НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”
Кафедра промислової електроніки

Реєстраційний №_____

На правах рукопису
УДК 621.314

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Зав. кафедрою д. т. н., проф.
_____ /Жуйков В. Я./

АТЕСТАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

УПРАВЛІННЯ ЗАРЯДОМ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ОРІЄНТОВАНОМУ БАЗИСІ

з спеціальності: Електронні системи 8.090803

Виконавець роботи:
Волківський Вадим Борисович

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор
Терещенко Тетяна Олександрівна

Київ 2003

ABSTRACT

The certificate work consists of 88 pages of the printed text. The work contains 42 illustrations and 4 tables. A literature list includes 20 sources.

The purpose of this work is the development of devices for charging of storage batteries by asymmetric current with increased efficiency, realizations of the analysis of characteristics of these devices and development of algorithms of efficient control of storage batteries charging.

The researches were conducted on PC using specialized MathWorks software package Simulink 4.0 integrated in MATLAB 6.

The results are: circuits of devices for charging of storage batteries by an asymmetric current were developed with an application pulse regulation method; modeling and analysis of electromagnetic processes of devices operation was carried out; control of storage batteries charging on the basis of transformation in oriented basis was offered; the algorithm of control of device for charging of storage batteries by asymmetric current with a microprocessor control system on the spectrum in oriented basis was developed.

The results of this work may be used to prolongate term of operation of storage batteries and to reduce energy consumption of devices for charging of storage batteries by asymmetric current.

Key words: storage battery, asymmetric current, oriented basis, management of charge, algorithm of management, energy consumption.

ЗМІСТ

Стр.

ВСТУП 6

Розділ 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУМУЛЯТОРІВ І СУЧАСНІ МЕТОДИ ЇХ ЗАРЯДУ 10

1.1 Застосування акумуляторних батарей у локальних об'єктах 10

1.2 Основні характеристики і вибір типу акумуляторів 12

1.3 Свинцево-кислотні акумулятори 20

1.4 Методи і пристрої для заряду акумуляторів 22

Висновки до розділу 1 29

Розділ 2 РОЗРОБКА СХЕМИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ АСИМЕТРИЧНИМ СТРУМОМ 31

2.1 Схема пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом 31

2.2 Принцип роботи пристрою 32

2.3 Аналіз електромагнітних процесів 33

2.4 Оптимізація заряду накопичувального конденсатора та вибір величини його ємності 38

2.5 Вибір типу силових ключів для пристрою 42

2.5 Моделювання електромагнітних процесів 42
Висновки до розділу 2 51

Розділ 3 РОЗРОБКА СХЕМИ ТРИЛАНКОВОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ АСИМЕТРИЧНИМ СТРУМОМ 52
3.1 Схема триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом 52
3.2 Принцип роботи пристрою 53
3.3 Аналіз електромагнітних процесів 54
3.4 Розрахунок величин індуктивностей накопичувальних дроселів та коефіцієнту заповнення імпульсного циклу у підвищуючому ШІП 59
3.5 Вибір типу силових ключів для пристрою 60
3.6 Моделювання електромагнітних процесів 60
Висновки до розділу 3 70

Розділ 4 УПРАВЛІННЯ ЗАРЯДОМ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ОРІЄНТОВАНОМУ БАЗИСІ 71
4.1 Визначення ОБ-спектрів струмів заряду акумуляторних батарей 71
4.2 Визначення величини струмів заряду акумуляторних батарей через ОБ-спектр 78
4.2.1 При постійному струмі споживання 78

4.2.2 При струмі джерела, що змінюється в широких межах 78

4.3 Мікропроцесорна система керування (МСК) триланковим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом на основі ОБ-спектру.. 79

Висновки до розділу 4 84

ВИСНОВКИ 85

ЛІТЕРАТУРА 87

ВСТУП

Актуальність.

У зв'язку з широким використанням акумуляторних батарей у системах електроживлення на сьогоднішній день актуальною є проблема подовження їх строку експлуатації, що забезпечить зменшення забруднення навколишнього середовища. Вирішення цієї проблеми може бути досягнуто шляхом вдосконалення пристроїв для заряду акумуляторних батарей, в тому числі заряду асиметричним струмом, оскільки такий заряд подовжує строк їх служби. Однак низький ККД пристроїв заряду асиметричним струмом на даний момент не дає змоги їх широкому застосуванню.

Таким чином, задача розробки схем пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з підвищеним ККД та побудови алгоритмів ефективного управління зарядом акумуляторних батарей є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Магістерська робота виконана в Національну технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки 6 “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці” в рамках науково-дослідної роботи “Розробка математичних основ алгоритмів мікропроцесорного керування силовими перетворювачами в автономних системах електроживлення” № 2518 (номер державної реєстрації 0102U002214), а також в рамках науково-дослідної роботи “Наукові основи ідентифікації параметрів пристроїв силової електроніки в системах керування” №2389 (номер державної реєстрації 0100U000581).

Мета і задачі досліджень.

Метою роботи є розробка схем пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з підвищеним ККД, проведення аналізу

характеристик моделей схем цих пристроїв та розробка алгоритмів ефективного управління зарядом акумуляторних батарей. Мета потребує вирішення наступних завдань:

- аналіз характеристик акумуляторних батарей та способів їх заряду;
- розробка схем пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з підвищеним ККД;
- моделювання та аналіз електромагнітних процесів роботи запропонованих схем пристроїв;
- розробка алгоритмів ефективного управління зарядом акумуляторних батарей.

При дослідженні використовувався математичний апарат перетворення в орієнтованому базисі та математичне моделювання процесів роботи схем пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом на ПЕОМ.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає в наступному:

- розроблені нові схеми пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, які характеризуються підвищеним ККД;
- запропоновано проводити управління зарядом акумуляторних батарей на основі перетворення в орієнтованому базисі;
- розроблено алгоритм керування пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з мікропроцесорною системою керування на основі ОБ-спектру.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці схем пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з збереженням енергії розряду в яких використовується імпульсний метод регулювання, що дозволяє подовжити строк експлуатації акумуляторних батарей та зменшити енергоспоживання цих пристроїв, а також в розробці алгоритму керування пристроями, який дозволить зменшити число каналів вимірювання.

Особистий вклад полягає в наступному:

- розроблені схеми пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом;
- проведено моделювання та аналіз електромагнітних процесів роботи пристроїв;
- розроблено алгоритм керування пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з мікропроцесорною системою керування на основі ОБ-спектру.

Апробація результатів роботи.

Основні положення і результати роботи доповідались на магістерському семінарі кафедри промислової електроніки (2002 р.).

Публікація результатів досліджень.

По результатах роботи подані до опублікування 3 статті: „Пристрій для заряду енергоємних акумуляторних батарей асиметричним струмом” (журнал "Технічна електродинаміка"), „Застосування перетворення в орієнтованому базисі для керування триланковим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом” (журнал "Технічна електродинаміка") та „Моделювання електромагнітних процесів у пристрою для заряду енергоємних акумуляторних батарей асиметричним струмом” (Вісник Національного університету „Львівська політехніка”). Також до Українського інституту промислової власності подані 2 заяви про видачу

деклараційного патенту України на винахід: „Пристрій для заряду акумуляторної батареї” (інд. номер заяви №2002108677) та „Пристрій для заряду акумуляторних батарей” (інд. номер заяви №2002108680)

Структура та обсяг роботи.

Магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів та висновків, які викладені на 88 сторінках машинописного тексту, містить 42 рисунки, 4 таблиці та перелік літератури з 20 найменувань.

Розділ 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУМУЛЯТОРІВ І СУЧАСНІ МЕТОДИ ЇХ ЗАРЯДУ

1.1 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.

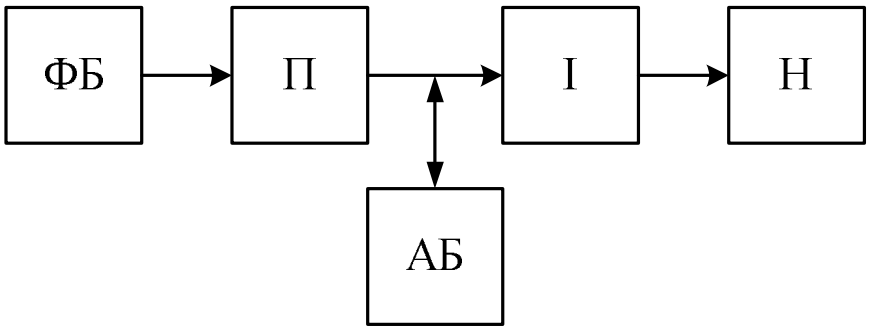
Розрізняють автономні і гібридні системи електроживлення. *Автономні системи* використовуються у віддалених місцях, де немає доступу до мережі підприємств комунального обслуговування. Живлення навантаження в таких системах здійснюється від джерела постійного або змінного струму. *Гібридною системою* 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 [1].

Структурна схема однієї з автономних систем з фотогенераторами приведена на рис. 1.1 (*а*). Система містить 1) фотобатареї (**ФБ**), що складається 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;

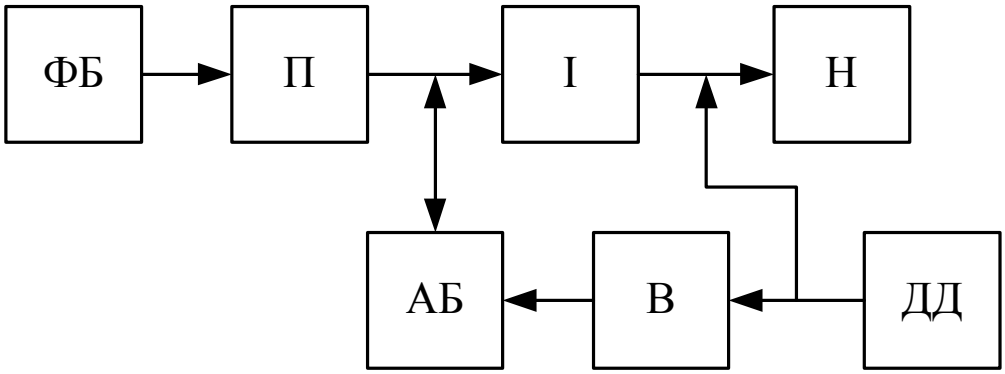
системи живлення окремих малопотужних холодильників для збереження ліків, продуктів; малопотужні системи освітлення. Автономні системи доцільно застосовувати для роботи на постійному струмі (без інверторів), оскільки це вимагає менших витрат на перетворення енергії. Вони можуть застосовуватися також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

Гібридна система включає фотобатареї (**ФБ**), один або більш додаткових джерел (**ДД**) типу вітрового або дизельного генератора й одну або більшу кількість акумуляторних батарей (**АБ**) і інверторів (**І**) (рис. 1.1(*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 інш.), її електричні параметри також змінюють значення. Енергія, яку віддає сонячна панель у навантаження, при різних умовах буде різною. В [2] розглянуте питання забезпечення відбору максимальної енергії у фотоелектричній автономній системі живлення. 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.



а)



б)

Рисунок 1.1 – Структурні схеми автономних систем живлення на основі фотобатарей: *а)* автономна система; *б)* гібридна система.

Розглянемо типи акумуляторних батарей, що входять до складу фотоелектричної автономної системи живлення, а також методи їхнього заряду.

1.2 Основні характеристики і вибір типу акумуляторів

Акумулятори – хімічні джерела електричної енергії багаторазової дії. Вони складаються з двох електродів (позитивного і негативного), електроліту і корпуса. 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 клемах 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: срібно-цинкові, срібно-кадмієві, нікель-кадмієві, нікель-цинкові і залізонікелеві. У кислотних акумуляторах пластини свинцеві.

При виборі акумуляторів необхідно порівняти наступні параметри:

- напругу на клемах акумулятора або акумуляторної батареї;
- номінальну ємність акумулятора;
- орієнтовану відносна вартість 1 *Втг* енергії, отриманої від різних типів акумуляторів однакової ємності;
- довговічність акумулятора – кількість циклів заряду-розряду;
- коефіцієнт віддачі – відношення кількості електрики в кулонах (або в ампер-годинах *Аг*)[1] , 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, отриманої їм при заряді. Значення коефіцієнта корисної дії завжди менше значення коефіцієнта віддачі.

Для одержання досить великих значень напруг або ємності окремі акумулятори з'єднуються між собою послідовно або паралельно в батареї. Існує ряд загальноприйнятих напруг для акумуляторних батарей: 2; 4; 6; 12; 24 *В*.

---

[1] 1 *Аг* = 3600 *Кл*

Кількість акумуляторів, що необхідно для укомплектування батареї при послідовному з'єднанні, визначається по формулі:

$$N = \frac{U_{Ж}}{U_a},$$

де N – число акумуляторних батарей;

$U_{Ж}$ – напруга живлення споживача;

U_a – напруга одного цілком зарядженого акумулятора.

Під ємністю, що віддається, розуміють максимальну кількість електрики в кулонах (ампер годинах), що акумулятор віддає при розряді до обраної кінцевої напруги. В умовній позначці типу акумулятора приводиться номінальна ємність, тобто ємність при нормальних умовах розряду (при розряді номінальним струмом і, звичайно, при температурі 20°*C*).

При паралельному з'єднанні акумуляторів, тобто при з'єднанні між собою позитивних і негативних полюсів всіх елементів відповідно, можна скласти батарею великої ємності з напругою, рівною номінальній напрузі одного акумулятора і ємністю, рівній сумі ємностей складових її акумуляторів [3].

Номінальною ємністю акумулятора називається ємність, гарантовану заводом виготовлювачем за певних умов розряду. Зарядною ємністю називається кількість електрики, що віддається акумуляторові при заряді. Зарядна ємність завжди трохи більше розрядної через необоротні процеси, що протікають при заряді і розряді.

Величина розрядної ємності акумулятора залежить від типу і конструкції використовуваних пластин, кількості активних речовин, що утримуються в них, матеріалу електродів, режиму розряду і температури.

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. [4].

Параметри найбільш розповсюджених типів акумуляторів приведені в табл. 1.1 [3].

Таблиця 1.1 – Параметри найбільш розповсюджених типів акумуляторів

Акумулятор / Параметр	Свинцево-кислотний	Залізо-нікелевий	Нікель-кадмієвий	Нікель-цинковий	Срібно-цинковий	Срібно-кадмієвий
Анод (+)	*Pb*	*Fe*	*Cd*	*Zn*	*Zn*	*Cd*
Катод (–)	PbO_2	NiO_X	NiO_X	NiO_X	*AgO*	*AgO*
Напруга холостого ходу, *В*	*2,15*	*1,4*	*1,35*	*1,8*	*1,86*	*1,4*
Напруга під навантаженням, *В*	*1,75–1,9*	*1,1–1,3*	*1,1–1,3*	*1,5–1,7*	*1,3–1,5*	*1,1*
Макс. ємність, *Аг/кг*	*55*	*195*	*165*	*185*	*285*	*230*
Щільність енергії, *Втг/кг*	*12-14*	*16*	*18*	*40*	*60*	*30*
Накопичувана енергія, $Втг/дм^3$	*25...30*	*16,6*	*30*	*54*	*54*	*42*
Циклічний термін служби (глибокі цикли)	*1000*	*3000*	*1500*	*300*	*50*	*200*
Термін збереження, *років*	*3*	*5*	*5*	–	–	*6*
Характеристики при низькій температурі (відношення ємності при 0°С до ємності при 25°С), *%*	*60*	*35*	*65*	*40*	*35*	*50*
Збереження заряду при 25°С (до ємності 80%), *міс*	*18*	*3*	*6*	*6*	*6*	*9*
Збереження заряду при 45°С (до ємності 80%), *міс*	*6*	*1*	*1*	*1*	*1*	*2*

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.

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.

Таблиця 1.2 – Залежність питомої енергії від температури навколишнього середовища

Акумулятор	Питома енергія, *Втг/кг*, при температурі, *°С*				Вплив на апаратуру і людей
	20	*0*	*–20*	*–40*	
Свинцево-кислотний	*36*	*29*	*18*	*8*	*Найбільш шкідливі з усіх акумуляторів*
Нікель-кадмієвий, ламельний	*20*	*16*	*11*	*5*	*Менш шкідливі, ніж кислотні*
Нікель-кадмієвий, безламельний	*38*	*33*	*26*	*19*	*Менш шкідливі, ніж кислотні*
Залізонікелевий	*18*	*13*	*9*	*–*	*Менш шкідливі, ніж кислотні*
Срібно-цинковий	*90*	*75*	*35*	*6*	*Найменш шкідливі з усіх акумуляторів*

Важливою характеристикою акумуляторів є орієнтована відносна вартість 1 *Втг* енергії, отриманої від різних типів акумуляторів приблизно однакової ємності (табл. 1.3).

Як видно з табл. 1.3 дорожче всього обходиться енергія, одержувана від срібно-цинкових і кадмієвих акумуляторів, і дешевше від свинцево-кислотних, прийнятих у даному випадку за одиницю.

Таблиця 1.3 - Відносна вартість 1 *Втг* енергії, одержуваної від акумуляторів

Акумулятор	Відносна вартість
Свинцево-кислотний	*1*
Нікель-кадмієвий, ламельний	*3*
Нікель-кадмієвий, безламельний	*13*
Залізонікелевий	*2*
Срібно-цинковий	*15*

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

Майже усі свинцеві акумулятори використовують так звану банкову конструкцію. При виготовленні корпусів використовуються: ебоніт, поліпропілен, і т.п. Ці матеріали стійки до тривалого впливу сірчаної кислоти.

Блок електродів кожної акумуляторної комірки міститься в ізольованій банці. Між електродами встановлюються сепаратори. Крайніми завжди є негативні електроди (рис. 1.2). Горизонтальні перемички, що з'єднують однойменні пластини в банку, називаються баретками.

В усіх малодоглядних акумуляторах пластини припідняті над дном. У просторі, що утворюється, накопичується шлам – активна маса, що відокремилася від електродів. У герметизованих акумуляторах виконаних за технологією PLT простір під пластинами відсутній.

Рисунок 1.2 – Будова акумулятора

Удосконалювання свинцевих акумуляторів йде по шляху пошуку нових сплавів для ґраток, полегшених і міцних матеріалів корпусів (сополімера пропилену і етилену) і поліпшення якості сепараторів [5].

З огляду на те, що в автономних фотоелектричних системах живлення масогабарітні показники акумулятора не грають великої ролі, доцільно обрати для фотоелектричної системи живлення 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.

1.3 Свинцево-кислотні акумулятори

Акумулятор складається з позитивного і негативного електродів, розчину сірчаної кислоти (27...39%-вий розчин) і сепаратора, що розділяє позитивні і негативні пластини.

Номінальна напруга кожного акумулятора складає 2*В*. Звичайно акумулятори з'єднують у батареї, що складаються з трьох (загальна напруга батареї 6*В*), шести (загальна напруга батареї 12*В*) або дванадцяти акумуляторів (загальна напруга батареї 24*В*).

Застосовуються два типи електродів: поверхневі і пастовані. Поверхневий електрод складається зі свинцевої пластини, на поверхні якої електрохімічним способом формується шар активної маси. Пастовані електроди підрозділяються на ґратчасті (намазні), коробчаті і панцирні.

У ґратчастих (намазних) електродах активна маса утримується в ґратці зі свинцево-сурм'яного сплаву товщиною 1...4 *мм*. У коробчатих пластинах ґратки з активною масою закриваються з двох сторін перфорованими свинцевими аркушами.

Панцирні пластини складаються зі свинцево-сурм'яних штирів, що містяться усередині пластмасових перфорованих трубок, заповнених активованою масою. Для негативних електродів використовуються намазні і коробчаті пластини, для позитивних – поверхневі, намазні і панцирні. Як сепаратори застосовують мікропористі пластини з вулканізованого каучуку (міпор), полівінілхлориду (міпласт) і скловолокна.

Батареї акумуляторів поміщають у моноблок з ебоніту, термопласту, поліпропілену, полістиролу, поліетилену, асфальтопекової композиції, кераміки або скла.

Акумулятори і батареї мають умовне буквено-цифрове позначення. Перша цифра (для вітчизняних акумуляторів) вказує число послідовно з'єднаних акумуляторів. Оскільки номінальна напруга свинцевого акумулятора дорівнює

двом вольтам, то номінальна напруга акумуляторної батареї дорівнює числу послідовно з'єднаних елементів, помноженому на два.

Для деяких акумуляторів указуються кліматичне виконання і розміщення. Наприклад, стартерна батарея із шести акумуляторів ємністю 55 *Аг* у моноблоці з ебоніту і з сепаратором зі скловолокна має умовну позначку: батарея 6СТ-55ЭС, ГОСТ 959.0-79.

Свинцеві акумулятори мають високі розрядні напруги (рис. 1.3) і питому потужність (до 100...150 *Вт/кг*) і відносно недорогі. До основних їхніх недоліків варто віднести низьку питому енергію і відносно малий ресурс.

При заряді акумулятора в міру нагрівання електроліту внутрішній опір падає, чим пояснюється стрибок напруги кривої 2 на рис. 1.3 у перший момент часу. Далі напруга на акумуляторі росте тому що ємність збільшується. При розряді хімічні реакції в акумуляторі якийсь час протікають повільніше тому що електроліт ще не прогрівся до робочої температури, чим і пояснюється деякий спад напруги на початку процесу розряду і подальша його стабілізація (крива 1 рис. 1.3); далі напруга на акумуляторі по мірі розряду падає оскільки знижується його ємність. Простір між кривою заряду і розряду показує втрати енергії при циклі заряд-розряд.

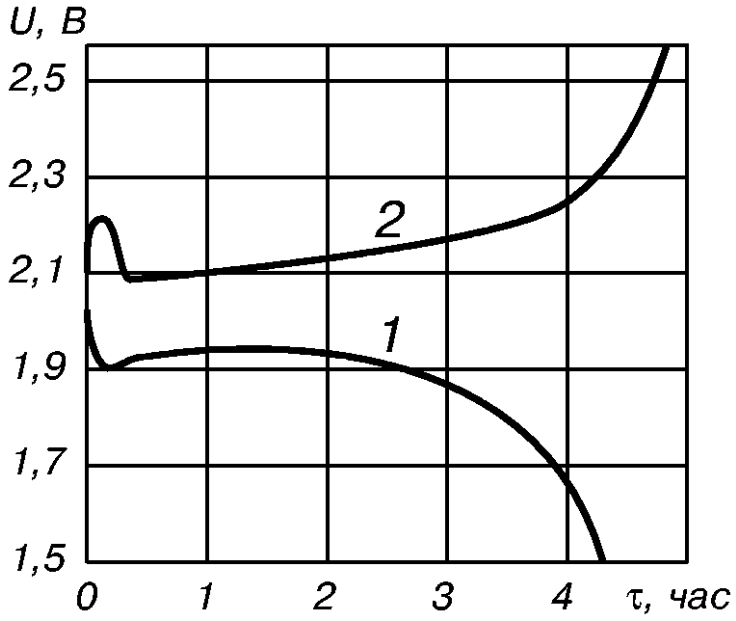


Рисунок 1.3 – Криві розряду (1) і заряду (2) свинцевого акумулятора

Літера після першої цифри позначає тип або призначення акумулятора або батареї:

С	*стаціонарні*
СТ	*стартерні*
А	*авіаційні*
В	*вагонні*

Удосконалювання свинцевих акумуляторів йде по шляху вишукування нових сплавів для ґраток (наприклад, свинцево-кальцієвих), полегшених і міцних матеріалів корпусів (наприклад, на основі сополімера пропилену і етилену), поліпшення якості сепараторів.

В останні роки виникли нові сфери застосування батарей, наприклад у якості резервних джерел живлення ЕОМ і систем, що накопичують енергію для можливих пікових навантажень [3].

1.4 Методи і пристрої для заряду акумуляторів

Заряд акумулятора відбувається, якщо до нього прикладений потенціал, що перевищує його напругу. Струм заряду акумулятора пропорційний різниці прикладеної напруги і напруги холостого ходу.

Швидкість заряду акумулятора може бути визначена в термінах ємності. Якщо ємність акумулятора *С* заряджається за час *t*, то швидкість заряду визначається відношенням *С/t*. Акумулятор ємністю 100 *Аг* при розряді зі швидкістю *С*/5 цілком розрядиться за 5 годин, при цьому струм розряду складе 100/5, або 20 *А*. Якщо акумулятор заряджається зі швидкістю *С*/10, то струм його заряду буде дорівнює 100/10, або 10 *А*. Швидкість заряду можна оцінити в тривалостях циклу. Так, якщо акумулятор заряджається за 5 годин, то говорять, що він має цикл 5 годин.

При заряді акумуляторів застосовують наступні способи заряду:

- при постійному струмі (*I*=*const*);

- при постійній напрузі (*U=const*);
- комбінований спосіб – заряд при постійному струмі до досягнення на акумуляторі визначеної напруги, яка потім підтримується постійною доти, поки струм не знизиться до визначеного значення;
- переривчастим струмом [6];
- асиметричним струмом [6].

У залежності від області застосування акумуляторів розрізняють ще деякі різновиди вищезгаданих способів заряду:

- швидкий заряд;
- циклічний заряд;
- плаваючий заряд – метод підтримки підзаряджаємої батареї при повному заряді шляхом подачі зворотної постійної напруги для компенсації в ній різних втрат;
- компенсаційний підзаряд – метод, при якому для приведення батареї в цілком заряджений стан і підтримки її в цьому стані використовується постійний струм заряду.

При швидкому заряді потрібно від 4 до 6 годин, у той час як тривалість розряду в штатному режимі варіюється від 10 до 15 годин. При циклічному заряді потрібна постійна напруга або постійний струм заряду. Іноді використовується плаваючий заряд, під час якого навантаження й акумулятор включаються паралельно, або компенсаційний підзаряд, коли потужність постійного струму подається в навантаження, у той час як ланцюг заряду акумулятора з навантаженням не з'єднаний.

На практиці найчастіше використовується швидкий заряд акумулятора (до 90% ємності) з наступним автоматичним переключенням на меншу швидкість заряду (до повної ємності).

Для малопотужних акумуляторів і заряду при постійній напрузі можна використовується пристрій, показаний на рис. 1.5 [3]. Для підтримки постійної вихідної напруги, значення якого встановлюється резистором *R2*, застосовується трививідний інтегральний стабілізатор напруги, наприклад *КР149ЕН5А*.

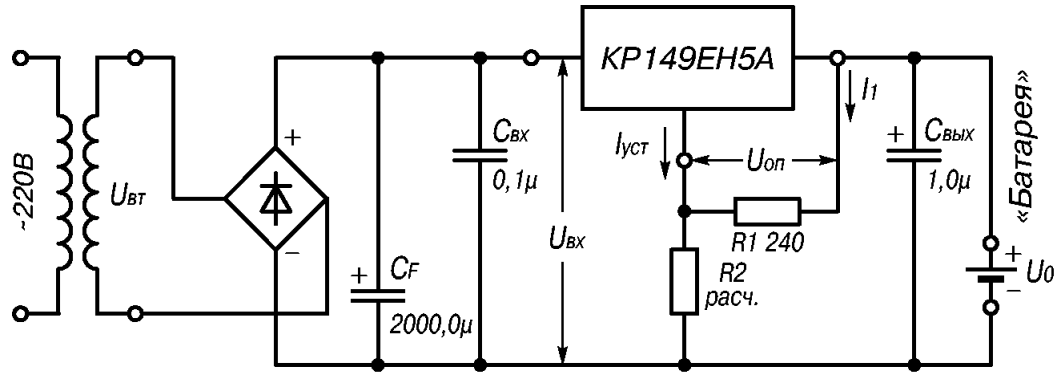


Рисунок 1.5 – Схема зарядного пристрою з постійною вихідною напругою (режим плаваючого заряду)

Для схеми справедливий вираз [3]:

$$U_0 = U_{ОП}\left(1+\frac{R1}{R2}\right)+I_{уст}R2\,,$$

де U_0 – напруга, що дорівнює різниці максимальної напруги на зарядженому акумуляторі і вихідній напрузі інтегрального стабілізатора напруги;

$U_{ОП}$ – вихідна напруга інтегрального стабілізатора напруги;

$I_{уст}$ – струм внутрішнього стабілізатора інтегральної мікросхеми.

Можливо використовувати у якості резистору *R2* змінний резистор, але з обов'язковим шунтуванням постійним резистором (для блокування деренчання движка резистору) таким чином, щоб їхній сумарний опір дорівнював розрахунковому. За його допомогою підтримується необхідна вихідна напруга й одночасно здійснюється захист схеми від струму короткого замикання.

На рис. 1.6 показаний зарядний пристрій із джерелом струму й автоматичним обмеженням напруги. Цей пристрій підтримує постійний струм заряду і відключає акумулятор від зарядного пристрою при досягненні встановленої напруги заряду. Тут джерело струму виконане на транзисторі *VT2* і світлодіоді *VD1*, що виконує функцію індикатора (напруга емітер-база транзистора *VT2*, що задає струм джерела струму, визначається спаданням напруги на світлодіоді). Транзистор *VT1* обмежує напругу на навантаженні, закриваючи протікання струму через світлодіод *VD1* по досягненні напруги заряду акумулятора, що встановлюється підбором резистора *R1*. При номіналах, зазначених на схемі, напруга заряду акумулятора 12*В* при максимальному струмі порядку 100*мА*. Світлодіод показує ступінь заряду акумулятора. При цілком зарядженому акумуляторі він гасне.

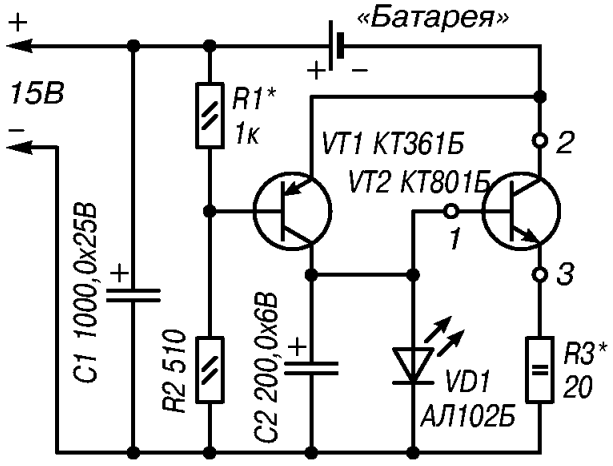


Рисунок 1.6 – Схема автоматичного зарядного пристрою (режим плаваючого заряду)

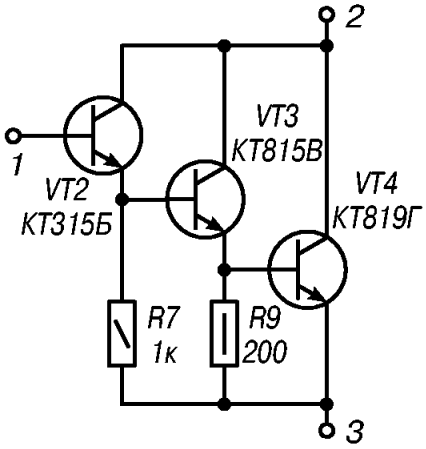


Рисунок 1.7 – Схема складеного транзистору

Такі зарядні пристрої не вимагають приладів виміру струму і напруги, контролю закінчення заряду і наприкінці заряду автоматично зменшують струм, надаючи акумуляторові максимально можливий заряд. При необхідності заряджати акумуляторні батареї великої ємності (наприклад автомобільні)

струм заряду неважко збільшити до 5*А*. У цьому випадку транзистор *VT2* необхідно замінити складеним транзистором рис. 1.7, забезпечивши останній з них тепловідводом [3].

Заряд акумуляторних батарей асиметричним струмом

Звичайно кислотні акумуляторні батареї заряджають постійним струмом. Але метод заряду постійним струмом має ряд недоліків таких, як необоротна сульфатація негативних пластин і необхідність у контрольно-тренувальних циклах. В [3] пропонується заряджати кислотні акумуляторні батареї асиметричним струмом. Те, що при заряді кислотних акумуляторних батарей асиметричним струмом необоротна сульфатація негативних пластин не виникає, а отже відпадає необхідність у контрольно-тренувальних циклах, на даний момент являється загальновизнаним фактом. 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 $q_з$ на 10-15%, скорочення часу заряду $t_з$ на 10-15% (у порівнянні з параметрами, одержуваними при заряді постійним струмом), а також підвищення ресурсу акумуляторної батареї [6, 7]. Але навіть сучасні схеми зарядних пристроїв асиметричним струмом мають невисокий ККД, що стає на заваді до використання асиметричного струму для заряду кислотних акумуляторних батарей, хоча він і має такі суттєві переваги у порівнянні з зарядом постійним струмом.

На рис. 1.8 представлена схема заряду акумуляторів 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* и розрядний – 0,5 *А* [3]. 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*).

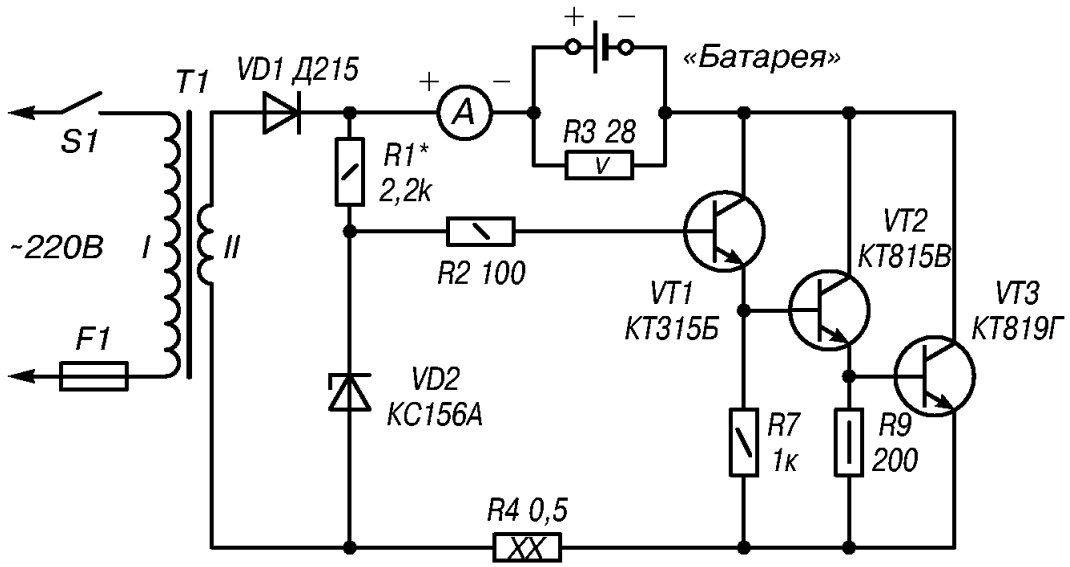


Рисунок 1.8. – Схема заряду акумулятора асиметричним струмом

За час одного періоду змінної напруги формується один імпульс зарядного струму (кут відсічення alpha дорівнює 60°, рис. 1.9). У проміжку між зарядними імпульсами формується розрядний імпульс через резистор *R3*, підбором якого встановлюється амплітуда розрядного струму.

Необхідно враховувати, що сумарний струм зарядного пристрою повинний дорівнювати 1,1 від струму заряду акумулятора, тому що при заряді резистор *R3* підключений паралельно акумуляторові.

При використанні аналогового амперметра він буде показувати біля однієї третини від амплітуди імпульсу зарядного струму. Схема захищена від короткого замикання виходу.

Заряд акумулятора ведуть доти, поки не наступить рясне газовиділення (кипіння) у всіх банках, а напруга і щільність електроліту будуть постійними протягом двох годин підряд. Це є ознакою закінчення заряду. Потім варто зробити зрівнювання щільності електроліту в секціях і продовжити заряд ще 30 хвилин для кращого перемішування.

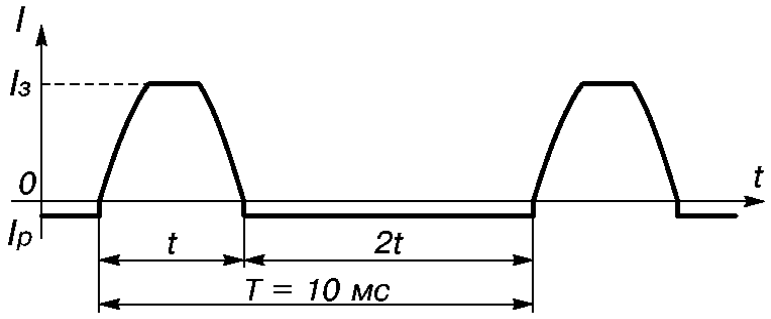


Рисунок 1.9 – Діаграма зарядного асиметричного струму

Під час заряду акумулятора варто періодично перевіряти температуру електроліту, щоб не допустити її підвищення вище 45°*C* в холодних і помірних кліматичних зонах і вище 50°*C* в жарких і теплих вологих [3].

Висновки до розділу 1

1. Показано, що оскільки в автономних фотоелектричних системах живлення масогабаритні властивості акумулятора не грають великої ролі, то доцільно вибрати для фотоелектричної системи живлення 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. Акумуляторні батареї можуть також використовуватися як резервні джерела живлення ЕОМ і систем, що накопичують енергію для можливих пікових навантажень.
2. Показано, що спосіб заряду акумуляторів асиметричним струмом має ряд переваг у порівнянні з іншими способами, а саме: при заряді кислотних акумуляторних батарей асиметричним струмом необоротна сульфатація негативних пластин не виникає, а отже відпадає необхідність у контрольно-тренувальних циклах. 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 $q_з$ на 10-15%, скорочення часу заряду $t_з$ на 10-15% (у порівнянні з параметрами, одержуваними при заряді постійним струмом), а також підвищення ресурсу акумуляторної батареї. Але навіть сучасні схеми зарядних пристроїв асиметричним струмом мають невисокий ККД, що стає на заваді до використання асиметричного струму для заряду кислотних акумуляторних батарей.

3. Необхідно розробити методи і пристрої заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з високим ККД, що можуть бути застосовані в автономних системах живлення, зокрема у фотоелектричній автономній системі живлення, у якій організований максимальний відбір енергії і тому струм заряду змінюється в широких межах.

Розділ 2 РОЗРОБКА СХЕМИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ АСИМЕТРИЧНИМ СТРУМОМ

2.1 Схема пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом

Розглянута в п.1.4 схема пристрою для заряду акумуляторів асиметричним струмом, запропонована в [3], має наступні суттєві недоліки: наявність втрат енергії внаслідок формування розрядного імпульсу через резистор та необхідність у сумарному струмі зарядного пристрою рівному 1,1 від струму заряду акумулятора, тому що при заряді резистор, через якій формується розрядний імпульс, підключений паралельно акумуляторові. Для усунення цих недоліків пропонується схема, зображена на рис. 2.1.

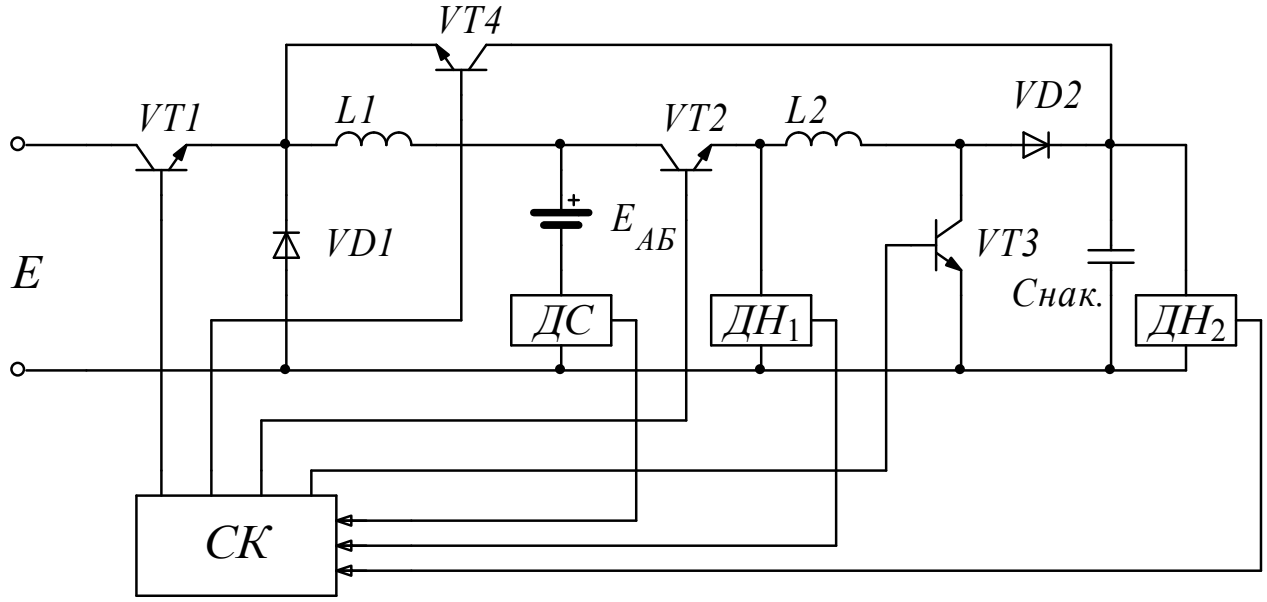


Рисунок 2.1 – Схема пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом

Схема складається з двох ШІП. Перший – понижуючого типу на елементах *VT*1, *VD*1, *L*1, $E_{АБ}$, формує зарядний імпульс. Другий ШІП – підвищуючого типу на елементах *L*2, *VT*3, *VD*2, *Снак.*, формує розрядний імпульс, енергія якого зберігається у накопичувальному конденсаторі *Снак.*.

Транзистор *VT*2 використовується для підключення акумуляторної батареї (**АБ**) до підвищуючого ШІП. При досягненні на накопичувальному конденсаторі *Снак.* визначеної напруги його потрібно розрядити на АБ. Розряд накопичувального конденсатора проводиться ШІП понижуючого типу на елементах *VT*4, *VD*1, *L*1, $E_{АБ}$, під час формування зарядного імпульсу. Схема містить також систему керування (*СК*), датчик струму (*ДС*) і датчики напруги ($ДН_1$, $ДН_2$).

2.2 Принцип роботи пристрою

Пристрій працює наступним чином. Напруга мережі (*E*) надходить на вхід понижуючого ШІП, який формує імпульс зарядного струму необхідної амплітуди. В проміжках між зарядними імпульсами формується розрядний імпульс акумуляторної батареї через транзистор *VT2,* який використовується для підключення АБ до підвищуючого ШІП, який формує імпульс розрядного струму, енергія якого зберігається на накопичувальному конденсаторі *Снак.*. При досягненні необхідної напруги на накопичувальному конденсаторі він використовується як джерело напруги замість основного (*E*) у ШІП понижуючого типу на елементах *VT*4, *VD*1, *L*1, $E_{АБ}$, 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 асиметричним струмом. За рахунок того, що енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі, відпадає необхідність у сумарному струмі зарядного пристрою рівному 1,1 від струму заряду акумулятора, забезпечується підвищення ККД зарядного пристрою.

Перевагою запропонованого пристрою також є те, що в ньому використовується імпульсний метод регулювання, на відміну від пристрою,

запропонованому в [3], в якому використовується безперервне регулювання. Головна перевага імпульсного методу регулювання – високий ККД, який, як правило, перевищує 80 – 90% [8].

Окрім високого ККД, імпульсний метод регулювання має ще ряд переваг у порівнянні з безперервним регулюванням:

1) ефективне використання параметрів регулюючого елемента, який може працювати в режимах, близьких до максимально допустимих значень струму і напруги;

2) менші масогабаритні показники, оскільки завдяки високому ККД втрати потужності незначні і немає потреби в радіаторах для розсіювання тепла, що виділяється;

3) менша чутливість до зміни температури оточуючого середовища, оскільки регулюючим фактором є *тривалість імпульсу,* а не *опір* регулюючого елемента [8].

2.3 Аналіз електромагнітних процесів

Основна увага при розробці вентильних перетворювачів приділяється отриманню найбільшого коефіцієнту перетворення енергії, що досягається, в першу чергу, роботою вентилів у якості силових ключів з двома станами – відкритий та закритий. В силу цього в теорії вентильних перетворювачів найбільше розповсюдження отримали ключові моделі вентилів, що відображають головним чином ключовий характер роботи напівпровідникових приборів в перетворювальних пристроях. Ключова модель діода відповідає кусочно-лінійній апроксимації його ВАХ двома прямими лініями. В залежності від нахилу апроксимуючих прямих діод моделюється наступним чином: у відкритому стані – активним опором $R_{VD}^{пр}$ чи короткозамкненою гілкою; у закритому стані – активним опором $R_{VD}^{звор}$ чи розімкнутою гілкою. Короткозамкнена та розімкнена гілки отримуються у результаті замикання чи розмикання входячого до складу еквівалентних схем ідеального ключа S [9].

Ключова модель транзистору, працюючого в ключовому режимі, отримується аналогічним чином. З урахуванням вищезазначеного створена еквівалентна схема заміщення схеми пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом, яка зображена на рис. 2.2.

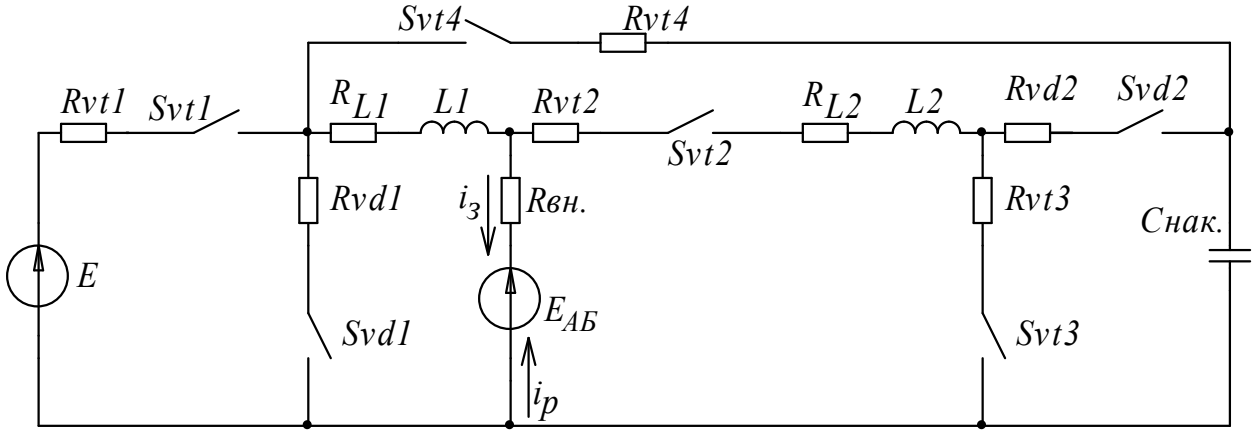


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема заміщення схеми пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом

Розглянемо п’ять випадків замкнення ключів і диференційні рівняння, які їх описують:

1). Ключ *Svt*1 – замкнений; ключі *Svd*1, *Svt*2, *Svt*3, *Svd*2, *Svt*4 – розімкнуті;

$$L1\frac{di_з}{dt}+\left(R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.}\right)\cdot i_з+E_{АБ}=E;$$

2). Ключ *Svt*1 – розімкнутий, *Svd*1 – замкнений, а ключі *Svt*2, *Svt*3, *Svd*1, *Svt*4 – розімкнуті;

$$L1\frac{di_з}{dt}+\left(R_{vd1}+R_{L1}+R_{вн.}\right)\cdot i_з+E_{АБ}=0;$$

3). Ключі *Svt*2 та *Svt*3 – замкнені, а *Svt*1, *Svd*1, *Svd*2, *Svt*4 – розімкнуті;

$$L2\frac{di_p}{dt}+\left(R_{вн.}+R_{vt2}+R_{L2}+R_{vt3}\right)\cdot i_p=E_{АБ};$$

4). Ключі *Svt*2 та *Svd*2 – замкнені, а *Svt*1, *Svd*1, *Svt*3, *Svt*4 – розімкнуті;

$$L2\frac{di_p}{dt}+\left(R_{вн.}+R_{vt2}+R_{L2}+R_{vd2}\right)\cdot i_p+\frac{1}{Снак.}\int_{t_1}^{t_2}i_p dt+U_0=E_{АБ};$$

де U_0 – початкова напруга на конденсаторі;

5). Ключ *Svt*4 – замкнений, а ключі *Svt*1, *Svd*1, *Svt*2, *Svt*3, *Svd*2 – розімкнуті;

$$L1\frac{di_з}{dt}+\left(R_{вн.}+R_{vt2}+R_{L2}+R_{vd2}\right)\cdot i_з+\frac{1}{Cнак.}\int_{t_1}^{t_2} i_з dt+E_{АБ}=U_0.$$

Для розрахунку перехідних процесів в схемі можна використати методику розрахунку перехідних процесів за допомогою функцій вільного режиму, запропоновану в [10]. Отже, отримаємо рішення:

1). Якщо *Svt*1 – замкнений; *Svd*1, *Svt*2, *Svt*3, *Svd*2, *Svt*4 – розімкнуті, то для струму заряду можемо записати:

$$i_з\left(t\right)=\frac{E-E_{АБ}}{R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.}}\left(1-f_{L1L1}(t)\right)+I_0\cdot f_{L1L1}(t),$$

де $f_{L1L1}(t)$ – функція вільного режиму: $f_{L1L1}(t)=e^{-\frac{t}{\tau}}$,

I_0 – початкове значення струму в індуктивності,

τ – стала часу електричного ланцюга (стала часу *RL* ланцюга): $\tau=\frac{L1}{R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.}}$;

Отже, можемо записати для струму заряду:

$$i_з\left(t\right)=\frac{E-E_{АБ}}{R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau}};$$

2). За умови якщо *Svt*1 – розімкнутий, *Svd*1 – замкнений, а *Svt*2, *Svt*3, *Svd*1, *Svt*4 – розімкнуті, струм заряду дорівнює:

$$i_з\left(t\right)=\frac{-E_{АБ}}{R_{vd1}+R_{L1}+R_{вн.}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

стала часу ланцюга: $\tau=\frac{L1}{R_{vd1}+R_{L1}+R_{вн.}}$;

3). У випадку коли *Svt*2 та *Svt*3 – замкнені, а *Svt*1, *Svd*1, *Svd*2, *Svt*4 – розімкнуті, розрядний струм буде:

$$i_p\left(t\right)=\frac{E_{АБ}}{R_{вн.}+R_{vt2}+R_{L2}+R_{vt3}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

стала часу ланцюга: $\tau = \dfrac{L1}{R_{вн.} + R_{vt2} + R_{L2} + R_{vt3}}$;

4). Коли *Svt*2 та *Svd*2 – замкнені, а *Svt*1, *Svd*1, *Svt*3, *Svt*4 – розімкнуті, можливі наступні випадки перехідного процесу при розряді АБ на накопичувальний конденсатор *Снак.*:

4.1). Аперіодичний перехідний процес при $R > 2\rho$,

де $R = R_{вн.} + R_{vt2} + R_{L2} + R_{vd2}$ – сумарний опір ланцюга;

$\rho = \sqrt{\dfrac{L2}{Снак.}}$ – хвильовий опір контуру;

$$i_p(t) = \frac{E_{АБ}}{R} - \frac{E_{АБ}}{R} f_{L2L2}(t) - E_{АБ} f_{L2Снак.}(t) + I_0 f_{L2L2}(t) + U_0 f_{L2Снак.}(t);$$

де $f_{L2L2}(t)$ і $f_{L2Снак.}(t)$ – функції вільного режиму електричного ланцюга:

$$f_{L2L2}(t) = \frac{1}{p_1 - p_2}\left(p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}\right);$$

$$f_{L2Снак.}(t) = -\frac{1}{(p_1 - p_2)L2}\left(e^{p_1 t} - e^{p_2 t}\right);$$

I_0 – початкове значення струму в індуктивності;

U_0 – початкова напруга на конденсаторі;

де $p_1 = -a + b$ і $p_2 = -a - b$ – корені характеристичного рівняння;

$a = \dfrac{R}{2 \cdot L2}$ – коефіцієнт затухання контуру;

$$b = \sqrt{a^2 - \omega_p^2} = \sqrt{\frac{R^2}{4 \cdot L2^2} - \frac{1}{L2 \cdot Снак.}};$$

$\omega_p = \dfrac{1}{\sqrt{L2 \cdot Снак.}}$ – резонансна частота контуру.

4.2). Коливальний перехідний процес при $R < 2\rho$:

$$i_p(t) = \frac{E_{АБ}}{R} - \frac{E_{АБ}}{R} f_{L2L2}(t) - E_{АБ} f_{L2Снак.}(t) + I_0 f_{L2L2}(t) + U_0 f_{L2Снак.}(t);$$

де функції вільного режиму електричного ланцюга наступні:

$$f_{L2L2}(t)=e^{-at}\left(\cos\omega_0 t-\frac{a}{\omega_0}\sin\omega_0 t\right);$$

$$f_{L2Снак.}(t)=-\frac{1}{\omega_0\cdot L2}e^{-at}\sin\omega_0 t\ ;$$

де $\omega_0=\sqrt{\omega_p^2-\alpha^2}=\sqrt{\frac{1}{L2\cdot Снак.}-\frac{R^2}{4\cdot L2^2}}=\omega_p\sqrt{1-\left(\frac{R}{2\rho}\right)^2}$ – частота вільних (або власних) коливань контуру.

5). Коли *Svt*4 – замкнений; *Svt*1, *Svd*1, *Svt*2, *Svt*3, *Svd*2 – розімкнуті можливі наступні випадки перехідного процесу при розряді накопичувального конденсатора *Снак.* на АБ:

5.1). Аперіодичний перехідний процес при $R>2\rho$,

де $R=R_{vt4}+R_{L1}+R_{вн.}$ – сумарний опір ланцюга;

$\rho=\sqrt{\frac{L1}{Снак.}}$ – хвильовий опір контуру;

$$i_з(t)=-\left(\frac{E_{АБ}}{R}-\frac{E_{АБ}}{R}f_{L1L1}(t)-E_{АБ}f_{L1Снак.}(t)+I_0 f_{L1L1}(t)+U_0 f_{L1Снак.}(t)\right);$$

де функції вільного режиму:

$$f_{L1L1}(t)=\frac{1}{p_1-p_2}\left(p_1e^{p_1t}-p_2e^{p_2t}\right);$$

$$f_{L1Снак.}(t)=-\frac{1}{\left(p_1-p_2\right)L2}\left(e^{p_1t}-e^{p_2t}\right);$$

де $p_1=-a+b$ і $p_2=-a-b$ – корені характеристичного рівняння;

$a=\frac{R}{2\cdot L1}$ – коефіцієнт затухання контуру;

$$b=\sqrt{a^2-\omega_p^2}=\sqrt{\frac{R^2}{4\cdot L1^2}-\frac{1}{L1\cdot Снак.}};$$

$\omega_p=\frac{1}{\sqrt{L1\cdot Снак.}}$ – резонансна частота контуру.

5.2). Коливальний перехідний процес при $R<2\rho$:

$$i_з(t) = -\left(\frac{E_{АБ}}{R} - \frac{E_{АБ}}{R} f_{L1L1}(t) - E_{АБ} f_{L1Снак.}(t) + I_0 f_{L1L1}(t) + U_0 f_{L1Снак.}(t) \right),$$

де функції вільного режиму:

$$f_{L1L1}(t) = e^{-at}\left(\cos\omega_0 t - \frac{a}{\omega_0}\sin\omega_0 t \right);$$

$$f_{L1Снак.}(t) = -\frac{1}{\omega_0 \cdot L1} e^{-at}\sin\omega_0 t;$$

де $\omega_0 = \sqrt{\omega_p^2 - \alpha^2} = \sqrt{\frac{1}{L1 \cdot Снак.} - \frac{R^2}{4 \cdot L1^2}} = \omega_p \sqrt{1 - \left(\frac{R}{2\rho} \right)^2}$ – частота вільних (або власних) коливань контуру.

Отримані рівняння дозволяють провести розрахунок електромагнітних процесів схеми, але доцільніше буде використати спеціалізовані програмні пакети, призначені для розрахунку електромагнітних процесів в електричних схемах, оскільки це збереже час та дозволить точніше провести моделювання.

2.4 Оптимізація заряду накопичувального конденсатора та вибір величини його ємності

Оптимізація заряду накопичувального конденсатора полягає у тому, що конденсатор потрібно зарядити до необхідної напруги за мінімальний час. Для оптимального заряду конденсатора потрібно максимально ефективно використовувати енергію розрядного імпульсу акумулятора. Згідно [11] для того, щоб втрати енергії розрядного імпульсу були мінімальними, потрібно розрахувати закон зміни коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП.

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

$$\gamma = \frac{U_H - U_{вх.}}{U_H};$$

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

Згідно [12] втрати мінімальні, коли приріст напруги $\Delta U_{Снак.}$ для кожної ступіней заряду величина постійна і дорівнює:

$$\Delta U_{Снак.} = \frac{I \cdot t_{зар.}}{C_{нак.}}.$$

Час заряду однієї ступіні: $t_{зар.} = \frac{1}{f} \cdot \gamma$.

Враховуючи втрати у елементах схеми, перехідні процеси та інерційність зміни напруги на виході підвищуючого ШІП, у формулі для $t_{зар.}$ коефіцієнт γ можна прирівняти одиниці та приріст напруги $\Delta U_{Снак.}$ потрібно вибирати в 2...5 разів більший. З урахуванням того, що $\gamma = 1$, формулу для розрахунку приросту напруги $\Delta U_{Снак.}$ запишемо наступним чином:

$$\Delta U_{Снак.} \approx \frac{I \cdot \frac{1}{f}}{C_{нак.}},$$

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

$$\gamma(U_{Снак.}, U_{вх.}) = \frac{U_{Снак.} + \Delta U_{Снак.} - U_{вх.}}{U_{Снак.} + \Delta U_{Снак.}}. \qquad (2.1)$$

Значення напруги живлення підвищуючого ШІП ($U_{вх.}$) і напруги на накопичувальному конденсаторі ($U_{Снак.}$), необхідні для розрахунку коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП, отримуються за допомогою датчиків напруги $ДН_1$ та $ДН_2$ (див. рис. 2.1).

Дослідивши залежність коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП від величини ємності накопичувального конденсатора та напруги на ньому $\gamma\left(Снак., U_{Снак.}\right)$, графіки якої зображені на рис. 2.3–2.4, можна зробити висновок, що величина коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП 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 ШІП на елементах *VT*4, *VD*1, *L*1, $E_{АБ}$, під час формування зарядного імпульсу (див. рис. 2.1).

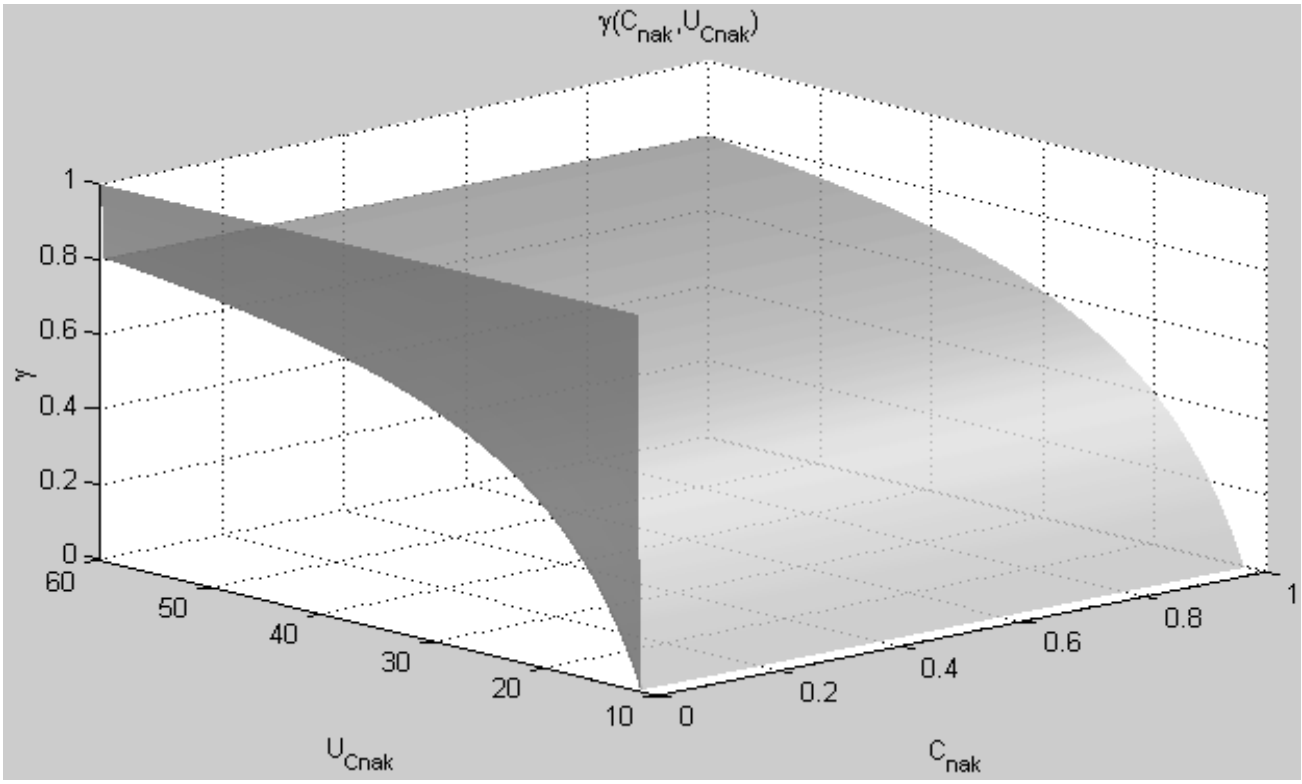


Рисунок 2.3 – Графік залежності коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП від величини ємності накопичувального конденсатора та напруги на ньому $\left(\text{при } Снак. = 0...1\ Ф\right)$

Нижче приводиться спрощена формула, яка використовується для попередньої оцінки величини ємності накопичувального конденсатора:

$$Снак. \approx \frac{I_{зар.} \cdot t}{U_{Снак.\max} - U_{Снак.\min}} \cdot \gamma_{пон.ШІП} = \frac{I_{зар.} \cdot t}{U_{Снак.\max} - U_{Снак.\min}} \cdot \frac{E^*_{АБ}}{\frac{U_{Снак.\max} + U_{Снак.\min}}{2}}; \quad (2.2)$$

де $I_{зар.}$ – величина струму зарядного імпульсу;

t – час заряду АБ від накопичувального конденсатора, який рекомендується обирати не більшим тривалості імпульсу зарядного струму;

$U_{Снак.\max}$ – максимальна напруга, до якої буде заряджатися накопичувальний конденсатор: $U_{Снак.\max} \approx E + 20\%$;

$U_{Снак.\min}$ – мінімальна напруга, до якої буде розряджатися накопичувальний конденсатор: $U_{Снак.\min} \approx E - 20\%$;

E – напруга мережі живлення;

$\gamma_{пон.ШІП}$ – коефіцієнт заповнення імпульсного циклу понижуючого ШІП на елементах $VT4$, $VD1$, $L1$, $E_{АБ}$;

$E^*_{АБ}$ – напруга на АБ при її заряді.

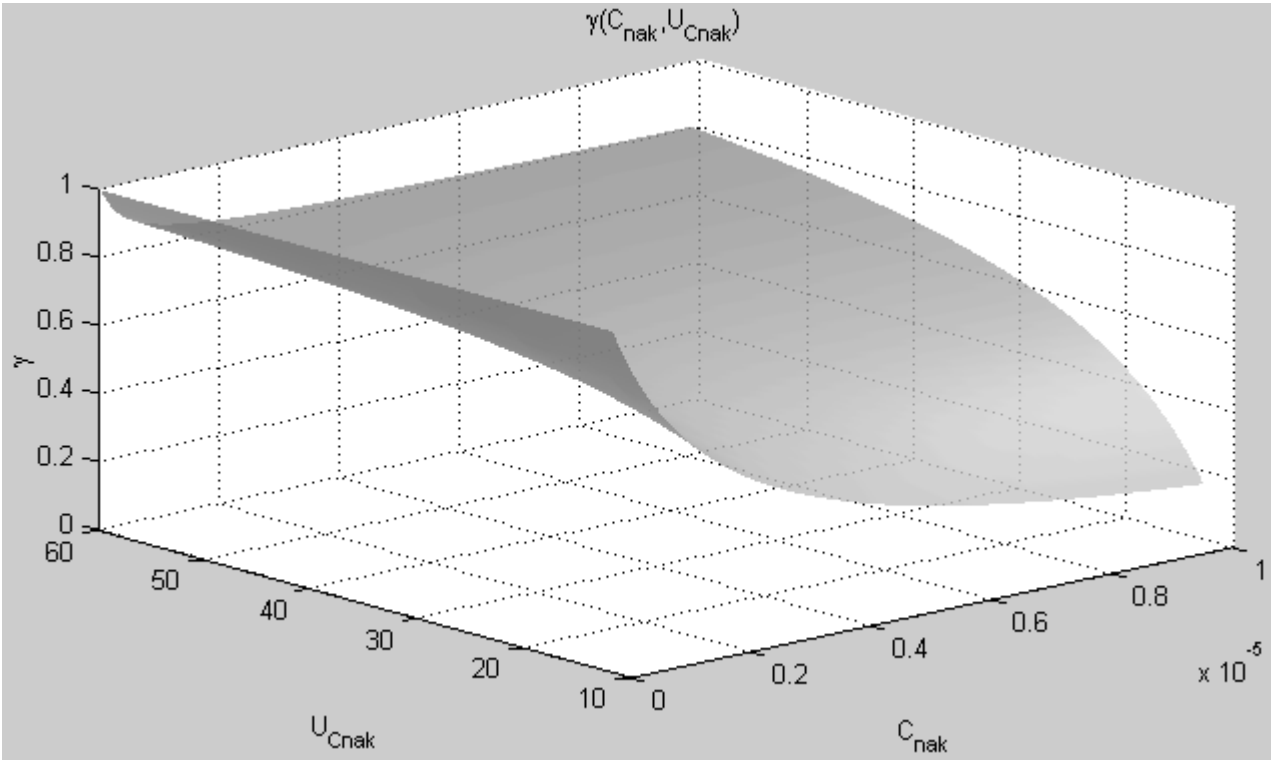


Рисунок 2.4 – Графік залежності коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП від величини ємності накопичувального конденсатора та напруги на ньому $\left(\text{при } Снак. = 0...10\ мкФ\right)$

2.5 Вибір типу силових ключів для пристрою

При виборі силових ключів для пристрою потрібно пам‘ятати, що в MOSFET-транзисторах (*Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor*) паралельно транзистору технологічно вбудований зворотній діод [13] і тому використовувати їх в якості силових ключів *VT*1 і *VT*4 не можна, оскільки при формуванні зарядного імпульсу понижуючим ШІП накопичувальний конденсатор буде заряджатися від мережі живлення (*E*) із-за наявності вбудованого зворотного діоду у транзистор *VT*4, а при його розряді на АБ значна частина накопленої в ньому енергії буде передаватися через вбудований у транзистор *VT*1 зворотній діод у мережу живлення. Хоча з іншого боку, MOSFET з номінальними напругами 200 *В* та менше мають більш низьке значення напруги у включеному стані, ніж IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) (пряме падіння напруги у IGBT-транзисторів 4-го покоління 1,0–1,5 *В*), і залишаються неперевершеними в цьому відношенні в області низьких робочих напруг і комутуємих струмів до 50 А [14].

Отже, з вище зазначеного можна зробити висновок, що доцільно вибирати у якості силових ключів *VT*2 та *VT*3 MOSFET-транзистори, оскільки вони мають більш низьке значення напруги у включеному стані при номінальних напругах менше 200 *В*, а *VT*1 та *VT*4 вибирати IGBT-транзистори, оскільки вони, на відміну від MOSFET, не мають паралельно транзистору технологічно вбудований зворотній діод.

2.6 Моделювання електромагнітних процесів

Моделювання електромагнітних процесів роботи пристрою проводилося за допомогою пакету розгалуження математичної системи MATLAB 6 – Simulink 4, який представляє користувачу зручні і прості засоби візуального моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем. Пакет розгалуження Simulink 4 служить для імітаційного моделювання моделей, які складаються з графічних блоків із заданими властивостями (параметрами) [13, 15–17].

Модель пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом зображена на рис.2.5. Модель складається з силової частини та системи керування (СК). До СК входять: PWM – підсистема широтно-імпульсного модулятора (ШІМ); Capacitor Charge Control – підсистема керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШІМ; Commutation Control – підсистема керування комутацією транзисторів.

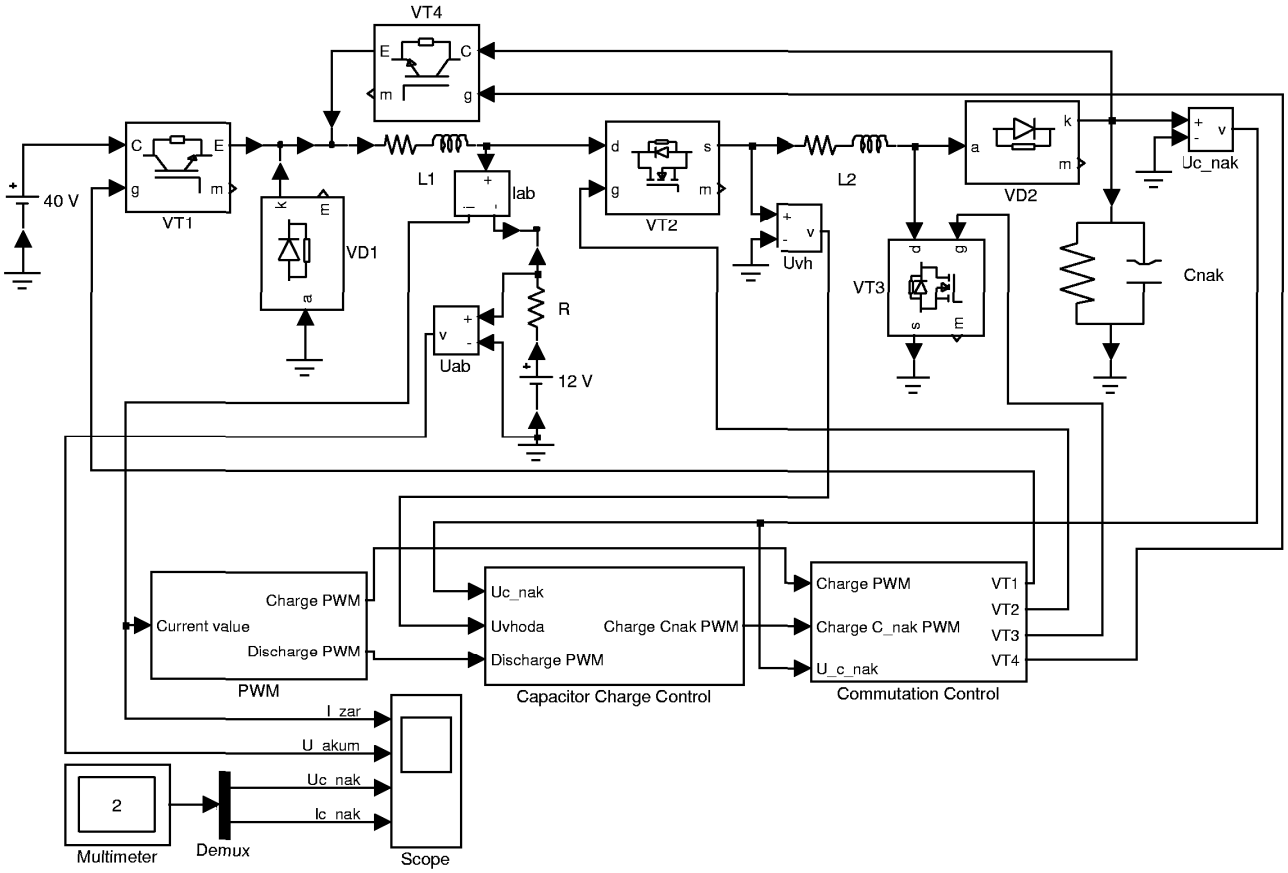


Рисунок 2.5 – Модель пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом

Силова частина моделі, зображеної на рис. 2.5, 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);
- спрощена модель акумуляторної батареї, яка складається з джерела живлення та опору (R, 12 V);
- накопичувальні індуктивності (дроселі) (L1, L2);
- накопичувальний конденсатор (Cnak);
- вимірювач миттєвого струму у акумуляторній батареї (Iab);
- вимірювачі миттєвих напруг на акумуляторній батареї (Uab), на вході підвищуючого ШІП (Uvh) і на накопичувальному конденсаторі (Uc_nak);
- Multimeter – блок для спостереження (вимірювання) миттєвих значень величин, які вибрані у полі Measurement відповідних блоків (у нашому випадку це струм у конденсаторі та напруга на ньому);
- блок Demux – для розділення сигналів;
- блок Scope – для спостереження (вимірювання) миттєвих значень струму у АБ та напруги на ній, а також струму у накопичувальному конденсаторі та напруги на ньому.

Підсистема ШІМ, модель якої зображена на рис. 2.6, генерує сигнали керування транзисторами понижуючих ШІП, 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 ШІП, що використовується для заряду накопичувального конденсатора, які передаються у підсистему керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШІП.

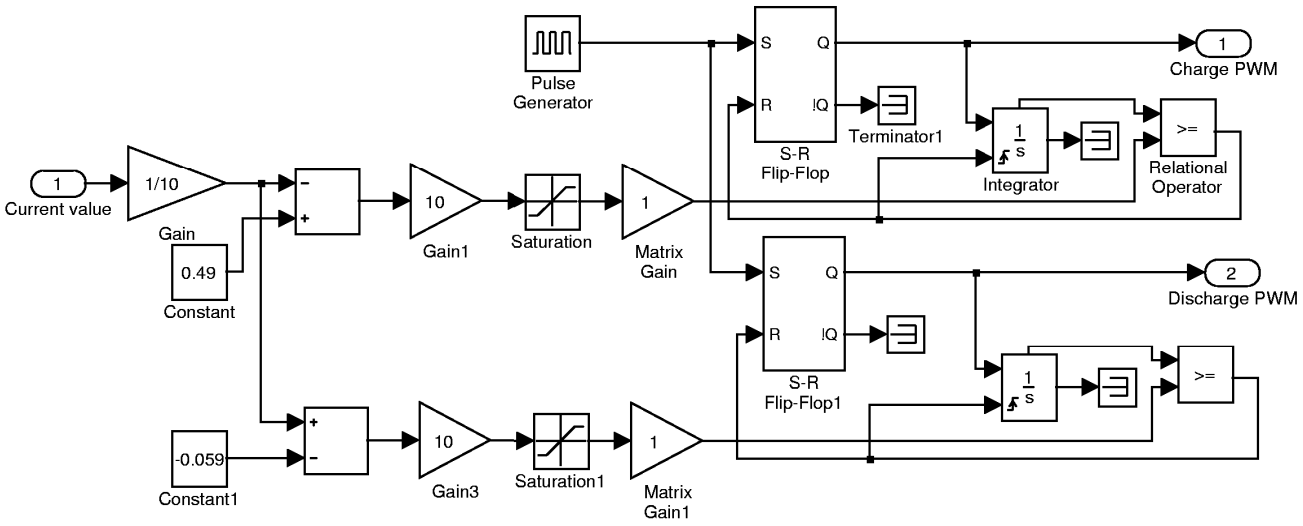


Рисунок 2.6 – Модель підсистеми ШІМ

В підсистемі керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШІП, модель якої зображена на рис. 2.7, виконується розрахунок і генерація коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП, що використовується для заряду накопичувального конденсатора, за формулою (2.1), а також проводиться корекція цього коефіцієнта заповнення у разі відхилення струму розрядного імпульсу від заданого значення.

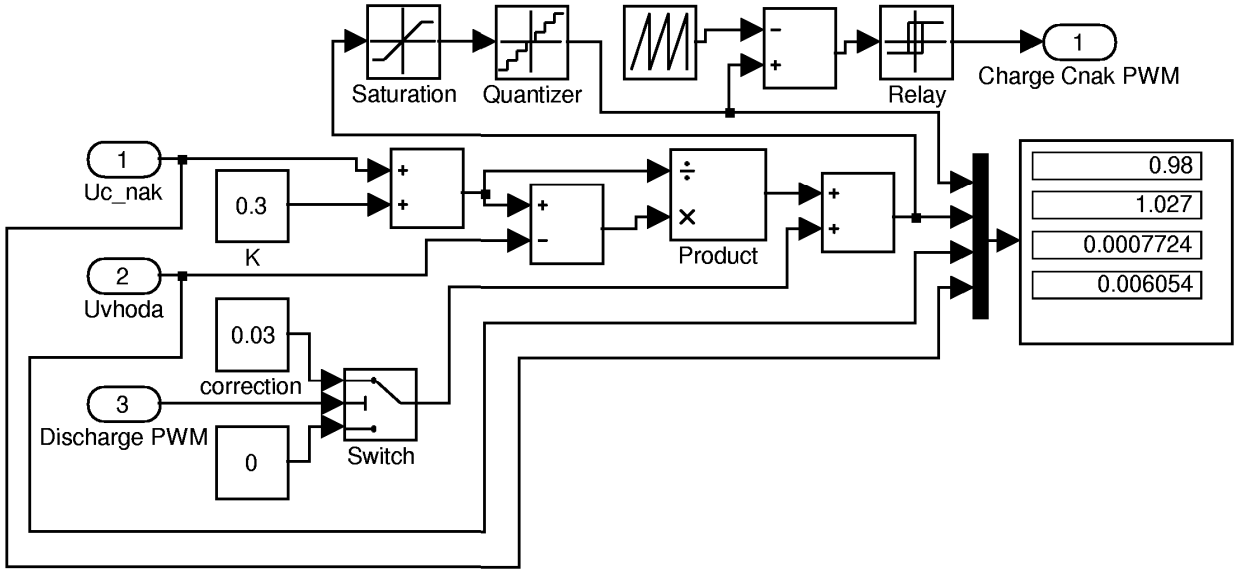


Рисунок 2.7 – Модель підсистеми керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШІП

Підсистема керування комутацією транзисторів, модель якої зображена на рис. 2.8, 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 ШІП: подається сигнал ШІМ на транзистор VT1 або VT4, що, у свою чергу, залежить від напруги на конденсаторі (якщо напруга на конденсаторі досягає $U_{Снак.} \geq 50B$ – працює VT4, а якщо понижується до $U_{Снак.} \leq 30B$ – знову починає працювати VT1); або вмикають транзистор VT2 і починається розряд АБ на накопичувальний конденсатор.

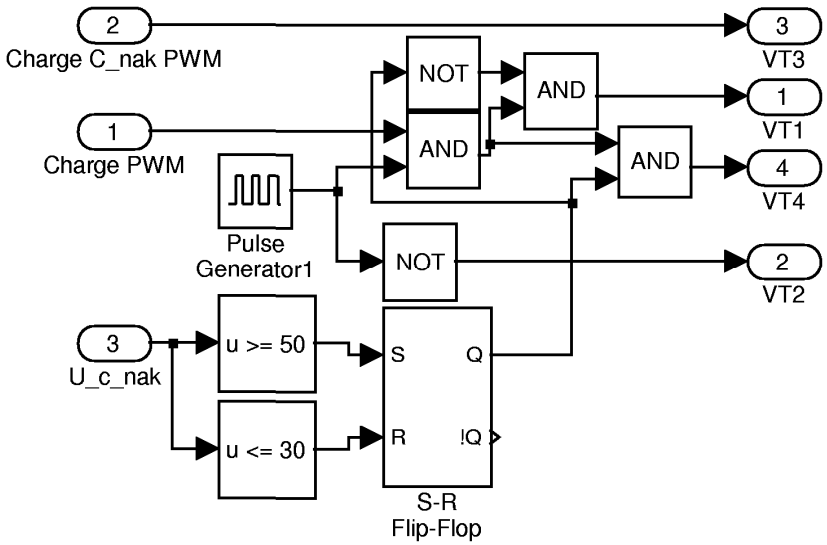


Рисунок 2.8 – Модель підсистеми керування комутацією транзисторів

Результати моделювання зображені на рис. 2.9–2.11.

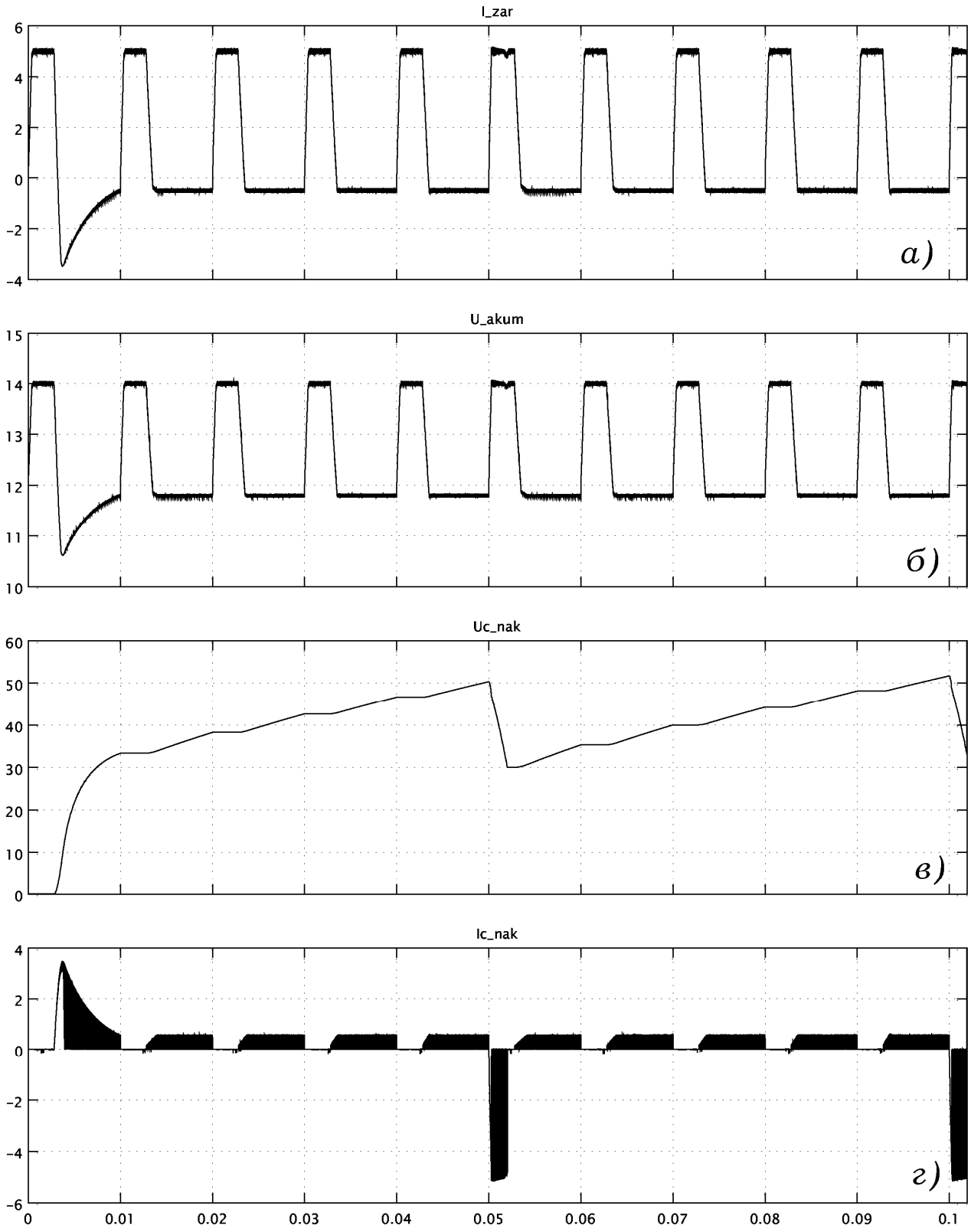


Рисунок 2.9 – Струм заряду АБ (*а*) та напруга на АБ під час її заряду (*б*), напруга на накопичувальному конденсаторі (*в*) та струм у ньому (*г*)

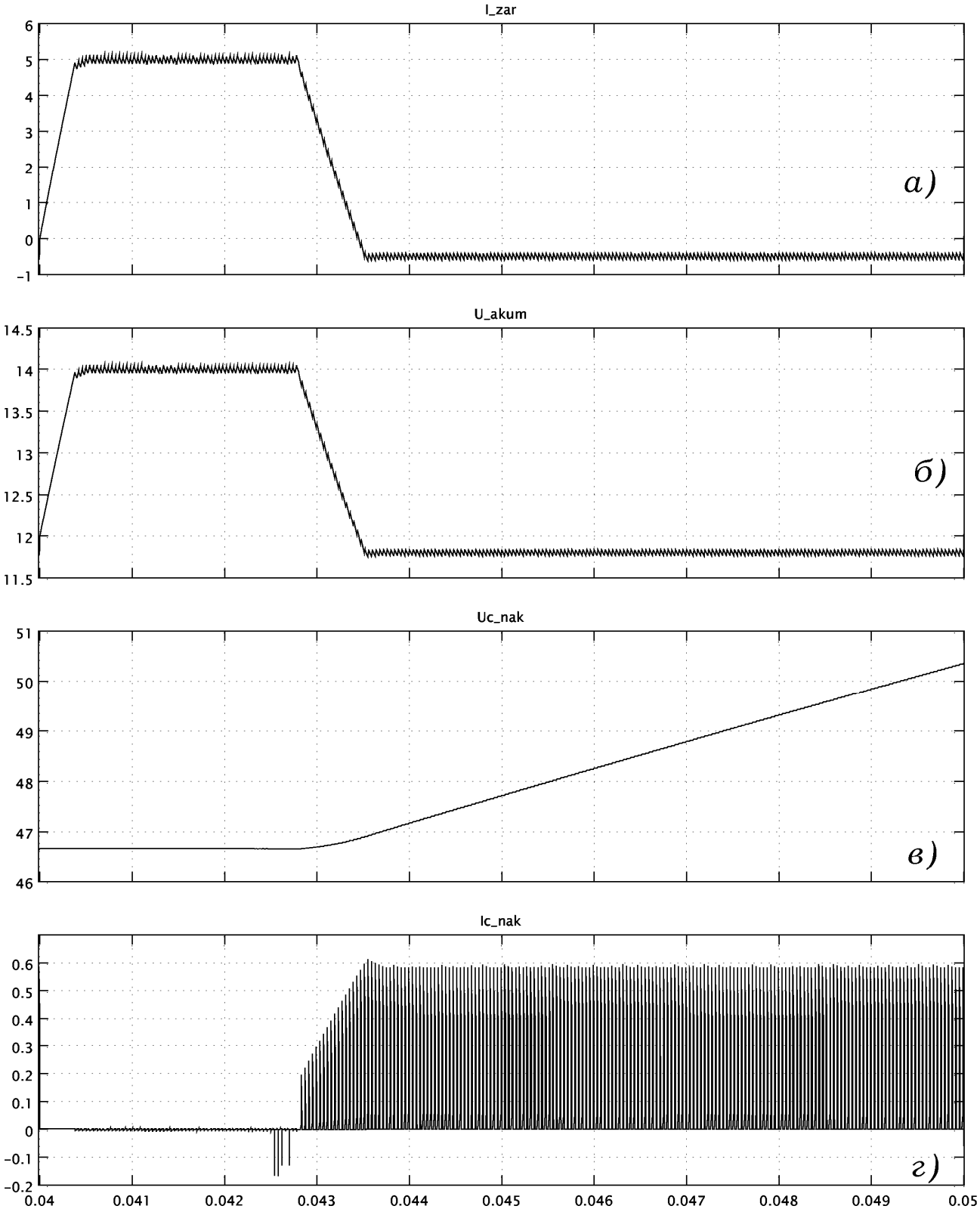


Рисунок 2.10 – Струм заряду АБ (*а*) та напруга на АБ під час її заряду (*б*), напруга на накопичувальному конденсаторі (*в*) та струм у ньому (*г*) (збільшена частина рис. 2.9)

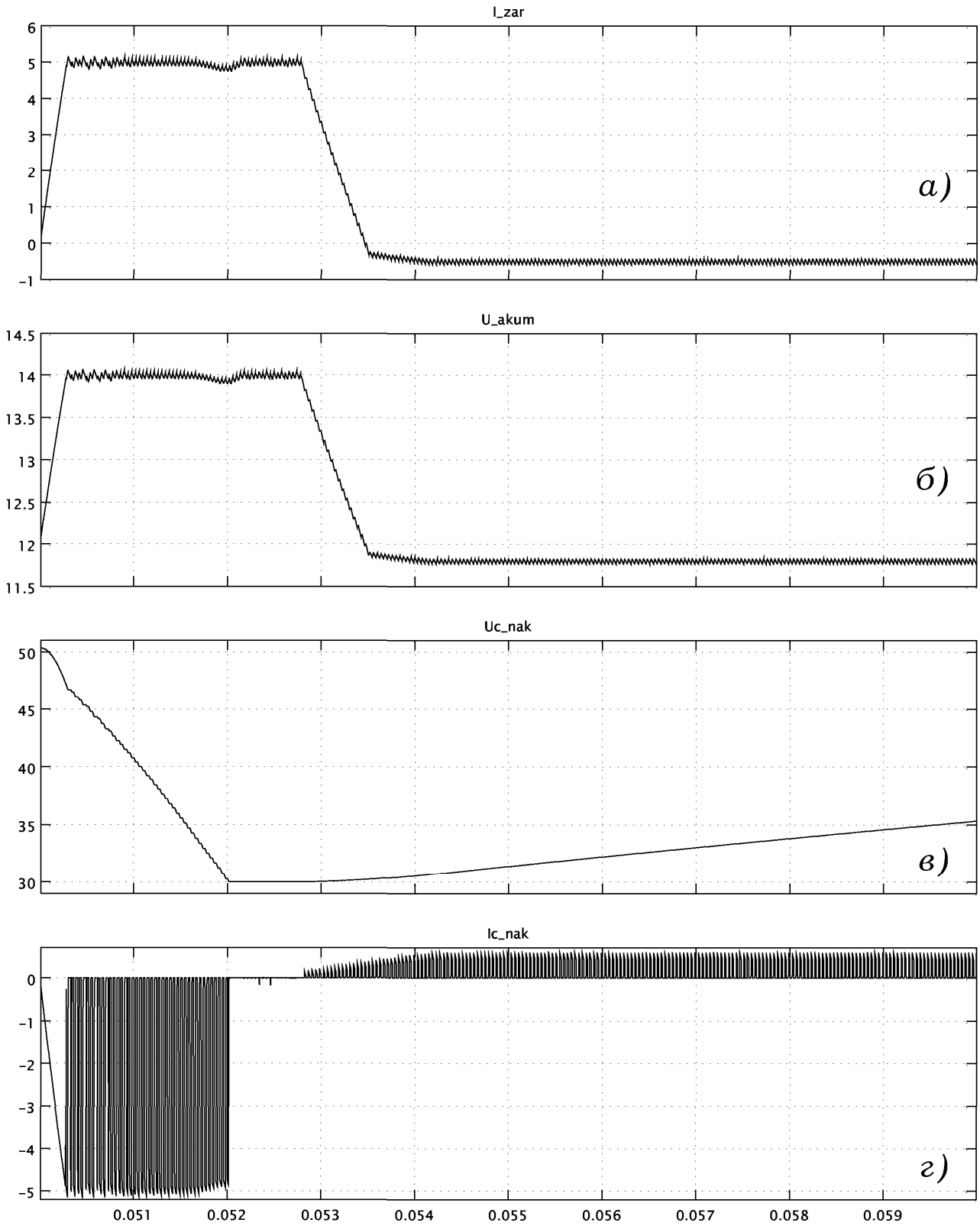


Рисунок 2.11 – Струм заряду АБ (*а*) та напруга на АБ під час її заряду (*б*), напруга на накопичувальному конденсаторі (*в*) та струм у ньому (*г*) під час його розряду

Як видно з результатів моделювання (рис. 2.9 (*а*)), пристрій забезпечує заряд АБ асиметричним струмом необхідних параметрів. При цьому енергія розрядного імпульсу зберігається накопичувальним конденсатором (рис. 2.9 (*в*), рис. 2.10 (*в*)) і потім знову передається АБ під час зарядного імпульсу (рис. 2.11 (*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 асиметричним струмом, схема якого запропонована в [3].

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано схему пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, який має наступні переваги: за рахунок того, що енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі, зменшується споживання енергії мережі на 10-12% у порівнянні з відомим пристроєм для заряду акумуляторів асиметричним струмом; використовується імпульсний метод регулювання, ККД якого, як правило, перевищує 80 – 90% [8].
2. Виведено формулу регулювання коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП, яка забезпечує оптимальний заряд конденсатора, що дає змогу максимально ефективно використовувати енергію розрядного імпульсу акумулятора.
3. Доведено, що доцільно вибирати у якості силових ключів *VT*2 та *VT*3 MOSFET-транзистори, оскільки вони мають більш низьке значення напруги у включеному стані при номінальних напругах менше 200 *В*, а *VT*1 та *VT*4 вибирати IGBT-транзистори, оскільки вони, на відміну від MOSFET, не мають паралельно транзистору технологічно вбудований зворотній діод, із-за наявності якого у транзисторі *VT*4 при формуванні зарядного імпульсу понижуючим ШІП накопичувальний конденсатор заряджався б від мережі живлення (*E*), а при розряді накопичувального конденсатора на АБ значна частина накопленої в ньому енергії передавалася б через вбудований у транзистор *VT*1 зворотній діод у мережу живлення.

Розділ 3 РОЗРОБКА СХЕМИ ТРИЛАНКОВОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ АСИМЕТРИЧНИМ СТРУМОМ

3.1 Схема триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом

Якщо до складу системи електроживлення входить декілька акумуляторних батарей, доцільною є розробка пристрою для їх одночасного заряду асиметричним струмом. Поширимо ідею заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з підвищеним ККД, розглянуту у розділі 2 для одної акумуляторної батареї, на випадок використання декількох акумуляторних батарей. Пропонується схема пристрою для заряду трьох акумуляторних батарей асиметричним струмом, яка зображена на рис. 3.1.

Це пристрій заряду акумуляторних батарей, який містить три зарядні ланки кожна з яких складається з двох ШІП. Перші – понижуючого типу на елементах: у 1 ланці – *VT*1, *VD*1, *L*1, $E_{АБ1}$; у 2 ланці – *VT*4, *VD*3, *L*4, $E_{АБ2}$; у 3 ланці – *VT*7, *VD*5, *L*7, $E_{АБ3}$, формують зарядний імпульс у кожній з ланок. Другі ШІП – підвищуючого типу на елементах: у першій ланці – *L*2, *VT*3, *L*3, *VD*2; у другій ланці – *L*5, *VT*6, *L*6, *VD*4; у третій ланці – *L*8, *VT*9, *L*9, *VD*6, формують розрядний імпульс, енергія якого передається у накопичувальний дросель понижуючого ШІП наступної ланки, причому вихід підвищуючого ШІП останньої ланки з‘єднаний з накопичувальним дроселем понижуючого ШІП першої ланки. Транзистори *VT*2, *VT*5 і *VT*8 використовуються для підключення акумуляторної батареї (АБ) до підвищуючого ШІП. Схема містить також систему керування (*СК*) і датчики струму ($ДС_1$, $ДС_2$ та $ДС_3$).

Внаслідок того, що до мережі живлення під’єднано три акумуляторні батареї, використання запропонованого пристрою дозволяє зменшити спотворення форми струму мережі живлення, оскільки споживання енергії рівномірно рознесено у часі на періоді напруги мережі живлення.

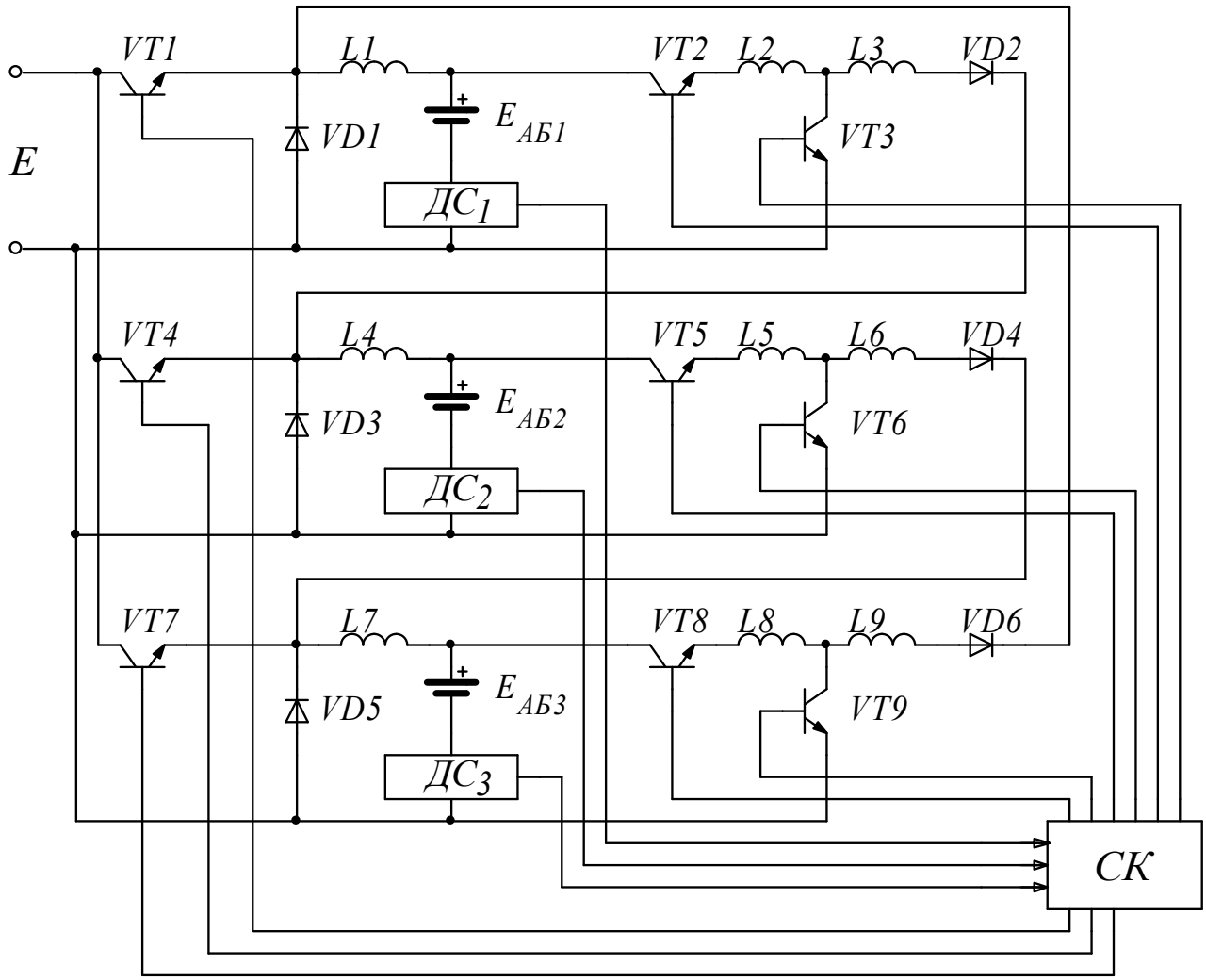


Рисунок 3.1 – Схема триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом

3.2 Принцип роботи пристрою

Пристрій працює наступним чином. Напруга мережі *E* надходить на вхід понижуючого ШІП першої ланки, який формує імпульс зарядного струму необхідної амплітуди. В проміжках між зарядними імпульсами формується розрядний імпульс акумуляторної батареї через транзистор *VT2,* що використовується для підключення АБ1 до підвищуючого ШІП, котрий формує імпульс розрядного струму, енергія якого передається у накопичувальний дросель ШІП наступної ланки, де сумується зі струмом, отриманим із мережі живлення, причому енергія імпульсу розрядного струму останньої ланки

передається у накопичувальний дросель ШІП першої ланки. Керування широтно-імпульсними перетворювачами пристрою здійснюється сигналами, які надходять з *СК* на входи керування.

Таким чином, пристрій забезпечує заряд акумуляторних батарей асиметричним струмом, форма якого у різних ланках зображена на рис. 3.2 (співвідношення амплітуд зарядної і розрядної складової струму 5:1). За рахунок того, що енергія розряду не втрачається, а передається з одної батареї у іншу, також відпадає необхідність у сумарному струмі зарядного пристрою, рівному 1,1 від струму заряду акумулятора, забезпечується підвищення ККД зарядного пристрою.

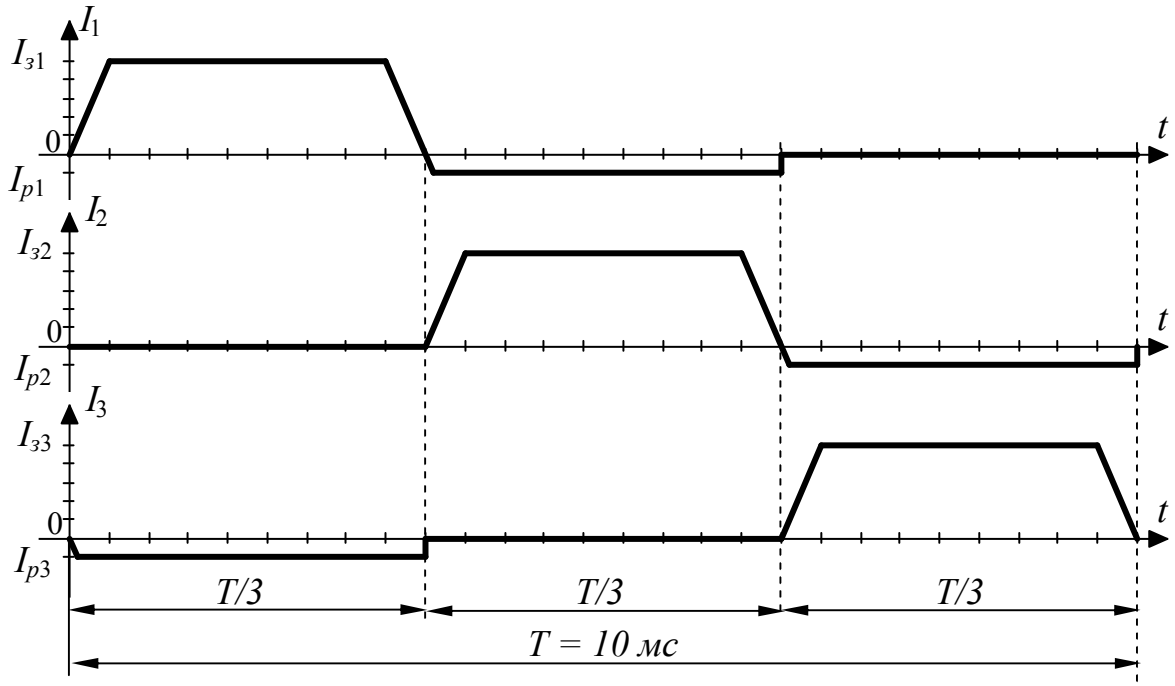


Рисунок 3.2 – Діаграми зарядного асиметричного струму у трьох ланках пристрою

Перевагою запропонованого пристрою, як і пристрою, запропонованого в розділі 2, також є те, що в ньому використовується імпульсний метод регулювання, на відміну від пристрою, запропонованому в [3], в якому використовується безперервне регулювання. Як вже зазначалось, головна

перевага імпульсного методу регулювання – високий ККД, який, як правило, перевищує 80 – 90% [8].

3.3 Аналіз електромагнітних процесів

З урахуванням допущень, розглянутих у п. 2.3, створена еквівалентна схема заміщення схеми триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, яка зображена на рис. 3.3.

Період роботи пристрою умовно можна розбити на три частини, на кожній з яких проходять ті ж самі процеси але у інших ланках схеми. В табл. 3.1 приведені періоди роботи силових ключів схеми та процеси, які відбуваються в ланці в ці періоди.

Таблиця 3.1 – Періоди роботи силових ключів схеми та процеси, які відбуваються в ланці в ці періоди

Період роботи схеми	Силові ключі, розділені по належності до ланок та процес, якій відбувається в ланці в даний період роботи схеми		
	Перша ланка	Друга ланка	Третя ланка
$k \cdot T ... \left(\frac{1}{3}+k\right) \cdot T,\ k \in Z$	*VT*1, *VD*1 заряд АБ1		*VT*8, *VT*9, *VD*6 розряд АБ3
$\left(\frac{1}{3}+k\right) \cdot T ... \left(\frac{2}{3}+k\right) \cdot T,\ k \in Z$	*VT*2, *VT*3, *VD*2 розряд АБ1	*VT*4, *VD*3 заряд АБ2	
$\left(\frac{2}{3}+k\right) \cdot T ... (1+k) \cdot T,\ k \in Z$		*VT*5, *VT*6, *VD*4 розряд АБ2	*VT*7, *VD*5 заряд АБ3

Розглянемо тільки випадки замкнення ключів на першій третині періоду роботи пристрою і диференційні рівняння, які їх описують, оскільки на двох інших третинах будуть проходити ті ж самі процеси, але в інших ланках схеми:

1). Ключ *Svt*1 – замкнений; ключі *Svd*1, *Svt*8, *Svt*9, *Svd*6 – розімкнуті;

$$L1\frac{di_{з1}}{dt}+\left(R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.1}\right)\cdot i_{з1}+E_{АБ1}=E;$$

2). Ключ *Svt*1 – розімкнутий, *Svd*1 – замкнений, а ключі *Svt*8, *Svt*9, *Svd*6 – розімкнуті;

$$L1\frac{di_{з1}}{dt}+\left(R_{vd1}+R_{L1}+R_{вн.1}\right)\cdot i_{з1}+E_{АБ1}=0;$$

3). Ключі *Svt*8 та *Svt*9 – замкнені, а *Svt*1, *Svd*1, *Svd*6 – розімкнуті;

$$L2\frac{di_{р3}}{dt}+\left(R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L2}+R_{vt9}\right)\cdot i_{р3}=E_{АБ3};$$

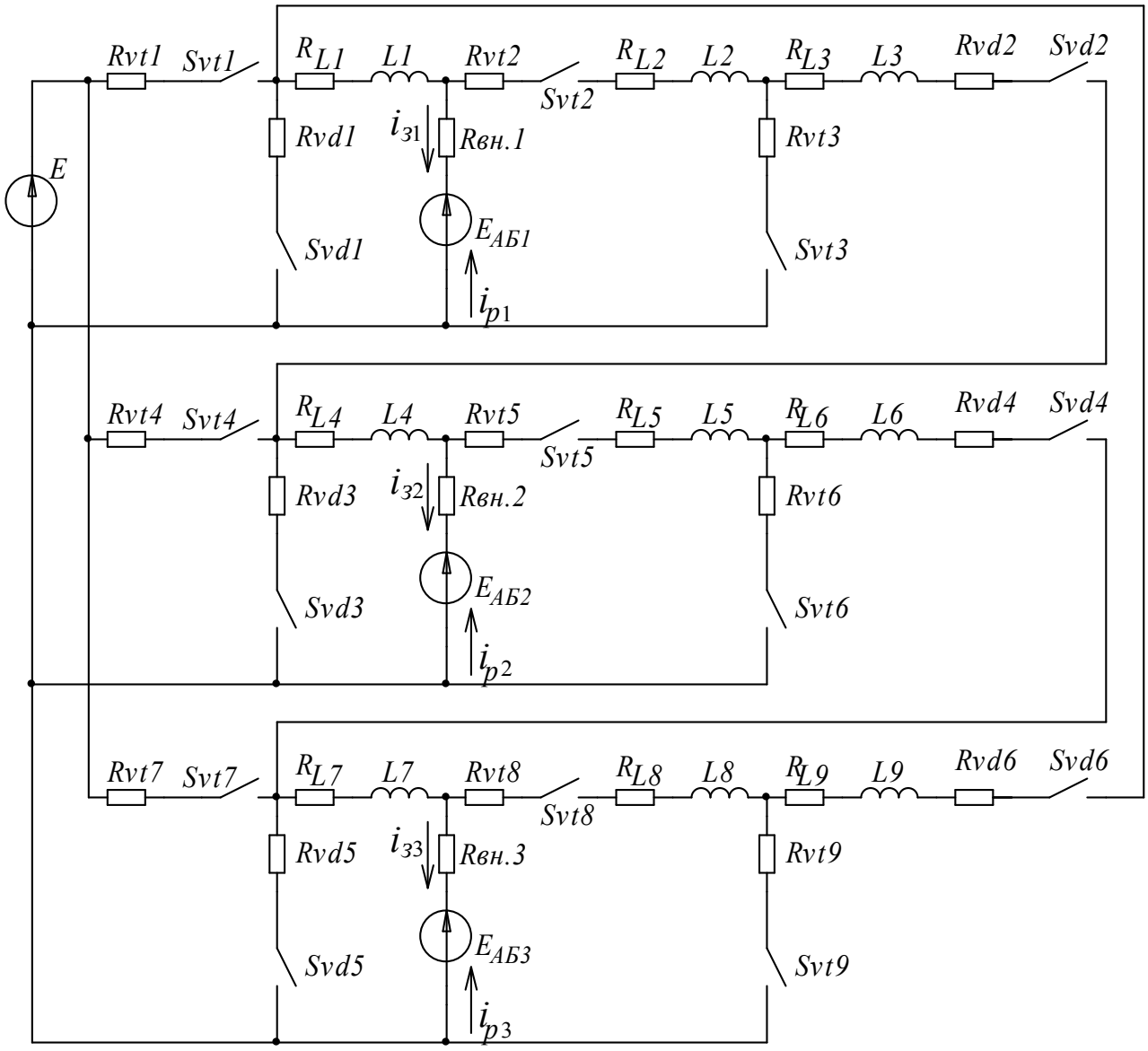


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема заміщення схеми триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом

Зауважимо, що взагалі у випадках *1)*, *2)* та 3*)* ключі *Svt*8 та *Svt*9 можуть бути замкнені з ключем *Svt*1, або *Svd*1, але оскільки ланцюги в таких випадках не зв'язані між собою, то розглядаємо їх роботу окремо.

4). Ключі *Svt*8 та *Svd*6 – замкнені, а *Svt*1, *Svd*1, *Svt*9 – розімкнуті;

$$(L8+L9)\frac{di_{p3}}{dt}+\left(R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L8}+R_{L9}+R_{vd6}+R_{L1}+R_{вн.1}\right)\cdot i_{p3}+E_{АБ1}=E_{АБ3};$$

5). Ключі *Svt*1, *Svt*8 та *Svd*6 – замкнені, а *Svd*1, *Svt*9 – розімкнуті;

$$\begin{cases} L1\dfrac{di_{дж.}}{dt}+\left(R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.1}\right)\cdot i_{дж.}+E_{АБ1}=E \\ (L8+L9+L1)\dfrac{di_{p3}}{dt}+\left(R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L8}+R_{L9}+R_{vd6}+R_{L1}+R_{вн.1}\right)\cdot i_{p3}+E_{АБ1}=E_{АБ3}. \\ i_{з1}(t)=i_{дж.}(t)+i_{p3}(t) \end{cases}$$

Для розрахунку перехідних процесів в схемі використовуємо методику розрахунку перехідних процесів за допомогою функцій вільного режиму, запропоновану в [10]. Отже, отримаємо рішення:

1). Якщо *Svt*1 – замкнений; *Svd*1, *Svt*8, *Svt*9 *Svd*6 – розімкнуті, то для струму заряду можемо записати:

$$i_{з1}(t)=\frac{E-E_{АБ1}}{R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.1}}\left(1-f_{L1L1}(t)\right)+I_0\cdot f_{L1L1}(t),$$

де $f_{L1L1}(t)$ – функція вільного режиму: $f_{L1L1}(t)=e^{-\frac{t}{\tau}}$,

I_0 – початкове значення струму в індуктивності,

τ – стала часу електричного ланцюга (стала часу *RL* ланцюга): $\tau=\dfrac{L1}{R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.1}}$;

Отже, можемо записати для струму заряду:

$$i_{з1}(t)=\frac{E-E_{АБ1}}{R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.1}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau}};$$

2). За умови якщо *Svt*1 – розімкнутий, *Svd*1 – замкнений, а *Svt*8, *Svt*9, *Svd*6 – розімкнуті, струм заряду дорівнює:

$$i_{з1}(t)=\frac{-E_{АБ1}}{R_{vd1}+R_{L1}+R_{вн.1}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

стала часу ланцюга: $\tau=\dfrac{L1}{R_{vd1}+R_{L1}+R_{вн.1}}$;

3). У випадку коли *Svt*8 та *Svt*9 – замкнені, а *Svt*1, *Svd*1, *Svd*6 – розімкнуті, розрядний струм буде:

$$i_{р3}(t)=\frac{E_{АБ3}}{R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L8}+R_{vt9}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

стала часу ланцюга: $\tau=\dfrac{L8}{R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L8}+R_{vt9}}$;

4). У випадку коли ключі *Svt*8 та *Svd*6 – замкнені, а *Svt*1, *Svd*1, *Svt*9 – розімкнуті, розрядний струм буде:

$$i_{р3}(t)=\frac{E_{АБ3}-E_{АБ1}}{R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L8}+R_{L9}+R_{vd6}+R_{L1}+R_{вн.1}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

стала часу ланцюга: $\tau=\dfrac{L8+L9+L1}{R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L8}+R_{L9}+R_{vd6}+R_{L1}+R_{вн.1}}$;

5). У випадку коли ключі *Svt*8, *Svd*6 та *Svt*1– замкнені, а *Svd*1, *Svt*9 – розімкнуті, зарядний струм буде:

$$i_{з1}(t)=i_{дж.}(t)+i_{р3}(t),$$

де $i_{дж.}(t)$ – струм джерела, а $i_{р3}(t)$ – розрядний струм третього ланцюга, який ми знайшли вище:

$$i_{дж.}(t)=\frac{E-E_{АБ1}}{R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.1}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}};$$

стала часу ланцюга: $\tau_1=\dfrac{L1}{R_{vt1}+R_{L1}+R_{вн.1}}$

$$i_{р3}(t)=\frac{E_{АБ3}-E_{АБ1}}{R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L8}+R_{L9}+R_{vd6}+R_{L1}+R_{вн.1}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)+I_0\cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

стала часу ланцюга: $\tau=\dfrac{L8+L9+L1}{R_{вн.3}+R_{vt8}+R_{L8}+R_{L9}+R_{vd6}+R_{L1}+R_{вн.1}}$.

Отримані рівняння дозволяють провести розрахунок електромагнітних процесів схеми, але, як вже було зазначено в п. 2.3, доцільніше буде використати спеціалізовані програмні пакети, призначені для розрахунку електромагнітних процесів в електричних схемах, оскільки це збереже час та дозволить точніше провести моделювання.

3.4 Розрахунок величин індуктивностей накопичувальних дроселів та коефіцієнту заповнення імпульсного циклу у підвищуючому ШІП

Для того, щоб відкрити діод (*VD*2, *VD*4, або *VD*6 – в залежності від того у якій ланці формується розрядний імпульс струму АБ) і забезпечити необхідну величину імпульсу розрядного струму, в підвищуючий ШІП перед діодом вводимо додатковий накопичувальний дросель (*L*3, *L*6 та *L*9). Також можна замість основного та додаткового накопичувальних дроселів в підвищуючому ШІП ввести накопичувальний дросель з відпайкою. Величина індуктивності додаткового дроселя розраховується за формулою:

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

де n – коефіцієнт трансформації дроселів підвищуючих ШІП, який знаходиться за формулою:

$$n = \frac{i_p}{i_з - i_p},$$

де i_p – величина імпульсу зарядного струму;

$i_з$ – величина імпульсу розрядного струму.

Величини індуктивностей накопичувальних дроселів у паралельних ланках повинні бути рівні:

$$L_1 = L_4 = L_7; \qquad L_2 = L_5 = L_8; \qquad L_3 = L_6 = L_9.$$

Також бажано щоб величина індуктивності накопичувального дроселя понижуючого ШІП була рівна величині індуктивності основного накопичувального дроселя підвищуючого ШІП: $L_{1(4,7)} = L_{2(5,8)}$.

Коефіцієнт заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП знаходиться по формулі:

$$\gamma = \frac{U_{вих.} - U_{вх.}}{U_{вих.}},$$

де $U_{вх.}$ – напруга живлення,

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

$$U_{вих.} = U_{VD}^{пр.} + E,$$

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

E – напруга джерела живлення схеми.

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

3.5 Вибір типу силових ключів для пристрою

В п. 2.5 були розглянуті MOSFET та IGBT-транзистори. Як вже зазначалося MOSFET з номінальними напругами 200 *В* та менше мають більш низьке значення напруги у включеному стані, ніж IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) (пряме падіння напруги у IGBT-транзисторів 4-го покоління 1,0–1,5 *В*), і залишаються неперевершеними в цьому відношенні в області низьких робочих напруг і комутуємих струмів до 50 А. Отже, можна зробити висновок, що доцільно вибирати у якості силових ключів пристрою MOSFET-транзистори, оскільки вони мають більш низьке значення напруги у включеному стані при номінальних напругах менше 200 *В*.

3.6 Моделювання електромагнітних процесів

Моделювання електромагнітних процесів роботи триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом також проводилося за допомогою пакету розгалуження математичної системи MATLAB 6 – Simulink 4.

Модель триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом зображена на рис.3.4. Модель складається з силової частини та системи керування (СК) – Control System. СК зображена на рис. 3.5. 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.

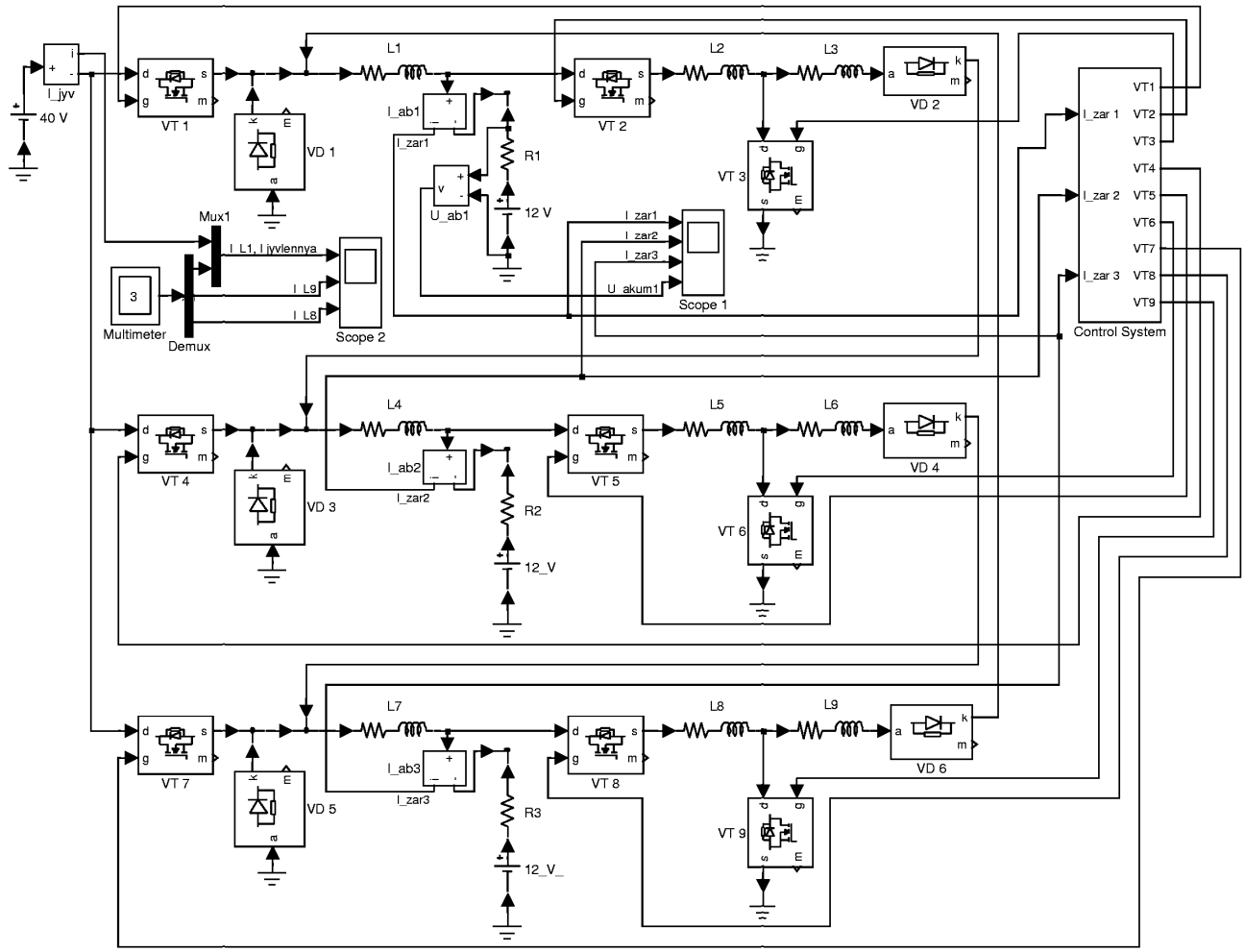


Рисунок 3.4 – Модель триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом

Силова частина моделі, зображеної на рис. 3.4, складається з наступних елементів (модулів):

- джерело постійної напруги (40 V);
- силові транзисторні модулі на MOSFET-транзисторах із зворотним діодом (VT1 – VT9);
- діоди (VD1 – VD6);
- спрощені моделі акумуляторних батарей, які складаються з джерела живлення та опору (R1, 12 V; R2, 12_V; R3, 12_V_);
- накопичувальні дроселі (L1 – L9);
- вимірювачі миттєвого струму у акумуляторних батареях (I_ab1, I_ab2, I_ab3), та струму джерела постійної напруги (I_jyv);
- вимірювач миттєвої напруги на акумуляторній батареї (U_ab1);
- 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 Demux – для розділення сигналів;
- блок Mux1 – для збирання сигналів;
- блок Scope 1 – для спостереження (вимірювання) миттєвих значень струмів у акумуляторних батареях та напруги на одній з них;
- блок Scope 2 – для спостереження (вимірювання) миттєвих значень струмів у джерелі постійної напруги та дроселях L1, L8 та L9.

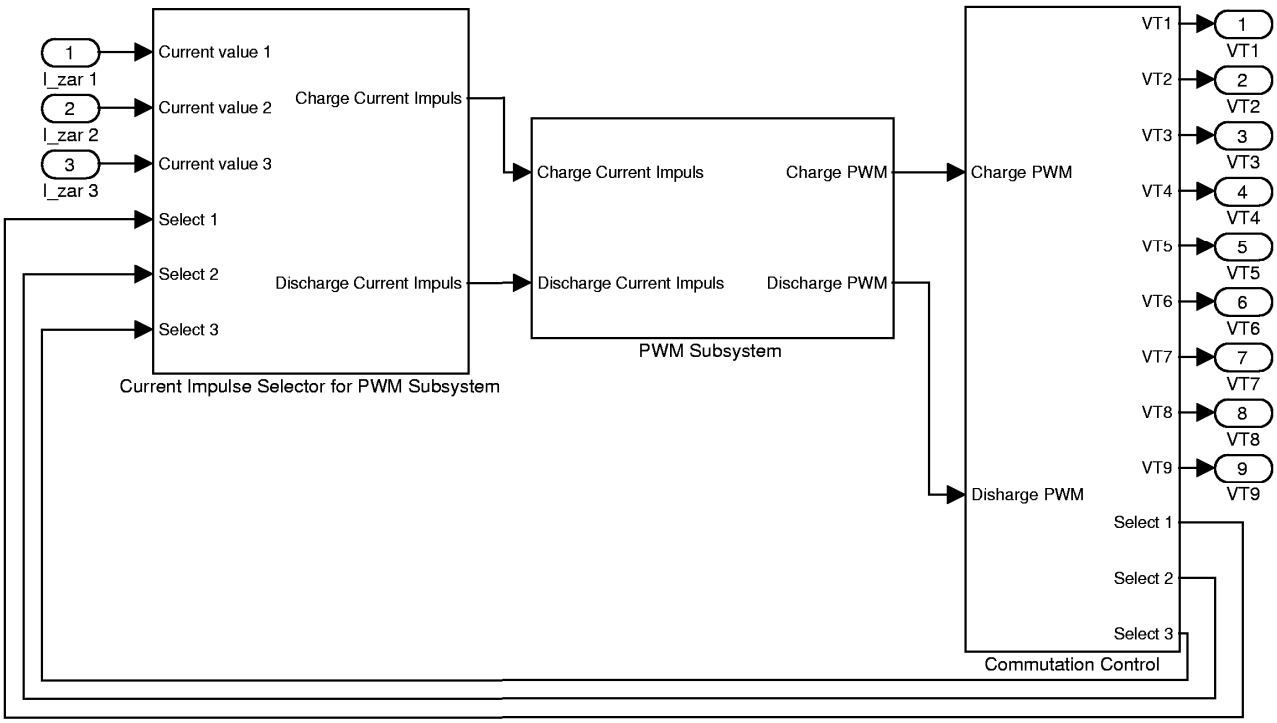


Рисунок 3.5 – Модель підсистеми СК

Підсистема вибору імпульсів струму, модель якої зображена на рис. 3.6, керованих перемикачів, які комутують сигнали з вимірювачів миттєвого струму у акумуляторних батареях (I_ab1, I_ab2, I_ab3) для підсистеми ШІМ (рис. 3.7) в залежності від періоду роботи схеми. Керує підсистемою вибору імпульсів струму підсистема керування комутацією транзисторів і вибором імпульсів струму (рис. 3.8).

Підсистема ШІМ, модель якої зображена на рис. 3.7, генерує сигнали керування транзисторами понижуючих ШІП, які формують імпульс зарядного струму від джерела постійної напруги (транзистори VT1, VT4 та VT7), формує корегуючи сигнали керування для корекції коефіцієнта заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП, а також формує сигнали керування транзисторами підвищуючих ШІП (транзистори VT3, VT6 та VT9).

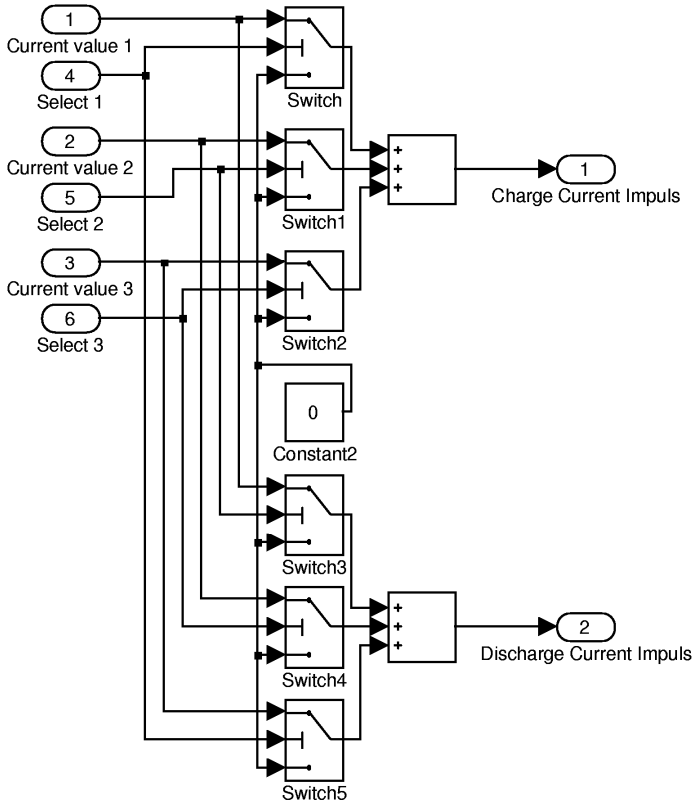


Рисунок 3.6 – Модель підсистеми вибору імпульсів струму

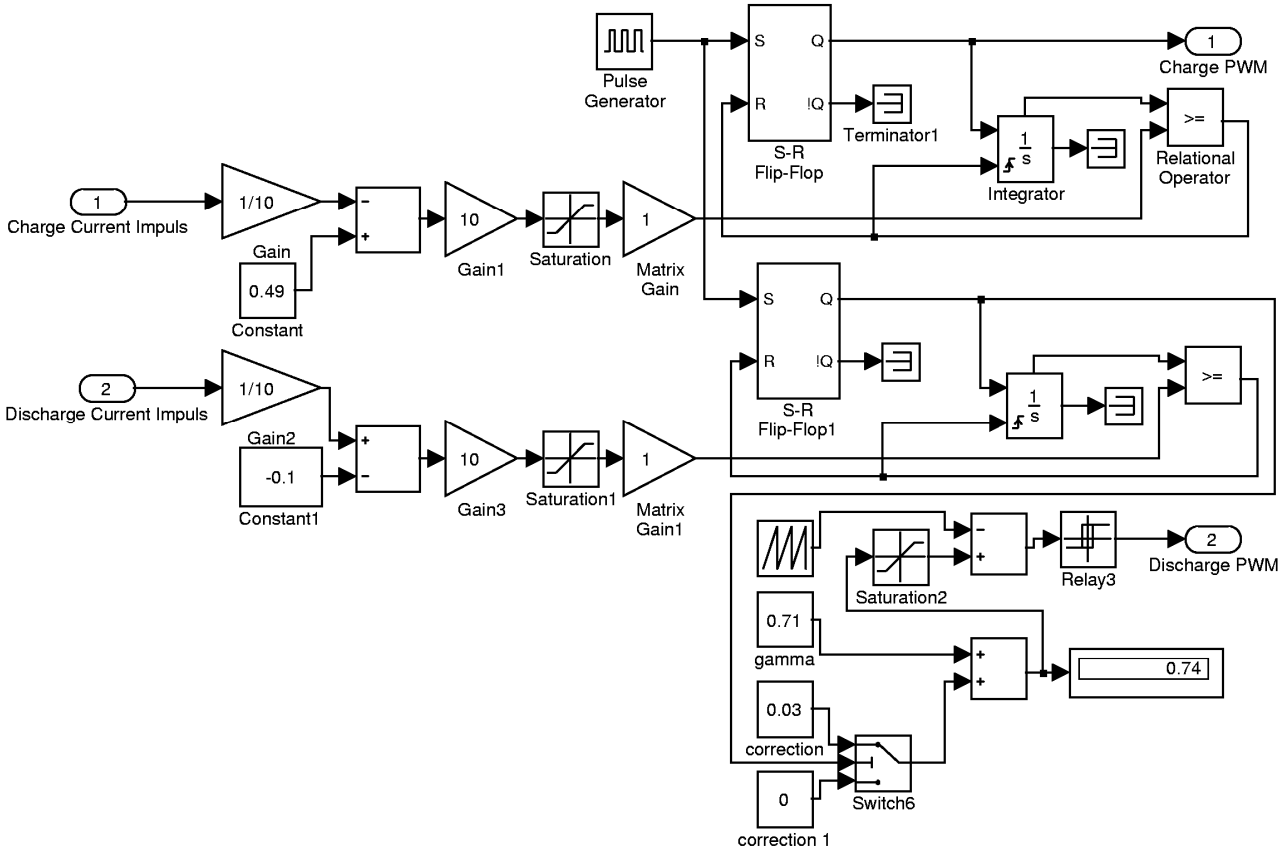


Рисунок 3.7 – Модель підсистеми ШІМ

Підсистема керування комутацією транзисторів і вибором імпульсів струму, модель якої зображена на рис. 3.8, складається з генераторів, які задають довжини зарядного та розрядного імпульсів, та набору логічних елементів, які, в залежності від сигналу на виході генераторів, 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. Періоди, у які працюють транзистори, можна подивитись у табл. 3.1, в якій приведені періоди роботи силових ключів схеми та процеси, які відбуваються в ланці в ці періоди.

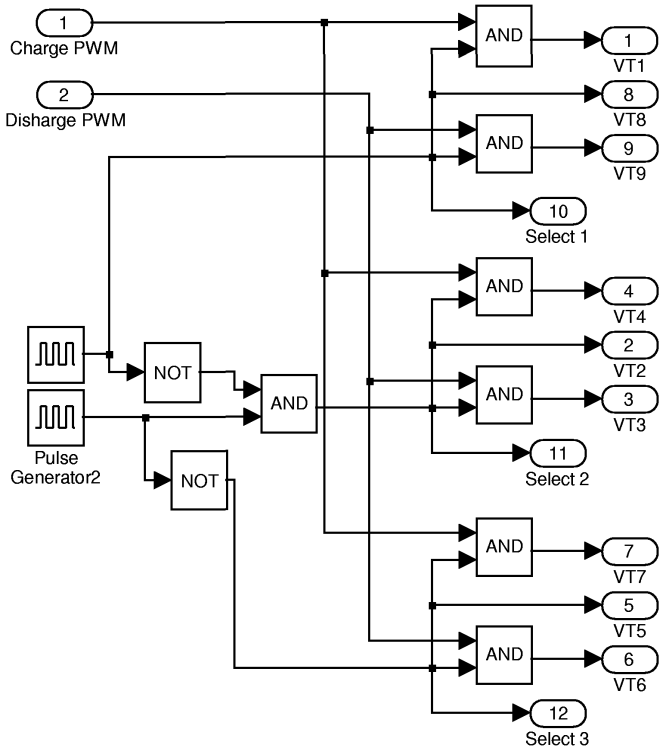


Рисунок 3.8 – Модель підсистеми керування комутацією транзисторів і вибором імпульсів струму

Результати моделювання зображені на рис. 3.9–3.11.

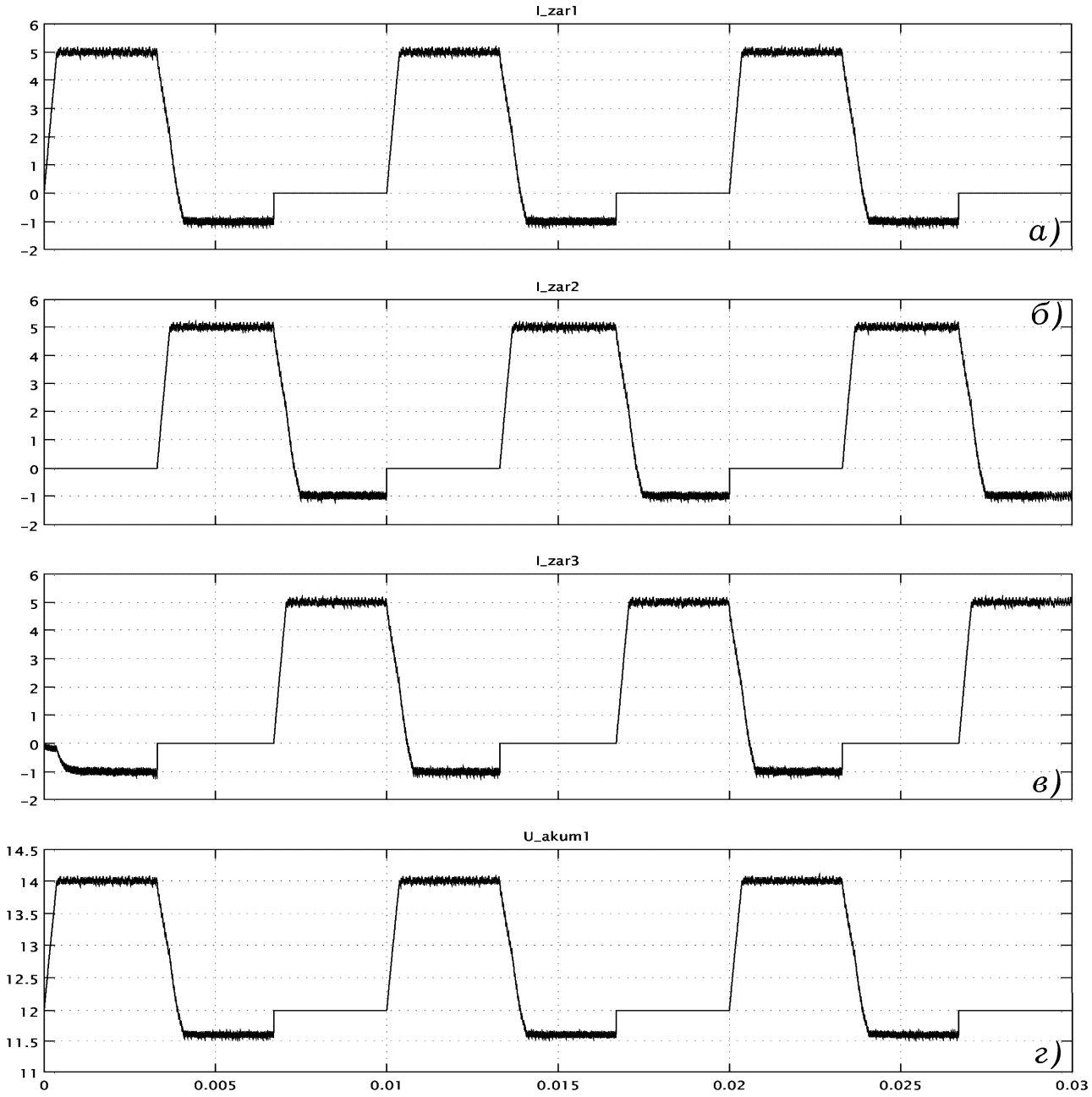


Рисунок 3.9 – Струми заряду акумуляторних батарей (*а–в*)
та напруга на АБ1 під час їх заряду (*г*)

Як видно з результатів моделювання (рис. 3.9 (*а, б, в*)), пристрій забезпечує заряд акумуляторних батарей асиметричним струмом необхідних параметрів. При цьому струм розрядного імпульсу сумується з струмом зарядного імпульсу наступної ланки (рис. 3.10 (*а, б*), рис. 3.11 (*а, б*)), причому струм розрядного імпульсу останньої ланки сумується з струмом зарядного імпульсу першої ланки. Виділені ділянки на рис. 3.11 (*а*) (для прикладу виділено лише 2 з багатьох ділянок – позначені 1) на рис. 3.11 (*а*)) наглядно демонструють економію при споживанні струму від мережі живлення, який доповнюється струмом, отриманим при розряді АБ попередньої ланки (див. рис. 3.11 (*а, б*), криві 2)), який, у свою чергу, зберігається у додатковому дроселі (на даній частині періоду роботи пристрою це дросель L9, графік струму якого зображений на рис. 3.11 (*б*)).

За рахунок того, що струм розрядного імпульсу сумується з струмом 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 асиметричним струмом, схема якого запропонована в [3]. 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.

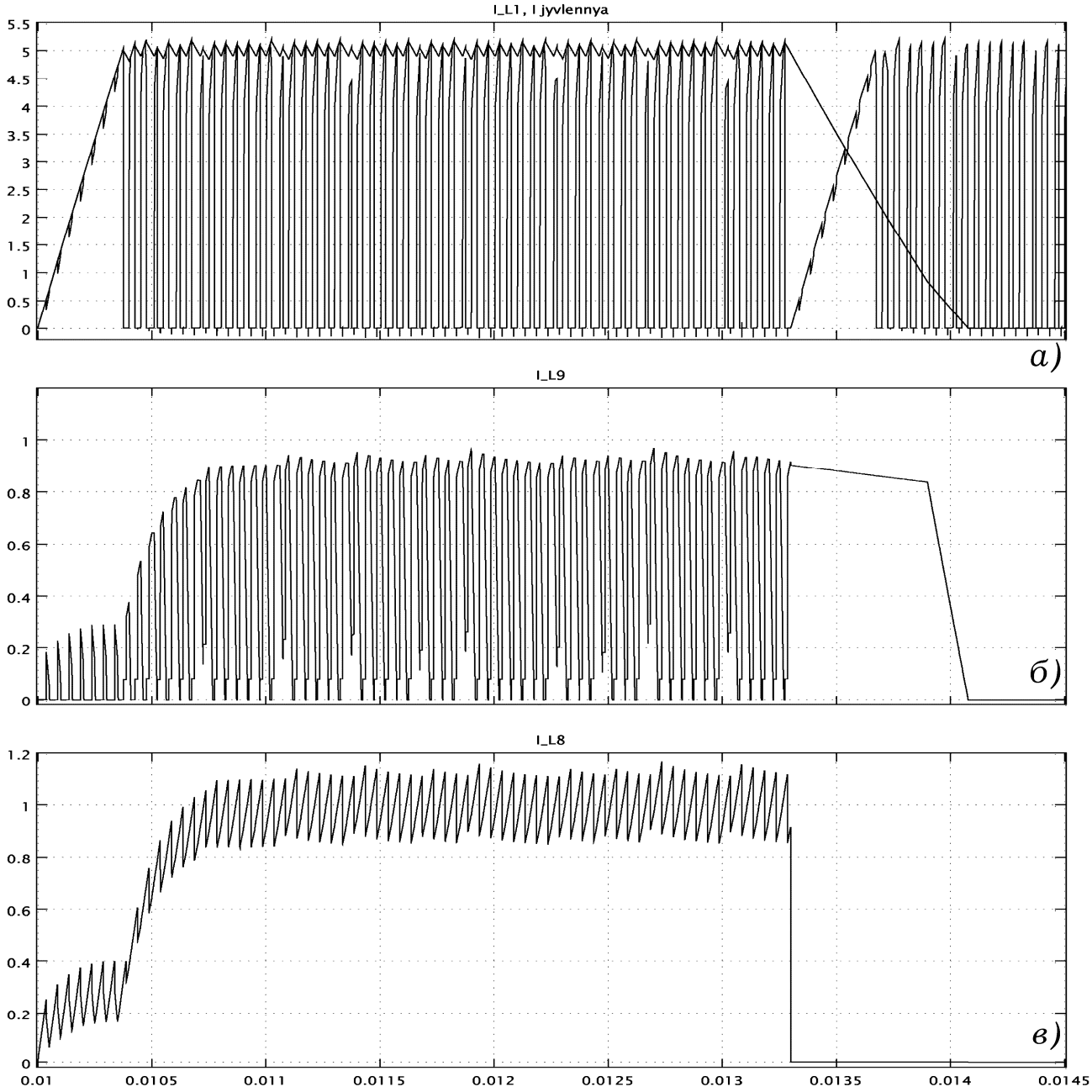


Рисунок 3.10 – Струми у накопичувальних дроселях L1 (*а*), L9 (*б*), L8 (*в*) та джерелі живлення (*а*)

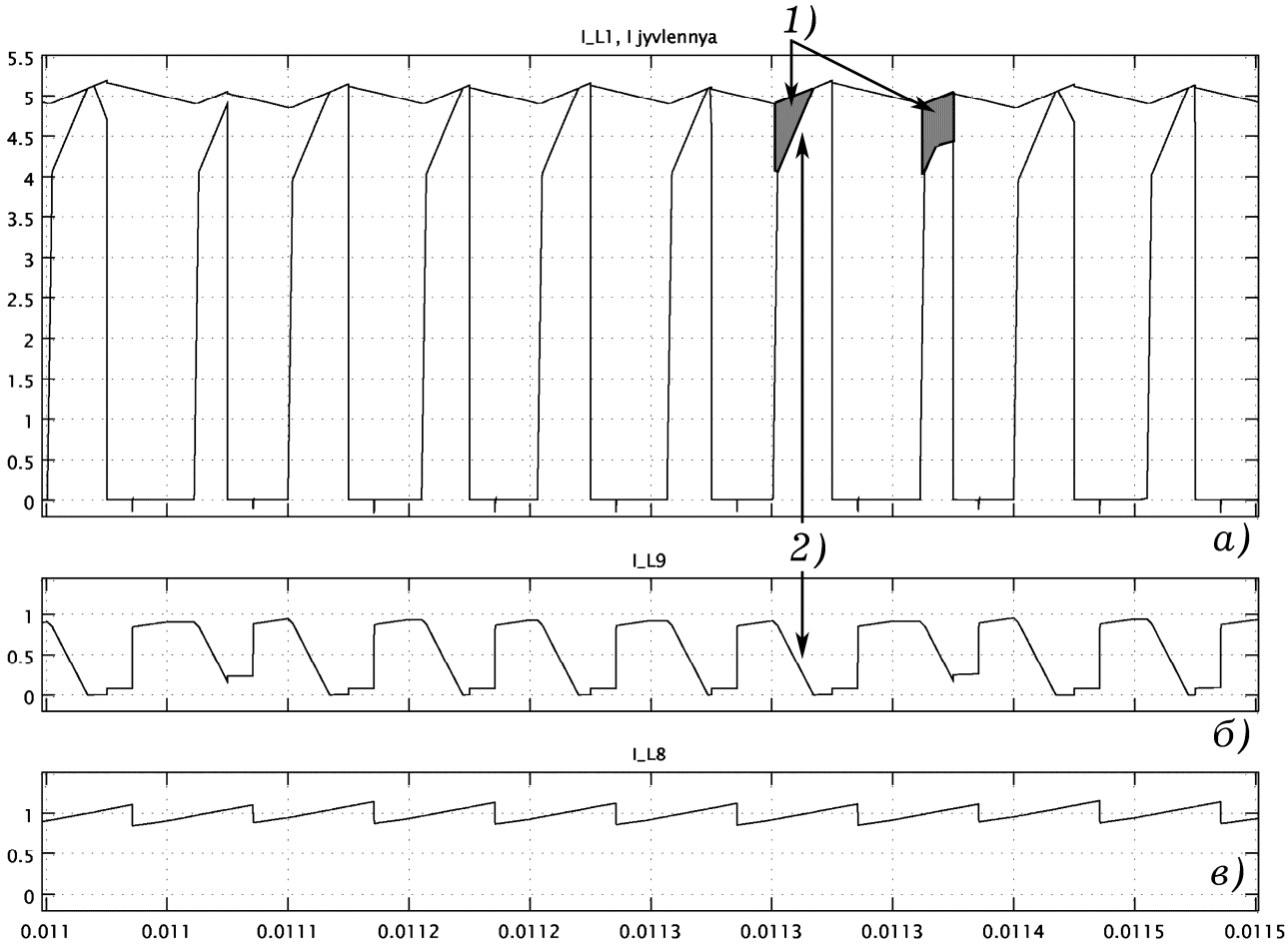


Рисунок 3.11 – Струми у накопичувальних дроселях L1 (*а*), L9 (*б*), L8 (*в*) та джерелі живлення (*а*) (збільшена частина рис. 3.9)

Висновки до розділу 3

1. Запропоновано схему пристрою для заряду трьох акумуляторних батарей асиметричним струмом, у якому за рахунок того, що струм розрядного імпульсу сумується з струмом зарядного імпульсу наступної ланки, зменшується споживання енергії мережі приблизно на 10-12% у порівнянні з відомим пристроєм для заряду акумуляторів асиметричним струмом.
2. 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.

Розділ 4 УПРАВЛІННЯ ЗАРЯДОМ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ОРІЄНТОВАНОМУ БАЗИСІ

4.1 Визначення ОБ-спектрів струмів заряду акумуляторних батарей

Для керування триланковим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом потрібно три датчики струму для виміру значення струму у кожній ланці, що ускладнює розрахунки при мікропроцесорному керуванні в реальному масштабі часу. Пропонується користуватися одним датчиком струму, ввімкненим після джерела напруги, використовуючи ОБ-спектр струму, що забезпечує більшу швидкодію при мікропроцесорній реалізації алгоритму керування. Для цього необхідно знайти сумарний ОБ-спектр імпульсів струму заряду акумуляторних батарей, які виробляються триланковим пристроєм заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом і зображені на рис. 4.1.

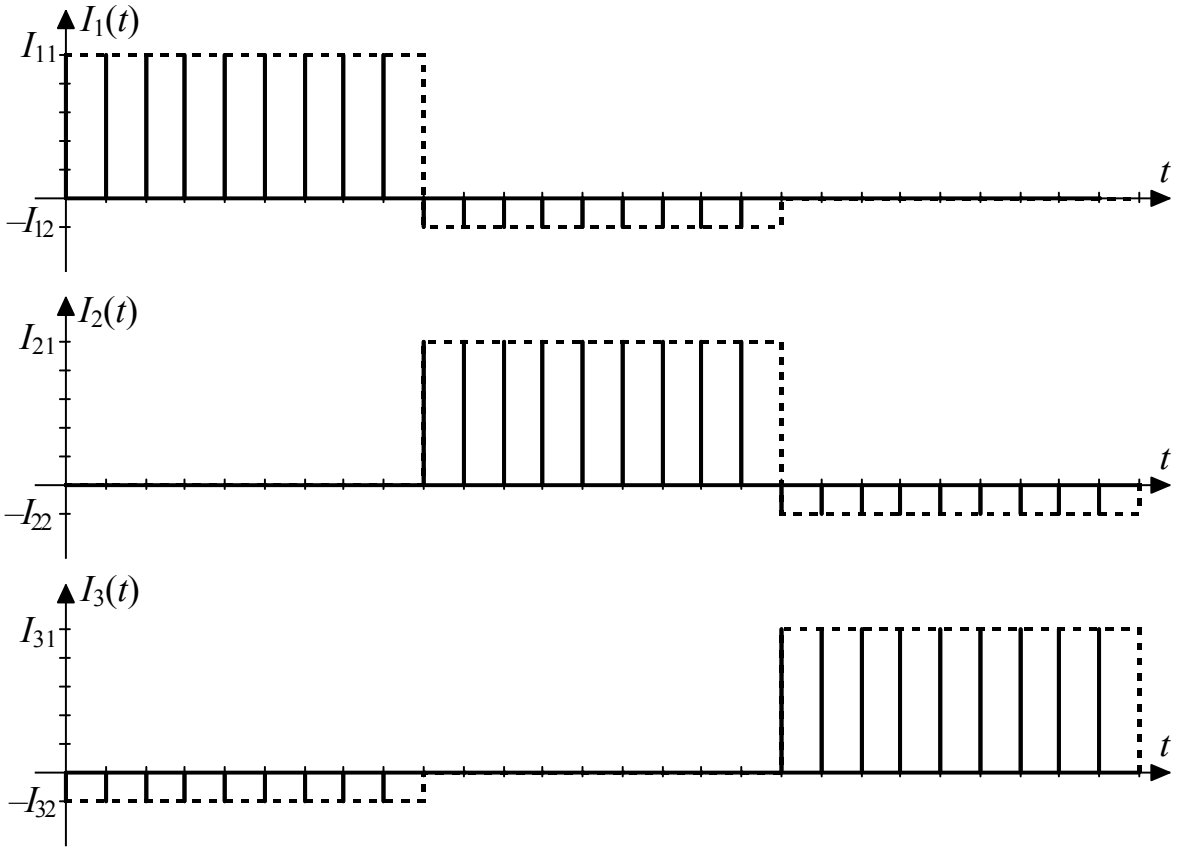


Рисунок 4.1 – Струми заряду акумуляторних батарей

Знайдемо ОБ-спектр прямокутного імпульсу $y_1(x)$, зображеного на рис.4.2.

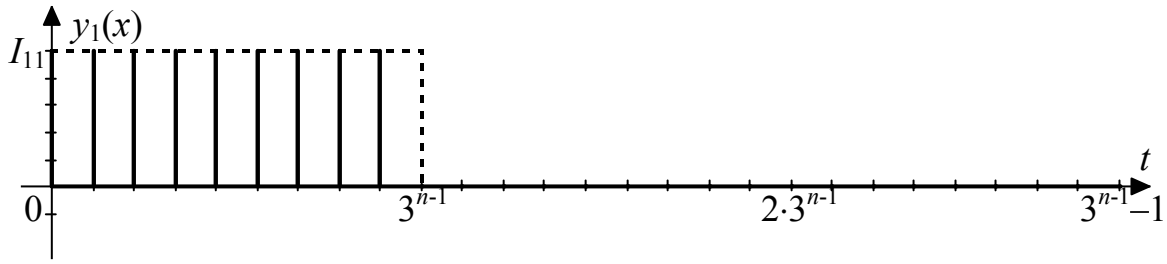


Рисунок 4.2 – Дискретний прямокутний імпульс

Нехай довжина дискретного прямокутного імпульсу дорівнює 3^{n-1}, а інтервал визначення функції дорівнює 3^n-1. Тоді така функція-оригінал описується співвідношенням:

$$y_1(x)=\begin{cases} I_{11},\ x=0,1,...,3^{n-1}-1 \\ 0,\ x=3^{n-1},...,3^n-1 \end{cases}.$$

Знайдемо ОБ-спектр $Y_1(\nu)$ постійної функції на інтервалі $[0\ldots3^{n-1}]$:

$$Y'(\nu)=\sum_0^{3^{n-1}-1} y_1(x)\varphi_d(\nu,x)=I_{11}\sum_0^{3^{n-1}-1}\varphi_d(\nu,x).$$

З [18] відомо, що середнє значення $\varphi_d(\nu,x)=0$ для усіх базисних функцій при $\nu\neq0$. Отже, дорівнюватимуть нулю і значення спектру $Y(\nu)$, і тільки при $\nu=0$ $Y(0)=\frac{I_{11}}{3^{n-1}}\sum_0^{3^{n-1}-1}\varphi_d(0,x)=I_{11}$. Таким чином:

$$Y(\nu)=\begin{cases} I_{11},\ \nu=0 \\ 0,\ \nu=1,2,...,3^{n-1}-1 \end{cases}.$$

На рис. 4.3 наведена постійна одинична дискретна функція та її спектр.

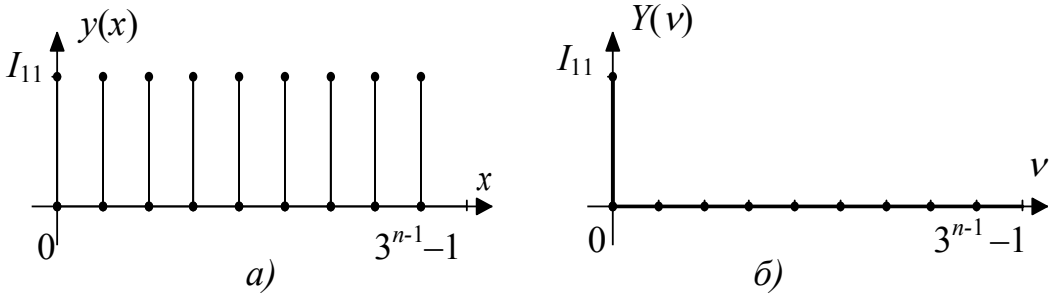


Рисунок 4.3 – Постійна одинична дискретна функція (*а*) та її спектр (*б*)

Спектр прямокутного імпульсу знайдемо, користуючись першою теоремою подовження [18]. Отримаємо:

$$Y_1(\nu)=\begin{cases}\frac{I_{11}}{3},\ \nu=i\cdot 3^{n-1}\\ 0,\ \nu\neq i\cdot 3^{n-1}\end{cases}.$$

Дискретний прямокутний імпульс та його спектр зображені на рис. 4.4.

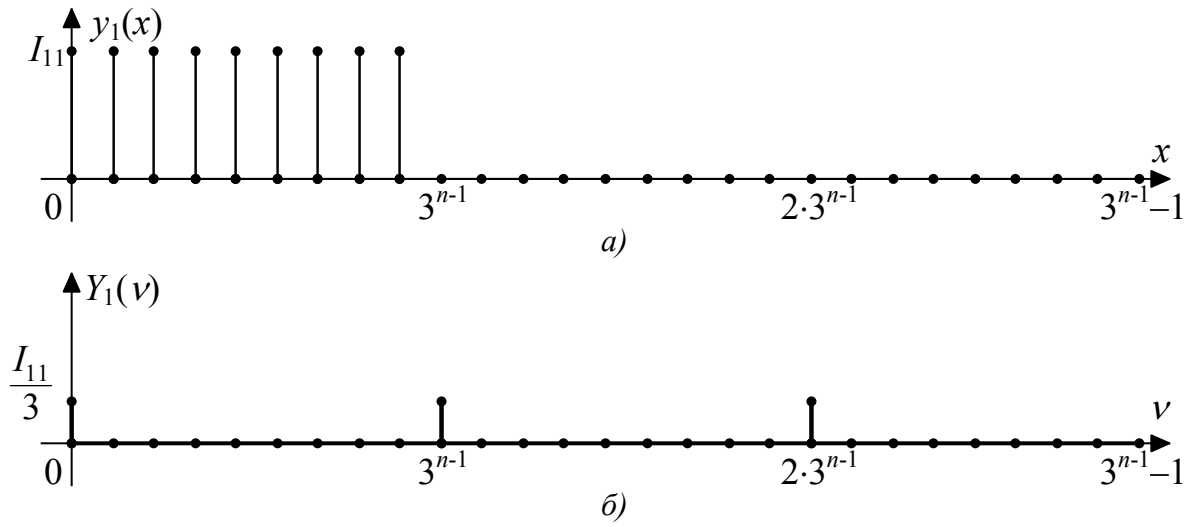


Рисунок 4.4 – Дискретний прямокутний імпульс (*а*) та його спектр (*б*)

Знайдемо тепер ОБ-спектр імпульсу $y_2(x)$, зсунутого на $\frac{1}{3}$ періоду.

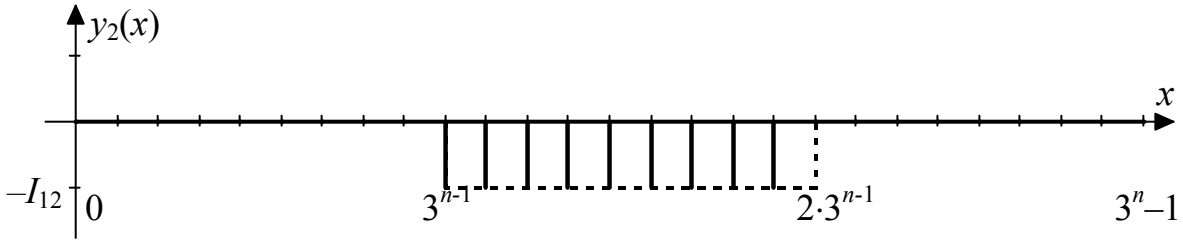


Рисунок 4.5 – Дискретний прямокутний імпульс, зсунутий на $\frac{1}{3}$ періоду

Згідно теореми запізнення [18]:

$$Y_\tau(\nu)=Y(\nu)\circ\varphi_d(\nu,\tau)=Y(\nu)\circ\varphi_d(\nu,3^{n-1}).$$

Але оскільки функція *m*-парна, то можемо записати:

$$Y_\tau(\nu) = Y(\nu) \cdot \varphi_d(\nu, 3^{n-1}).$$

Базисна функція:

$$\varphi_d(\nu, 3^{n-1}) = \underbrace{1,1,...,1}_{3^{n-1}}, \underbrace{-1,-1,...,-1}_{3^{n-1}}, \underbrace{0,0,...,0}_{3^{n-1}}.$$

Таким чином, спектр:

$$Y_2(\nu) = \underbrace{-\frac{I_{12}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{\frac{I_{12}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{0,0,...,0}_{3^{n-1}}.$$

Дискретний прямокутний імпульс та його спектр зображені на рис. 4.6.

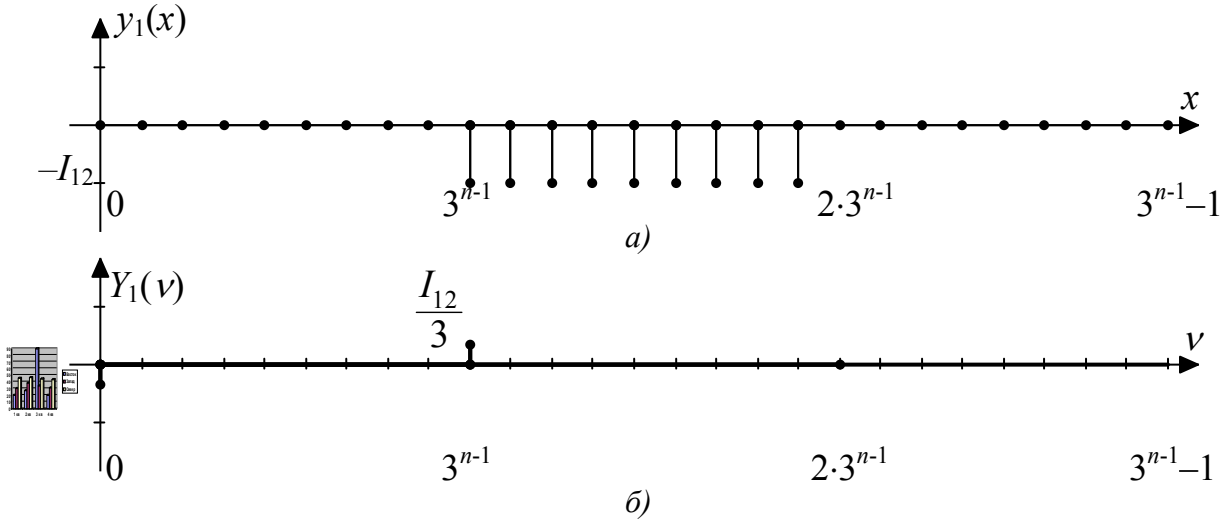


Рисунок 4.6 – Дискретний прямокутний імпульс (*а*) та його спектр (*б*)

Спектр імпульсу I_1, зображеного на рис. 4.1, знаходимо як суму спектрів $Y_1(\nu)$ і $Y_2(\nu)$:

$$Y_{I_1}(\nu) = Y_1(\nu) + Y_2(\nu) = \underbrace{\frac{I_{11}-I_{12}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{\frac{I_{11}+I_{12}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{\frac{I_{11}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}.$$

Сигнал I_1 та його спектр зображені на рис.4.7.

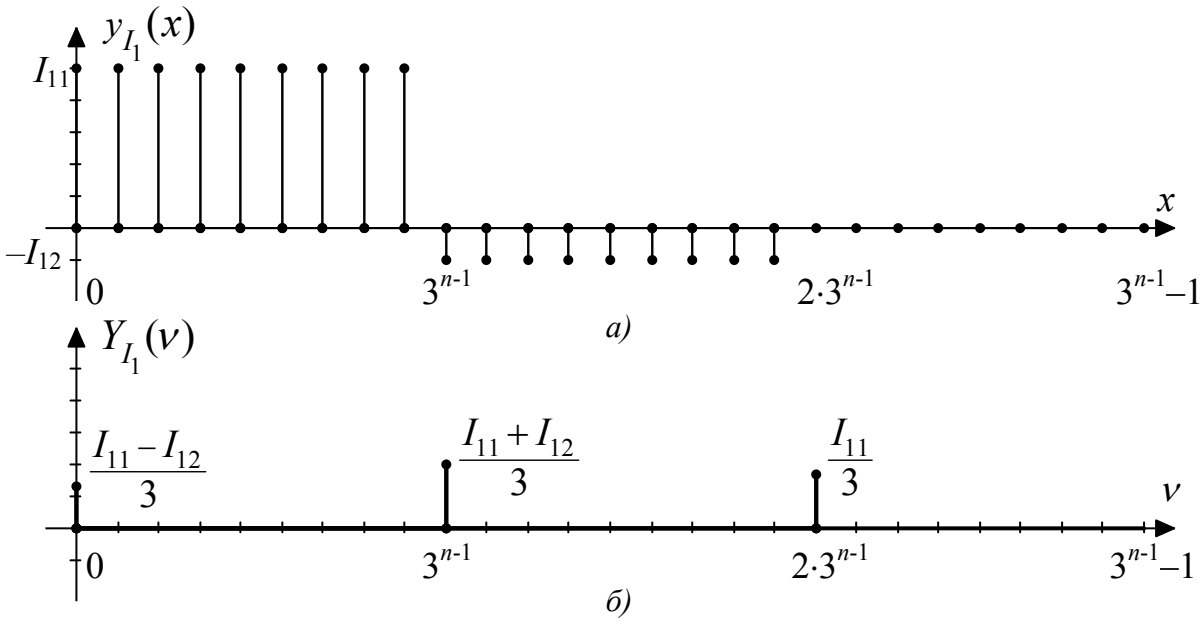


Рисунок 4.7 – Сигнал I_1 (*а*) та його спектр (*б*)

Спектр струму I_2 знайдемо як суперпозицію спектрів імпульсів: 1) додатного, зміщеного на $\frac{1}{3}$ періоду (на 3^{n-1}) та 2) від‘ємного, зміщеного на $\frac{2}{3}$ періоду (на $2\cdot3^{n-1}$).

Спектр 1-го імпульсу згідно теореми запізнення:

$$Y_1(\nu)=Y(\nu)\cdot\varphi_d(\nu,\tau)=Y(\nu)\cdot\varphi_d(\nu,3^{n-1}).$$

Базисна функція:

$$\varphi_d(\nu,3^{n-1})=\underbrace{1,1,...,1}_{3^{n-1}},\underbrace{-1,-1,...,-1}_{3^{n-1}},\underbrace{0,0,...,0}_{3^{n-1}}.$$

Таким чином, спектр:

$$Y_1(\nu)=\underbrace{\frac{I_{21}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}},\underbrace{-\frac{I_{21}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}},\underbrace{0,0,...,0}_{3^{n-1}}.$$

Спектр 2-го імпульсу згідно теореми запізнення:

$$Y_2(\nu)=Y(\nu)\cdot\varphi_d(\nu,\tau)=Y(\nu)\cdot\varphi_d(\nu,2\cdot3^{n-1}).$$

Базисна функція:

$$\varphi_d(\nu, 2\cdot 3^{n-1}) = \underbrace{1,1,...,1}_{3^{n-1}}, \underbrace{0,0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{-1,-1,...,-1}_{3^{n-1}}.$$

Таким чином, спектр:

$$Y_2(\nu) = \underbrace{-\frac{I_{22}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{0,0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{\frac{I_{22}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}.$$

Спектр сигналу I_2, зображеного на рис. 4.1, знаходимо як суму спектрів $Y_1(\nu)$ і $Y_2(\nu)$:

$$Y_{I_2}(\nu) = Y_1(\nu) + Y_2(\nu) = \underbrace{\frac{I_{21}-I_{22}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{-\frac{I_{21}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}, \underbrace{\frac{I_{22}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}$$

Сигнал I_2 та його спектр зображені на рис.4.8.

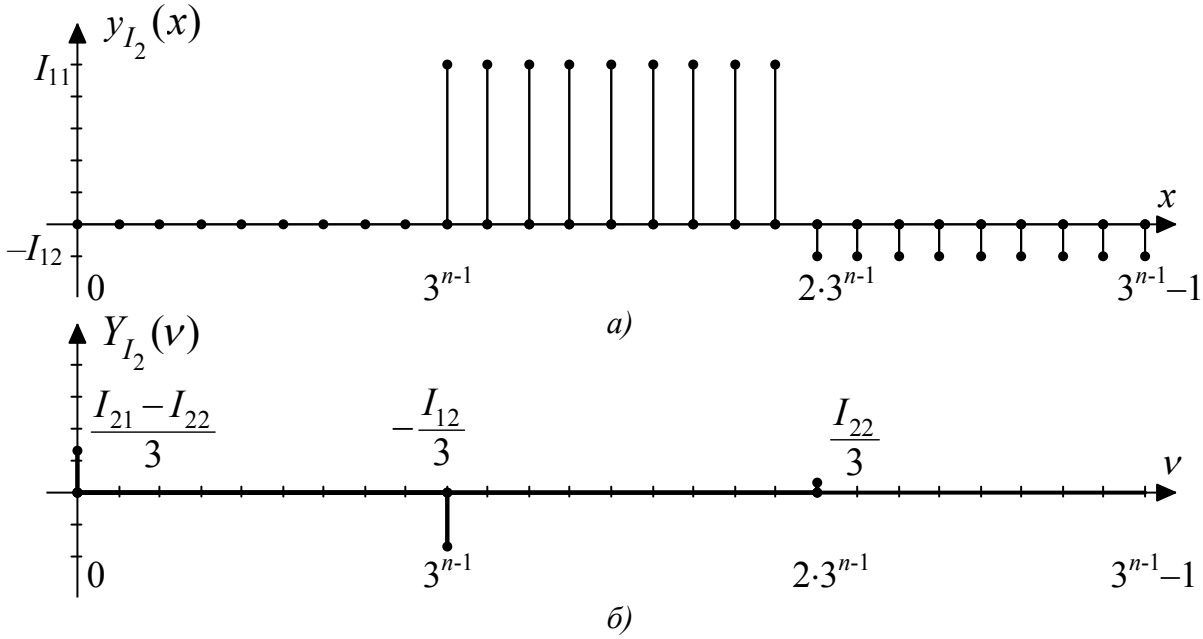


Рисунок 4.8 – Сигнал I_2 (*а*) та його спектр (*б*)

Спектр струму I_3 дорівнює сумі спектру незміщеного від‘ємного імпульсу амплітудою I_{32} і зміщеного на $\frac{2}{3}$ періоду (чи $2\cdot 3^{n-1}$ відліків) додатного імпульсу амплітудою I_{31}.

$$Y_2(\nu)=\underbrace{-\frac{I_{32}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}},\underbrace{-\frac{I_{32}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}},\underbrace{-\frac{I_{22}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}$$

$$Y_1(\nu)=\underbrace{\frac{I_{31}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}},\underbrace{0,0,...,0}_{3^{n-1}},\underbrace{-\frac{I_{31}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}$$

$$Y_{I_3}(\nu)=Y_1(\nu)+Y_2(\nu)=\underbrace{\frac{I_{31}-I_{32}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}},\underbrace{-\frac{I_{32}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}},\underbrace{-\frac{I_{32}+I_{31}}{3},0,...,0}_{3^{n-1}}.$$

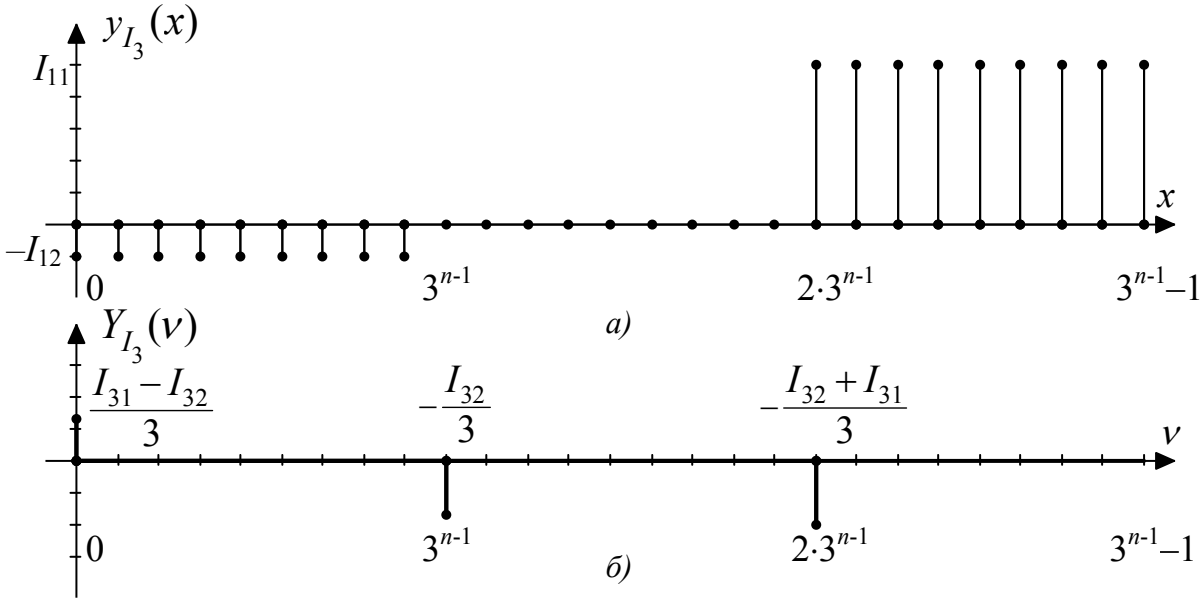


Рисунок 4.9 – Сигнал I_3 (*а*) та його спектр (*б*)

Спектр струму живлення I (через джерело E) містить всього три відліки, які дорівнюють:

$$\left.\begin{aligned}Y(0)&=\frac{I_{11}+I_{21}+I_{31}}{3}-\frac{I_{12}+I_{22}+I_{32}}{3}\\ Y(3^{n-1})&=\frac{I_{11}-I_{21}}{3}+\frac{I_{12}-I_{32}}{3}\\ Y(2\cdot3^{n-1})&=\frac{I_{11}-I_{31}}{3}+\frac{I_{22}-I_{32}}{3}\end{aligned}\right\}\qquad(4.1)$$

Зазначимо, що при рівності імпульсів зарядного струму (I_{11}=I_{21}=I_{31}) і імпульсів розрядного струму (I_{12}=I_{22}=I_{32}) спектр I містить тільки одну складову $Y(0)$, що відповідає постійному струму споживання.

Оскільки з трьох рівнянь неможливо знайти 6 невідомих, тому потрібно накласти обмеження: імпульси розрядного струму вважати рівними певній константі або вважати прямо залежними від імпульсів зарядного струму.

4.2 Визначення величини струмів заряду акумуляторних батарей через ОБ-спектр

Розглянемо два випадки роботи пристрою:

- при постійному струмі споживання;
- при струмі джерела, що змінюється в широких межах.

4.2.1 При постійному струмі споживання

У випадку, коли струм споживання постійний, можна вважати, що імпульси розрядного струму рівні і дорівнюють певній константі ($I_{12}=I_{22}=I_{32}=const$). Тоді будемо стабілізувати лише імпульси зарядного струму I_{11}, I_{21}, I_{31}. Розв‘язавши систему (4.1), знайдемо імпульси зарядного струму I_{11}, I_{21}, I_{31} через відліки $Y(0)$, $Y(3^{n-1})$, $Y(2\cdot3^{n-1})$:

$$\left.\begin{aligned} I_{11} &= Y(0)+Y\left(3^{n-1}\right)+Y\left(2\cdot3^{n-1}\right)+I_{32} \\ I_{21} &= Y(0)-2\cdot Y\left(3^{n-1}\right)+Y\left(2\cdot3^{n-1}\right)+I_{12} \\ I_{31} &= Y(0)+Y\left(3^{n-1}\right)-2\cdot Y\left(2\cdot3^{n-1}\right)+I_{22} \end{aligned}\right\} \qquad (4.2)$$

4.2.2 При струмі джерела, що змінюється в широких межах

Якщо під час заряду струм на виході джерела змінюється в широких межах (наприклад, при живленні від фотопанелей або вітрогенераторів), то доцільно прийняти імпульси зарядного струму рівними сумі струму джерела та імпульсів розрядного струму:

$$I_{i1} = I(t) + I_{j2}\,.$$

Введемо пряму залежність їх від імпульсів зарядного струму:

$$I_{j2} = k \cdot I_{i1},$$

де i=1, 2, 3; j=3, 1, 2; а k – коефіцієнт, який задає відношення величин імпульсів зарядного та розрядного струму.

Таким чином, залежність імпульсів зарядного струму від струму джерела буде:

$$I_{i1} = \frac{I(t)}{1-k}.$$

У цьому випадку також можна знайти струми з системи рівнянь (4.1) через відліки $Y(0)$, $Y(3^{n-1})$, $Y(2\cdot 3^{n-1})$:

$$\left.\begin{aligned} I_{11} &= \frac{Y(0)+Y\left(3^{n-1}\right)+Y\left(2\cdot 3^{n-1}\right)}{1-k} \\ I_{21} &= \frac{Y(0)-2\cdot Y\left(3^{n-1}\right)+Y\left(2\cdot 3^{n-1}\right)}{1-k} \\ I_{31} &= \frac{Y(0)+Y\left(3^{n-1}\right)-2\cdot Y\left(2\cdot 3^{n-1}\right)}{1-k} \end{aligned}\right\} \qquad (4.3)$$

Перевагою такого методу керування є використання одного каналу вимірювання для находження 3-х (у випадку, коли I_{12}=I_{22}=I_{32}=*const*), або 6-ти (у випадку, коли $I_{j2} = k \cdot I_{i1}$) струмів, а потім їх стабілізації.

В роботі [20] показано, що ОБ перетворення найменш трудомістке у порівнянні з перетвореннями Хартлі, Уолша та СКІ-перетворенням. Завдяки оперуванню цілими числами у випадку ОБ-перетворення час виконання операцій мікроконтролерами зменшується внаслідок відсутності множення дробових чисел навіть якщо кількість операцій перетворень співпадають.

4.3 Мікропроцесорна система керування (МСК) триланковим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом на основі ОБ-спектру

Як вже зазначалось, для керування триланковим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом потрібно три датчики струму для виміру значення струму у кожній ланці, що ускладнює розрахунки при мікропроцесорному керуванні в реальному масштабі часу. Пропонується

використовувати один датчик струму, ввімкнений відразу після джерела напруги, використовуючи ОБ-спектр струму, що забезпечує більшу швидкодію при мікропроцесорній реалізації алгоритму керування. Схема такого пристрою зображена на рис. 4.10. Схема відрізняється від запропонованої в розділі 3 тільки відсутністю датчиків струму, ввімкнутих у гілки з акумуляторними батареями, наявністю датчика струму, ввімкненого відразу після джерела напруги та застосуванням мікропроцесорної системи керування (МСК).

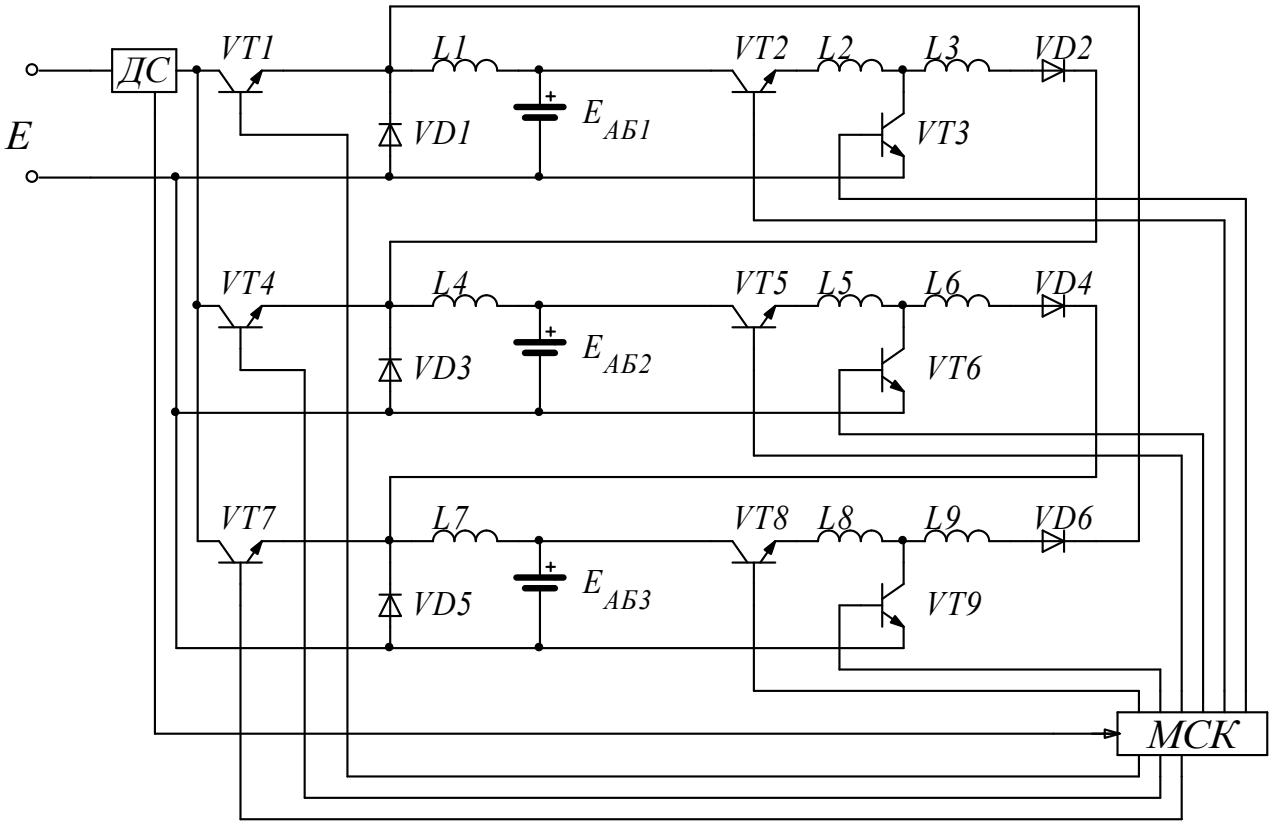
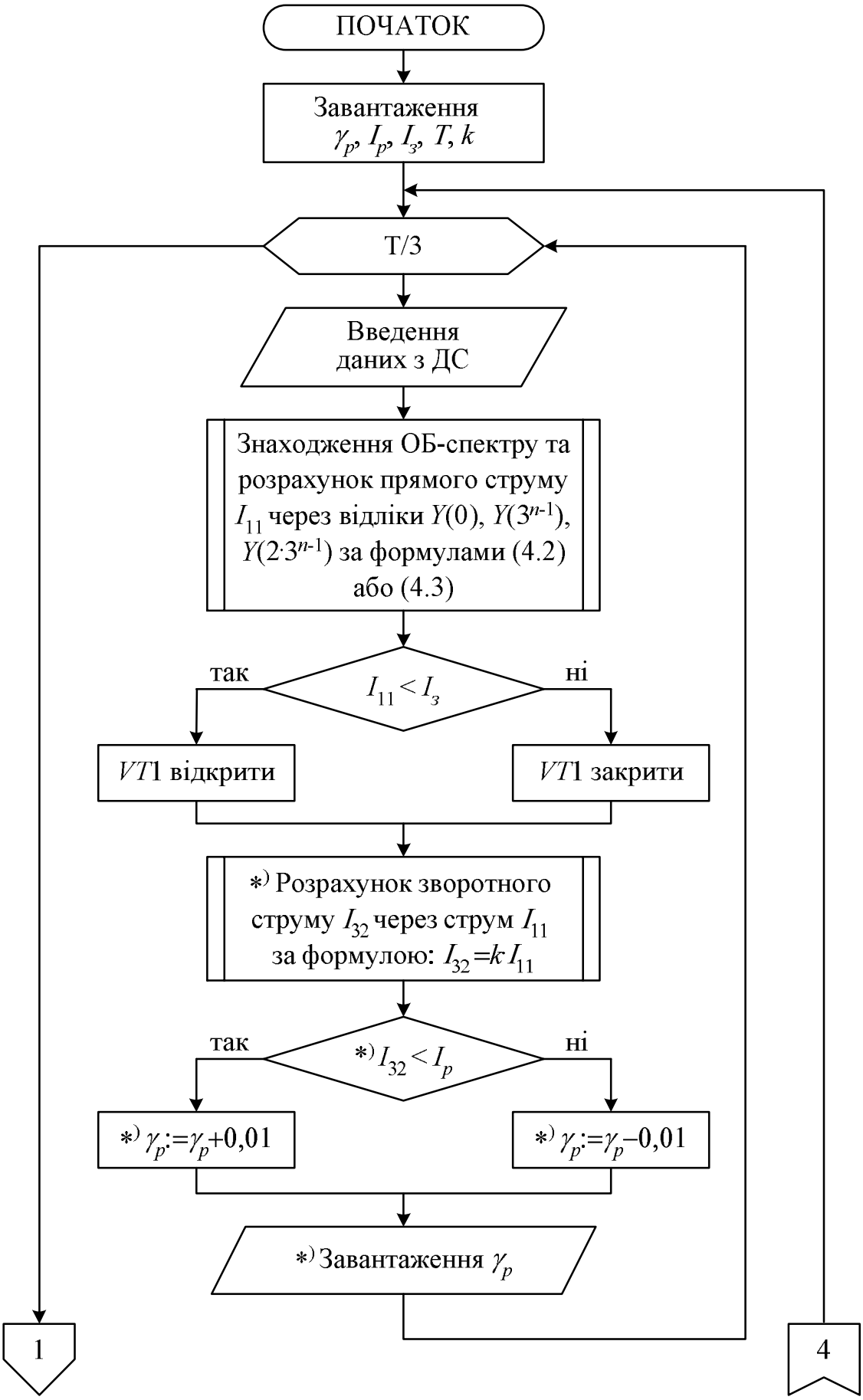
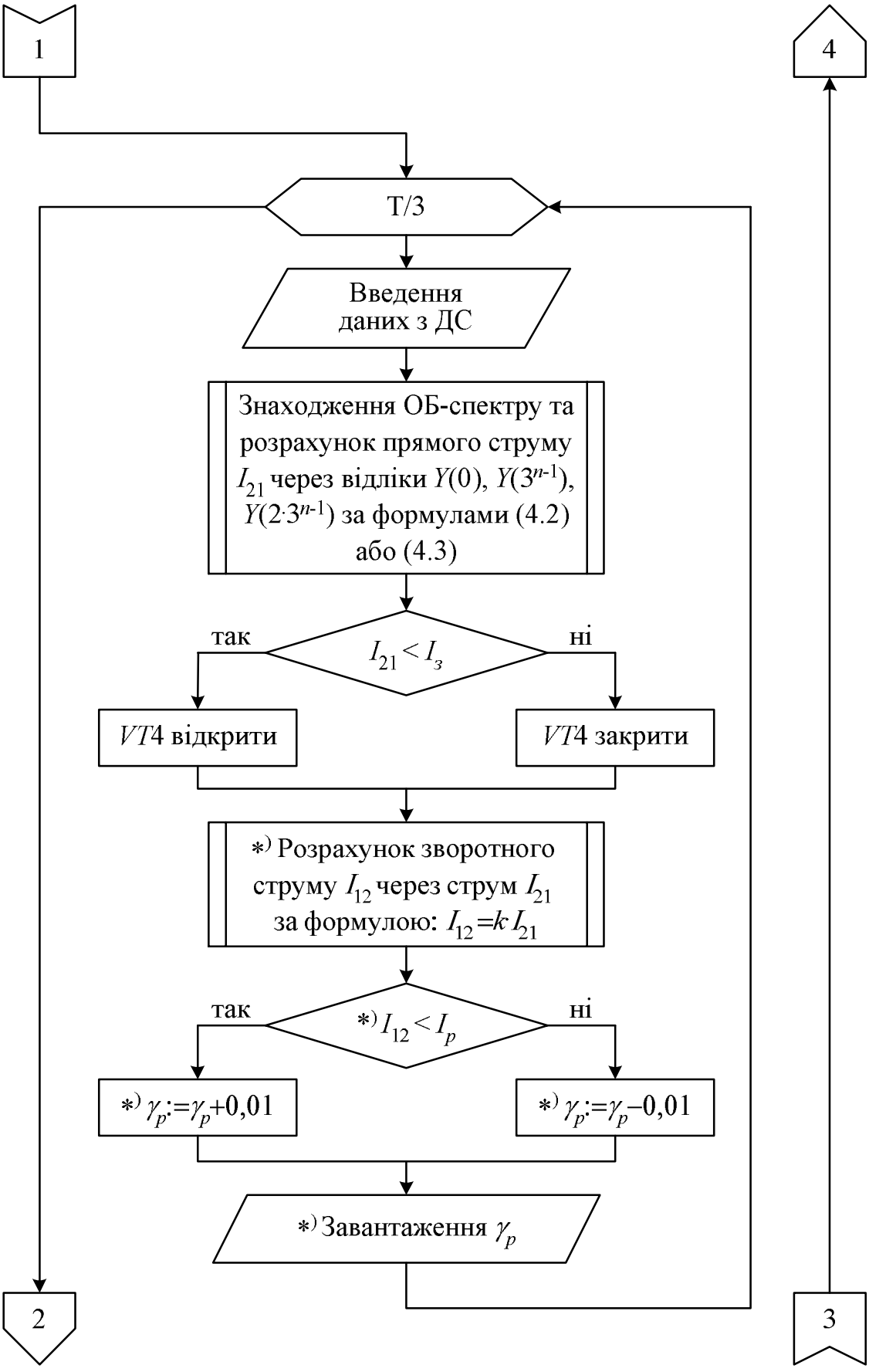


Рисунок 4.10 – Схема триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з МСК на основі ОБ-спектру

Для триланкового пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з МСК на основі ОБ-спектру розроблено алгоритм керування, блок-схема якого зображена на рис. 4.11. Якщо вважаємо, що імпульси розрядного струму рівні і дорівнюють певній константі ($I_{12}=I_{22}=I_{32}=const$), то відмічені зірочкою (*) блоки випускаються з блок-схеми алгоритму (див. п.*4.2.1*).


ПОЧАТОК
Завантаження γ_p, I_p, $I_з$, T, k
Т/3
Введення даних з ДС
Знаходження ОБ-спектру та розрахунок прямого струму I_{11} через відліки $Y(0)$, $Y(3^{n-1})$, $Y(2\cdot3^{n-1})$ за формулами (4.2) або (4.3)
так
$I_{11} < I_з$
ні
$VT1$ відкрити
$VT1$ закрити
*) Розрахунок зворотного струму I_{32} через струм I_{11} за формулою: $I_{32}=k\,I_{11}$
так
*) $I_{32} < I_p$
ні
*) $\gamma_p:=\gamma_p+0{,}01$
*) $\gamma_p:=\gamma_p-0{,}01$
*) Завантаження γ_p
1
4


1
4
Т/3
Введення даних з ДС
Знаходження ОБ-спектру та розрахунок прямого струму I_{21} через відліки $Y(0)$, $Y(3^{n-1})$, $Y(2\cdot3^{n-1})$ за формулами (4.2) або (4.3)
так
$I_{21} < I_з$
ні
$VT4$ відкрити
$VT4$ закрити
*) Розрахунок зворотного струму I_{12} через струм I_{21} за формулою: $I_{12}=k\,I_{21}$
так
*) $I_{12} < I_p$
ні
*) $\gamma_p:=\gamma_p+0{,}01$
*) $\gamma_p:=\gamma_p-0{,}01$
*) Завантаження γ_p
2
3

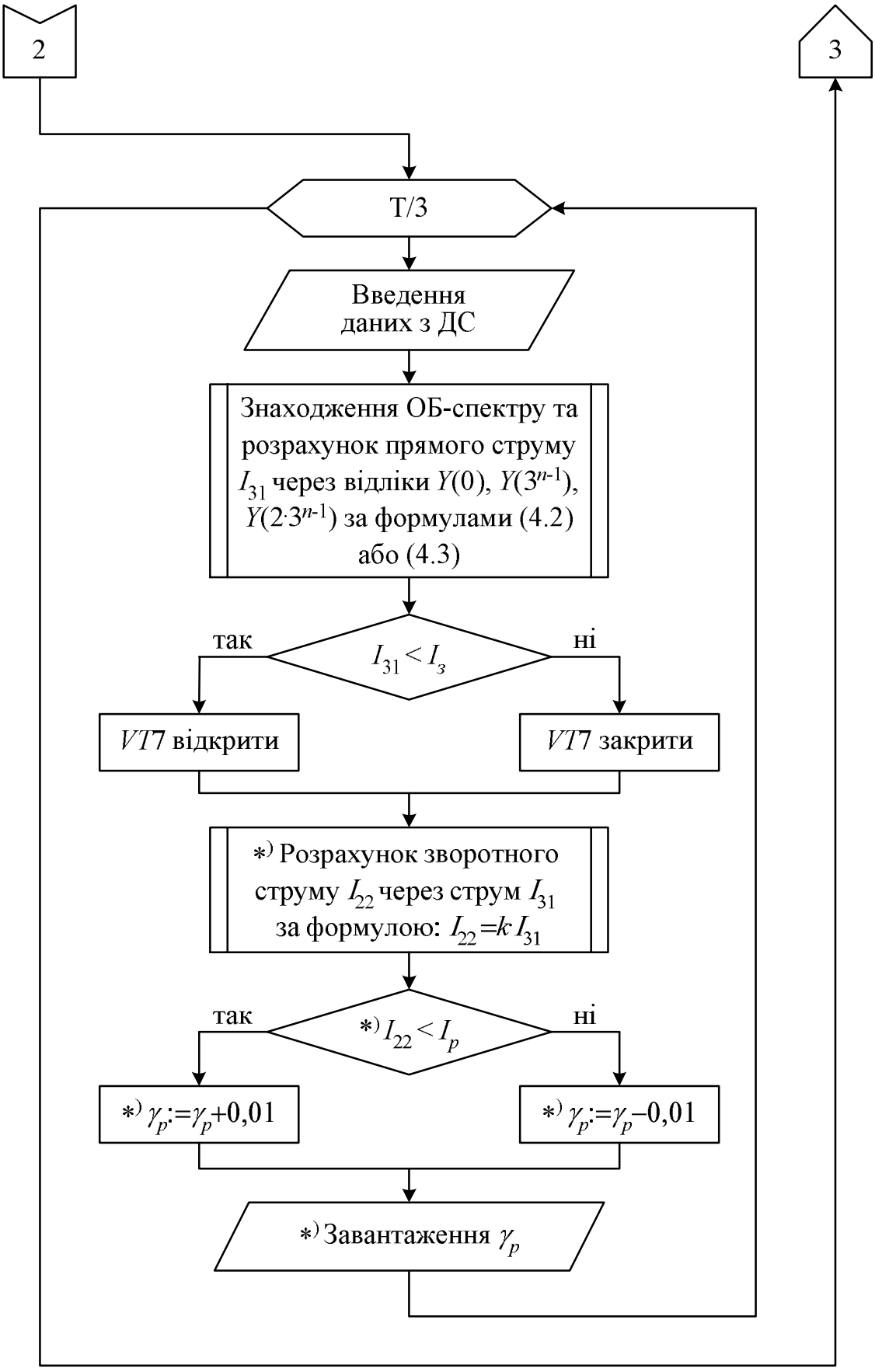


Рисунок 4.11 – Блок-схема алгоритму керування пристроєм

Висновки до розділу 4

1. Запропоновано використання одного датчику струму у триланковому пристрою заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, використовуючи ОБ-спектр для знаходження трьох струмів заряду.
2. Виявлено, що для керування триланковим пристроєм заряду АБ асиметричним струмом, використовуючи ОБ-спектр, потрібно накласти обмеження: амплітуди імпульсів розрядного струму вважати рівними певній константі або вважати прямо залежними від амплітуд імпульсів зарядного струму.
3. Використання перетворення в орієнтованому базисі для керування триланковим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом дозволяє скоротити час розрахунків і підвищити швидкодію системи.
4. Розроблено алгоритм керування триланковоим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з МСК на основі ОБ-спектру.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що оскільки в автономних фотоелектричних системах живлення масогабаритні властивості акумулятора не грають великої ролі, то доцільно вибрати для фотоелектричної системи живлення 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. Акумуляторні батареї можуть також використовуватися як резервні джерела живлення ЕОМ і систем, що накопичують енергію для можливих пікових навантажень.
2. Показано, що спосіб заряду акумуляторів асиметричним струмом має ряд переваг у порівнянні з іншими способами, а саме: при заряді кислотних акумуляторних батарей асиметричним струмом необоротна сульфатація негативних пластин не виникає, а отже відпадає необхідність у контрольно-тренувальних циклах. 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 $q_з$ на 10-15%, скорочення часу заряду $t_з$ на 10-15% (у порівнянні з параметрами, одержуваними при заряді постійним струмом), а також підвищення ресурсу акумуляторної батареї.
3. Розроблені схеми пристроїв для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, у яких за рахунок того, що енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі (схема з накопичувальним конденсатором), або струм розрядного імпульсу сумується з струмом зарядного імпульсу наступної ланки (3-ланкова схема), зменшується споживання енергії мережі на 10-12% у порівнянні з

відомим пристроєм для заряду акумуляторів асиметричним струмом. Також в пристроях використовується імпульсний метод регулювання, ККД якого, як правило, перевищує 80 – 90%.

4. Для схеми пристрою з накопичувальним конденсатором виведено формулу регулювання коефіцієнту заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШІП, яка забезпечує оптимальний заряду конденсатора, що дає змогу максимально ефективно використовувати енергію розрядного імпульсу акумулятора.
5. Використання пристрою для заряду трьох акумуляторних батарей асиметричним струмом 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.
6. Запропоновано проводити управління зарядом акумуляторних батарей на основі перетворення в орієнтованому базисі.
7. Використання перетворення в орієнтованому базисі для керування триланковим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом дозволяє скоротити час розрахунків і підвищити швидкодію системи.
8. Розроблено алгоритм керування триланковоим пристроєм для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з МСК на основі ОБ-спектру.
9. Розроблені методи і схеми пристроїв заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом з високим ККД, що можуть бути застосовані в автономних системах живлення, зокрема у фотоелектричній автономній системі живлення, у якій організований максимальний відбір енергії і тому струм заряду змінюється в широких межах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дикий М. О., **Поновлювані джерела енергії**, К., Вища школа, 1993, 351стр.
2. 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. — 160л. — л. 130-138.
3. **Батарейки и аккумуляторы**: Для широкого круга читателей / В. С. Лаврус (ред.). — К.: Наука и техника, 1995. — 47с.: ил. — (Информационное издание; Вып.1).
4. Деордиев С. С. **Аккумуляторы и уход за ними.** – К.: Техніка, 1985. – 136 с.
5. **Источники энергии:** Для широкого круга читателей / В. С. Лаврус (ред.). — К.: Наука и техника, 1997. — 106с.: ил. — (Информационное издание).
6. Синдеев Игорь Михайлович. **Электроснабжение летательных аппаратов**: [Учебник для вузов гражд. авиации] / И. М. Синдеев. — М. : Транспорт, 1982. — 272 с. : ил.; 22 см.
7. **Накопители энергии:** Учеб. Пособие для вузов / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич; Под ред. Д. А. Бута.–М.: Энергоатомиздат, 1991.–400 с.: ил.
8. **Перетворювальна техніка.** Підручник. Ч. 2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко. За ред. В. С. Руденка. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
9. **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.

10. Ромашко В.Я. **Основи аналізу дискретно-лінійних ланцюгів.** К.: Либідь. 1993.
11. **Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии** / О. Г. Булатов, В. С. Иванов, Д. И. Панфилов. – М.: Радио и связь, 1986. – 160 с., ил.
12. **Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии** / Пентегов И. В.– Киев : Наук. Думка, 1982.–424с.
13. Герман-Галкин С.Г. **Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК.** – СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА принт, 2002. – 304 с., ил.
14. Рогачёв К.Д. **Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).** – http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/igbt/index.htm
15. **MATLAB 6 / 6.1 / 6.5 + Simulink 4 / 5. Основы применения. Полное руководство пользователя** / Дьяконов В.П. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2002.– 768 с.
16. Дьяконов В.П. **Simulink 4. Специальный справочник. –** СПб.: ПИТЕР, 2002. – 528с.: ил.
17. И.В.Черных. **Simulink: Инструмент моделирования динамических систем.** – http://www.matlab.ru/simulink/book1/index.asp.htm
18. **Симметричное преобразование на конечных интервалах** / Жуйков В.Я., Терещенко Т.А., Петергеря Ю.С. – К.: Аверс, 2000. – 218 с.
19. Терещенко Т.О., Петергеря Ю.С., Хохлов Ю.В. **Застосування перетворення в орієнтованому базисі для розрахунку трифазних систем** // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”, частина 2. – 2001. – С. 85-88.
20. Петергеря Ю.С., Хохлов Ю.В., Хижняк Т.А. **Порівняльний аналіз спектральних перетворень** // Электроника и связь. – 2002. - №16. – С.71-75.