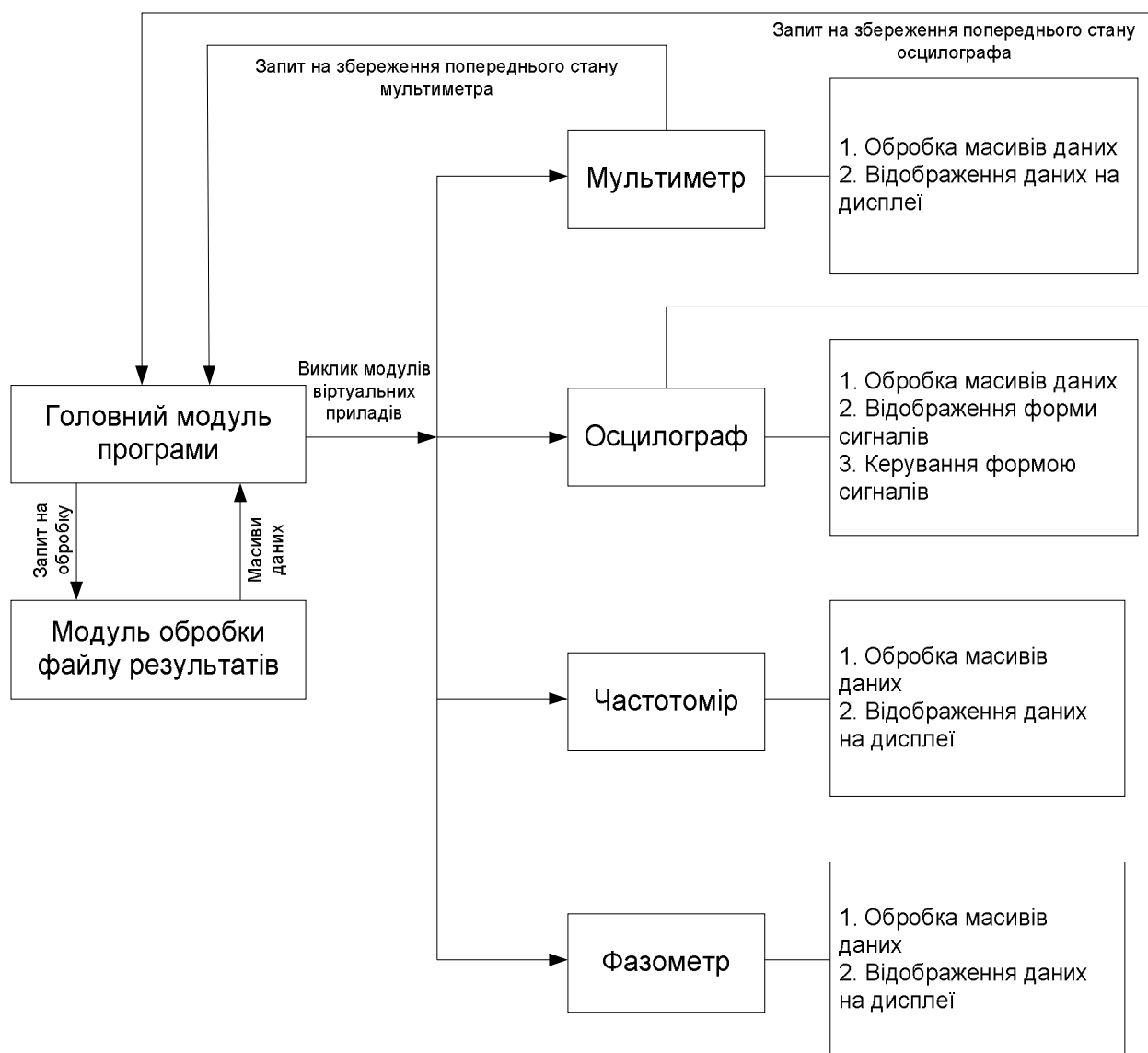


Рис. 5.10. Структурна схема взаємодії програм модулів віртуального лабораторного стенду

Розділення проекту на окремі частини забезпечує можливість модернізації окремих блоків в майбутньому незалежно один від одного, що значно спрощує процес програмування та дає можливість забезпечити візуалізацію отриманих даних із зарядного пристрою під час роботи.

## 5.2. Пристрій заряду акумуляторної батареї в експериментальній системі електроживлення з альтернативними джерелами енергії

У зв'язку з тим, що на протязі світового дня змінюються умови роботи фотобатарей (освітленість, температура та інш.), її електричні параметри також змінюють значення. Енергія, яку віддає фотобатарея у навантаження, при різних умовах буде різною. При відборі максимальної енергії [39] струм заряду акумуляторних батарей змінюється в широких межах, що може істотно скоротити їхній термін служби. Тому використання зарядних пристроїв АБ імпульсним асиметричним струмом в системах електроживлення локальних об'єктів є необхідним.

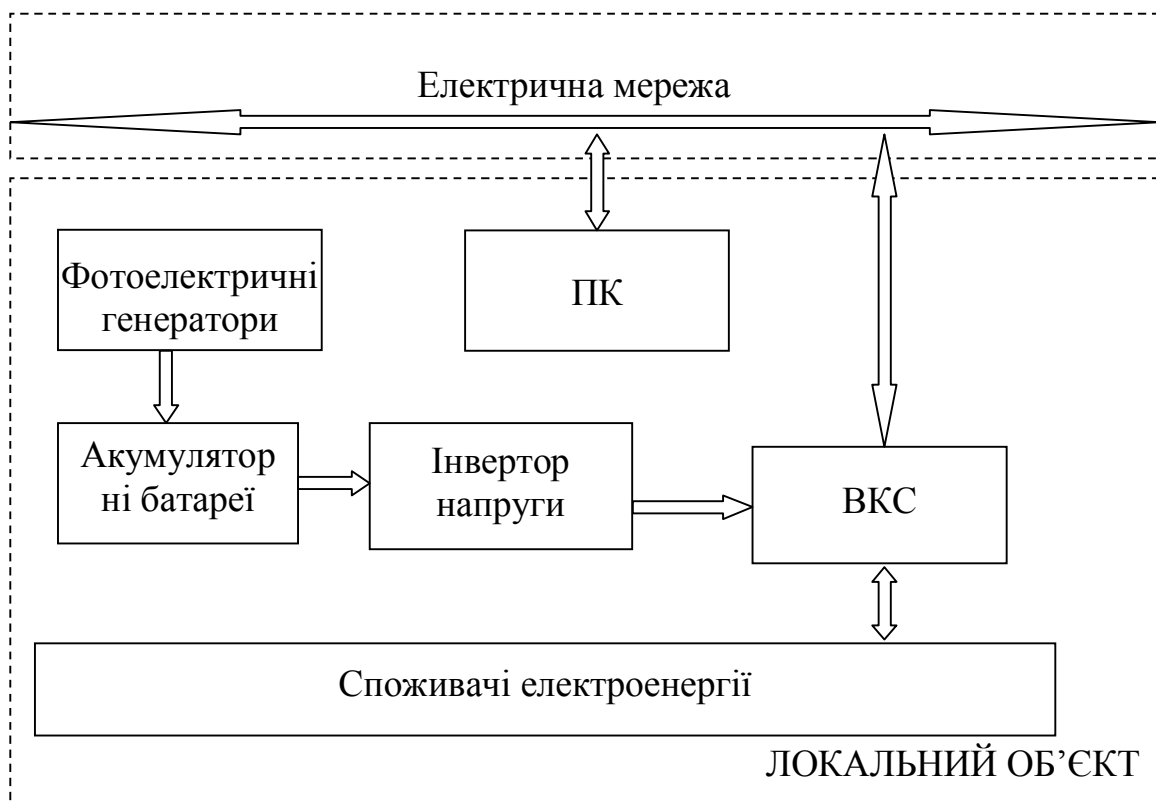


Рис. 5.11. Структурна схема експериментального локального об'єкту

Структурна схема експериментального локального об'єкта, наведена на рис. 5.11, має наступні технічні характеристики:

- потужність фотобатарей – 2,1 кВА;
- номінальна постійна напруга накопичувальних акумуляторних батарей 110 В;
- ємність накопичувачів 100 А·год;
- вихідна напруга інвертора  $220 V_{-15\%}^{+10\%}$ , синусоїдальної форми, частота  $50\text{Гц}\pm 1\%$ ;
- параметри мережі живлення:  $220 V_{-15\%}^{+10\%}$ , синусоїдальної форми, частота  $50\text{Гц}\pm 1\%$ .

Мультимікропроцесорна система на базі процесорів фірми ATMEEL типа AT90S8515 та AT90S8535 для інтелектуального керування споживанням, використанням та накопиченням електроенергії складається з наступних блоків:

- персональний комп'ютер з вбудованим електромодемом для передачі сигналів керування по електромережі, який виконує функції центрального керуючого блоку;
- вимірювально-керуючі системи (ВКС) для кожного споживача, які реалізують функції мікроконтролерів керування підсистемами споживачів та мікроконтролерів керування під'єднанням до мережі.

Система електроживлення локального об'єкту розміщена в учбовій лабораторії НТУУ „КПІ”.

Програмне забезпечення (ПЗ) складається з програми для персонального комп'ютера та для кожної з ВКС керованих об'єктів. Задачами ПЗ є під'єднання/від'єднання навантажень до електромережі, а також відображення інформації про стан навантажень.

Експериментальна установка працює наступним чином: персональний комп'ютер з вбудованим електромодемом для передачі сигналів керування по електромережі циклічно опитує усі ВКС з вбудованими електромодемами навантажень. Якщо з ВКС приходить інформація про те, що натиснута кнопка „вкл.” то ПК відповідає даному ВКС розраховане раніше за допомогою затримуючих  $m$ -фільтрів та з урахуванням рівня пріоритету значення величини затримки ввімкнення  $\tau_i$ . У відповідь на це ВКС відраховує час  $\tau_i$  і під'єднує навантаження до мережі. Оскільки для деяких навантажень є можливість вибору джерела живлення (альтернативне джерело або стаціонарна електромережа) то разом з величиною  $\tau_i$  передається і тип джерела, до якого треба підключити споживача. Також ПК зчитує з датчиків потужності ВКС значення потужності споживання, аналізує їх та заносить ці значення в пристрій прогнозування і виводить характеристики споживання на екран монітора.

### **5.3. Зарядний пристрій акумуляторної батареї в підсистемі електропостачання космічної мікроплатформи МС-Е**

Для більшості сучасних супутників як вторинне джерело використовуються акумуляторні батареї різних електрохімічних систем. Вибір структурної схеми системи електропостачання визначається вимогами до якості електроенергії (із широким допуском на вихідну напругу або зі стабілізованою вихідною напругою), составом споживачів електроенергії і їх характеристиками потужності. При цьому система електропостачання повинна забезпечувати наступні режими роботи:

- робота первинного джерела енергії на навантаження й заряд акумуляторної батареї (характерний для освітлених ділянок орбіти);
- робота акумуляторної батареї на навантаження при непрацюючому первинному джерелі енергії (характерний для тінювих ділянок орбіти);
- спільна робота первинного джерела енергії й акумуляторної батареї на навантаження (характерний для освітлених ділянок орбіти у випадку перевищення споживаної потужності енергії первинного джерела).

При проектуванні систем електропостачання космічних супутників особлива увага приділяється вибору акумуляторних батарей і розробці пристроїв їхнього заряду, тому що акумуляторна батарея повинна забезпечити роботу системи при пікових навантаженнях й у моменти проходження тіньових ділянок орбіти, але в той же час повинна мати мінімальну вагу. Таким чином необхідно вирішити завдання вибору акумуляторної батареї, яка зможе забезпечити роботу системи протягом строку технічної експлуатації супутника, і мати мінімальну вагу, для зменшення витрат на виведення супутника на орбіту.

**Структурно-функціональна схема зарядного пристрою.** Акумуляторна батарея призначена для роботи в буферному режимі із фотобатареями, забезпечуючи живлення підсистем супутника на тіньових ділянках орбіти й у випадках, коли споживана апаратурами потужність перевищує потужність ФБ. АБ складається з 16 послідовно з'єднаних герметичних акумуляторів нікель-кадмієвої електрохімічної системи. Номінальна ємність акумулятора – 5 А·г. Робоча напруга батареї – 17,6 ... 26 В. Питома енергоємність – близько 40 Вт·г/кг. АБ оснащують датчиками (одним або декількома) для контролю її температурного режиму.

Для забезпечення необхідного строку технічної експлуатації космічного апарату (КА) потрібно розробити ЗП, що забезпечить необхідні зарядні характеристики з найбільшим ККД і при цьому збереже максимально можливу функціональну простоту пристрою.

Структурно-функціональна схема ЗП зображена на рис. 5.12. ЗП акумуляторної батареї, що працює в буферному режимі, складається з наступних функціональних елементів:

ДС<sub>ФБ</sub> – датчик струму ФБ;

ДН<sub>ФБ</sub> – датчик напруги ФБ;

ШП – широтно-імпульсний перетворювач;

АБ – акумуляторна батарея;

ДС – датчик струму;

ДН – датчик напруги;

Т<sub>АБ</sub> – датчик температури АБ;

МСК – мікропроцесорна система керування;

ЗП – зарядний пристрій;

RS-485 – стандартний інтерфейс передачі даних.

Електроенергія, що виробляється ФБ на світловій частині орбіти, надходить на вхід ЗП, де надходить через ДС<sub>ФБ</sub> на вхід ШП, що неї перетворює в електроенергію із заданими параметрами, необхідними для заряду АБ. Із ШП енергія надходить в АБ через ДС. ДС необхідний для підрахунку  $A \cdot год$ , переданих АБ або отриманих від неї. ДН призначений для контролю напруги на акумуляторі. ДС<sub>ФБ</sub> і ДН<sub>ФБ</sub> необхідні для забезпечення умов відбору максимальної енергії від ФБ. Датчик температури Т<sub>АБ</sub> призначений для контролю температури АБ і своєчасного припинення заряду. Збір інформації з датчиків і керування зарядом здійснює МСК.

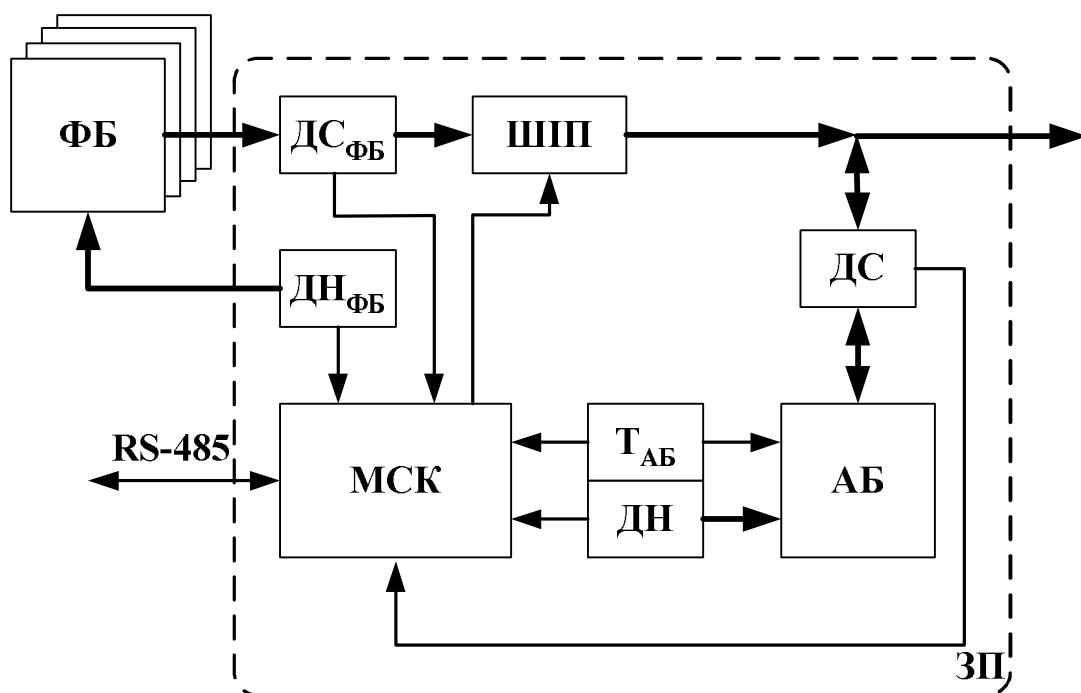


Рис. 5.12. Функціональна схема зарядного пристрою

Задачі, які виконує МСК:

- підрахунок зарядних і розрядних ампер-годин (лічильник ампер-годин);
- спостереження за струмом, що проходить через АБ;

- спостереження за напругою на АБ;
- спостереження за струмом, що надходить у ЗП від ФБ;
- спостереження за напругою на ФБ;
- спостереження за температурою на АБ;
- керування ШП;
- відбір максимальної потужності від ФБ;
- керування процесами заряду відповідно до заданого алгоритму;
- формування керуючого сигналу на відключення всієї можливої або частини навантаження з метою зниження енергоспоживання при можливих позаштатних ситуаціях.

**Вибір типу АБ та методика розрахунку її параметрів.** Для визначення типу АБ необхідна інформація про:

- температуру при експлуатації;
- пікові й оптимальні струми навантаження.

Для визначення мінімальної кількості елементів, що входять до складу АБ, необхідно мати інформацію про:

- максимальне значення стабілізованої напруги ПЕП, надаваного для живлення підсистем (напруга на АБ повинне бути більше або дорівнює цьому значенню при мінімальній нарузі на елементі АБ).

Для визначення ємності АБ необхідно:

- сумістити найбільш енергоспоживчий з можливих режимів з тіньовою ділянкою, тобто визначити максимально можливе енергоспоживання, при проходженні КА максимальної за часом тіньової ділянки;
- знати строк технічної експлуатації, що повинен проробити КА, і залежно від нього вибрати глибину розряду (ГР) АБ за графіком залежності кількості циклів заряду/розряду АБ від глибини розряду АБ;
- знати ККД АБ по ємності;
- знати мінімальну напругу на елементі АБ;
- знати кількість елементів, що входять до складу АБ.

При виборі елементів АБ виходячи з розраховані ємності й кількості елементів, що входять до складу АБ, для забезпечення оптимального співвідношення габарити-ємність можна збільшити кількість елементів, що входять до складу АБ, з метою зменшення необхідної ємності АБ до наявної у фірми-виготовлювача. Після чого необхідно провести контрольні розрахунки ємності АБ, до складу якої вже буде входити більша кількість елементів.

Вибираємо тип АБ з урахуванням вихідних даних по підсистемі електропостачання (ПЕП):

- температура при експлуатації в діапазоні орбіт 500-800 км коливається від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $40^{\circ}\text{C}$ ;
- піковий струм навантаження для спрацьовування в колі піроелемента в діапазоні значень від 1,5 до 8А.

Виходячи з порівняльних характеристик різних типів акумуляторів, попередній вибір зупиняється на акумуляторах NiCd типу, тому що температура при експлуатації відповідає необхідній.

Нижче приведена методика розрахунку параметрів АБ, яка дозволяє вибрати для космічної мікроплатформи батарею з мінімальною вагою та необхідними параметрами.

Визначаємо мінімальну кількість елементів, що входять до складу АБ, з урахуванням вихідних даних з ПЕП і мінімальної напруги на елементі попередньо обраного типу акумулятора:

- максимальне значення стабілізованої напруги ПЕП, надаваного для живлення підсистем:

$$U_{\text{ПЕП max}} = 12 \text{ В};$$

- мінімальна напруга на елементі NiCd типу акумулятора:

$$U_{\text{ел. min}} = 1,05 \text{ В}.$$

Звідси мінімальна кількість елементів буде:

$$n = \frac{U_{\text{ПЕП max}}}{U_{\text{ел. min}}} = \frac{12 \text{ В}}{1,05 \text{ В}} \approx 12 \text{ эл.}$$

Нижче наведені дані, необхідні для розрахунку ємності АБ:



- при проходженні КА в тіньовій ділянці тривалістю  $T_{min.}=55$  хв, максимальна потужність споживання  $P_{min.}=19$  Вт;
- строк технічної експлуатації КА 1 рік із проробкою до 3 років. Виходячи із цього, розраховуємо кількість циклів, які повинна відпрацювати АБ (*кількість циклів = 3 роки · 365 днів у році · 18 оборотів на день  $\approx 20$  тис.*), і за графіком залежності кількості циклів заряду/розряду АБ від глибини розряду АБ NiCd типу (рис. 5.13) визначаємо глибину розряду (ГР), при якій АБ відробить необхідну кількість циклів заряду/розряду:  $ГР \leq 23$  %;

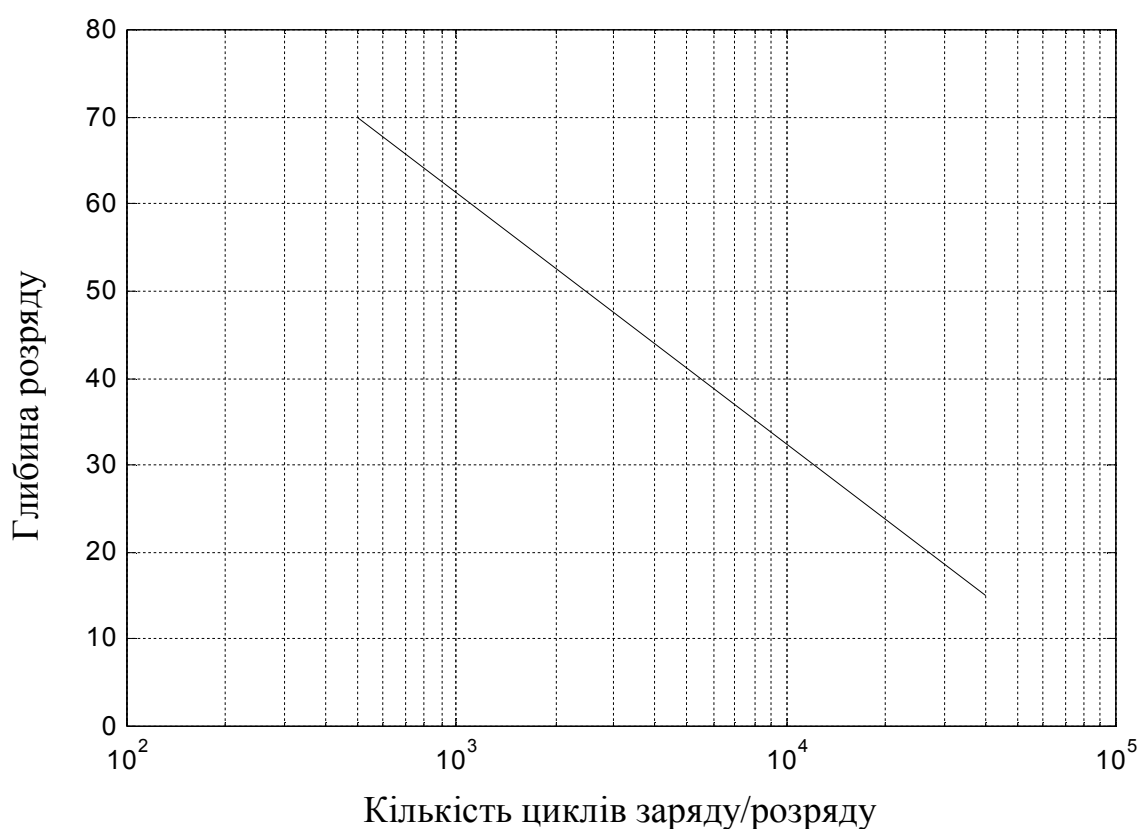


Рис. 5.13. Графік залежність кількості циклів заряду/розряду АБ від глибини розряду АБ NiCd типу

- ККД АБ по ємності для NiCd:

$$\eta=0,85-0,95;$$

- мінімальна напруга на елементі NiCd акумулятора:

$$U_{el.min}=1,05$$
 В;

- мінімальна кількість елементів, що входять до складу АБ:

$$n = 12.$$

Розраховуємо ємність АБ по формулі:

$$C_{AB} = \frac{P_{min.} \cdot T_{min.}}{GP \cdot U_{el.min} \cdot n \cdot \eta} = \frac{19 \cdot \frac{55}{60}}{0,23 \cdot 1,05 \cdot 12 \cdot 0,9} = 6,68 \text{ A} \cdot \text{год}.$$

Обираємо як елементи АБ NiCd батареї фірми SANYO - Cadnica KR-7000F з номінальною ємністю 7 A·год. Розраховуємо вагу 12 елементів, що входять до складу АБ, без конструкційних елементів:

$$W = 12 \cdot 0,224 = 2,688 \text{ кг}.$$

Для АБ за технічним завданням виділено 2,5 кг. Отже буде доцільніше обрати інші елементи для АБ з підвищеною питомою ємністю. Вибираємо як елементи АБ NiCd батареї фірми SANYO – Cadnica KR-5000DEL з номінальною ємністю 5 A·год. Розраховуємо кількість елементів, що входять до складу АБ виходячи з номінальної ємності обраних елементів АБ:

$$n = \frac{P_{min.} \cdot T_{min.}}{GP \cdot U_{el.min} \cdot C_{AB} \cdot \eta} = \frac{19 \cdot \frac{55}{60}}{0,23 \cdot 1,05 \cdot 5 \cdot 0,9} = 16.$$

Розраховуємо вагу 16 елементів, що входять до складу АБ, без конструкційних елементів:

$$W = 16 \cdot 0,152 = 2,432 \text{ кг}.$$

Отже, даний тип акумуляторів задовольняє технічним умовам і може бути застосований у КА.

**Схема електрична принципова зарядного пристрою.** Схема електрична принципова ЗП, розробленого для космічної мікроплатформи МС-Е, зображена на рис. 5.14 і до її складу входять наступні елементи:

- ДС<sub>ФБ</sub> (U2) – датчик струму, якій надходить з фотобатареї;
- ДН<sub>ФБ</sub> (R3, R6) – датчик напруги фотобатареї;
- ШП (Q1, Q2, D2, L1, C1, C4, D1, R1, R8, R9) – широтно-імпульсний перетворювач;
- АБ (B1) – акумуляторна батарея;

- ДС ( $U3$ ) – датчик струму акумуляторної батареї;
- ДН ( $R2, R5$ ) – датчик напруги акумуляторної батареї;
- $T_{AB}$  ( $U3$ ) – датчик температури акумуляторної батареї;
- МСК ( $U1$ ) – мікропроцесорна система керування ЗП на базі мікроконтролера Atmel ATmega8.

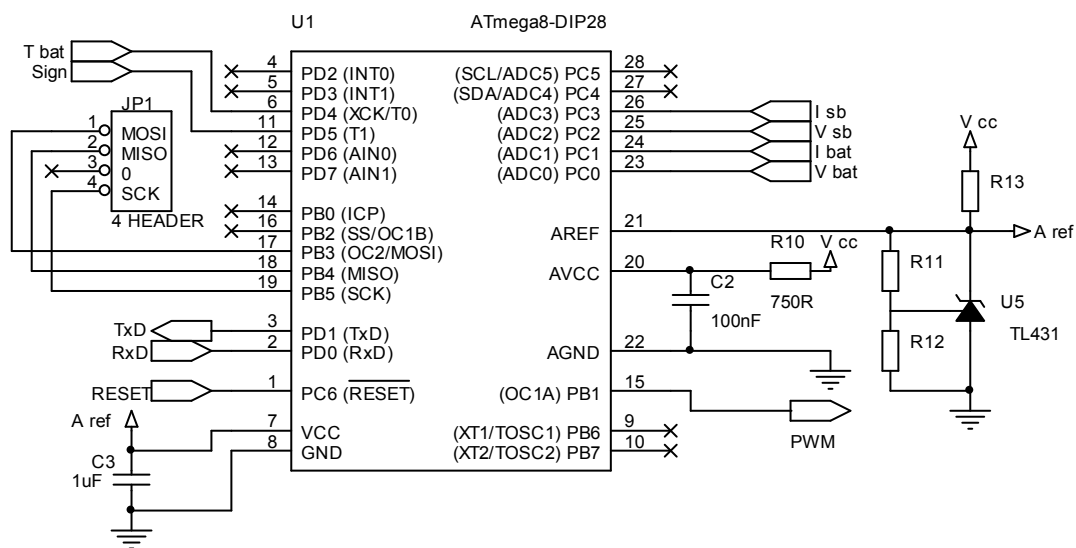
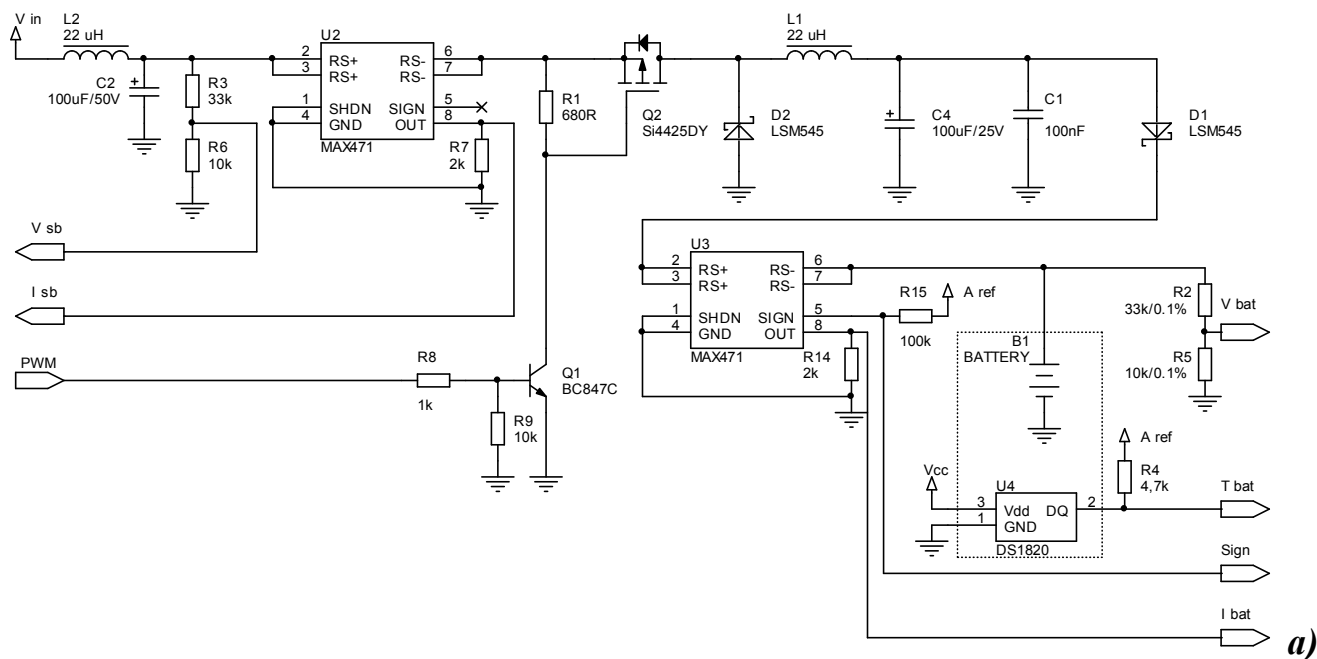


Рис. 5.14. Схема електрична принципова зарядного пристрою:

а) силова частина

б) мікропроцесорна система керування

ЗП працює наступним чином. Електроенергія від *ФБ* надходить на вхід зарядного пристрою. На вході пристрою знаходиться широтно-імпульсний перетворювач *ШІП* понижуючого типу, який забезпечує задані параметри електроенергії, необхідні для заряду акумуляторної батареї (*АБ*). З *ШІП* енергія поступає в *АБ* через датчик струму *ДС*, який необхідний для підрахунку ємності акумулятора у Ампер-годинах, відданих *АБ*, та контролю струму заряду. Датчик напруги *ДН* призначений для контролю напруги на *АБ*. Система керування *МСК* на мікроконтролері Atmel ATmega8 підтримує на акумуляторі необхідні параметри заряду, виконує алгоритм заряду та керує процесом заряду в цілому.

Запропонована методика розрахунку параметрів *АБ* дозволяє вибрати для космічної мікроплатформи батарею з мінімальною вагою та необхідними параметрами, що зменшує витрати на виведення супутника на орбіту. Розроблена методика вибору та розрахунку акумуляторних батарей, а також схема електрична принципова передані для використання при конструюванні космічної мікроплатформи *МС-Е* у ДКБ „Південне”, м. Дніпропетровськ.

## Висновки до п'ятого розділу

1. Розроблена експериментальна установка дозволяє дослідити процеси у зарядному пристрої, які відбуваються під час заряду акумуляторної батареї імпульсним асиметричним струмом.
2. Розроблено алгоритми роботи експериментальної установки для дослідження впливу заряду імпульсним асиметричним струмом на характеристики акумуляторів, завдяки чому досягається ефективне управління зарядним пристроєм і здійснюється автоматизоване проведення експериментального дослідження.
3. Використання віртуального осцилографу, що входить до складу лабораторного стенду виміральної апаратури і дозволяє фіксувати швидкоплинні процеси заряду/розряду акумуляторної батареї, дало змогу автоматизувати експериментальне дослідження і значно спростило експериментальну установку.
4. Розроблений пристрій заряду акумуляторної батареї в експериментальній системі електроживлення з альтернативними джерелами дозволяє забезпечити заряд акумуляторів з необхідними параметрами і використовується в учбовій лабораторії НТУУ „КПІ”.
5. Запропонований пристрій заряду акумуляторної батареї в підсистемі електропостачання космічної мікроплатформи МС-Е забезпечує роботу системи при пікових навантаженнях й у моменти проходження тіньових ділянок орбіти.
6. Запропонована методика розрахунку параметрів АБ, яка дозволяє вибрати для космічної мікроплатформи батарею з мінімальною вагою та необхідними параметрами, що зменшує витрати на виведення супутника на орбіту. Розроблена методика і схема електрична принципова передані для використання при конструюванні космічної мікроплатформи МС-Е у ДКБ „Південне”, м. Дніпропетровськ.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено енергозберігаючі способи та схеми напівпровідникових перетворювачів для заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами з підвищеною ефективністю в яких раціонально використовується енергія розрядного імпульсу струму. Розроблено адаптивний спосіб заряду, який шляхом зміни тривалості зарядних і розрядних імпульсів в залежності від стану акумулятора дозволяє істотно скоротити час заряду. Розроблена схемна модель акумулятора, яка враховує поляризаційну складову повного внутрішнього опору та дозволяє розрахувати перехідні процеси при подачі зарядних і розрядних імпульсів струму. Отримані нові науково обґрунтовані результати в сукупності є суттєвими для розвитку пристроїв електроживлення, в яких використовуються акумулятори.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. Проведено аналіз характеристик акумуляторів та методів їх заряду і обґрунтовано необхідність використання заряду імпульсними асиметричними струмами, оскільки він перевищує за якісними показниками інші і дозволяє збільшити термін служби батареї в 1,5–3 рази, що дозволить суттєво зменшити забруднення навколишнього середовища та зменшити фінансові витрати на оновлення парку батарей.
2. Розроблена схемна модель акумулятора, створена на основі проведеного аналізу перехідних процесів, що виникають при подачі імпульсу струму на акумулятор, враховує поляризаційну складову повного внутрішнього опору і необхідна для організації зворотного зв'язку акумулятора із зарядною системою, дозволяє керувати процесом заряду – змінювати довжини імпульсів в залежності від стану акумулятора.
3. Розроблено алгоритм розрахунку параметрів схемної моделі акумулятора. Порівняння розрахункових кривих перехідних напруг з експериментальними довело, що запропонована модель акумулятора дозволяє отримати розрахункові криві перехідних напруг, значення яких відрізняються не більше ніж на 2% і коефіцієнт варіації знаходиться у межах 2-6%, у порівнянні з експериментальними.

4. Запропонований адаптивний спосіб заряду, створений алгоритм керування ним та обґрунтований підбір тривалості зарядних і розрядних імпульсів струму дозволяють підвищити ефективність заряду акумуляторних батарей імпульсним та імпульсним асиметричним струмом.
5. Розроблений новий спосіб використання енергії розрядного імпульсу струму при заряді акумуляторів імпульсним асиметричним струмом дозволяє підвищити ККД зарядних пристроїв акумуляторних батарей.
6. Зменшено енергоспоживання в запропонованих схемах пристроїв для заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом за рахунок використання енергії розрядного імпульсу: шляхом збереження її в накопичувальному елементі для подальшого заряду акумулятора; для заряду іншого акумулятора при заряді групи акумуляторів; для живлення корисного навантаження.
7. Проведене порівняння ККД пристроїв заряду акумуляторів імпульсним асиметричним струмом показало, що пристрої, в яких використовуються запропоновані енергозберігаючі способи заряду імпульсним асиметричним струмом і імпульсні методи регулювання, на даному етапі розвитку сучасних систем заряду імпульсним асиметричним струмом мають високий ККД, який складає 82–94%, а загальне збільшення ККД у порівнянні з існуючими пристроями, сягає 12–34%.
8. Проведене моделювання схем пристроїв, створених на основі енергозберігаючих способів заряду з використанням створеної схемної моделі акумулятора, довело, що дані схеми забезпечують заряд акумуляторних батарей струмом необхідної форми, причому енергія імпульсу розрядного струму не втрачається, а використовується, або повторно, або для заряду іншої батареї, чи для живлення корисного навантаження.
9. Використання адаптивного способу заряду, який змодельовано з використанням створеної схемної моделі акумулятора, дозволяє скоротити час заряду до 2,7 разу і ефективно використовувати електроенергію для заряду та ресурси акумулятора.

10. Розроблена експериментальна установка дозволяє дослідити процеси у зарядному пристрої, які відбуваються під час заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом, і розроблено алгоритми роботи експериментальної установки, завдяки чому досягається ефективне управління зарядним пристроєм і здійснюється автоматизоване проведення експериментального дослідження.
11. Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується використанням коректних методів досліджень, узгодженням розрахунків з експериментальними даними і раніш відомими результатами за літературними джерелами.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. Учеб. М.: Высш. шк., 1969. 512 с.
2. Багоцкий В.С. Основы электрохимии. – М.: Химия, 1988. – 400 с.: ил.
3. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с., ил.
4. Батарейки и аккумуляторы: Для широкого круга читателей / В. С. Лаврус (ред.). — К.: Наука и техника, 1995. — 47с.: ил. — (Информационное издание; Вып.1).
5. Введение в молекулярную электронику / Н.С. Лидоренко, Б.И. Ильин, И.А. Зайденман и др.; Под ред. Н.С. Лидоренко. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.
6. Вентильные преобразователи переменной структуры / Тонкаль В.Е., Руденко В.С., Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Денисюк С.П., Новосельцев А.В.; Отв. ред. Шидловский А.К.; АН УССР. Ин-т электродинамики.– Киев : Наук. думка, 1989.– 336 с.
7. Волкивский В.Б., Камаев В.С., Колодяжный А.В. Методы заряда никель-кадмиевых аккумуляторных батарей // Електроніка і зв'язок. – 2005. – № 27. – С. 18-25.
8. Волківський В.Б. Адаптивний метод заряду акумуляторних батарей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2005. – Ч. 2.– С. 40-43.
9. Волківський В.Б. Пристрій для заряду асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2004. – Ч. 3. – С. 21-24.
10. Волківський В.Б. Триланковий пристрій для заряду енергоємних акумуляторних батарей асиметричним струмом // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2004. – Ч. 6. – С. 89-94.
11. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА принт, 2002. – 304 с., ил.

12. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику, Издательство «Высшая школа», М., 1983, 400 с.
13. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Электрохимия, Издательство «Высшая школа», М., 1987.
14. Деклараційний патент України на винахід № 57499 А, H02J7/00. Пристрій для зарядки акумуляторної батареї. / В.Я. Жуйков, Т.О. Терещенко, Ю.С. Петергеря, В.Б. Волківський (Україна). – № 2002108677; Заявлено 31.10.2002; Опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6.
15. Деклараційний патент України на винахід № 58230 А, H02J7/00. Пристрій для зарядки акумуляторних батарей. / В.Я. Жуйков, Т.О. Терещенко, Ю.С. Петергеря, В.Б. Волківський (Україна). – № 2002108680; Заявлено 31.10.2002; Опубл. 15.07.2003, Бюл. № 7.
16. Деклараційний патент України на корисну модель № 10667 U, H02J7/00. Пристрій для зарядження акумуляторної батареї асиметричним струмом. / В.Я. Жуйков, Т.О. Терещенко, В.Б. Волківський (Україна). – № u200505266; Заявлено 02.06.2005; Опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11.
17. Делахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов, издательство «Мир», М., 1967 г.
18. Деордиев С. С. Аккумуляторы и уход за ними. – К.: Техніка, 1985. – 136 с.
19. Дикий М. О., Поновлювані джерела енергії, К., Вища школа, 1993, 351стр.
20. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования, Физматгиз, М., 1961.
21. Дитрих Берндт, Электрохимические накопители электроэнергии. – К.: Наука и Техника, 1998. – 34 с., ил.
22. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя – М.: СОЛОН-Пресс. – 2002.– 768 с.
23. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб.: ПИТЕР, 2002. – 528с.: ил.

24. Заблудовский В.А., Костин Н.А. Перенапряжение кристаллизации при электролизе импульсным током сверхвысоких амплитуд // Докл. АН УССР. Сер. Б. - 1985. - № 2. - С. 42-45.
25. Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. – М. ДОДЭКА, 1997 г., 224 с. – ISBN-5-87835-0010-6.
26. Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом для электронной аппаратуры. Учеб. пособие / В.В. Пилинский. – Киев: КПИ, 1985. – 104 с.
27. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч.И. Хусаинов и др.; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1985. – 576 с., ил.
28. Источники энергии: Для широкого круга читателей / В. С. Лаврус (ред.). — К.: Наука и техника, 1997. — 106с.: ил. — (Информационное издание).
29. Корыта И., Дворжак И., Богачкова В. Электрохимия. М.: Мир, 1977. 472 с.
30. Костин Н.А. Влияние частоты импульсного тока на скорость осаждения и некоторые свойства осадков // Электрохимия.- 1985. - Том 21.-№4.-С.444-449.
31. Костин Н.А., Кублановский В.С., Заблудовский В.А. Импульсный электролиз. - Киев: Наукова Думка, 1989. - 169С.
32. Костин Н.А., Кублановский В.С. Импульсный электролиз сплавов. -Киев: Наукова Думка, 1995. - 206С.
33. Костин Н.А., Черненко В.И. Концентрационные изменения в приэлектродном слое и составляющие поляризации при импульсном электролизе // Докл. АН УССР. Сер. Б. - 1982. - № 5. - С.53-57.
34. Ксенжек О.С. Переходные процессы при заряджении пористых электродов // Журнал Физической Химии. - 1963. - Vol.37. - № 9. -Р.2007.
35. Кублановский В.С., Городыский А.В.,Белинский В.Н., Глушак Т.С. Концентрационные изменения в приэлектродных слоях в процессе электролиза. - Киев: Наук. Думка, 1978. - 120С.
36. Кулбановский Я.С. Переходные процессы. М., «Энергия», 1974.

37. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии / Пентегов И. В. – Киев : Наук. Думка, 1982.–424с.
38. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч. 2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будионний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко. За ред. В. С. Руденка. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
39. Петергеря Юлія Сергіївна. Керування вентильними перетворювачами з ідентифікацією параметрів: Дис. канд. техн. наук: 05.09.12 / Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". – К., 1999. – 160 л. – л. 130-138.
40. Підпригора Юрій Вікторович. Розробка віртуального циклу лабораторних робіт по курсу теорія електричних кіл: дип. проект Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". – К., 2005. – 99л.
41. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз – К.: Вища шк.. 1987. – 280с.
42. Подражанский Юрий Маркович. Использование импульсных режимов заряда для повышения эксплуатационных параметров аккумуляторов: Дис... канд. техн. наук: 05.17.03 / Украинский гос. химико-технологический ун-т. – Д., 2000. – 133 л. + прил.(24л.) – Две кн. единицы. – Библиогр.: л. 127-133.
43. Полукаров Ю.М., Попков Ю.А., Гринина В.В., Шешенина З.Е. Влияние пульсирующего тока на морфологию роста кристаллов меди из сульфатных растворов // Электрохимия. - 1982. -Том 18. - С. 1224-1229.
44. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии / О. Г. Булатов, В. С. Иванов, Д. И. Панфилов. – М.: Радио и связь, 1986. – 160 с., ил.
45. Прогрессивные импульсные и переменноточковые режимы электролиза / Черненко В.И., Литовченко К.И., Папанова И.И. – Киев: Наук. думка, 1986, – 176 с. – ISBN 5-12-000226-9.
46. Рогачёв К.Д. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). – <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/igbt/index.htm>

47. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока – М.: Сов. Радио, 1978. – 264 с.
48. Ромашко В.Я. Основы анализа дискретно-линейных ланцюгів. К.: Либідь. 1993.
49. Ротинян А. Л., Тихонов К. И., Шошина И. А. Теоретическая электрохимия / Под ред. А. Л. Ротиняна. – Л. Химия, 1981. – 424 с., ил.
50. Сайт компании "Чип и Дип", г. Москва – <http://www.chipdip.ru/library/DOC000049313.pdf>
51. Сиднеев Игорь Михайлович. Электроснабжение летательных аппаратов: [Учебник для вузов гражд. авиации] / И. М. Синдеев. — М. : Транспорт, 1982. — 272 с. : ил.; 22 см.
52. Скорчелетти В.В. Теоретическая электрохимия. Изд. 4-е, испр. и доп. Л., «Химия», 1974. – 568 с.
53. Співак В.М., Волківський В.Б. Моделювання електромагнітних процесів у пристрою для заряду енергоємних акумуляторних батарей // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. „Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – 2003. – № 487. – С. 165-172.
54. Терещенко Т.О., Волківський В.Б., Кріпак О.О. Алгоритми роботи експериментальної установки для дослідження впливу заряду асиметричним струмом на характеристики акумуляторів // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2006. – Ч. 3. – С. 3-7.
55. Терещенко Т.О., Волківський В.Б., Кріпак О.О. Експериментальна установка для дослідження впливу заряду асиметричним струмом на тривалість життя акумуляторних батарей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2006. – Ч. 2. – С. 30-33.
56. Терещенко Т.О., Петергеря Ю.С., Волківський В.Б. Застосування перетворення в орієнтованому базисі для керування триланковим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2003. – Ч. 3. – С. 39-43.

57. Терещенко Т.О., Співак В.М., Волківський В.Б. Пристрій для заряду енергоємних акумуляторних батарей асиметричним струмом // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2003. – Ч. 2. – С. 11-15.
58. Фрумкин А.Н., Багоцкий В.С., Иофа З.А., Кабанов Б.Н. Кинетика электродных процессов, издательство МГУ, 1952 г.
59. Черненко В. И., Литовченко К.П., Папанова И.И. Прогрессивные импульсные и переменнo-токовые режимы электролиза. Киев: Наукова думка, 1986. 176 с.
60. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. – <http://www.matlab.ru/simulink/book1/index.asp.htm>
61. Шелягин В.Д., Абакумов В.Г., Писаренко Л.Д., Спивак В.М., Волкивский В.Б. Система управления и электропитания гибридной лазерно-дуговой технологической установки для сварки // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2003. – Ч. 4. – С. 78.
62. Энергетические установки для космических аппаратов / Под ред. Н. Снайдера. – М.: Мир, 1964. – 395 с.
63. C. E. Holland, J. W. Weidner, R. A. Dougal, and R. E. White, “Experimental Characterization of Hybrid Power Systems Under Pulse Current Loads”, *Journal of Power Sources*, Vol. 109, No. 1, June 2002, pp.32-37.
64. C.C. Chan and K.T. Chau, “An Overview of Electric Vehicles – Challenges and Opportunities”, in *Conf. Proa IECON*, Vol. 1, 1996, pp.1-6.
65. C.C. Chan, “An Overview of Electric Vehicle Technology”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 81, No. 9, Sep., 1993, pp. 1202-1213.
66. Eric C. Darcy, Dissertation presented to the Faculty of the Department of Chemical Engineering University of Houston, “Investigation of the response of NiMh cells to burp charging”, – 1998. – <http://www.galaxypower.com/organization/NASA-II.pdf>


67. F. B. Diniz, L. E. P. Borges, and B. de B. Neto, "A Comparative Study of Pulsed Current Formation for Positive Plates of Automotive Lead Acid Batteries," *Journal of Power Sources*, Vol.109, No.1, June 2002, pp.184-188.
68. Galaxy Power Inc. "ICS1702 QuickSaver® Charge Controller for Nickel-Cadmium and Nickel-Metal Hydride Batteries", – 1999. – <http://www.galaxypower.com/organization/ics1702.pdf>
69. H. Oman, "Battery Developments that will make Electric Vehicles Practical", *IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine*, Vol. 1, Issue 8, Aug., 2000, pp.11-21.
70. H. Oman, "Making Batteries Last Longer", *IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine*, Vol. 14, Issue 9, Sep., 1999, pp. 19-21.
71. K. C. Tseng, T. J. Liang, J. F. Chen, and M. T. Chang, "High Frequency Positive/Negative Pulse Charger with Power Factor Correction," *The 33rd IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2002*, pp.671-675.
72. L. T. Lam, H. Ozgun, O. V. Lim, J. A. Hamilton, L. H. Vu, D. G. Vella, and D. A. J. Rand, "Pulsed Current Charging of Lead/Acid Batteries – a Possible Means for Overcoming Premature Capacity Loss?", *Journal of Power Sources*, Vol. 53, No. 2, Feb. 1995, pp.215-228.
73. Linden D. (editor). *Handbook of Batteries*. - New York: McGraw-Hill, 1995. -2nded.-P.36,44-48.
74. NASA Johnson Space Center "NiMH Battery Life Test Graph", – 2000. – <http://www.galaxypower.com/organization/NASA-summary.pdf>
75. P. H. Cheng and C. L. Chen, "High Efficiency and Nondissipative Fast Charging Strategy", *IEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol.150, No.5, Sep. 2003, pp.539-545.
76. Panasonic OEM Batteries, "NiCd, Charge Methods", – 2003. – [http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic\\_NiCd\\_ChargeMethods.pdf](http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_NiCd_ChargeMethods.pdf)
77. Popov K.I., Maksimovic V.D., Ocokoljic B.M. Fundamental aspects of pulsating current on the surface roughness and the porosity on metal deposits // *Surface Technol.* - 1980. - Vol. 11.- N.2. - P.99-109.

78. R. C. Cope and Y. Podrazhansky, "The Art of Battery Charging", 14th Annual Battery Conference on Applications and Advances, 1999, pp.233-235.
79. Sanyo "Cadnica battery", – 2001. –  
[http://www.sanyo.com/batteries/pdfs/cadnicaT\\_E.pdf](http://www.sanyo.com/batteries/pdfs/cadnicaT_E.pdf)
80. T. B. Gage, "Lead-Acid Batteries: Key to Electric Vehicle Commercialization - Experience with Design, Manufacture, and Use of EVs", 15<sup>th</sup> Battery Conference on Applications and Advances, 2000, pp.217-222.
81. T. J. Liang, T. Wen, K. C. Tseng, and J. F. Chen, "Implementation of a Regenerative Pulse Charger Using Hybrid BuckBoost Converter," The 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2001, pp.437-442.
82. Tho Nguyen, Linda Bushnell, Department of Electrical Engineering University of Washington, "Advanced battery charging techniques: pulse-charging in large-scale applications – design of divide and conquer technique for high-capacity batteries", – 2003. –  
[http://www.ee.washington.edu/research/arcs/reports/Tho\\_Nguyen\\_Battery\\_Summer\\_2003.pdf](http://www.ee.washington.edu/research/arcs/reports/Tho_Nguyen_Battery_Summer_2003.pdf)
83. Venkat Srinivasan, G. Q. Wang and C. Y. Wang, "Mathematical Modeling of Current Interrupt and Pulse Operation of VRLA Cells," Journal of the Electrochemical Society, 150, A316 (2003)
84. Yao-Ching Hsieh. Charge Equalization for Series-Connected Batteries: Doctoral Dissertation / National Sun Yat-sen University – 2003. – 90 pages. –  
<http://etd.lib.nsysu.edu.tw/ETD-db/ETD-search/getfile?URN=etd-0104104-232051&filename=etd-0104104-232051.pdf>



## Додаток А

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Зам. директора НДІ “ХЕМЗ”  

 І. К. Чосов

” 20” грудня 2005 р.

## АКТ

технічного використання результатів дисертаційної роботи  
 асистента кафедри промислової електроніки Національного технічного  
 університету України „Київський політехнічний інститут” Волківського В.Б.

Дисертаційна робота Волківського В.Б., яка подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, присвячена розробці способів та систем заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом.

Основні положення дисертаційної роботи були застосовані у мікропроцесорній системі заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, в якій використані розроблені алгоритми ефективного управління зарядом і алгоритми адаптивного заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом на основі запропонованого в дисертаційній роботі способу, і у пристрої для формовки свинцевих акумуляторів асиметричним струмом.

В результаті впровадження запропонованого методу адаптивного заряду батарей в мікропроцесорну систему заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом вдалося збільшити зарядну ємність на 10-15% (у порівнянні з параметрами, одержуваними при заряді постійним струмом), скоротити час заряду до 30-60 хвилин, а також підвищити ресурс акумуляторної батареї до 3 разів, зменшується споживання енергії мережі на 10-12%.

Впровадження пристрою для формовки свинцевих акумуляторів асиметричним струмом дозволило прискорити процес формовки в 2 - 3 рази у порівнянні з формовкою постійним струмом.

Зав. відділом,  
 К. Т. Н.

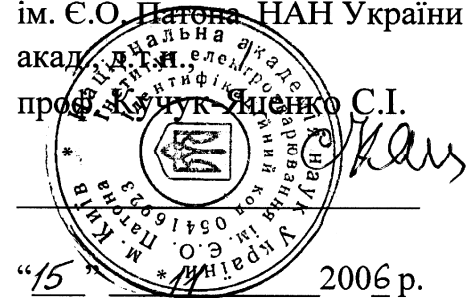


Бахнов Л.С.

## Додаток Б

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Замісник директора  
 Інституту Електрозварювання  
 ім. Є.О. Патона НАН України  
 акад. Д.І.Н. елементів  
 проф. Кучук Яценко С.І.



## А К Т

технічного використання результатів дисертаційної роботи  
 аспіранта кафедри „Промислової електроніки”  
 Національного технічного університету України  
 „Київський політехнічний інститут”  
 ВОЛКІВСЬКОГО Вадима Борисовича

Дисертаційна робота Волківського В.Б., подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, присвячена вдосконаленню методів заряду та розробці схем пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсними та асиметричними струмами.

Основні положення дисертаційної роботи застосовані у системі безперебійного електроживлення гібридної лазерно-дугової технологічної установки для зварювання з мікропроцесорним керуванням. В цій системі використана схема пристрою, розроблена на основі запропонованого в дисертаційній роботі способу заряду асиметричним струмом акумуляторної батареї в буферному режимі з використанням енергії імпульсу розрядного струму для живлення корисного навантаження.

В результаті впровадження запропонованого способу підвищено ресурс акумуляторної батареї у 1,5–2 рази і зменшено енергоспоживання на 8–10%.

Зав. відділом „Спеціалізованої  
 високовольтної техніки і лазерної технології”,  
 с.н.с., к.т.н.

В.Д. Шелягін

## Додаток В

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з наукової роботи  
ННУ “КПІ”, член-кор. НАНУ

Ільченко М. Ю.

03 200 7р.



## А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи  
аспіранта кафедри „Промислової електроніки” Національного технічного  
університету України „Київський політехнічний інститут” Волківського В.Б.  
в учбовому процесі Національного технічного університету України

Ми, що нижче підписалися, зав. кафедрою промислової електроніки д.т.н., проф. Жуйков В.Я., професор кафедри д.т.н., проф. Терещенко Т.О., вчений секретар кафедри Абакумова О.О., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Волківського В.Б., яка присвячена вдосконаленню методів заряду та розробці схем пристроїв заряду акумуляторних батарей імпульсними та асиметричними струмами, впроваджені в учбовий процес кафедри.

В лекційних курсах “Основи енергозбереження” відображені розроблені в дисертаційній роботі енергозберігаючі методи заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, які забезпечують збільшення ККД внаслідок ефективного використання енергії імпульсу розрядного струму, дозволяють підвищити ефективність заряду акумуляторних батарей імпульсним асиметричним струмом, підвищити ресурс акумуляторних батарей до 3 разів і скоротити час заряду у декілька разів.

Зав. кафедрою  
промислової електроніки,  
д.т.н., проф.

В.Я. Жуйков

Професор кафедри  
промислової електроніки,  
д.т.н., проф.

Т.О. Терещенко

Вчений секретар кафедри  
промислової електроніки

О.О. Абакумова