

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
Олександр Дідик
«___» _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

***«Автоматизація процесу керування циклами роботи системи
акумулявання при автономному енергопостачання»***

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу, групи АК-23М-2
ОПП «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»
_____ Панченко Є.В.
«___» _____ 20__ р.

Керівник роботи
доцент, к.т.н.
_____ Олена ГОЛИК
«___» _____ 20__ р.

м. Кропивницький

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“___” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА
ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Панченко Євген Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. ТЕМА РОБОТИ «Автоматизація процесу керування циклами роботи системи акумулювання при автономному енергопостачанні»

2. КЕРІВНИК РОБОТИ

Голик Олена Петрівна, к.т.н., доцент

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

3. СТРОК ПОДАННЯ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ 26.12.2024 РОКУ

4. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ автоматично здійснювати процес розряд/заряд/контроль акумуляторних батарей, що входять до складу системи енергозабезпечення з сонячними фотобатареями

5. Перелік графічного матеріалу амплітудо та фазочастотні характеристики, аналіз стійкості системи, структурні та функціональні схеми пристроїв для забезпечення роботи системи акумулювання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ (Додатки)	Прізвище, ініціали консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Жесан Р.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ З/П	НАЗВА ЕТАПІВ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	СТРОК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ РОБОТИ	ПРИМІТКА
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Дата видачі завдання

«__» _____ 20__р.

Підпис керівника

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«__» _____ 20__р.

Підпис здобувача

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

З метою зменшення витрат, пов'язаних з обслуговуванням, підвищенням термінів служби, надійності і ефективності системи енергозабезпечення на основі використання сонячних перетворювачів фото батарей, в магістерській роботі приділено увагу процесам автоматизації заряду, розряду та контролю роботи системи акумулювання, зокрема акумуляторних батарей,

Досліджено та виконано аналіз і вибір найбільш доцільного критерію для заряду акумуляторних батарей, аналіз вольт-амперних характеристик фото батарей, а також синтез в комбінації роботи фотобатарей з акумуляторними батареями. Виконано розрахунок роботи пристрою для дотримання фотобатареї в режимі віддачі максимальної потужності з акумуляторною батареєю.

ANNOTATION

In order to reduce the costs associated with maintenance, increase the service life, reliability and efficiency of the energy supply system based on the use of solar photo-battery converters, the master's thesis focuses on the processes of automating the charge, discharge and control of the operation of the storage system, in particular, batteries,

The analysis and selection of the most appropriate criterion for the charge of storage batteries, the analysis of the current-voltage characteristics of photo batteries, as well as the synthesis of the combination of operation of photo batteries with storage batteries have been studied and carried out. The calculation of the operation of the device to observe the photobattery in the mode of maximum power return with the battery was performed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....

1 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНОМУ ЕНЕРГОПОСТАЧАННІ.....

1.1. Доцільність застосування нетрадиційних відновлюваних джерел енергії для автономного енергопостачання в Україні

1.2. Огляд та узагальнення роботи автономних систем з фото-батареями

1.3 Аналіз роботи акумуляторних батарей для систем з НВДЕ ...

1.4. Висновки до розділу.....

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ФОТОБАТАРЕЯ-АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ.....

2.1. Аналіз та синтез фотоперетворювачів у складі системи....

2.2. Спрощення зарядних характеристик АБ, шляхом апроксимації.....

2.3. Побудова математичної моделі для системи ФБ-АБ у складі енергосистеми з НВДЕ.....

2.4. Визначення показників якості математичної моделі.....

2.5. Висновки до розділу.....

3 РОЗРОБКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНО-АКУМУЛЯТОРНОЇ СИСТЕМИ.....

3.1. Визначення основних схем технічної системи оптичного перетворювача в режимі максимальної потужності.....

3.2. Визначення передаточних характеристик.....

3.3. Вибір методів максимального виявлення.....

3.4. Висновки до розділу.....

4 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ..

4.1. Розрахунок пристроїв зарядки акумуляторів від фотоелементів в режимі максимальної потужності.....

4.1.1. Вихідні дані.....

4.1.2. Розрахунок компонентів перетворювача полярності....

4.1.3. Розрахунок елементів керування

4.2. Підтримання фотоелектрохімічної систему в точці максимального потенціалу, коли фотоелемент частково непрозорий.....

4.3. Пристрій для корекції характеристик струму і напруги акумуляторного фотоелектричного перетворювача.....

4.4 Пристрій для підвищення ефективності накопичувальної системи.....

4.5. Висновки до розділу.....

ВИСНОВКИ.....

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

ДОДАТКИ.....

ВСТУП

Актуальність. Зростаючий інтерес до автономних енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Основними завданнями, які вирішуються при проектуванні автономних енергетичних систем на основі відновлюваних ресурсів, є визначення необхідної потужності акумуляторних батарей для стабільного забезпечення енергією в певних кліматичних умовах та підвищення їх ефективності. Зберігання відновлюваної енергії в енергетичних системах на основі ВДЕ малої потужності (до 10 кВт) в системах накопичення енергії в основному використовуються електрохімічні, лужні та кислотні батареї. Багато публікацій про побудову та експлуатацію систем відновлюваної енергетики показують, що підтримка АБ вимагає значних зусиль і часу. Неоптимальна продуктивність АБ призводить до скорочення терміну його служби, а відносно висока вартість АБ збільшує експлуатаційні витрати всієї енергетичної системи. Враховуючи вищесказане, можна сказати, що підвищення ефективності накопичення енергії та збільшення терміну служби накопичувачів електричної енергії шляхом оптимальної координації джерел енергії та акумуляторів є необхідними умовами для підвищення ефективності та надійності наших енергосистем. Таким чином, автоматизація процесів заряджання та розряджання та керування АВ рекомендується для зменшення витрат на технічне обслуговування та підвищення довговічності, надійності та ефективності систем відновлюваної енергії.

Цілі та завдання дослідження Метою даного дипломного проекту є розробка принципів створення енергетичних систем і пристроїв на основі ВДЕ, які підвищують ефективність енергосистем за рахунок підвищення ефективності накопичення електроенергії ВДЕ.

Поставлені цілі вимагають вирішення наступних наукових завдань:

- аналіз та вибір ефективних критеріїв тарифу АБ.
- аналіз сучасних методів апроксимації струмопровідних характеристик акумуляторів ФП.
- вивчення характеристик роботи ФП і АБ.

- розробка методики розрахунку пристроїв обслуговування ФП в режимі максимальної віддачі потужності при роботі в АБ.

Об'єкт дослідження - незалежні енергетичні системи на базі ВДЕ.

Предмет дослідження є підвищення ефективності систем накопичення електроенергії.

Методи дослідження. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження процесу зарядки акумулятора від ВДЕ з використанням диференціально-математичної машини та інтегрального розрахунку. При складанні методики розрахунку пристроїв підвищення ККД акумуляторів використовувалися математичні засоби та елементи теорії саморегулювання, розрахунки проводились у програмному середовищі MathCad. Моделювання електричних перехідних процесів проводилося за допомогою програми Electronics Workbench.

1 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНОМУ ЕНЕРГОПОСТАЧАННІ

1.1. Доцільність застосування нетрадиційних відновлюваних джерел енергії для автономного енергопостачання в Україні

Внаслідок військового стану в Україні та ворожим нападам на енергетичну інфраструктуру останні роки почали приділяти все більше уваги нетрадиційним відновлюваним джерелам енергії (НВДЕ), зокрема, сонячній та вітровій енергіям. Крім того, вони є екологічно «чистими».

Проте НВДЕ мають властивість невисокої концентрації приблизно до 1 кВт/м^2 у порівнянні з традиційними джерелами енергії, а також неможливість зі 100% впевненістю передбачити їх надходження в конкретні моменти часу.

Доцільним є одночасне застосування різних видів НВДЕ, тобто одне джерело енергії буде компенсувати недостачу іншого в певні моменти часу, надлишок можна направляти на акумуляторні батареї. Але для забезпечення якісної енергії недостатньо лише акумуляторних батарей, необхідно щоб була система акумулювання, яка має включати в себе перетворюючий інвертор. Зазвичай в таких автономних енергосистемах у складі системи акумулювання застосовують електро-хімічні акумуляторні батареї. Тому в кваліфікаційній роботі буде приділено увагу саме ефективному керуванню процесами акумулювання електроенергії в автономних енергосистемах з НВДЕ.

Для коректної роботи енергетичних установок з системою акумулювання також треба визначати ємність системи акумулювання та побудувати схеми систем: електро-хімічний акумулятор→фото-перетворювач; акумуляторна батарея→вітроустановка.

Таким чином необхідно дослідити окремо роботу акумуляторних батарей (АБ) та фото-перетворювачів (ФБ) та комплексну роботу АБ ФБ та вітроустановки (ВЕУ).

НВДЕ в Україні наразі мають дуже широку державну підтримку, шляхом розробки відповідних нормативних актів. Одним з яких є Закон «Про альтернативні джерела енергії» [28].

Наразі в багатьох країнах для енергозабезпечення використовують НВДЕ. Наприклад, Данія взагалі повністю перейшла на НВДЕ та відмовилась від використання традиційних видів палива, які шкодять довкіллю.

В роботах [1-10] запропоновано різні рішення для використання НВДЕ в різних сферах господарства та побутового життя. Так наприклад, в роботі [3] авторами представлено структурну схему системи автономного електричного постачання на основі ФБ. Критерій Найквіста було застосовано для дослідження стабільності системи від підсилювального широтно-імпульсного перетворювача (ШІП) ФБ. Запропоновано блок-схему для способу відбору максимальної потужності від ФБ по струму на виході ФБ. Для моделювання використали програмний пакет MATLAB Simulink. При моделюванні було взято данні за одну добу в автономному об'єкті та сонячного випромінювання з лабораторії LARES. В результаті авторами надані рекомендації про стан користувачів цієї автономної системи з зазначенням періодів доби, в той час коли потужність генерування значно перевищує/недостатньо споживання. А це свою чергу впливає на стан системи акумуляування загалом та акумуляторні батареї зокрема.

В роботі [4] запропоновано сонячно-вітрову систему електростанції, яка містить ФБ, ВЕУ та АБ. Енергію АБ застосовують у разі, коли немає енергії від НВДЕ.

В [24] визначено вирази для відібрання max потужності від НВДЕ при умовах коли працює навантаження безперервно та імпульсно. Розроблено алгоритм з ідентифікацією параметрів системи на основі.

В джерелі [2] зазначено важливість зберігання накопиченої електроенергії від ФБ, шляхом використання акумуляторів необхідної ємності. Рекомендують літій-іонні, свинцево-кислотні (гелеві). Також наведено склад типової автономної системи з ФБ (ФБ, контролер заряду, АБ, інвертор, кабелі та периферійні пристрої).

1.2. Огляд та узагальнення роботи автономних систем з фото-батареями

В попередньому підрозділі було обґрунтовано доцільність застосування комбінованих джерел енергії для автономного енергопостачання. Але необхідно зважати на певні переваги та недоліки використання певних видів НВДЕ. Таким чином бажано володіти інформацією щодо загально-основних вимог до систем енергозабезпечення з НВДЕ [10, 12]: застосовувати пріоритетність об'єктів для енергопостачання для випадків недостатньої кількості або відсутності енергії; забезпечення накопиченої енергії в АБ в обсязі, щоб було достатньо і для споживачів і на систему акумулювання при недостатньої кількості надходження енергії; автоматичне керування процесом енергопостачання з максимально-ефективним використанням НВДЕ в першу чергу. Наразі є дуже багато різних схем таких автономних енергосистем. Підбір елементів складових системи повинен враховувати наявні кліматичні умови та енергопотенціалу джерел енергії.

Виконавши аналіз різних автономних енергосистем [5, 8, 9, 12, 13, 15, 17] було узагальнено основні типові схеми системи, які показані на рис.1.1-1.4.

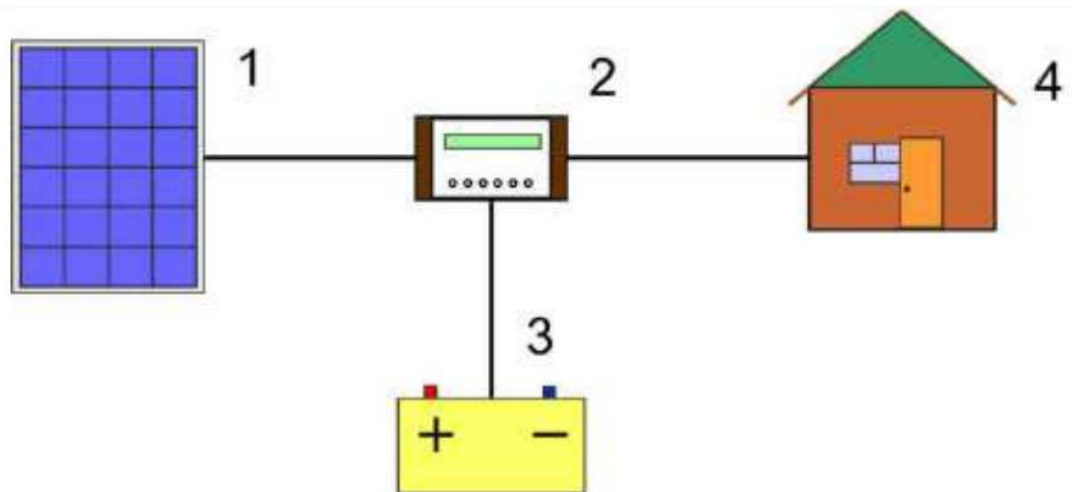


Рисунок 1.1 – Автономна станція з постійним струмом:

1-ФБ; 2 – контролер заряду; 3-АБ; 4-споживач

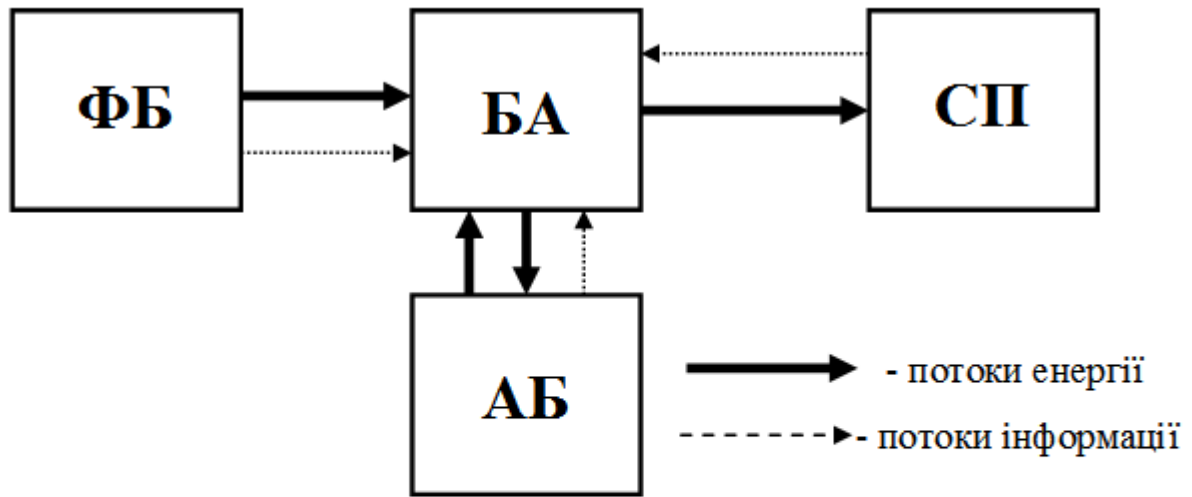


Рисунок 1.2 – Енергосистема на основі фото-батарей:

ФБ – фото батарея; БА – блок автоматики;

АБ – акумуляторна батарея; СП – споживач

Система, що показана на рис. 1.2 працює так. Для стабілізації напруги, яка надходить від фото-батарей, використано блок автоматики. Також блок автоматики застосовують для забезпечення режимів роботи при віддачі тах потужності коли акумуляторна батарея заряджається (розряджається), щоб також не було перезаряду/пере розряду тощо.

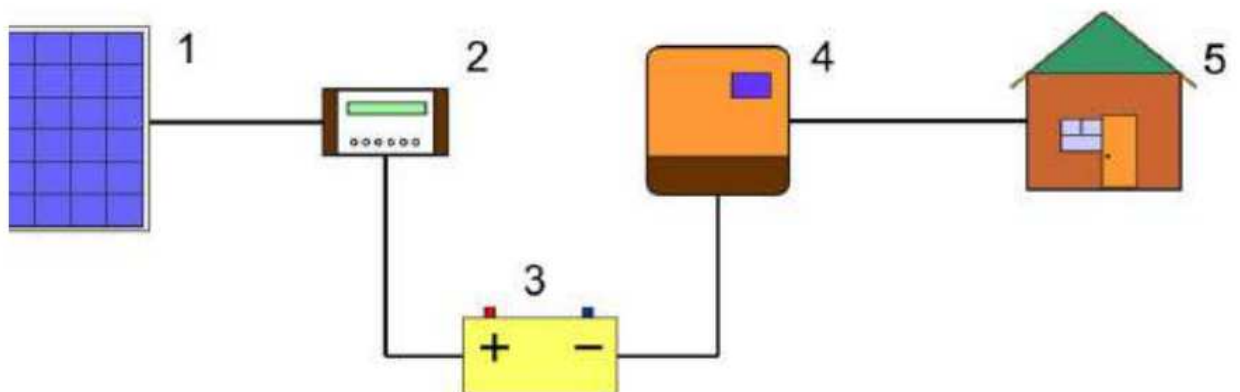


Рисунок 1.3 – Автономна станція зі змінним струмом:

1-ФБ; 2 – контролер заряду; 3-АБ; 4-інвертор; 5-споживач

На рис. 1.4 показана комбінована система з ФБ, ВЕУ та тепловим акумулятором. Застосування комплексного підходу дає змогу знизити ємність АБ (оскільки сонячна та вітрова енергії, як правило, надходять несинхронно, то таким чином може спричинити часткову компенсацію цієї нестабільності в енергопостачанні).

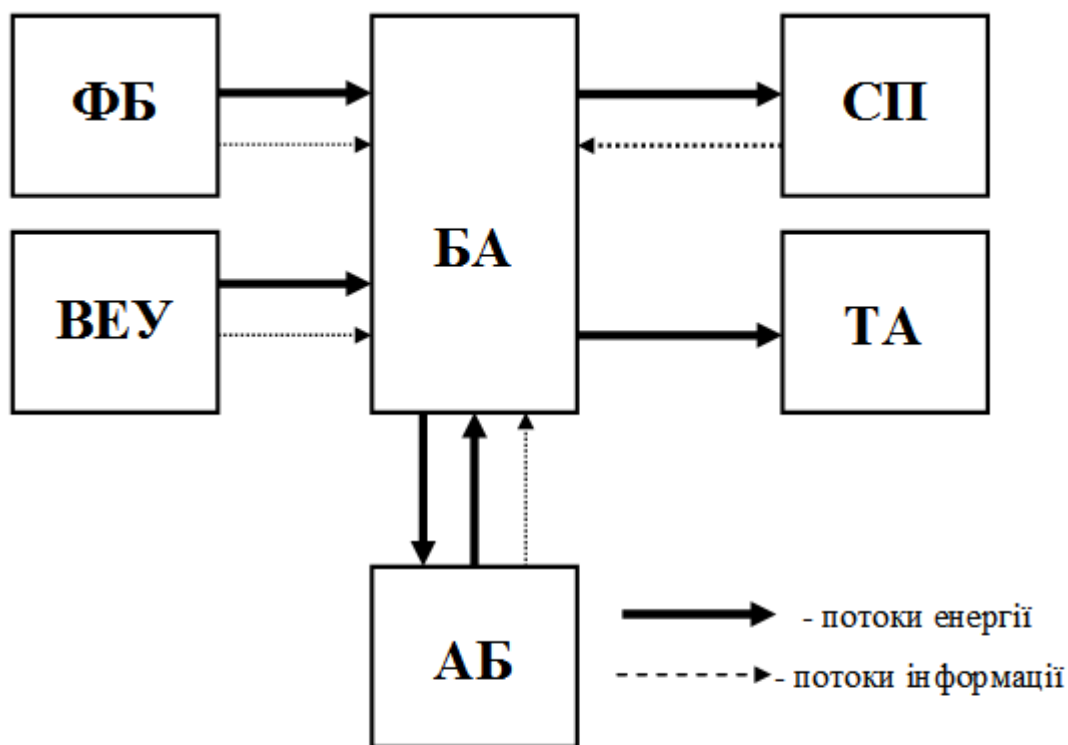


Рисунок 1.4 – Комбінована енергосистема:

ФБ – фото батарея; БА – блок автоматики;

АБ – акумуляторна батарея; СП – споживач;

ВЕУ – вітроелектрична установка; ТА – тепловий акумулятор

Ця система працює так. Блок автоматики аналізує в якому стані перебувають джерела енергії та навантаження користувача. Потім робить стабілізацію для напруги живлення користувача, з метою забезпечення максимальних та ефективних режимів роботи АБ. Інші елементи системи працюють як і в системі, показаній на рис. 1.2.

1.3. Аналіз роботи акумуляторних батарей для систем з НВДЕ

Одним з основних елементів системи енергопостачання локального об'єкту, необхідним для її нормального функціонування, є накопичувач електричної енергії – АБ. Вона забезпечує накопичування енергії відновлювальних джерел для подальшого живлення навантаження або передачі надлишкової енергії у мережу після відповідного перетворення.

НВДЕ вважають нестационарно-стохастичними джерелами, оскільки зміна енергетичних потенціалів таких джерел є періодичною і випадковою, що залежить від пори року, доби та часу, а також погодних умов. Слід зазначити, що можна спостерігати певну компенсацію при поступанні НВДЕ.

В статті [10] наведені графіки залежності того як змінюється потрапляння енергії сонця відповідно до енергетичних потреб (в умовах м. Кропивницький). В результаті не завжди потреби відповідають наявній сонячній енергії.

Належить зважати на те, що хоча середньорічне сумарне надходження сонячної досить стабільне, це не виключає можливості відносно короткотривалих перебоїв в енергопостачанні (до декількох днів). Тому, для стабільного енергопостачання, а зокрема електропостачання споживачів в енергосистемі на основі відновлюваних джерел, необхідним є використання системи акумуляування енергії.

В системах електроживлення на основі відновлюваних джерел невеликої (до 10 кВт) потужності використовуються в основному електрохімічні акумулятори. Використання електрохімічних акумуляторів не тільки дозволяє забезпечити стабільне електропостачання, але також підвищує коефіцієнт використання відновлюваних джерел за рахунок накопичення надлишкової та низько потенційної енергії з подальшою передачею її споживачеві.

Таким чином, від ефективної роботи системи акумуляування залежить ефективність енергосистеми в цілому.

АК заряджається і накопичує електроенергію від первинних джерел (ПД) (ФБ, сонячні колектори, термо-електричні генератори та ін.), які розташовані в певному автономному об'єкті. Уночі, якщо у якості ПД, є сонячний колектор або у погоду без вітру (в якості ПД є ВЕУ) та у пікові години навантажень

(коли енергії ПД не вистачає), АБ розряджається та надає електроенергією автономному споживачу.

АК є видом хімічного джерела струму, пояснюється це тим, що в них при заряді електрична енергія→хімічну, а при розряді хімічна→електричну. В своїй будові вони мають 2 електроди («+» та «-») і електроліт.

В джерелі [12] наводяться різні показники ефективності роботи АБ. Узагальнимо їх.

Маємо:

1. «ефект пам'яті» та саморозряд за якийсь певний період.
2. Довговічність в днях або циклах заряду-розряду.
3. Коефіцієнт віддачі, це відношення кількості електричної енергії, що віддала АК коли повністю розрядилась, до кількості електричної енергії, яку отримано під час заряду.
4. Електрорушійна сила (ЕРС). Залежно від електро-хімічної системи у повністю зарядженої АБ вона буде майже 1,3–2,0 В.
5. Вплив на обладнання та обслуговуючий працівників персонал.
6. Напруга АБ
7. ККД АБ. Його значення буде завжди меншим за значення коефіцієнту віддачі.
8. Віддавана ємність АБ – максимальне значення кількості електроенергії, що АБ буде віддавати коли розрядиться до заданого значення кінцевої кількості розрядної напруги.
9. Можливість зберігати як без електроліту так і з електролітом.

На клеммах однієї АБ напруга та ЕРС малі. Для того щоб отримати більші значення напруги або заряду, треба окремі АБ з'єднати між собою або послідовно, або паралельно.

Фізико-хімічні процеси, які протікають в АБ залежать від значної кількості факторів [12], таких як: досягнутий стан заряду або розряду, температура, відома кількість перезарядів та їх режими; режим заряду/розряду, минулі стани зарядженості/розрядженості та ін. Однак неможливо забезпечити всі ці характеристики в одній АБ. Через те, що деякі є несумісними між собою, то треба жертвувати якоюсь частиною переваг з метою дотримання інших вимог.

Перед тим як обрати необхідний тип АБ для живлення конкретного споживача, необхідно знати наступні дані:

- режим роботи (постійний або періодичний);
- характер зміни навантаження (плавний або ступінчастий);
- діапазон зміни сили струму та напруги;
- температуру навколишнього середовища тощо.

Розглянемо та узагальнимо найрозповсюдженіші види АБ [12].

Свинцево-кислотні акумулятори історично являються традиційним електрохімічним джерелом енергії. Напруга на зажимах одного елемента свинцево-кислотного акумулятора складає 2 В. Питома енергія АБ, що серійно випускаються, складає 30 – 35 Вт.год/кг (теоретичне значення – 170 Вт.год/кг.) Термін служби – 400 – 600 зарядно-розрядних циклів. Існує інформація про перспективні дослідні зразки, для яких досягнута питома енергія 45 – 55 Вт.год/кг, кількість зарядно-розрядних циклів становить 600 – 1200. Свинцево-кислотні батареї характеризуються відносно малим саморозрядом – 0,1-0,5% за добу.

На рис. 1.6 представлено вплив температури на залишкову ємність свинцево-кислотної АБ.

Через відносну дешевизну та непогані експлуатаційні властивості свинцево-кислотні акумулятори широко використовуються в енергосистемах на основі ВДЕ.

У нікель–цинкових АБ присутній невеликий внутрішній опір. А номінальна напруга становить 1,6 В при питомій енергії від 40 до 90 Вт.год/кг. Від 300 до 350 кількість зарядно/розрядних циклів. Не впливають глибокі перерозряди, немає занадто високо-токсичних матеріалів.

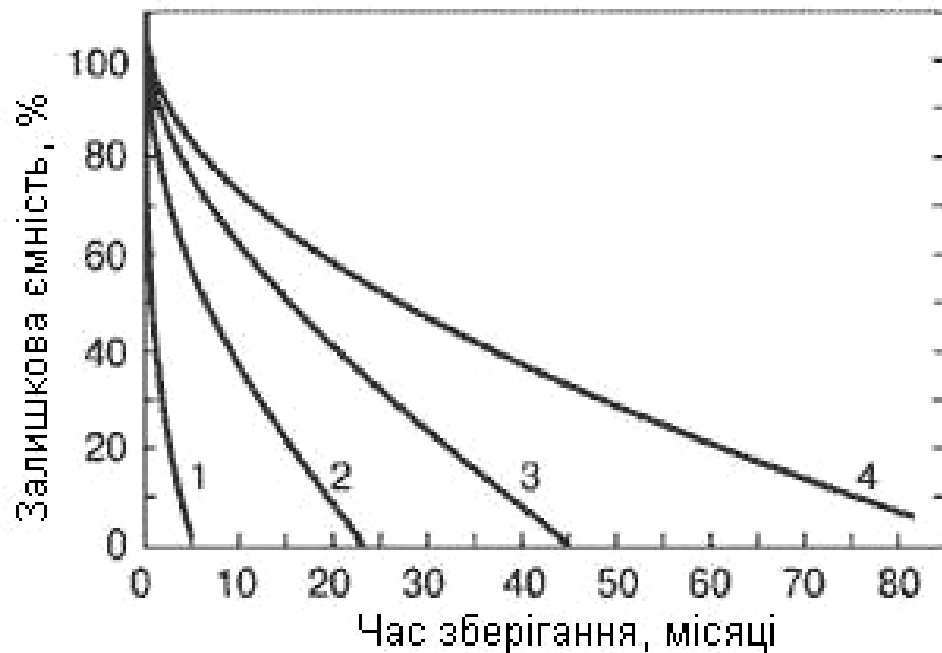


Рисунок 1.6 – Залежність впливу температури при залишковій ємності герметизованої свинцево-кислотної АКБ:

1 – 40 °C; 2 – 20 °C; 3 - 10 °C; 4- 0 °C

Недолік – це важке обслуговування під час використання, тому що необхідно контролювати кінцеву зарядну напругу та обов’язково розряджати до нуля хоча б кожні п’ять-шість циклів [12].

Великий ресурс роботи у нікель-залізних АКБ від 1500 до 2000 циклів. Також перевагами є те, що в них немає шкідливих токсичних речовин і тому вони безпечні під час експлуатації. І ще їх не складно обслуговувати [12]. Але їх не дуже використовують бо є недоліки, які переважають їх позитивні сторони. Це залежність показника розрядного струму і величини температури електроліту від ємності залізного електрода; високий питомий опір сполуки Fe_2O_3 та FeO ; суттєвий саморозряд [12]. Схожі характеристики мають і нікель-кадмієві АКБ, але саморозряд у них невеликий. А дуже істотним недоліків є наявність токсичного кадмію у складі АКБ та вартість самої АКБ.

В таблиці 2.1 приведена інформація про основні характеристики описаних вище та деяких інших типів акумуляторів [27].

Найчастіше в системах з НВДЕ обирають свинцево–кислотні акумулятори. Тому далі в роботі буде досліджуватись робота саме цих АКБ.

Таблиця 1.1 – Зведені характеристики різних АБ

Тип джерела струму	Питома енергія, Вт*год/кг	Питома потужність, Вт/кг	Робоча тем-ра °С	Кількість заряд – розрядних циклів.	Вартість по відношенню до свинцевих.
1	2	3	4	5	6
Свинцево-кислотні	35	100	Оточуюче середовище ОС	600	1
Герметичні свинцево-кислотні	40	160	ОС	500	2,5
Свинцево-водневі	60	120	ОС	1500	3
Нікель-кадмієві	80	300	ОС	1700	4
Нікель-залізни	50	100	ОС	2000	2
Нікель-цинкові	70	200	ОС	150	10
Нікель-гідрид металічні	80	170	ОС	1500	_____
Цинк-хлорні	60	120	ОС	350	_____
Натрій-нікель-хлоридні	100	150	300	1000	_____
Літій-залізо-сульфідні	100	180	450	1000	4
Літій-алюмінієві	175	_____	450	1000	_____

Існуючі системи, що мають у складі ФБ, повинні мати у своєму складі також пристрої, за допомогою яких можна відбирати максимальну потужність у ФБ. Розглянемо електричні характеристики АБ на прикладі найбільш поширеного їх типу – свинцево-кислотних акумуляторів [10]. Рівняння електричної рівноваги АБ $E = I_p R_n + I_p R_{вн}$ визначає зовнішню характеристику АБ $U = f(I)$ [10].

Значення ЕРС E залежить від складу електрохімічної системи активних речовин електродів і електроліту. Напруга $U = I R_n$ на зовнішньому опорі R_n навантаження складає $U = E - I R_{вн}$ і змінюється в залежності від ЕРС, струму розряду I та повного внутрішнього опору $R_{вн}$ АБ, при тому що R_n є функцією низки факторів: струму I , робочої температури елементу T , розмірів і конструкції електродів, складу електроліту. Значення $R_{вн}$ зменшується зі збільшенням об'єму АБ і робочої температури через інтенсивніше протікання електрохімічних процесів. Під час розряду АБ $R_{вн}$ збільшується внаслідок

варіювання концентрації (густини) електроліту і зміни структури поверхневого шару електродів. Повний внутрішній опір визначається з такого виразу:

$$R_{\text{вн}} = R1_{e.n.} + R2_{e.n.} + R3_{el} + R4_{пер} + R5_{пол}, \quad (1.1)$$

де $R_{e.n.}$, $R_{e.n.}$ – опір позитивного і негативного електродів;

R_{el} – опір електроліту;

$R_{пер}$ – перехідний опір між електродами і електролітом;

$R_{пол}$ – опір поляризації, обумовлений появою на поверхнях електродів подвійного шару різнойменних зарядів (при проходженні постійного струму) і зміною потенціалу на кожному з електродів.

Найважливішим параметром АБ є розрядна ємність:

$$q_p = \int_{t_0}^{t_p} i dt, \quad (1.2)$$

де t_0 , t_p – час початку і закінчення експлуатаційного режиму зі струмом $i=i(t)$.

При постійному значенні струму розряду $I=const$ ємність $q_p = I \cdot (t_p - t_0)$, причому $(t_p - t_0) = t_{p,p}$ – час роботи в розрядному режимі. Величину q_p прийнято визначати в ампер-годинах.

Зберігання розімкнених АБ фактично супроводжується шкідливим явищем – саморозрядом, питомий показник якого:

$$\Delta q_{\text{ном}} = (q_0 - q_x) / q_0 t_x, \quad (1.3)$$

де q_0 і q_x – початкова ємність АБ та її ємність після зберігання протягом часу у t_x діб.

Ємність q_p залежить від температури, розрядного струму, режиму проведення заряду. Наближено вплив температури на рівень q_p для діапазону зміни температури від -50°C до $+30^{\circ}\text{C}$ можна визначити лінійною функцією:

$$q_T = q_{T_0} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad , \quad (1.4)$$

де $\alpha \leq 0,01 \text{ A} \cdot$ - температурний коефіцієнт ємності,

T_0 – нормальна температура АБ (300 K).

Основні режими роботи АБ характеризують за допомогою розрядних $u=f(t)$ і зарядних $u=u(t)$, $i=i(t)$ кривих напруги або струму як функції часу. Типовими розрядними кривими є характеристики при 5-годинному режимі розряду при постійній температурі $T=298 \text{ K}$.

1.4. Висновки до розділу

1. Україна має належні умови та необхідність використання НВДЕ для енергозабезпечення.
2. Тому що сонячна енергія самою доступною, то в роботі в подальшому буде розглянуто роботу ФБ.
3. Енергосистеми з ФБ повинні мати систему акумулювання для того щоб компенсувати стохастичний та неперіодичний характер потрапляння сонячного випромінювання на поверхню ФБ, який крім того не корелює з потребами користувача.
4. В результаті огляду видів АБ, зроблено висновок, що для доцільним та економічно-обґрунтованим є застосування в енергосистемах з НВДЕ саме свинцево-кислотних АБ.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ФОТОБАТАРЕЯ-АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ

2.1. Аналіз та синтез фотоперетворювачів у складі системи

В системах, які працюють разом з традиційно промисловою енергомережею, а також і в автономних системах дуже часто застосовують фотоперетворювачі [4]. В парі з такими фотоперетворювачами повинні працювати електрохімічні акумулятори. Але їх застосування вимагає дотримання показників стабільності енергопостачання з одночасним підвищенням коефіцієнту застосування фотоперетворювачів.

З метою аналітичного опису процесу, що відбувається в системі фотобатарея-акумуляторна батарея та загалом в колі живлення обладнання слід спрощувати та підбирати вольт-амперні характеристики (ВАХ) фотобатареї, шляхом визначення аналітичних функцій. Найчастішим застосуванням є дрібно-лінійна апроксимація ВАХ фотобатареї [21, 33-35].

Для параметрів $U_{o.c.} = 15,5\text{В}$, $I_{s.c.} = 2,43\text{ А}$, $S = 0,28\text{ м}^2$ примінемо цю апроксимацію та отримаємо аналітичний опис ВАХ ФБ. I_{sc} - струм короткого замикання ФБ. U_{oc} - напруга холостого ходу ФБ. S - площа ФБ.

При освітленості $S_1=1000\text{ лк}$ та $S_2=700\text{ лк}$ було отримано наступне:

$$U(I) = \frac{(I - I_{sc})}{b + c \cdot (I - I_{sc})}, \quad (2.1)$$

де I - струм ФБ, b, c - константи спрощення апроксимації;

Звідки:

$$b = \frac{1}{F_{sc}}, \quad c = \frac{1}{U_{os}} + \frac{1}{F_{sc} \cdot I_{sc}}$$

$$\text{де } F_{sc} = \frac{dU}{dI}(I = I_{sc})$$

Таблиця 2.1 – Вихідні дані ФБ (освітленість S_1)

$U, В.$	15,67	15,28	15,19	15,13	14,58	13,17	7,43	0
$I, А.$	0	0,33	0,43	0,65	1,25	2,15	2,33	2,40

Таблиця 2.2 – Вихідні дані ФБ (освітленість S_2)

$U, В.$	14,32	13,55	12,94	12,62	10,68	8,3	6,26	0
$I, А.$	0	0,17	0,28	0,36	0,46	0,53	0,65	0,70

При S_1 отримаємо:

$$F_{sc} = -148,6; \quad b = -6,729 \times 10^{-3}; \quad c = 0,061$$

При S_2 отримаємо:

$$F_{sc} = -125,2; \quad b = -7,987 \times 10^{-3}; \quad c = 0,058.$$

Графік залежності ВАХ апроксимуючої функції при S_1 і S_2 наведені на рис. 2.1 та 2.2.

Щоб знайти потужність, що віддає ФБ під навантаженням необхідно використати таку формулу:

$$P(I) = U(I) \cdot I$$

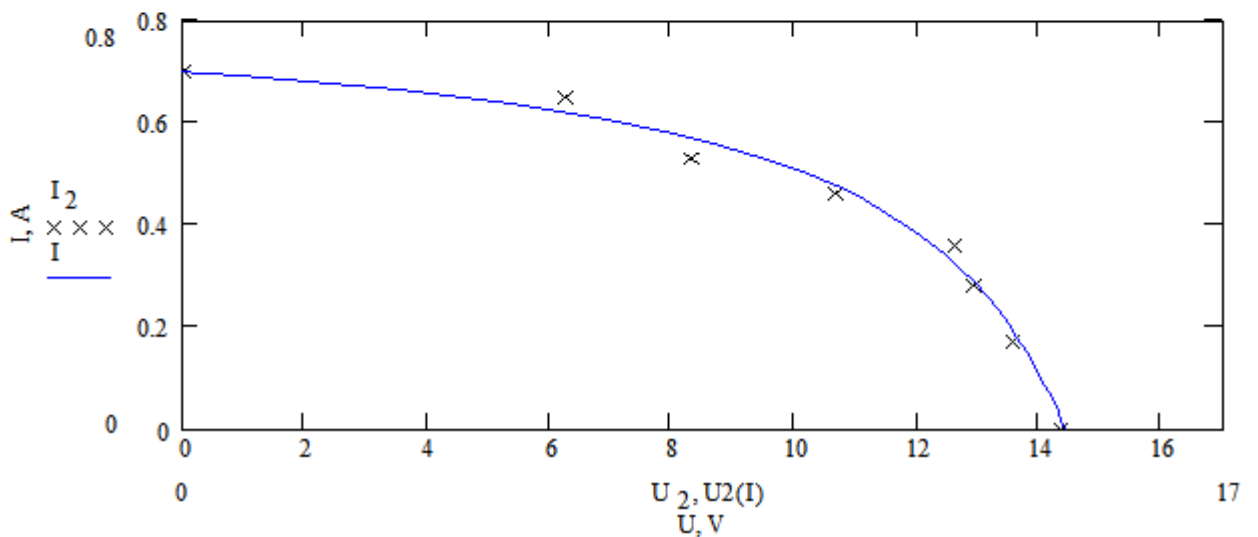
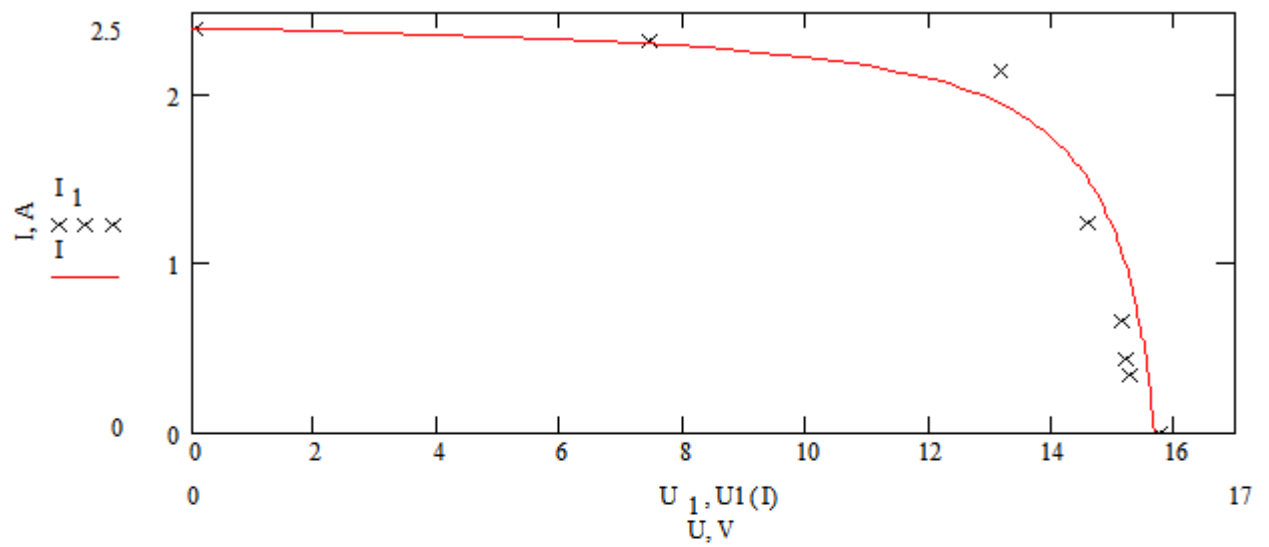


Рисунок 2.1 – Графік дрібно-лінійної апроксимації ВАХ ФБ:

$S_1=1000$ лк - червоний колір; $S_2=700$ лк синій колір

Тут можна зробити висновок, що від інтенсивності освітлення залежить величина та положення екстремуму, який з'являється при залежності потужності від струму ФБ.

Але в подальшому застосовувати для математичного моделювання роботи електричних схем цю дрібно-лінійну апроксимацію недоцільно, оскільки є індуктивність та ємність, а це вимагає розв'язання громіздко-складних диференціальних рівнянь.

Тому для моделювання роботи таких схем рекомендовано використання кусково-лінійної апроксимації. Головною перевагою якої є те, що кутові коефіцієнти апроксимуючих прямих необхідно обчислювати відповідно до параметрів у дрібно-лінійній апроксимації.

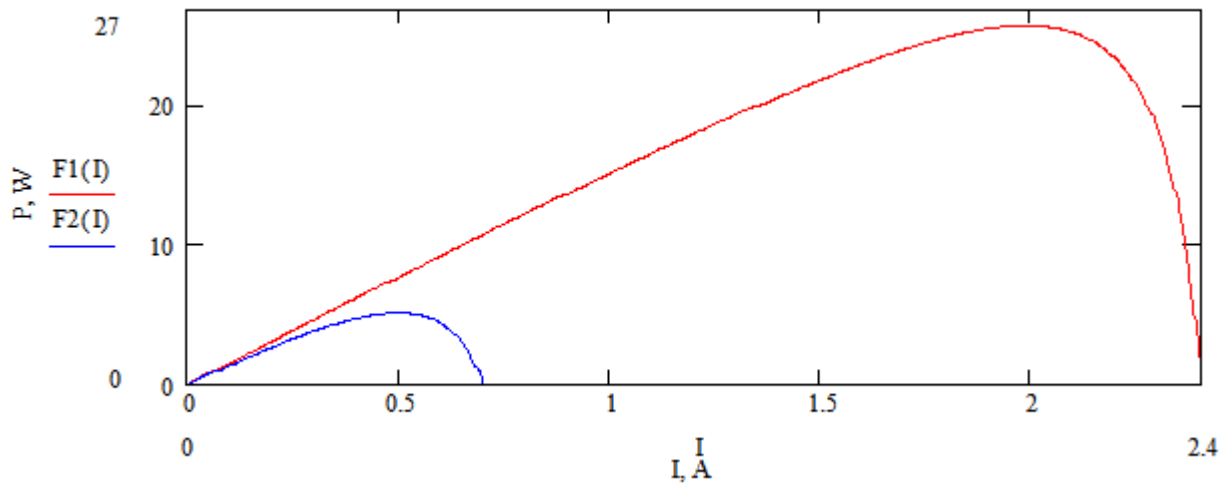


Рисунок 2.2 – Залежність струму ФБ від потужності, що віддає ФБ у навантаження:

$S_1=1000$ лк - червоний колір; $S_2=700$ лк синій колір

В [15-17] було показано приклад кусково-лінійної апроксимації. Там кутові коефіцієнти апроксимуючих прямих прирівнювали до похідних з дрібно-лінійною апроксимацією у точках короткого замикання/холостого ходу.

Але в цьому випадку також було знайдено недоліки [16]:

- велика похибка біля точки максимальної потужності де розташована робоча точка;
- різне значення коефіцієнтів заповнення ВАХ (при дрібно-лінійній та кусково-лінійній апроксимаціях);
- коефіцієнт заповнення ВАХ, що апроксимували за допомогою двох прямих, та кутові коефіцієнти є більшими, ніж коефіцієнт заповнення ВАХ, при апроксимації вир. 2.1.

В [15-17] запропоновано для усунення цих недоліків визначати кутові коефіцієнти прямих апроксимуючих так, щоб точка максимальної потужності (ТМП) співпадала з точкою їх перетину.

Отже тоді зробимо щоб апроксимуючі прямі проходили через точки з такими координатами

$$U_{oc}, 0 \text{ та } U_m, I_m, \text{ і } 0, I_{sc} \text{ та } U_m, I_m,$$

де I_m, U_m - координати ТМП.

Прирівнявши до нуля похідну функції (добуток $U(I) \cdot I$) визначимо координати ТМП

$$F = \frac{d[U(I) \cdot I]}{dI} = \frac{(2 \cdot I - I_{sc}) \cdot (b + c \cdot (I - I_{sc})) - (I^2 - I \cdot I_{sc})}{[b - c \cdot (I - I_{sc})]^2}$$

$$I_m = \frac{c \cdot I_{sc} - b}{c} + \sqrt{\left(\frac{c \cdot I_{sc} - b}{c}\right)^2 + \frac{I_{sc} \cdot (I_{sc} \cdot c - b)}{c}}, \quad (2.2)$$

$$U_m = \frac{\frac{c \cdot I_{sc} - b}{c} + \sqrt{\left(\frac{c \cdot I_{sc} - b}{c}\right)^2 + \frac{I_{sc} \cdot (I_{sc} \cdot c - b)}{c}}}{b + c \cdot \left[\frac{c \cdot I_{sc} - b}{c} + \sqrt{\left(\frac{c \cdot I_{sc} - b}{c}\right)^2 + \frac{I_{sc} \cdot (I_{sc} \cdot c - b)}{c}}\right]}, \quad (2.3)$$

Тоді рівняння прямих апроксимуючих буде:

$$U_1 = a_1 \cdot I + b_1 \quad U_1 = \frac{I \cdot (U_m - U_{oc})}{I_m} + U_{oc},$$

$$U_2 = a_2 \cdot I + b_2, \text{ або: } U_2 = \frac{I \cdot U_m}{I_m - I_{sc}} - \frac{I_{sc} \cdot U_m}{I_m - I_{sc}}.$$

При освітленості $S_I=1000$ лк отримали такі коефіцієнти апроксимації $a_1 = -1,384$ Ом, $b_1 = 15,67$ В, $a_2 = -30,147$ Ом, $b_2 = 74,75$ В.

Щоб оцінити якість кусково-лінійної апроксимації можна взяти за критерій величину максимальної відносної похибки стосовно дрібно-лінійної апроксимації. При цьому коефіцієнти заповнення ВАХ P_{ff} мають бути однаковими при обчисленні як дрібно-лінійною так і кусково-лінійною апроксимаціями.

Тепер треба знайти значення максимальної відносної похибки кусково-лінійної апроксимації щодо дрібно-лінійної апроксимації.

Для зручності було введено такі безрозмірні змінні u, x, f^*

$$u = \frac{U}{U_{oc}}, \quad x = \frac{I}{I_{sc}}, \quad f^* = \frac{U_{oc}}{F_{sc} I_{sc}}$$

Тоді вираз (2.1) буде мати такий вигляд:

$$u(x) = \frac{1-x}{1-(1+f^*)x}$$

$$P(x) = \frac{1-x}{1-(1+f^*)x} x$$

$$\frac{dP(x)}{dx} = 0; \quad x = \frac{1 - \sqrt{-f^*}}{1 + f^*}$$

було знайдено координату x ТМП.

Далі маємо:

$$u = \frac{1 - \sqrt{-f^*}}{1 + f^*}$$

Рівняння апроксимуючих прямих:

$$u_1(x) = \frac{a-1}{a}x + 1;$$

$$x_2(u) = \frac{a-1}{a}u + 1,$$

$$u_2(x) = \frac{a}{a+1}x - \frac{a}{a-1},$$

$$\text{де } a = \frac{1 - \sqrt{-f^*}}{1 + f^*}.$$

Дрібно-лінійна та кусково-лінійна апроксимації наведені на графіках, показаних на рис. 3.3.

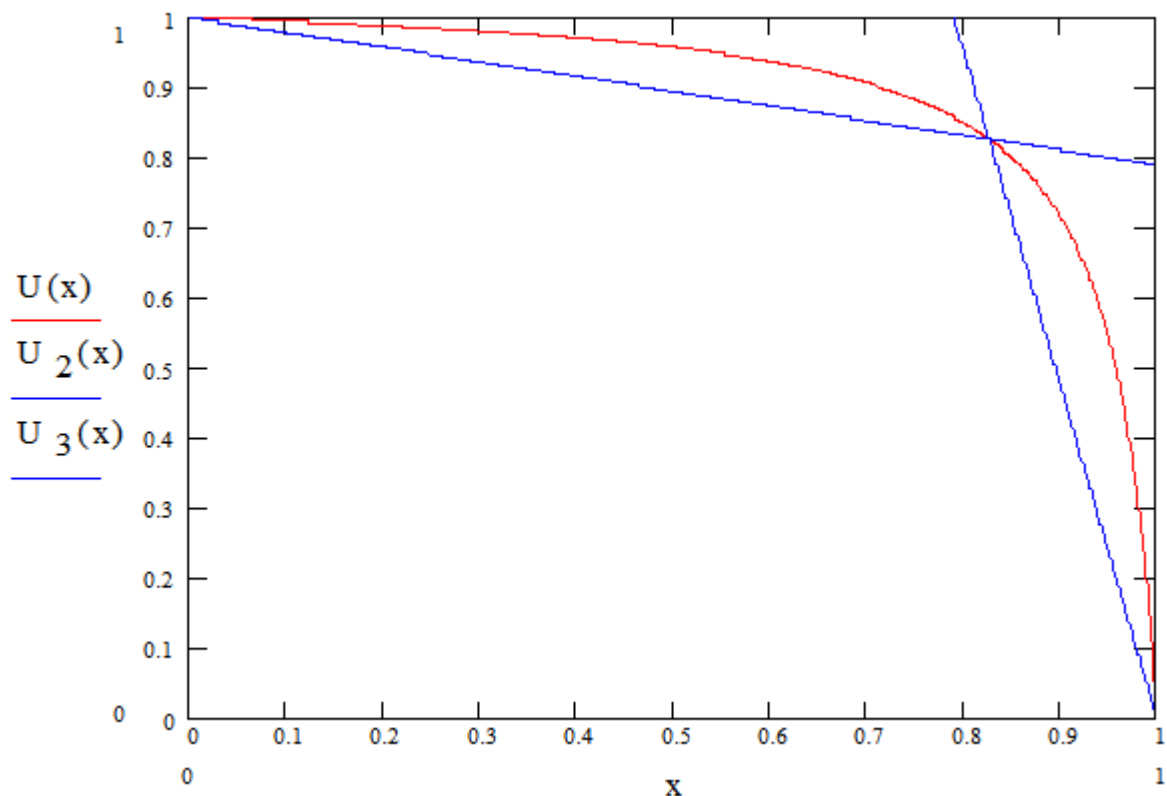


Рисунок 2.3 – Графіки апроксимацій:
дрібно-лінійна (червоний колір)
кусково-лінійна (синій колір)

Тут за критерій якості взято максимальну відносну похибку $\sigma(x)$.

Беремо таку функцію:

$$F(x) = \frac{1-x}{1-(1+f^*)x} - xb - 1; \quad b = \frac{a-1}{a} = \frac{-f^* - \sqrt{-f^*}}{1 - \sqrt{-f^*}}$$

Треба визначити координату точки x – це і є максимальна відносна похибка, а від неї треба знайти максимум $F(x)$ функції.

Було взято таке диференціальне рівняння:

$$\frac{dF(x)}{dx} = 0, \tag{2.4}$$

$$x^2 - \frac{2}{1+f^*}x - \frac{f^*-b}{b(1+f^*)^2} = 0$$

Отримали:

$$x_c = \frac{1}{1 + f^*} \left(1 - \sqrt{\frac{f^*}{b}} \right)$$

Максимальна абсолютна похибка

$$\delta(x) = F(x_c).$$

Максимальна відносна похибка

$$\sigma(x) = \frac{F(x_c)}{u(x_c)}.$$

На рис. 2.4 показаний графік залежності максимальної відносної похибки від параметру функції f^* . З залежності графіка (див. рис. 2.4) видно, що мінімальна відносна похибка $\sigma(f^*) = 0$ співпадає з граничними значеннями параметру f^* .

Для випадку якщо параметр f^* лежить в межах $-0,1 < f^* < -0,01$ проведено розрахунки для ФБ, і на рис. 2.5 наведена залежність максимальної відносної похибки

Максимальна відносна похибка для реальних ФБ знаходиться в таких межах $7,4\% < \sigma(f^*) < 4,8\%$. Причому в точці максимальної відносної похибки кутовий коефіцієнт апроксимуючої прямої буде співпадати з диференціальним опором (як видно зі співвідношення 2.4).

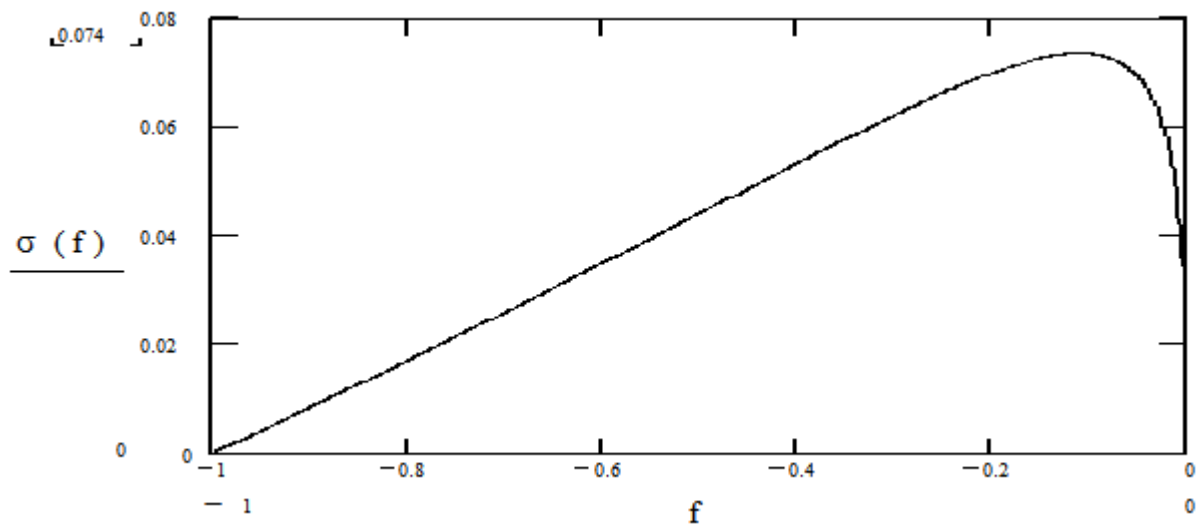


Рисунок 2.4 – Значення максимальної відносної похибки залежно від параметру f^*

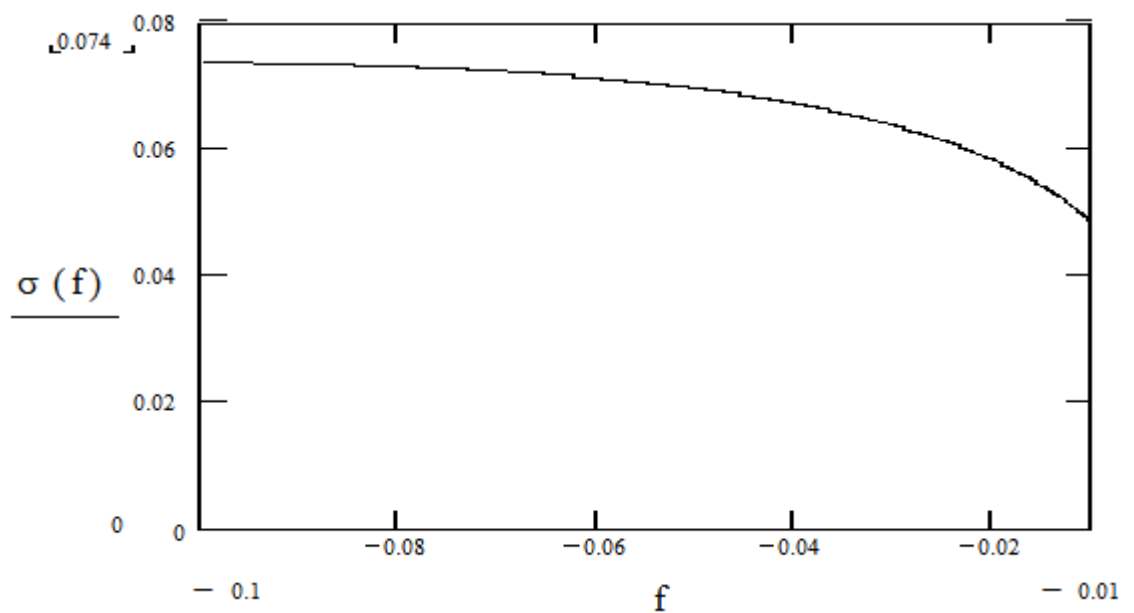


Рисунок 2.5 – Максимальна відносна похибка залежно від параметру f^*

2.2. Спрощення зарядних характеристик АБ, шляхом апроксимації

Процес заряду АБ від ФБ можна записати в аналітичному виразі зарядної характеристики. На рис. 2.6 [15] представлено графіки зарядних характеристик

лужних АБ (типу НК – 20). Відповідно до виразу 2.5 бачимо, що напруга на АБ залежить від заряду, що приходить на АБ в певний момент часу t та від струму, який протікає через АБ. Таким чином маємо таку величину:

$$Q = \int_0^t I dt, \quad (2.5)$$

де I, Q - струм через АБ та заряд АБ в момент часу t .

Отже функція, що спрощує напругу на АБ буде мати наступний вигляд:

$$U_a = a_3 \cdot Q + a_4 \cdot I + b_3, \quad (2.6)$$

де U_a - напруга на АБ;

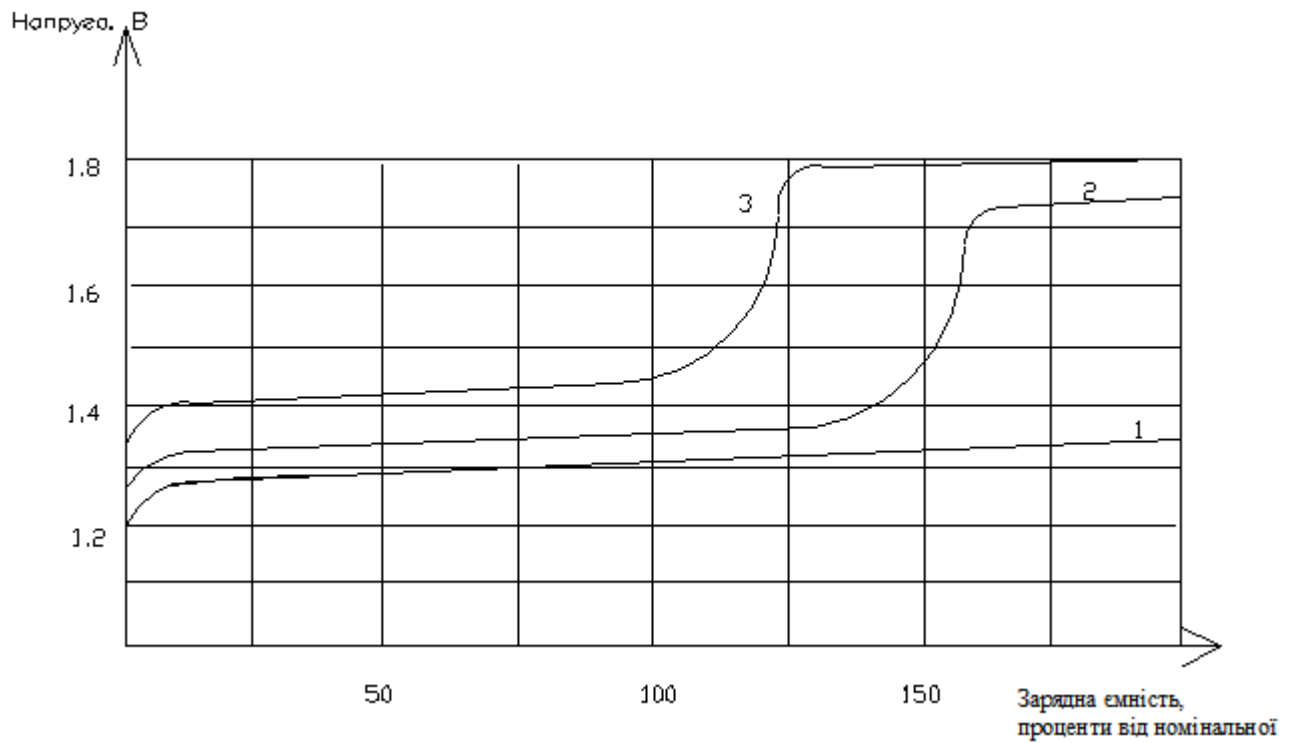
a_3 (Ом/год), a_4 (Ом) – коефіцієнти пропорційності;

b_3 - напруга розрядженого АБ.

Коефіцієнти a_3, a_4 визначають за зарядними кривими АБ (див. рис. 2.6) шляхом обчислення тангенсу кута нахилу зарядних характеристик для коефіцієнта a_3 , який залежить від заряду Q , який надали АБ.

В процесі заряду АБ струмом зі значенням $I = 0,01Q_n$ (при цьому Q_n - значення номінальної ємності АБ), другу ділянку зарядної характеристики (місце на ділянці де різко збільшується напруга) буде не видно.

Коли АБ заряджений в 90–95%, то третя ділянка з'явиться. Це дає можливість в подальших розрахунках приймати значення $a_3 = const$.



**Рисунок 2.6 – Залежності зарядних кривих лужних
нікель– кадмієвих АБ при температурі 20°C:**

1 – заряд струмом $I = 0,01Q_n = 0,2A$;

2 – заряд струмом $I = 0,1Q_n = 2A$;

3 – заряд струмом $I = 0,2Q_n = 4A$

Коефіцієнт a_4 повинен враховувати зміни в напрузі на АБ відповідно до зарядного струму.

Тобто

$$a_4 = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

де ΔU - величина зміни напруги на АБ під час зміни зарядного струму ΔI .

Також таке спрощення можна використовувати для опису зарядних характеристик свинцевих/кислотних АБ.

2.3. Побудова математичної моделі для системи ФБ-АБ у складі енергосистеми з НВДЕ

Розглянемо процес зарядки АБ від ФБ. Енергія, що виробляється сонячною енергією, нестабільна і переривчаста. Це пов'язано з непостійним характером сонячного випромінювання. У зв'язку з цим необхідно підвищити ефективність системи, чого можна досягти за рахунок підвищення коефіцієнта використання електричної енергії, виробленої ФБ. Іншими словами, рекомендується підтримувати акумуляторну систему в оптимальному стані при режимі віддачі максимальної потужності ФБ.

Відповідно до [15] математична модель ТО повинна описувати опору РС у вигляді математичного співвідношення, яке визначає зв'язок між параметрами, що характеризують ТО РС.

Для аналітичного опису ВАХ ФБ ми використовуємо апроксимацію (кускову):

$$U(I) = a_1 \cdot I + b_1, (0 < I < I_m)$$

$$U(I) = a_2 \cdot I + b_2, (I_m < I < I_{sc})$$

де

$$a_1 = \frac{U_m - U_{oc}}{I_m}, b_1 = U_{oc},$$

$$a_2 = \frac{U_m}{I_m - I_{sc}}, b_2 = \frac{U_m \cdot I_{sc}}{I_m - I_{sc}}.$$

По формулам 2.2 та 2.3 знають I_m, U_m . Заряд за допомогою 2.5.

Рівняння для опису процесу заряду АБ тоді буде таким:

$$U(I) = a_3 \cdot \int_0^t I dt + a_4 \cdot I + b_3.$$

Нижче наведені співвідношення, які характеризують розрахункову схему системи:

$$\left. \begin{aligned} U(I) &= a_1 \cdot I + b_1, (0 < I < i_m) \\ U(I) &= a_2 \cdot I + b_2, (i_m < I < i_{к.з.}) \\ U(I) &= a_3 \cdot \int_0^t I dt + a_4 \cdot I + b_3 \end{aligned} \right\}$$

Позиція робочої точки на фотоперетворювачі ВАХ на фотоперетворювачі встановлюється на перетині ліній (останнє значення фотоперетворювача). Тоді рівняння, створене за схемою роботи системи фотоперетворювач-електрохімічна батарея, має такий вигляд:

$$a_1 \cdot I + b_1 = a_3 \cdot \int_0^t I dt + a_4 \cdot I + b_3$$

$$a_1 \cdot I + b_1 = a_3 \cdot \int I dt - a_3 Q(0) + a_4 \cdot I + b_3, \quad (2.7)$$

де $Q(0)$ - значення $\int I dt$ при $t = 0$.

Далі виконуємо диференціювання, маємо

$$a_1 \cdot \frac{dI}{dt} = a_3 \cdot I + a_4 \cdot \frac{dI}{dt}$$

Отримуємо

$$I = I(0) \cdot e^{\frac{a_3}{a_1 - a_4} \cdot t}, \quad (2.8)$$

$I(0)$ визначають за виразом (початкове значення струму):

$$I(0) = \frac{a_1}{a_1 - a_4} \cdot \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \approx \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}, \quad (2.9)$$

Потім здійснили інтегрування 2.8 та отримали вираз для взаємозв'язку заряду в АБ відповідно до часу заряду:

$$Q = I(0) \cdot \frac{a_1 - a_4}{a_3} \cdot \left(e^{\frac{a_3}{a_1 - a_4} \cdot t} - 1 \right), \quad (2.10)$$

Графік функції для цієї ФБ при освітленості $S_I = 1000$ лк з коефіцієнтом $a_1 = -1,384$ Ом та АБ НК-14 з коефіцієнтами $a_3 = 0.21$ Ом/год та $a_4 = 0.02$ Ом наведений на рис. 2.7. Також на цьому рисунку показано функцію $Q_1(t)$ - заряд АБ постійним струмом.

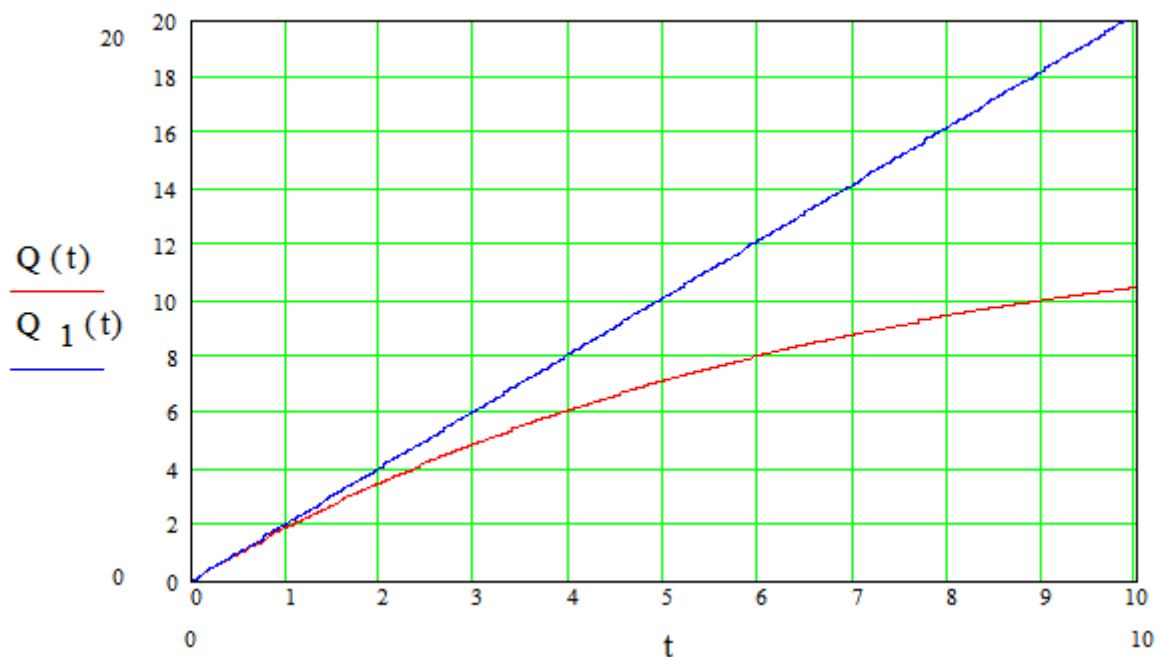


Рисунок 2.7 – Заряд АБ постійним струмом (синій), від ФБ (червоний)

На рис. 2.7 ми бачимо, що зарядка батареї від оптичного перетворювача характеризується значно нижчою швидкістю, а також неможливістю подавати живлення до батареї вище певного порогу. У цьому випадку:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) \rightarrow 15,53 \text{ А/год.}$$

2.4. Визначення показників якості математичної моделі

Відповідно до [31] матмодель розрахункової схеми технічного об'єкта має відповідати таким вимогам:

- відповідність - в даному випадку точний якісний і досить точний кількісний опис характеристик важливого технічного елемента;
- точність - можливість забезпечити прийнятний збіг між фактичним значенням і виявленим значенням за допомогою математичної моделі початкових параметрів налаштування;
- надійність - стійкість математичної моделі до помилок у вихідних даних.

Наявність в математичній моделі відповідності першим двом вимогам визначають, як правило, експериментально, а надійність матмоделі аналізується аналітично.

Треба взяти метод визначення коефіцієнта чутливості [30]. Цей метод означає, що досліджувана $f(t, \alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)$ функція розкладається в ряд Тейлора зі своїми параметрами $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$, і для визначення наближеного значення $\Delta f(t, \alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)$ (обмеження першого порядку) враховується лише перший член розкладання.

Врахувавши те, що найважливішим вихідним показником цієї такої матмоделі є те, як залежить максимальне значення заряду, що надається АБ, від характеристик АБ, певного ФБ та початку роботи робочої точки (тобто $Q_{max} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q(t)$ враховуємо вплив похибок $\Delta \alpha_n$ і Q_{max}).

Максимальна величина заряду залежить не від погоди, а від характеристик ФБ, початкового розташування АБ і робочої поверхні. Відповідно до виразів (2.9) та (2.10) отримаємо:

$$Q_{\max} = -\frac{a_1 \cdot (b_2 - b_1)}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)},$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\max} \approx & \frac{(b_2 - b_1) \cdot a_2}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)^2} \cdot \Delta a_1 - \frac{a_1 \cdot (b_2 - b_1)}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)^2} \cdot \Delta a_2 + \\ & + \frac{a_1 \cdot (b_2 - b_1)}{a_3^2 \cdot (a_1 - a_2)} \cdot \Delta a_3 + \frac{a_1}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)} \cdot \Delta b_1 - \frac{a_1}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)} \cdot \Delta b_2. \end{aligned}$$

Виділяємо коефіцієнти впливу:

$$\lambda_1 = \frac{(b_2 - b_1) \cdot a_2}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)^2}, \quad \lambda_2 = \frac{a_1 \cdot (b_2 - b_1)}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)^2},$$

$$\lambda_3 = \frac{a_1 \cdot (b_2 - b_1)}{a_3^2 \cdot (a_1 - a_2)}, \quad \beta_1 = \frac{a_1}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)},$$

$$\beta_2 = \frac{-a_1}{a_3 \cdot (a_1 - a_2)}.$$

Для ФБ та АБ, використаних для аналізу, значення будуть такі:

$$\lambda_1 = -10,25, \quad \lambda_2 = 0,47, \quad \lambda_3 = -64,43, \quad \beta_1 = 0,229, \quad \beta_2 = -0,229.$$

Як бачимо, то найбільше впливає на точність розрахування найбільше максимального заряду коефіцієнти a_1 і a_3 (це коефіцієнти в подальшому треба розраховувати як найточніше).

2.5. Висновки до розділу

1. Щоб підвищити значення параметру максимального заряду, що надається АБ від ФБ, слід робити підвищення значення струму $I(0)$.
2. Для цього є два способи:

- струм короткого замикання ФБ розпочинати заряд в точці, що перебуває на I прямій апроксимації;

- збільшувати напругу холостого ходу ФБ.

3. Ці способи можуть призвести до зростання розмірів системи ФБ, ну і вартості системи в цілому.

4. Зменшення кількості числа комутаторів можливе за умови зниження втрат потужності.

5. Тому необхідне використання систем автоматичного регулювання, що мають підтримувати оптимально-раціональний режим заряду АБ від ФБ, а також водночас мати 1 комутатор.

6. Також цій системі слід постійно підтримувати робочу точку в раціональній точці оптимального використання ФБ, тобто, в точці перетину прямих апроксимації, але при цьому щоб їх положення не змінювались під час процесу заряджання АБ.

3 РОЗРОБКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНО-АКУМУЛЯТОРНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Визначення основних схем технічної системи оптичного перетворювача в режимі максимальної потужності

У попередньому розділі ми побачили, що при роботі з електрохімічними елементами необхідно використовувати пристрій для підтримки фотоперетворювача в режимі максимальної потужності. Пристрій використовує якомога менше комутаторів, щоб мінімізувати втрати струму та підтримувати значення струму та напруги ФБ (робоча точка), щоб продукт відповідав максимальній точці потужності незалежно від умов освітлення, в яких він повинен бути складений. Насправді цей пристрій має бути перетворювачем постійного струму, а його керування має забезпечувати, щоб робоча точка знаходилась у ТМП.

Спочатку ми введемо поняття опору заряду батареї $R_z = \frac{U_{аб.}}{I_{зар.}}$ $U_{аб.}$ - напруга на акумуляторі; $I_{зар.}$ - зарядний струм. Для того щоб ФБ працювала у режимі максимальної потужності, опір навантаження батареї необхідно перемістити до ТМП, в даному випадку до перетину прямих. Розберемо деякі варіанти схемних рішень, які можна використовувати для вирішення даної задачі.

1. Перетворювач (трансформатор) постійної напруги-1. Принципова схема трансформатора наведена на рис. 3.1а

Це базова схема підвищувального перетворювача постійного струму. Щоб вирішити цю проблему, цей тип трансформатора можна використовувати для регулювання, лише якщо напруга фотоперетворювача, що відповідає точці максимальної потужності ($U_{тмп}$), перевищує напругу акумулятора. Ця умова не завжди виконується. Крім того, напруга може впасти до точки максимальної потужності, коли інтенсивність освітлення зменшується або коли змінюється температура фотоелемента.

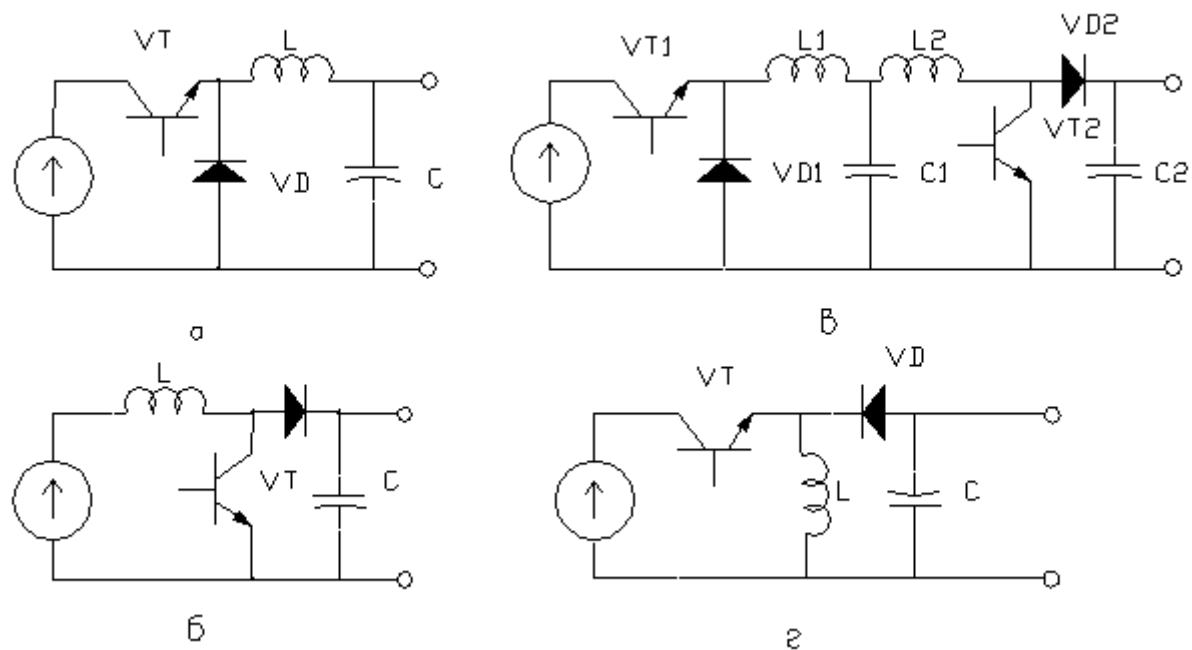


Рисунок 3.1 – Перетворювачі постійної напруги:

а- перший тип, б- другий тип, в - каскадні трансформатори першого і другого типу, г - третього типу зворотної полярності (полярно-реверсивний)

2. Перетворювач постійної напруги-2. Принципова схема показана на рисунку 3.1 б. Це базова схема підвищувального перетворювача постійного струму. Для використання перетворювача напруги DC-2 необхідно виконати наступні умови $U_{min} \leq U_{ab}$. В принципі, ця умова завжди може бути виконана, і, таким чином, цю систему можна регулювати. Однак у цьому випадку зменшується кількість ФБ, які можна використовувати з даною АБ (обмеження напруги холостого ходу).

3. Послідовне з'єднання перетворювача постійної напруги-1 та перетворювача постійної напруги-2 на сонові послідовного з'єднання трансформатора постійної напруги-1 і трансформатора постійної напруги-2 можна отримати схему з характеристиками обох. Його можна використовувати для роботи з перетворювачем постійної напруги-1 і з перетворювачем постійної напруги -2, тобто оптичними перетворювачами з плюсом U_{min} і мінусом U_{ab} (рис. 3.1в). Але якщо цей спосіб піддати регулюванню, то через наявність двох перемикачів система управління ускладниться і ефективність знизиться.

4. Перетворювач постійної напруги-3 полюси - інвертуючий перетворювач. Ця схема може мати характеристики перетворювача постійної напруги-1 і перетворювача постійної напруги-2 (рисунок 3.1г) в залежності від коефіцієнта заповнення керуючих імпульсів d [23]. $S_u = \frac{d}{1-d}$; $d = \frac{T_1}{T_s}$

T_1 - Контроль ширини імпульсу,

T_s - Перемикання циклів.

S_u - Коефіцієнт передачі напруги.

Особливістю цієї схеми є те, що вихідна напруга протилежна вхідній, але в даному випадку це не становить великої проблеми. Оскільки ця схема має лише один основний елемент, нею можна керувати за допомогою відносно простої системи керування. Враховуючи це, виберемо перетворювач постійної напруги - 3, як об'єкт керування для керування оптичним перетворювачем. Є така ситуація $P \sim f(d)$.

3.2 Визначення передаточних характеристик

Схеми перетворювача напруги постійного струму мають два режими роботи: режим постійного потоку та режим переривчастого потоку [21, 35]. Режим постійної витрати характеризується тим, що струм, що проходить через дросель, змінюється від нуля протягом усього циклу перемикання. Режим переривчастого струму характеризується інтервалами часу протягом циклу перемикання, коли імпедансний струм дорівнює нулю. Залежно від режиму роботи одна і та ж схема перетворювача постійної напруги може мати різні характеристики, особливо режим імпульсного перенапруги постійного струму, який має значно менші втрати (вищий ККД) [33, 35].

Режим роботи перетворювача визначається параметрами джерела живлення (в даному випадку ФБ), індуктивністю дроселя, опором навантаження і коефіцієнтом заповнення керуючого імпульсу d . Щоб визначити статичні характеристики керування перетворювачем постійної напруги в режимі постійного потоку, знайдіть струми та напруги еквівалентної

схеми, що представляє перетворювач постійної напруги під час фаз заряджання та розрядження дроселя. Затока .

На фазі навантаження дроселя ця система диференціальних рівнянь характеризується такою схемою:

$$V_s = L_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + R_{lf} \cdot I_f + R_{cf} \cdot (I_f - I) + U_{cf},$$

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U_{cf} - R_l \cdot I - (I - I_f) \cdot R_{cf},$$

$$C_f \cdot \frac{dU_f}{dt} = I_f - I,$$

$$U_c = I_l \cdot (R_c + Z_l),$$

$$C \cdot \frac{dU_c}{dt} = I_l,$$

$$U_l = Z_l \cdot \frac{U_c}{Z_l + R_c} + I \cdot R_l.$$

На етапі розвантаження АБ ця схема характеризується наступним рівнянням:

$$V_s = L_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + R_{lf} \cdot I_f + R_{cf} + U_{cf},$$

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = -U_c - R_l \cdot I - (I - I_l) \cdot R_c,$$

$$C_f \cdot \frac{dU_{cf}}{dt} = I_f,$$

$$U_c = R_c \cdot (I_l - I) + Z_l \cdot I_l,$$

$$C \cdot \frac{dU_c}{dt} = I_l - I,$$

$$U_l = \frac{Z_l}{Z_l + R_c} \cdot U_c.$$

де V_s, U_{cf}, U_c, U_l напруга джерела живлення (ФБ), на конденсатор фільтра напруги, на конденсатор трансформатор напруги, напруга на навантаження;

I_f, I, I_l - струм придушення фільтра, струм та струм навантаження трансформатора для придушення відповідно;

$R_{lf}, R_{cf}, R_c, R_l, Z_l$ - активний опір дросельного фільтра, активний опір конденсатора фільтра, активний опір конденсатора трансформатора, активний опір дросельного трансформатора, стійкий до будь-яких навантажень.

Для отримання коефіцієнта передачі цього методу використаємо метод усереднення змінної стану [21, 34, 35]. Суть цього методу полягає в перетворенні двох систем рівнянь, що описують схему, у два періоди структурної стійкості в одній системі шляхом складання відповідних рівнянь, помножених на вагові коефіцієнти.

Ваговим коефіцієнтом є відносна тривалість періодів стійкості конструкції. Тривалість періоду структурної стійкості в першому випадку така ж, як і тривалість періоду структурної стійкості t_s в другому випадку $T_s - t_s$. Період відносної стійкості структури в першому випадку $d' = 1 - \frac{t_s}{T_s} = 1 - d$ дорівнює (коефіцієнт заповнення керуючого імпульсу), а в другому - $d = \frac{t_s}{T_s}$.

Середнє рівняння системи стану:

$$V_s = L_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + R_{lf} \cdot I_f + R_{cf} \cdot I_f - R_{cf} \cdot I \cdot d + U_{cf},$$

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U_{cf} \cdot d - U_c \cdot (1-d) + R_c \cdot I_l \cdot (1-d) - R_c \cdot I \cdot (1-d) - \\ - R_l \cdot I + R_{cf} \cdot d \cdot (I - I_f),$$

$$C_f \cdot \frac{dU_{cf}}{dt} = I_f - I \cdot d,$$

$$U_c = (R_c + Z_l) \cdot I_l - R_c \cdot I \cdot (1-d),$$

$$C \cdot \frac{dU_c}{dt} = I \cdot (1-d) - I_l,$$

$$U_l = U_c.$$

Ця система рівнянь написана з посиланням на миттєві значення залучених змінних, але для подальших розрахунків рекомендується мати дві системи рівнянь, одну для постійного струму, а іншу для змінного струму. Вираз миттєвого значення змінної у вигляді суми:

$$V_s = v_s + v'_s, \quad I_f = i_f + i'_f, \quad I = i + i',$$

$$U_{cf} = u_{cf} + u'_{cf}, \quad I_l = i_l + i'_l, \quad U_c = u_c + u'_c, \quad U_l = u_l + u'.$$

Постійна складова відповідної функції часу $v_s', i_f', i', u_{cf}', i_l', u_c', u_l'$. $v_s, i_f, i, u_{cf}, i_l, u_c, u_l$ - змінні компоненти цих функцій. Визначте відхилення низького сигналу від фіксованого значення.

Щоб гарантувати, що режими постійного та змінного струму можуть бути враховані, наступне співвідношення вважається правильним:

$$\frac{v_s'}{v_s} \ll 1, \frac{u_{cf}'}{u_{cf}} \ll 1, \frac{u_l'}{u} \ll 1, \frac{i_f'}{i_f} \ll 1, \frac{i_l'}{i_l} \ll 1, \frac{d'}{d} \ll 1, \frac{i'}{i} \ll 1, \frac{u_c'}{u_c} \ll 1,$$

Коли ця умова виконується (у режимі безперервного потоку ця умова приблизно виконується), добуток змінних компонентів є набагато меншим, ніж інші члени у відповідній сумі, і ним можна знехтувати.

Фіксована система рівнянь автомобіля:

$$v_s = R_{lf} \cdot i_f + u_{cf},$$

$$0 = u_{cf} \cdot d - u_c \cdot (1 - d) - R_l \cdot i,$$

$$0 = i_f - i \cdot d,$$

$$u_c = Z_l \cdot i_l,$$

$$0 = i \cdot (1 - d) + i_l,$$

$$u_l = u_c.$$

З цієї системи рівнянь ми отримуємо вираз для коефіцієнта передачі перетворювача постійного струму, враховуючи зворотну величину вхідної та вихідної напруги та припускаючи, що джерело струму перетворювача є джерелом напруги:

$$S = -\frac{d}{1-d} \cdot \frac{Z_l}{\frac{R_{lf} \cdot d^2}{(1-d)^2} + \frac{R_l}{(1-d)^2} + Z_l}.$$

Графік залежності коефіцієнта пропускання від коефіцієнта заповнення керуючого імпульсу $R_{lf}, R_{cf} = 0,01 \cdot Z_l$. S_{max} ми бачимо, що неможливо отримати коефіцієнт передачі напруги більше ~6 через імпеданс втрат.

Якщо джерелом струму перетворювача є фотоелемент з великим нелінійним внутрішнім опором, а навантаженням є електрохімічний елемент,

напруга якого мало залежить від струму, то функція передачі струму навантаження виконується. Коефіцієнт керуючого імпульсу при постійній витраті дросельної заслінки можна виразити наступним чином:

$$I = \frac{d}{1-d} \cdot \frac{U_{oc} - U_a \cdot \left(\frac{1-d}{d} \right)}{(R_{lf} + a(I_f)) \cdot \frac{d^2}{(1-d)^2} + \frac{R_l}{(1-d)^2}}$$

де - U_{oc} напруга холостого ходу фотоперетворювача, U_a - напруга батареї, $a(I_f)$ - внутрішній опір фотоперетворювача як функція струму фотоперетворювача.

Графік цієї функції для оптичного перетворювача з параметрами, описаними в першому розділі, наведено на малюнку. 3.3.

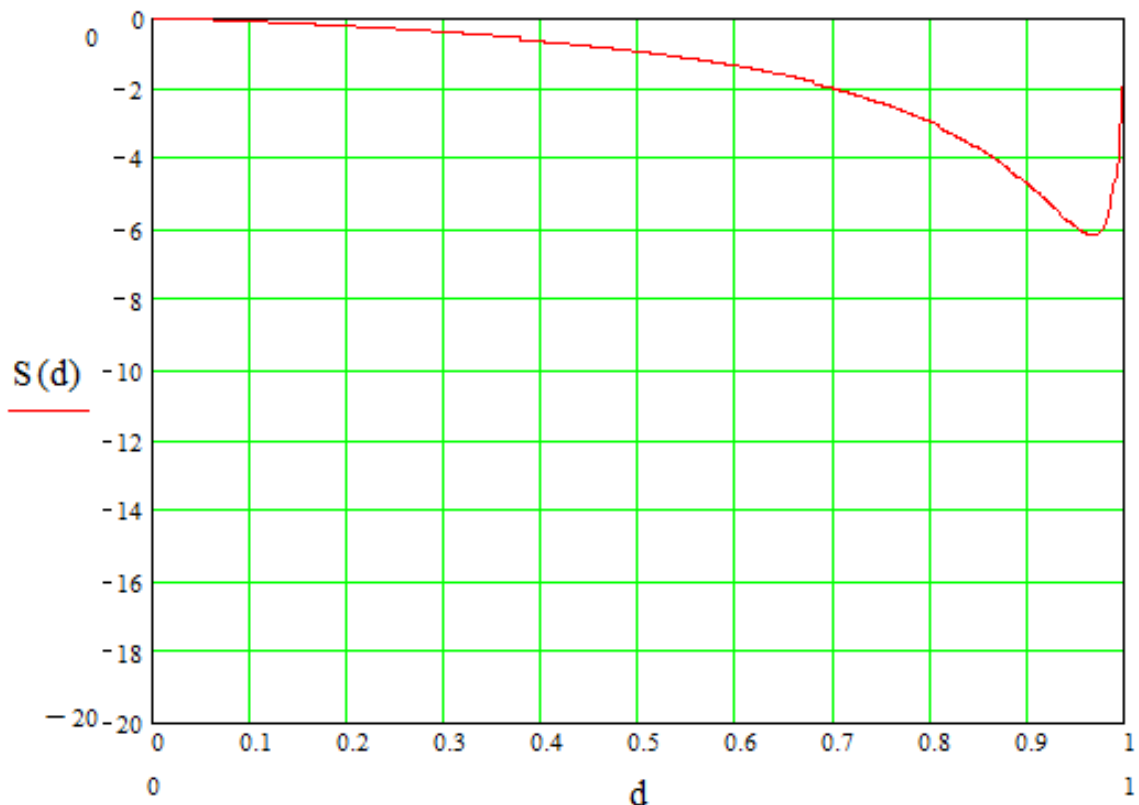


Рисунок 3.2 - Залежність коефіцієнта передачі перетворювача постійної напруги - 3 від коефіцієнта заповнення керуючих імпульсів

Як показано на діаграмі, ця функція має максимум при певному значенні параметра d , положення якого залежить від параметрів фотоперетворювача (напруги короткого замикання та внутрішнього опору) і напруги батареї.

Очевидно, що максимальна потужність може бути передана акумулятору лише тоді, коли система працює на максимальному струмі.

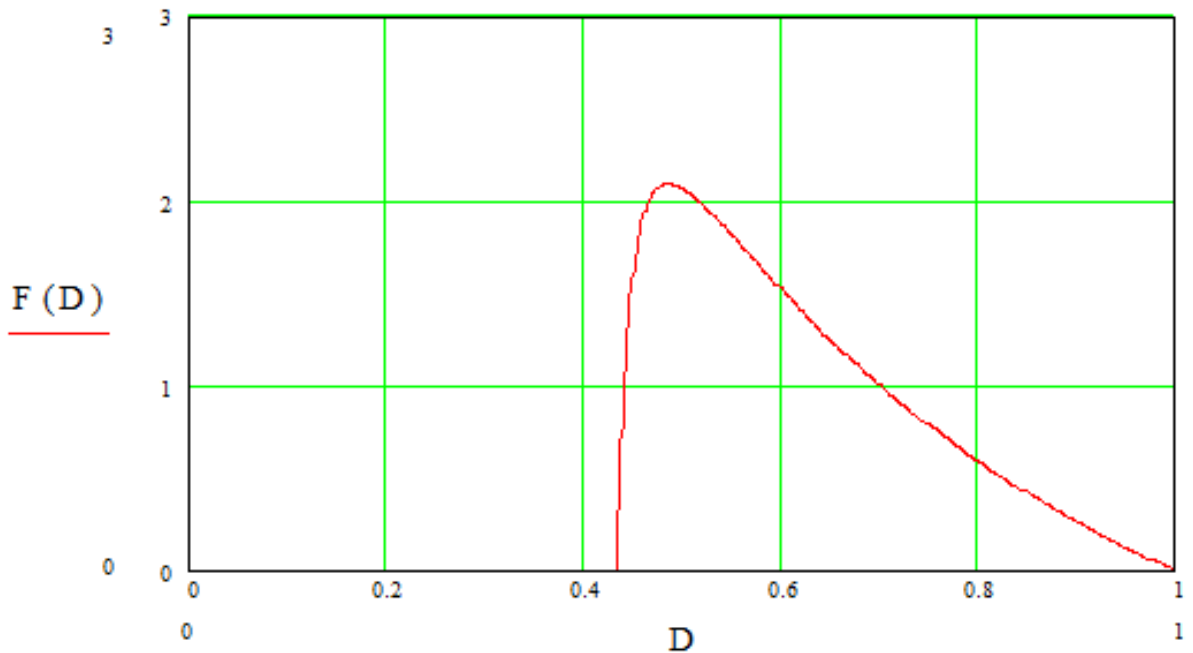


Рисунок 3.3 – Струм навантаження передатної функції – Контроль коефіцієнта заповнення імпульсу, коли перетворювач працює в режимі постійної витрати. Налаштування фотобатареї $U_{oc} = 15,7B$, $I_{sc} = 2,4A$

Система керування коефіцієнтом передачі струму навантаження - вихід

$$K = \frac{\dot{i}_{l(p)}}{d_{(p)}}.$$

$$\frac{\dot{i}_{l(p)}}{d_{(p)}} = \frac{U_{os} \cdot (1 - D) - R'_{\beta} \cdot I - p^5 \cdot \beta'_1 - p^4 \cdot \beta'_2 - p^3 \cdot \beta'_3 - p^2 \cdot \beta'_4 - p \cdot \beta'_5}{p^5 \cdot \alpha'_1 + p^4 \cdot \alpha'_2 + p^3 \cdot \alpha'_3 + p^2 \cdot \alpha'_4 + p \cdot \alpha'_5 + R_{\alpha}}, \quad (3.1)$$

Аналізуючи вираз для коефіцієнта передачі струму на вході-виході (4.1), бачимо, що полярний інверторний трансформатор має ознаки немінимальної фазової системи (наявність нулів та положення нулів і полюсів у комплексній

правій пів- літак). Коефіцієнт пропускання залежить від параметрів фотоелемента). Така система може бути активована шляхом замикання ланцюга негативного зворотного зв'язку, тому в ланцюзі негативного зворотного зв'язку необхідно використовувати схему випрямляча.

3.3 Вибір методів максимального виявлення

Відомо кілька методів знаходження екстремальних значень контрольних величин. Давайте розглянемо найбільш часто використовувані з них[37].

Чим запам'яталися суворі умови? Цей метод зберігає значення функції в окремі моменти часу вздовж інтервалу, щоб визначити функцію та порівняти їх пізніше. Перевага цього методу полягає в тому, що легко знайти загальний екстремум функції, коли функція має кілька кінцевих точок, і його легко реалізувати. Недоліком є те, що для підвищення точності знаходження викидів необхідно зменшити часовий інтервал вибраного регіону, що призводить до збільшення витрат на обладнання (пам'ять) і зниження продуктивності. Якщо положення меж змінюється з часом, операцію пошуку порівняння значень функції в дискримінантних точках необхідно повторити. Щоб визначити, скільки разів можна повторити цей процес, нам потрібна інформація про швидкість, з якою рухаються крайні точки. У цьому випадку швидкість залежить від рівня освітлення. Крім періодичних добових коливань, рівні освітленості мають випадковий елемент залежно від погодних умов. Враховуючи вищесказане, можна сказати, що цей метод пошуку викидів не дуже ефективний у даному випадку.

Метод виведення. Цей метод надсилає тестовий сигнал на вхід об'єкта керування з екстремальними характеристиками δX , аналізує сигнали зміни модифікованого значення та вирішує рух до екстремальних значень.

Хоча цей метод важче реалізувати, ніж метод масового значення, він потребує набагато менше пам'яті, оскільки потрібно порівнювати лише два значення контрольної величини. Щоб більш точно отримати максимальні значення, значення δX слід зменшити. Це сповільнює швидкість досягнення викидів. Це можна вважати недоліком цього методу.

Спосіб придушення вібрації. Суть цього методу полягає в додаванні малих гармонійних коливань до основної $Z = Z_0 + a \cdot \sin \Omega t$ процедури керування, що складається з двох величин $\frac{dZ_0}{dt} \ll a \times \Omega$.

Через вплив надмірних гармонійних коливань вихідні параметри керування змінюються в невеликих межах. Коли система працює з лівого боку характеристики максимального значення, фаза накладеного сигналу пошуку збігається з фазою інкрементальної зміни вихідного значення. У режимі лівостороннього керування фаза міняється на протилежну, і в екстремальних випадках вихідні параметри змінюються з подвоєною частотою. Порівнюючи фазу пошукового сигналу і фазу коливань вихідних параметрів, можна розробити базову процедуру налаштування, яка забезпечує перебудову системи для роботи в екстремальних точках. Швидкість системи обмежена до $a \cdot \Omega$. Основна перевага цього методу полягає в тому, що при використанні ідеальних елементів точність досягнення викидів не залежить від розміру процесу тестування. Враховуючи вищевикладене, для створення пристрою підвищення ефективності накопичувальної системи обрано метод примусового перерозподілу вібрації.

Як обчислити параметри, пояснюється в наступному підрозділі.

Відомо, що найзручнішим способом зарядки акумулятора є двоступенева зарядка. Тобто спочатку заряджається постійним струмом, а коли батарея досягає певної напруги, заряджається постійною напругою. Цей спосіб заряджання зменшує викиди газів і збільшує використання активності. Цей режим можна застосувати до цього пристрою. Для цього, коли напруга батареї досягає певного порогу, схему управління максимальною потужністю необхідно перевести в схему управління, яка забезпечує роботу пристрою в режимі стабілізації напруги.

Методика розрахунку на пристрій для надійної зарядки акумулятора від фотоелементів в режимі максимальної потужності

Використовувані параметри батареї:

U_a - номінальна напруга. Це залежить від типу акумулятора, який ви використовуєте, наприклад кислотного, лужного або літієвого.

максимальний струм зарядки акумулятора

$$I_{l.max} = \frac{P_{f.max}}{U_a} \quad (3.2)$$

мінімальний зарядний струм акумулятора

$$I_{l.min} = \frac{P_{f.min}}{U_a} \quad (3.3)$$

максимальне значення опору навантаження

$$R_{ch.max} = \frac{U_a}{I_{l.min}} \quad (3.4)$$

мінімальне значення опору навантаженню

$$R_{ch.min} = \frac{U_a}{I_{l.max}} \quad (3.5)$$

Найбільш підходящим режимом роботи для перетворювачів ланцюга DC-DC є режим дроселя постійного потоку. Щоб визначити мінімальну індуктивність дроселя, яка змушує схему переходити в режим постійного струму, розглянемо таке співвідношення: якщо заряд на дроселі надходить від джерела напруги (ця умова виконується, якщо заряд на дроселі є вхідною ємністю фільтра та джерело напруги) Тоді буде невелике падіння напруги на конденсаторі, коли конденсатор заряджається. Котушка індуктивності (достатньо велика), під час фази навантаження індуктивності струм, що проходить через конденсатор, визначається за рівнянням: $i = \frac{U_c \cdot t}{L}$ Тут U_c, L, t - фільтр напруги конденсатора, індуктивний дросель, синхронізація відповідно.

Максимальне значення струму придушення залежить D від

$$i_m = \frac{U_c \cdot D}{L \cdot f} \text{ коефіцієнта заповнення та частоти комутації. } f$$

Під час фази розряду індуктора струм, що протікає через індуктор, характеризується: $i = \frac{U_c \cdot D}{L \cdot f} \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$ де R опір навантаження.

Межа індуктивності дроселя залежить від частоти комутації, коефіцієнта заповнення імпульсу керування та опору навантаження

$$L_{min} \geq \frac{R}{4 \cdot f} \cdot (1 - D), \quad (3.6)$$

Для визначення діапазону зміни шпаруватості керуючого імпульсу в залежності від параметрів використовуваного фотоелемента $I_l(D)$ необхідно взяти характеристики перемикачів двох основних випадків - 1) найнижча напруга холостого ходу і найвища напруга холостого ходу напруга ланцюга. Фотоелемент високого короткого замикання. Пусковий струм- 2. Максимальна напруга навантаження та мінімальний струм короткого замикання. Характеристики передачі визначаються наступним чином:

$$I_l(D) = \frac{-B(D) - \sqrt{B(D)^2 - 4 \cdot K(D)}}{2}, \quad (3.7)$$

Рухи максимально регулюються накладенням вимушених коливань . Система складається з генератора тестового сигналу, смугового фільтра, який відокремлює сигнал відгуку перетворювача від тестового сигналу, підсилювача відгуку тестового сигналу, фазового детектора, інтегратора (система постійного контролю першого порядку) та широтно-імпульсного генератору. Керований інтегральним вихідним сигналом. Система потребує схеми випрямляча для запобігання збудження та покращення продуктивності.

Частота тестового сигналу має f_t такі умови: $f_t \ll f_s$ - Забезпечити ефективну фільтрацію та $f_t < f_{rf}, f_t < f_c$ - уникати явища резонансу. Бажано, щоб $f_t \leq \frac{f_c}{100 - 1000}$.

Оскільки частота перемикання в 100-1000 разів вища за частоту тестового сигналу, достатньо використовувати смуговий фільтр першого порядку, щоб досягти прийняттого ослаблення в діапазоні гасіння. Зміна частоти зниження сигналу $K_f = 40 - 60 \text{ dB}$.

Рекомендується використовувати напіврезонансну ланцюг вени як фільтр відгуку для тестового сигналу.

Коли умови виконуються $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$ резонансна частота контуру Віна дорівнює:

$$f_{rv} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}, \quad R \cdot C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{rv}} \quad (3.8)$$

Схеми випрямляча призначені для забезпечення стабільності системи, збільшення коефіцієнта посилення та запасу по фазі та покращення перехідних процесів. Щоб визначити, чи потрібна схема корекції чи ні, необхідно встановити амплітудно-частотні характеристики відкритої системи та ФЧХ. Для цього ми визначаємо властивості передачі окремих ланок.

Для визначення максимального коефіцієнта підсилення підсилювача K_1 використовують метод D-розбиття [21]. Суть цього методу полягає в знаходженні області стійкості системи в залежності від обраного параметра (в даному випадку коефіцієнта посилення K_1), тобто області значень обраного параметра. Корені рівняння характеризуються комплексною лівою півплощиною.

Метод D-розбиття [21] використовується для визначення конкретних значень коефіцієнта посилення для різних параметрів фотоелемента. Якщо заданий параметр (K_1) лінійно включити в характеристичне рівняння (в цьому випадку ця умова виконується), то характеристичне рівняння набуває вигляду:

$$A(p) = P(p) + K_1 \cdot Q(p) = 0$$

Звідки беруться $P(p), Q(p)$ поліноми p ?

Межі D - поділу визначають за наступним рівнянням:

$$A(j\omega) = P(j\omega) + K_1 \cdot Q(j\omega)$$

тому

$$K_1 = - \frac{P(j\omega)}{Q(j\omega)} = X + jY \quad (3,9)$$

$-\infty < \omega < +\infty$

Граничне значення коефіцієнта посилення K_1 можна отримати, прирівнявши уявну частину рівняння (3.10) до нуля (у робочому діапазоні частот зсув фази, викликаний підсилювачем, є малим, тобто коефіцієнт посилення). Один дійсний компонент).

$$K = \frac{j\omega^{10}\alpha_1 + j\omega^9\alpha_2'' + \omega^8\alpha_3'' - j\omega^7\alpha_4'' - \omega^6\alpha_5'' + j\omega^5\alpha_6'' + \omega^4 \cdot \alpha_7'' - j\omega^3\alpha_8'' - \omega^2\alpha_9'' + j\omega\alpha_{10}''}{-\omega^8\beta_1''' - j\omega^7\beta_2''' + \omega^6\beta_3''' + j\omega^5\beta_4''' - \omega^4\beta_5''' - j\omega^3 \cdot \beta_6''' + \omega^2\beta_7''' + j\omega\beta_8'''} \quad (3.10)$$

Дійсною частиною рівняння членів є D-розбиття

$$X = \frac{(\omega^{10}\alpha_1'' - \omega^8\alpha_3'' + \omega^6\alpha_5'' - \omega^4\alpha_7'' + \omega^2\alpha_9'')(-\omega^6\beta_2''' + \omega^4\beta_4''' - \omega^2\beta_6''' - \beta_8''') - (\omega^9\alpha_2'' - \omega^7\alpha_4'' + \omega^5\alpha_6'' - \omega^3\alpha_8'' + \omega\alpha_{10}'')(\omega^7\beta_1''' - \omega^5\beta_3''' + \omega^3\beta_5''' - \omega\beta_7''')}{(-\omega^8\beta_1''' + \omega^6\beta_3''' - \omega^4\beta_5''' - \omega^2\beta_7''')^2 + (\omega^7\beta_2''' - \omega^5\beta_4''' + \omega^3\beta_6''' - \omega\beta_8''')^2} \quad (3.10)$$

Уявною частиною параметричного рівняння D-розбиття

$$Y = \frac{(\omega^7\beta_2''' - \omega^5\beta_4''' + \omega^3\beta_6''' - \omega\beta_8''')(\omega^{10}\alpha_1'' - \omega^8\alpha_3'' + \omega^6\alpha_5'' - \omega^4\alpha_7'' + \omega^2\alpha_9'') + (\omega^9\alpha_2'' - \omega^7\alpha_4'' + \omega^5\alpha_6'' - \omega^3\alpha_8'' + \omega\alpha_{10}'')(-\omega^6\beta_2''' + \omega^4\beta_4''' - \omega^2\beta_6''' - \beta_8''')}{(-\omega^8\beta_1''' + \omega^6\beta_3''' - \omega^4\beta_5''' - \omega^2\beta_7''')^2 + (\omega^7\beta_2''' - \omega^5\beta_4''' + \omega^3\beta_6''' - \omega\beta_8''')^2} \quad (3.11)$$

На основі цих даних визначається зона стійкості системи.

Для характеристики процесу переносу необхідно скласти диференціальні рівняння системи, що описують рух до полюсів.

Використовуючи структурну схему системи та коефіцієнти передачі зв'язків її компонентів, можна скласти диференціальні рівняння, що описують перехідний процес.

$$T_1 \frac{d^3 D}{dt^3} + T_2 \frac{d^2 D}{dt^2} + T_3 \frac{dD}{dt} + T_4 D = 0, \quad (3.12)$$
$$\left. \frac{d^2 D}{dt^2} \right|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{dD}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad D|_{t=0} = -0,26$$

де - b амплітуди сигналу;

a - похідна $\frac{dI}{dD}$ отримано з контрольних властивостей є лінійною функцією, тобто $a = \text{const}$.

Для спрощення розрахунків керуючу характеристику зміщують вліво по осі D так, щоб кінець збігався з точкою $D=0$. Це відображено в початкових умовах.

Модель системи є лінійною. Це означає, що не враховуються нелінійність екстремальної похідної характеристики та екстремальна інерційність характеристики через вхідний фільтр. LC

Розв'язком цього рівняння є функція:

$$D(t) = A_1 \cdot e^{\alpha_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{\alpha_2 \cdot t} \cdot \cos \beta \cdot t + A_3 \cdot \sin \beta \cdot t, \quad (3.13)$$

Щоб врахувати сильні нелінійні ефекти та інерційні властивості, ви можете проектувати схеми аналогових і цифрових пристроїв за допомогою інструментів у програмному забезпеченні Electronics Workbench. Принципова схема моделі представлена на рис. 3.4.

POLY елементи (I і II) є багатовольтними джерелами, вихідні напруги яких формуються наступним чином:

$$U_o = a + b \cdot V_1 + c \cdot V_2 + d \cdot V_3 + e \cdot V_1^2 + f \cdot V_2 \cdot V_1 + g \cdot V_1 \cdot V_3 + \\ + h \cdot V_2^2 + i \cdot V_2 \cdot V_3 + j \cdot V_3^2 + k \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot V_3$$

де V_1, V_2, V_3 - вхідна напруга джерела напруги,

U_o - вихідна напруга,

$a - k$ - визначені користувачем поліноміальні коефіцієнти.

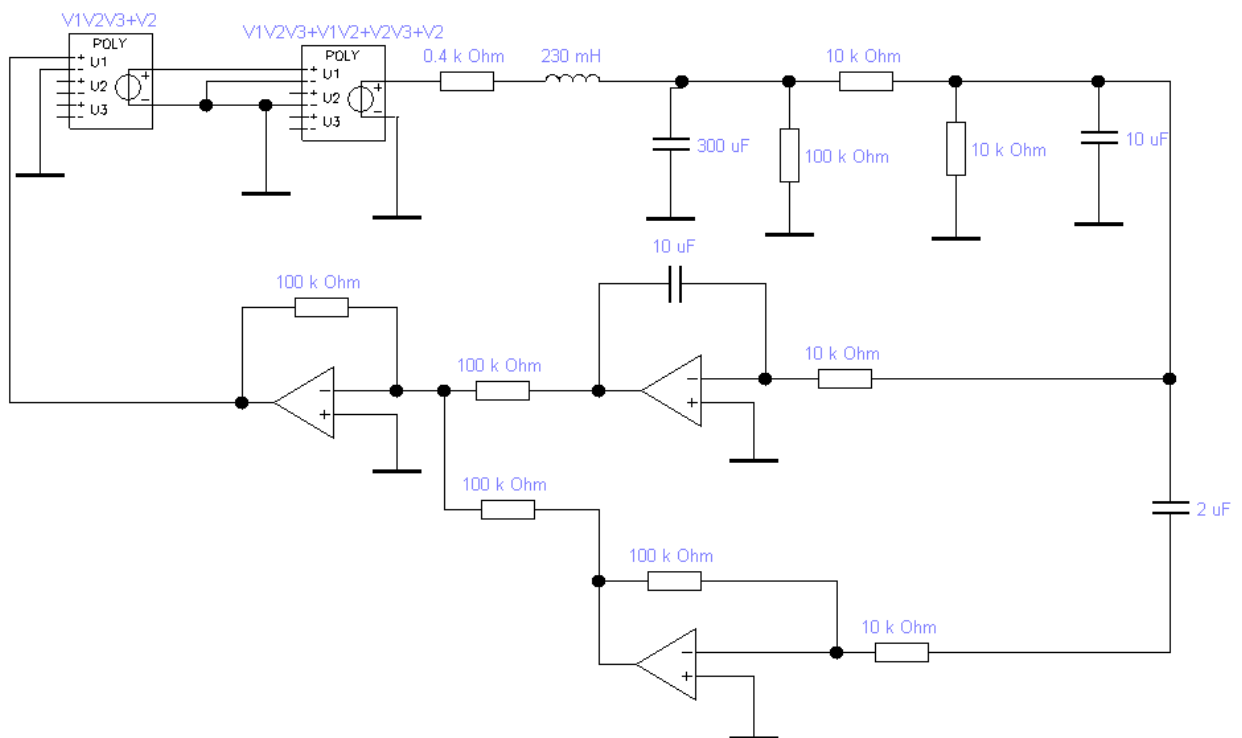


Рисунок 3.4 – Модель дослідження транспортного процесу з урахуванням нелінійності

3.4. Висновки до розділу

У цьому розділі аналізується система автоматичного контролю заряду АБ на основі ФБ системи перетворювача постійної напруги-3. Визначено, що від параметрів ФБ залежать нулі і полюси передаточної функції.

Методика розрахунку параметрів пристрою була обрана таким чином, щоб забезпечити заряд акумулятора від фотоелемента в режимі максимальної потужності.

4 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

4.1 Розрахунок пристроїв зарядки акумуляторів від фотоелементів в режимі максимальної потужності

4.1.1. Вихідні дані

Максимальна потужність фотоелемента $P_{\max} = 80 \text{ Вт}$.

Фотоелемент малої потужності $P_{\min} = 12 \text{ Вт}$.

Діапазон значень реактивної напруги - $U_{oc \min} = 6 \text{ В}$. $U_{oc \max} = 33 \text{ В}$, розподіл значень струму короткого замикання - $I_{sc \min} = 3 \text{ А}$, $I_{sc \max} = 15,5 \text{ А}$.

Номінальна напруга батареї $U_a = 12 \text{ В}$

Максимальний зарядний струм АКБ, згідно з $I_{l \max} = 8,33 \text{ А}$.

Згідно з $I_{l \min} = 1 \text{ А}$, мінімальна вартість ведення кола.

Максимальне значення опору навантаження в $R_{ch \max} = 10 \text{ Ом}$.

Мінімальне значення опору навантаження в $R_{ch \min} = 1,44 \text{ Ом}$.

4.1.2 Розрахунок компонентів перетворювача полярності

Складові перетворювача переполюсовки розрахуємо в термінах рис. 4.2 Спосіб передачі з попереднього розділу. ми приймаємо $R_{lf} = 10 \cdot R_l$, $R_l = 0,001 \cdot R_{ch \min}$ $R_l = 0,0014 \text{ Ом}$, $R_{lf} = 0,014 \text{ Ом}$.

Розраховуємо параметри для b, c наближення оптимального лінійного струму фотоелемента:

$$C_f = \frac{D^2}{0,02 \cdot L \cdot f^2}.$$

$$\text{де } b_{\min} = -20 \cdot 10^{-3} \text{ См}, b_{\max} = -3 \cdot 10^{-3} \text{ См} \quad c_{\min} = 0,029 \text{ В}^{-1}, c_{\max} = 1,66 \text{ В}^{-1}$$

Використовуйте систему:

$$\frac{1}{C_f} \cdot \int_0^t i dt = 0,005 \cdot U_c,$$

$$\frac{D^2}{2 \cdot L \cdot C_f \cdot f^2} = 0,01,$$

Ми плануємо передати характеристики двох крайніх випадків - фотоелемента з мінімальною напругою холостого ходу і максимальним струмом короткого замикання і максимальною напругою холостого ходу і мінімальним струмом.

На рис. 4.1 показані характеристики передачі в двох крайніх випадках.

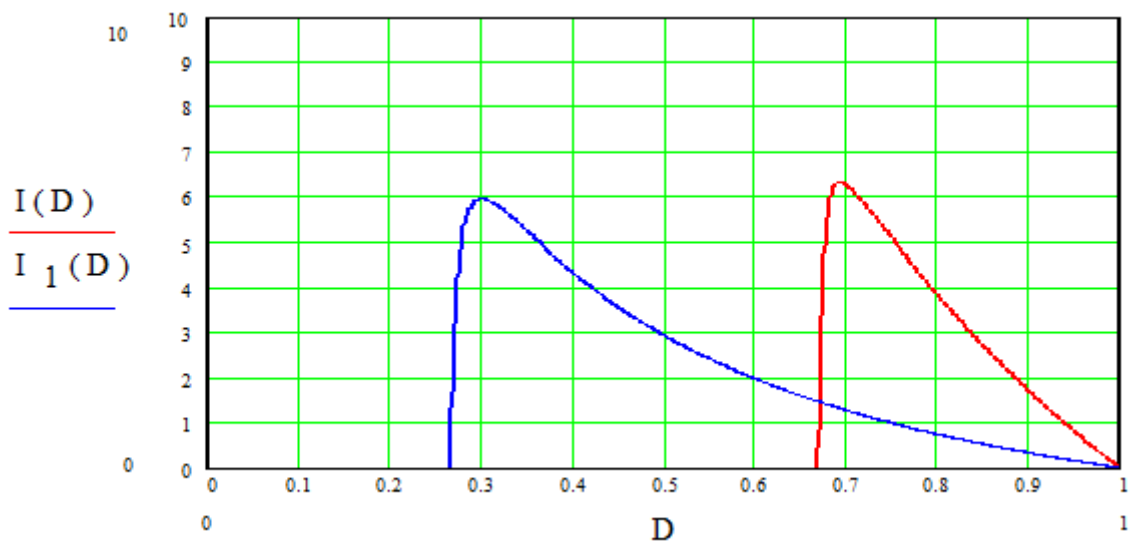


Рисунок 4.1 - Граничні випадки для режиму безперервного потоку

На рисунку 4.1 показаний коефіцієнт заповнення як функція керуючого імпульсу $0,3 < D < 0,7$. Доб'ємося частоти перемикання 100 кГц (ферит марки НМ-2000). Мінімальне значення індукційного дроселя, необхідного для підтримки безперервної роботи в режимі, визначається: $U_f = \frac{q}{C}$, $q = \int_0^t i dt$, де $L_{min} = 17,5 \text{ мкГн}$. ми приймаємо $L_{min} = 30 \text{ мкГн}$.

Електроємність конденсатора визначається за формулою: $L_f = 10L$, з якої $C_f = 163 \text{ нФ}$. можемо отримати $C_f = 200 \text{ нФ}$.

індукція мішка $L_f = 10 \cdot L$ $L_f = 300 \text{ мкГн}$.

Фільтр резонансної частоти $f_{rf} = 650 \Gamma\text{ц}$.

При цьому $f_c = 4 \kappa \Gamma\text{ц}$. величина ємності конденсатора перетворювача, резонансна частота перетворювача $C = 50 \text{ мкФ}$.

4.1.3 Розрахунок елементів керування

Вибираємо частоту тестового сигналу $f_t = 0,1 \kappa \Gamma\text{ц}$.

Коло Віна використовується для перевірки реакції фільтра на сигнал. Стала часу кола Віна визначається за формулою

$$K_{fd} = \frac{R_5}{R_5 + R_6 + p \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot C}$$

як $f_{rv} = 0,1 \kappa \Gamma\text{ц}$ і $R = 16 \kappa \text{Ом}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$

Розрахунок елементів фазового детектора. Виберіть фільтр постійної часу $\tau_{fd} = 0,1 \text{ сек}$. відповідно до номінального значення фільтруючого елемента ; $R_5 = 10 \kappa \text{Ом}$, $R_6 = 10 \kappa \text{Ом}$, $C_3 = 2 \text{ мкФ}$.

Інтегратор елементів. Стала часу інтегратора $\tau_i = 10^{-4} \cdot \tau_{fd}$.
 $R_7 = 10 \kappa \text{Ом}$, $C_4 = 10 \text{ нФ}$.

Для реалізації необхідності використання схем корекції необхідно побудувати частотну характеристику та систему відкритої частотної характеристики. Характеристики ланки передачі, що визначають частину системи керування, визначаються за формулою:

$$S_1(p) = \frac{U_{xx} \cdot (1 - D) - R'_\beta \cdot I - p^5 \cdot \beta'_1 - p^4 \cdot \beta'_2 - p^3 \cdot \beta'_3 - p^2 \cdot \beta'_4 - p \cdot \beta'_5}{p^5 \cdot \alpha'_1 + p^4 \cdot \alpha'_2 + p^3 \cdot \alpha'_3 + p^2 \cdot \alpha'_4 + p \cdot \alpha'_5 + R_\alpha}$$

Передатна функція перетворювача струму в напругу $S_2(p) = \frac{U_{вих}(p)}{i(p)}$.

$$S_2(p) = R_{ui}$$

Функція фільтрації файлів передачі:

$$S_3(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)}$$

$$S_3(p) = \frac{p \cdot \gamma_1}{1 + p \cdot \gamma_2 + p^2 \cdot \gamma_3}$$

Функція посилення передачі в робочому діапазоні частот

$$S_4(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = K_1$$

німецька * $K_1 = 1 + \frac{R_4}{R_3}.$

Збільшення змінюється, коли ви йдете до кінця, а також при використанні фотоелементів з різним фоном. K_1 Це необхідно для підтримки постійної амплітуди сигналу на вході фазового детектора. Цей перемикач K_1 забезпечується автоматичним вимикачем. Схема автоматичного керування повинна бути досить швидкою, щоб реагувати на зміни амплітуди сигналу протягом 2-3 циклів тестового сигналу, що є постійним часом посилення автоматичного керування. $\tau_a < (2-3) \cdot \frac{1}{f_t}$

Передайте функцію фільтра на вихід фазового детектора:

$$S_5(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{K_2}{\xi_1 \cdot p + 1}$$

де ξ_1 постійна часу фільтрується;

$$\xi_1 = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} \cdot C_3$$

K_2 — Коефіцієнт пропускання фільтра постійного струму;

$$K_2 = \frac{R_5}{R_5 + R_6},$$

Передайте функцію інтегратора:

$$S_6(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = -\frac{1}{\xi_2 \cdot p}$$

де ζ^2 постійна часу інтегратора.

Функція передачі широтно-імпульсного модулятора;

$$S_7(p) = \frac{d(p)}{U_{ex}(p)} = -K_3$$

Система передачі функцій з негативним відкритим контуром:

$$S_{\Sigma}(p) = \prod_{i=1}^7 S_i(p)$$

З теорії кіл відомо $S(p) \rightarrow S(j\omega)$, $S(j\omega)$ що це комплексний коефіцієнт пропускання ω та частота (рад/с).

Також відомо $S(j\omega) = S(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$ де

$$S(\omega) = \sqrt{Re(S(j\omega))^2 + Im(S(j\omega))^2}.$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{Im(j\omega)}{Re(j\omega)}\right).$$

або загальна причина;

$$S_{\Sigma}(j\omega) = \prod_{i=1}^n S_i(\omega) \cdot e^{j\sum_{i=1}^n \varphi(\omega)}.$$

Відповідно до критерію стійкості Боде, якщо зміна фази менше ніж π , то система зворотного зв'язку стійка. Якщо відома частота амплітуди $S(\omega)$ та частота часу $\varphi(\omega)$ не можуть відповідати цій вимозі, або система старіє, а запас посилення недостатній, рекомендується використовувати деякі схеми корекції.

Передатна функція схеми корекції (яка має форму інтегратора в U2 і диференціатора в U3;

$$S_k(p) = \frac{1}{p \cdot \xi_2} + \frac{p \cdot \xi_3}{1 + p \cdot \xi_4} = \frac{1 + p \cdot \xi_3 + p^2 \xi_5}{p \xi_2 + p^2 \cdot \xi_6}, \quad (4,5)$$

$$\text{де } \xi_3 = R_8 \cdot C_5 \quad \xi_4 = R_9 \cdot C_5 \quad \xi_5 = \xi_2 \cdot \xi_3 \quad \xi_6 = \xi_2 \cdot \xi_4$$

Для контролю ефективності виправлення необхідно виконати такі умови:

$$\omega_0 = (1,5 \div 2) \cdot \frac{1}{\xi_3}.$$

Серед них ω_0 частота та умови, коли коефіцієнт посилення відкритої системи = 0 дБ;

$$\frac{R_9}{R_8} = \frac{1}{\omega_0 \cdot \xi_2}, \dots \dots \dots (4,7)$$

$$S_{\Sigma}(p) = S_1(p) \cdot S_2(p) \cdot S_3(p) \cdot S_4(p) \cdot S_5(p) \cdot S_k(p) \cdot S_7(p), \quad (4,8)$$

Рівняння 3.9-3.13.

АЧХ і ФЧХ системи визначаються рівнянням (4.2-4.4).

На рис. 4.2 показана АЧХ кожної ланки і всієї системи при використанні фотоелементів з $U_{oc} = 15,7B, I_{sc} = 2,4A$.

На рис. 4.3 доставка ФЧХ.

Як видно з цих малюнків, система може складатися з вибраних з'єднань із певними коефіцієнтами посилення та значеннями параметрів фотоелемента.

Крім того, навіть якщо компанія задовольняє попит, система отримає невеликий прибуток за період і прибуток. Тому необхідні деякі виправлення кола.

Корекція характеристики передачі визначається навколо схеми (4.5). В якості коригуючого ефекту мають бути виконані умови (4.6) і (4.7). З цих умов $R_9 = 10k\Omega, R_8 = 1k\Omega, C_5 = 2,2\mu F$.

Частотна характеристика та частотна характеристика виправленої системи показані на малюнку 2. 4.4 і 4.5.

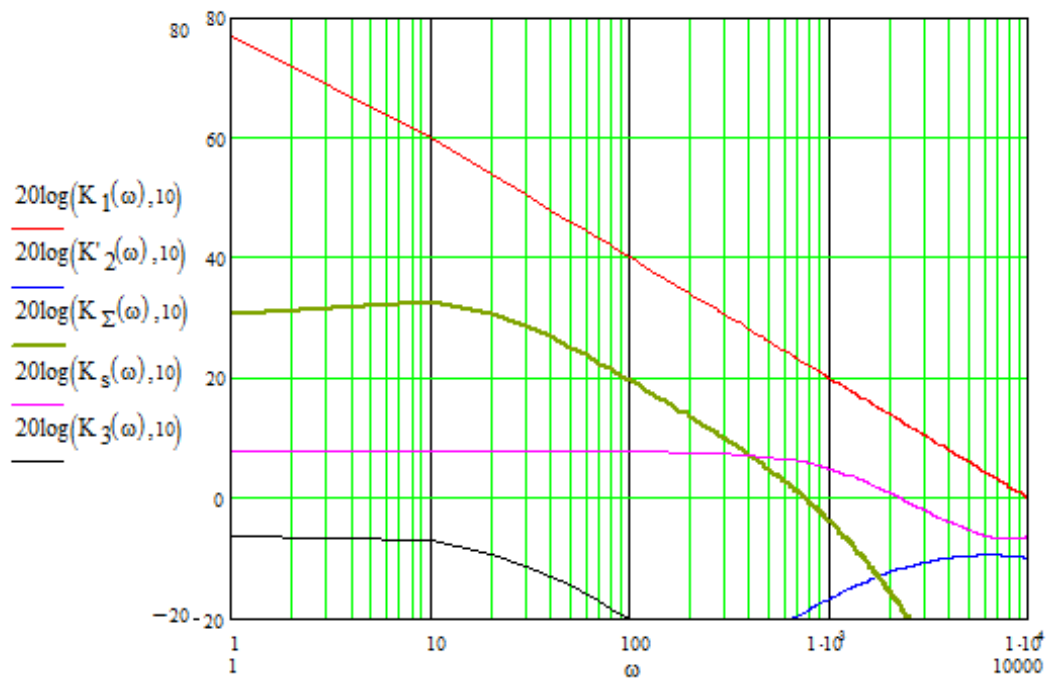


Рисунок 4.2 - Амплітудно-частотна характеристика:
Червона лінія - інтегратор; чорний - фільтр на виході детектора;
фіолетовий - PPN-III

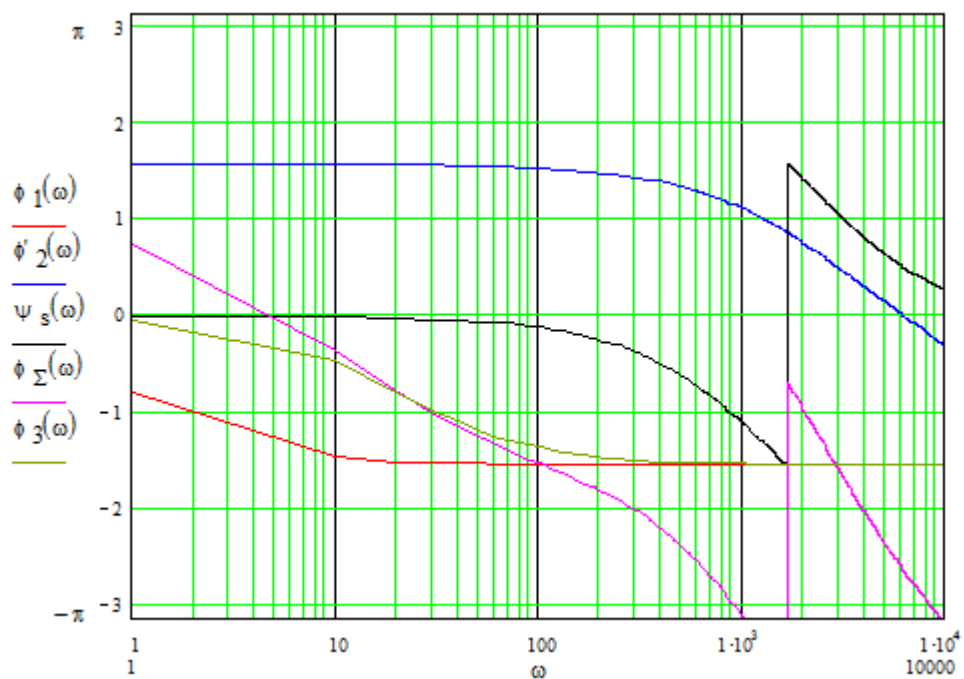


Рисунок 4.3-Фазочастотні характеристики:
Червоний - добавка, синій - винний фільтр, фіолетовий - вся система

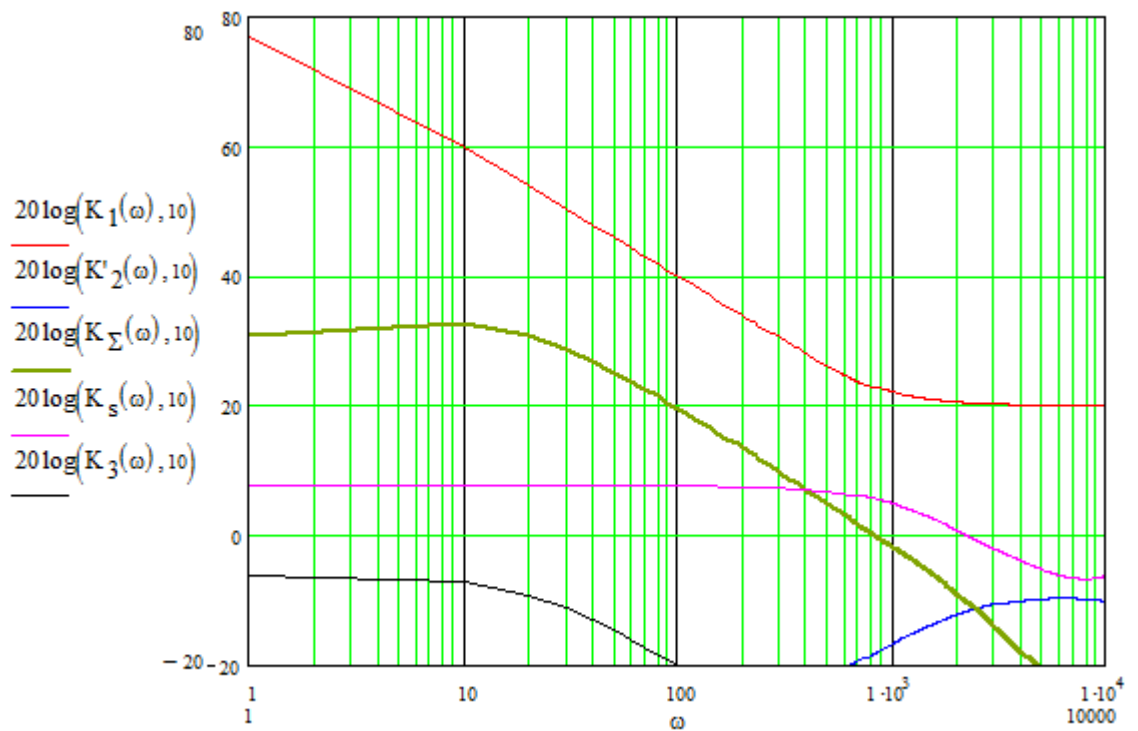


Рисунок 4.4 - АЧХ правильної системи:

**Червоний - круговий інтегратор з корекцією; синій - винний детектор;
сірий - вся система**

З графіків лінійної та нелінійної систем видно, що введення корекції підвищує стабільність запасу системи. Зокрема, запас по фазі збільшується приблизно від 20 0 до 60 0, а запас по амплітуді збільшується з одиниці дБ до 10 дБ.

Максимальний коефіцієнт посилення відгуку підсилювача на тестовий сигнал визначається поділкою D.

Дійсна частина члена D-розбиття рівняння визначається формулою (3.10), а уявна частина - визначається формулою (3.11).

Межі рисунка D є розділами з використанням таких фотографічних параметрів $U_{oc} = 33B, I_{sc} = 3A : 4.6$.

Межі рисунка D є розділами з використанням таких фотографічних параметрів $U_{oc} = 6B, I_{sc} = 15,5A : 4.7$.

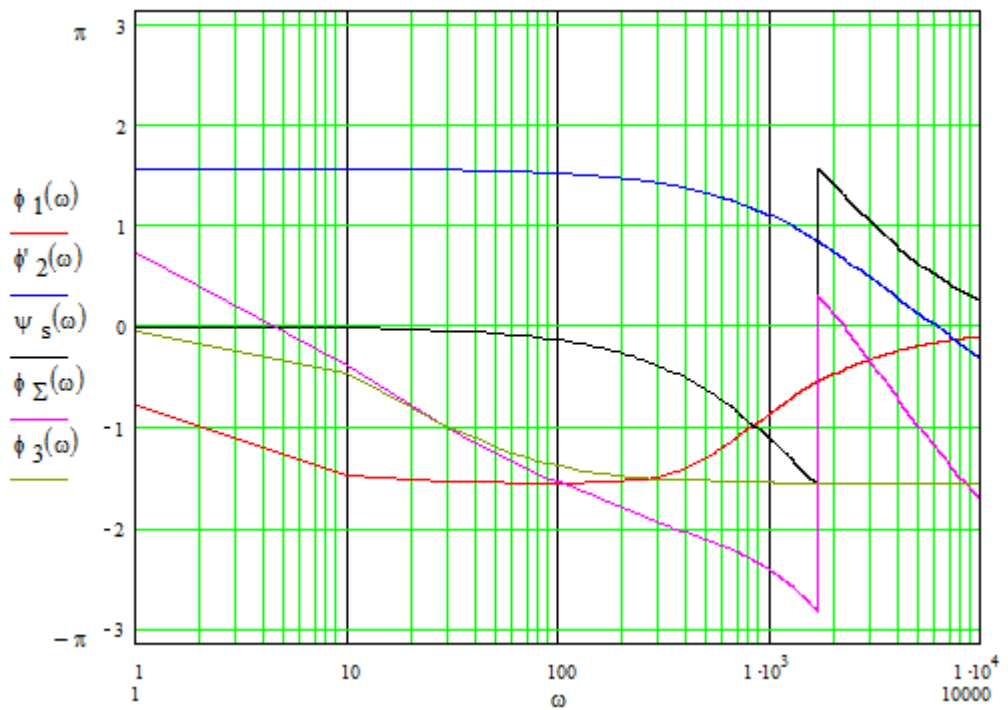
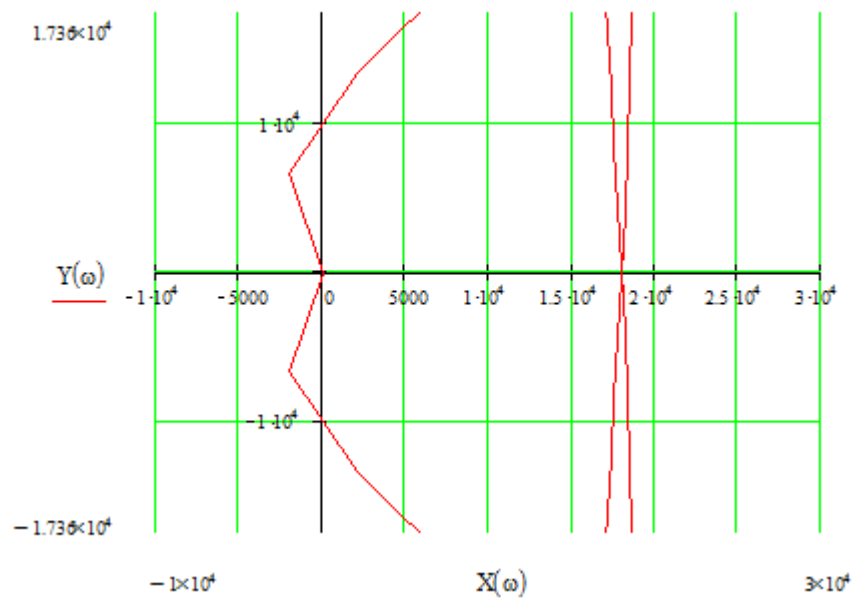


Рисунок 4.5 - Прямая ФЧХ:

**Червоний - круговий інтегратор з корекцією чорний - ППН-III;
 Синій - кільце вина; сірий - фільтр фазового детектора; фіолетовий -
 вся система**



**Рисунок 4.6 - Термінал D - Розбиття при використанні параметричних
 фотоелементів $U_{oc} = 36B, I_{sc} = 3A$**

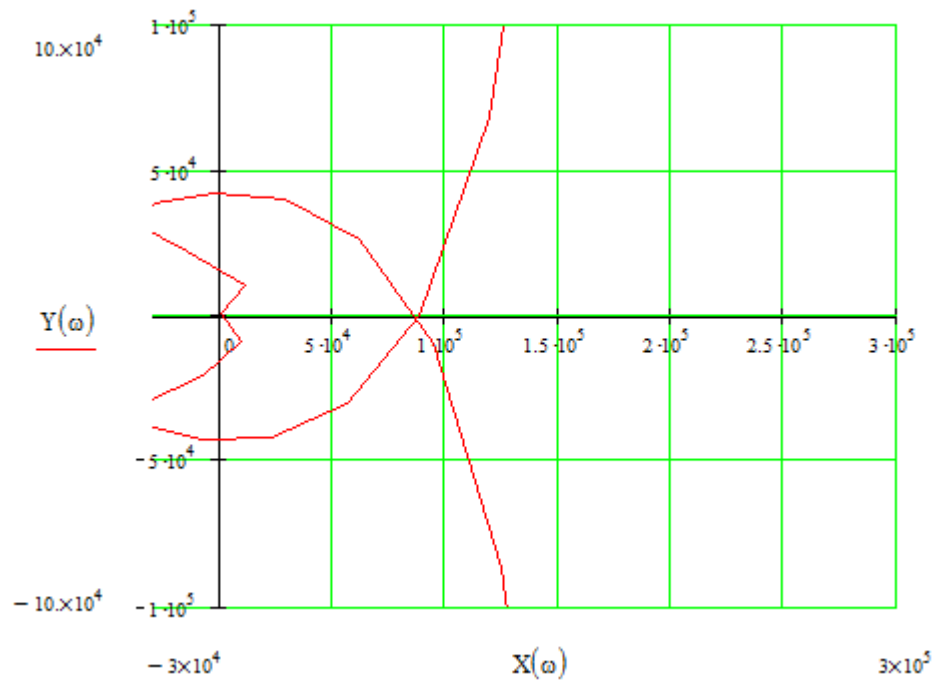


Рисунок 4.7 - Розбивка терма D при використанні параметричних фотоелементів $U_{oc} = 6B, I_{sc} = 15,5A$

Як видно з цих графіків, максимальні граничні значення прибутку відрізняються майже в 10 разів. Для того, щоб система працювала з усіма типами фотоелементів, наведеними в джерелі, необхідно обмежити максимальне посилення до 80 дБ.

Визначення характеристик системи в режимі високого сигналу

Для характеристики перехідного процесу лінеаризованої системи скористаємося залежностями (3.12) і (3.13).

На рис.. 4.8 зображено графік функції (перехідного процесу) розв'язку рівняння (3.12).

Щоб розглянути вплив нелінійності та надзвичайної інерції, ми використовуємо схему моделі, наведену в програмному забезпеченні та методах Electronic Workbench. Результати моделювання показані на рисунках 4.9 і 4.10.

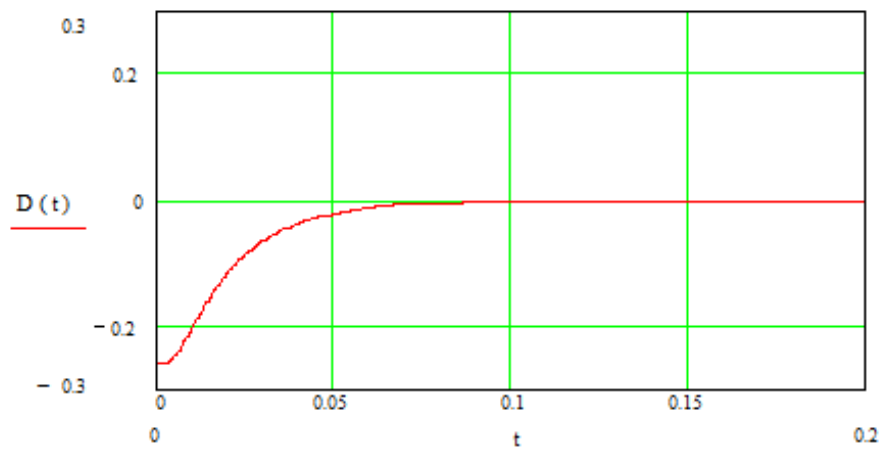
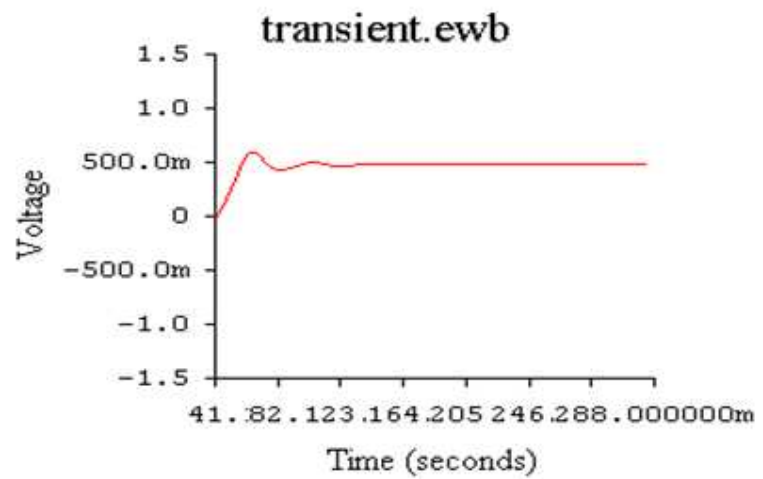
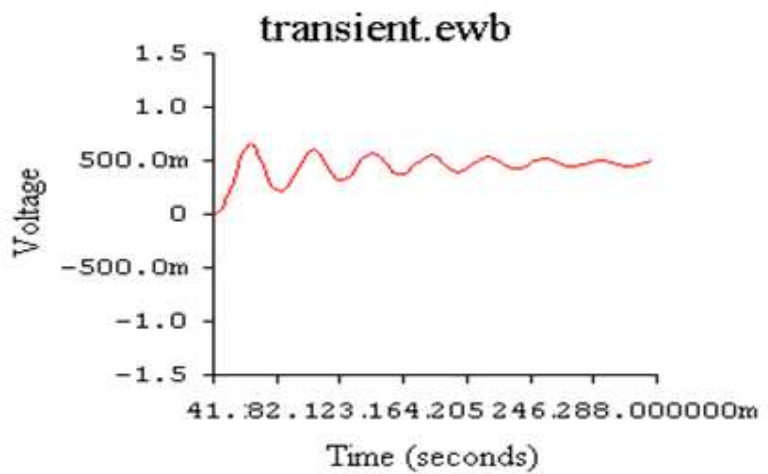


Рисунок 4.8 – Процес перетворення в правильній системі



а)



б)

**Рисунок 4.9 - Перехідний процес:
а - правильно; б-причина помилки**

На відміну від лінеаризованої моделі, перебіг процесу скоригованої системи також має коливальні характеристики, але адаптована амплітуда та величина значно менші, ніж у некоригованої.

За певних параметрів фотоелемента система може збуджуватися без помилок (рис. 4.10), а безпомилкова модель лінеаризації системи підтримує стабільність будь-якого параметра фотоелемента.

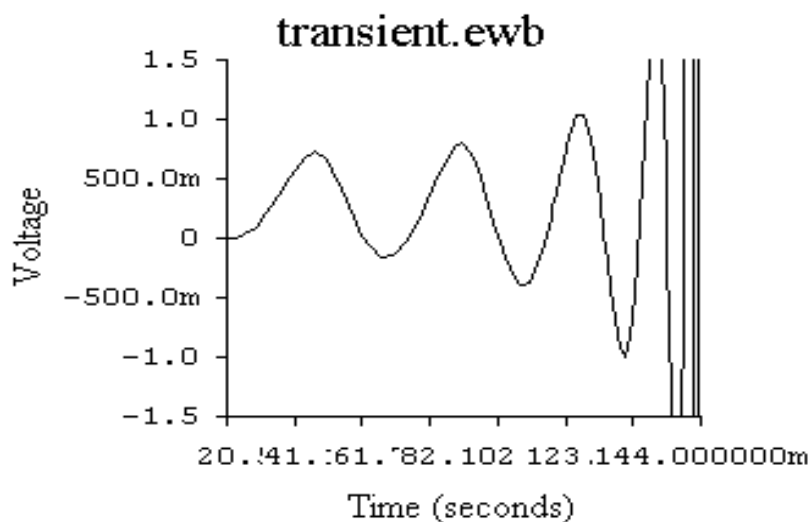


Рисунок 4.10 – Помилковий стимул, застосований до системи

Фото зарядки за цим параметром:

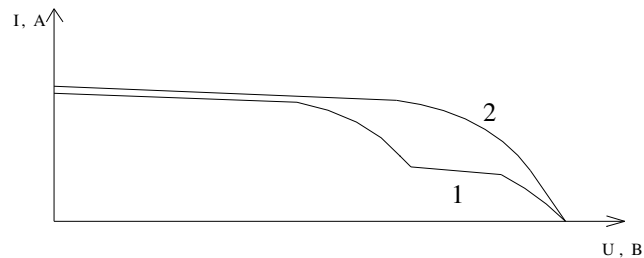
Напруга холостого ходу - 15В; струм короткого замикання - 1,3 А;

**Диференціальний опір у точці максимальної потужності становить
100м**

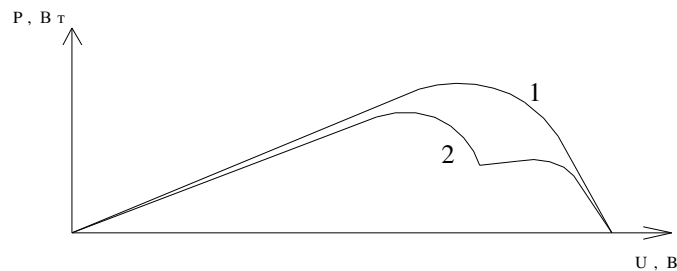
4.2. Підтримання фотоелектрохімічної систему в точці максимального потенціалу, коли фотоелемент частково непрозорий

У багатьох енергетичних системах, заснованих на ВДЕ, фотоелектричні елементи складаються з кількох частин, наприклад, елементи на дахах будівель, зовнішніх стінах тощо. У цьому випадку різні частини фотоелемента можуть бути освітлені з різною інтенсивністю. Вищенаведену ситуацію досліджено в [21]. Очевидно, що при затемненні навіть невеликої частини площі фотоелемента його ІАС істотно змінюється.

на малюнку. 4.11а показані 4 характеристики фотоелемента без листя та фотоелемента, освітленість якого (1,4% площі) на 35% нижча, ніж у решти модуля. Секції акумулятора з'єднані паралельно. На цьому ж малюнку (рис. 4.11б) показана діаграма потужності навантаження при робочій напрузі, зображена заштрихованим і частково порожнім фотоелементом.



а)



б)

Рисунок 4.11 - Фотоелемент ІАС:

а-1-непрозорий ІАЦ і 2-затінений фотоелемент;

б - залежність потужності від робочої напруги: 2 - профіль, 1 - експозиція

Втрата потужності екранованого фотоелемента відносно неекранованого фотоелемента становить:

$$\Delta P = \frac{P_0 - P_s}{P_0} \cdot 100\% = 23\%,$$

Хоча непрозора частина становить лише 1,4% усієї площі, тобто втрати енергії більш ніж у 15 разів перевищують втрати освітленої поверхні.

Її характеристика полягає в наявності двох крайніх точок на енергетичній діаграмі, тобто вищезгадана система не може реалізувати роботу системи в

оптимальній точці. Для того, щоб підтримувати систему в оптимальній точці, необхідно модифікувати алгоритм або знайти екстремальні значення, наприклад, поєднати метод примусової суперпозиції вібрації та метод запису екстремальних значень, або адаптувати кожну частину до екстремуму. Використовуйте для бою унікальне спорядження. Кожен має свої переваги та недоліки.

Втрата потужності становить 76 Вт, що відповідає 20% від максимально можливої потужності.

У цьому сенсі питання вибору параметрів потужності має вирішуватися шляхом включення конфігурації системи на основі економічних питань та питань енергоефективності.

Як згадувалося в попередньому абзаці, у випадку частково заштрихованої частини фотоелектричної трубки, яка характеризується кількома нахилами потенціалу, система керування перетворювачем з постійної напруги не може досягти роботи при максимальній абсолютній енергії. Характеристика чесноти. Для вирішення задачі знаходження абсолютного максимуму може бути використана модифікована система керування на основі методу краю пам'яті.

Роботу системи можна розділити на дві фази – фазу пошуку кінцевої точки та фазу роботи над кінцевою точкою.

Дізнайтеся про виявлені екстремальні сценарії. Відповідно до методу розрахунку пристрою, тобто за допомогою рівняння (3.7), розподіл змін коефіцієнта заповнення імпульсів керування визначається відповідно до параметрів використовуваних фотоелементів. Цей інтервал ділиться на 2^n інтервалів, де n — біт цифро-аналогового перетворювача.

Під час екстремального етапу виявлення генератор коду надає код від 0 до 2^n на вхідну послідовність ШІМ-ЦАП, перетворюючи його в значення напруги, придатні для ЦАП. Тому на виході ШІМ з'являється керуючий імпульс і його тривалість дискретно змінюється від мінімального до максимального значення.

Таким чином власна потужність фотоелемента «зливається». Процес знаходження абсолютного максимуму полягає в наступному: сигнал від

датчика струму подається на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який відбивається (ом. відбивається) парою сигналів від виходу STR. На додаток до генератора і регістра RG 3, синхронізованого сигналом STR. Peripatetics працює в режимі ШІМ дільника. Частота виходу калькулятора повинна бути достатньою для завершення перехідного процесу в PPN. Сигнал з виходу АЦП подається на демультиплексор DMX, а його вхідна адреса надходить на компаратор цифрового сигналу CMP. Сигнал на виході цифрового компаратора (ЦП) залежить від вмісту регістрів RG 1 і RG 2 . Зараз знаходиться.

Тому при досягненні екстремальних значень на виході СС з'являється серія високих і низьких сигналів (рис. 4.12).

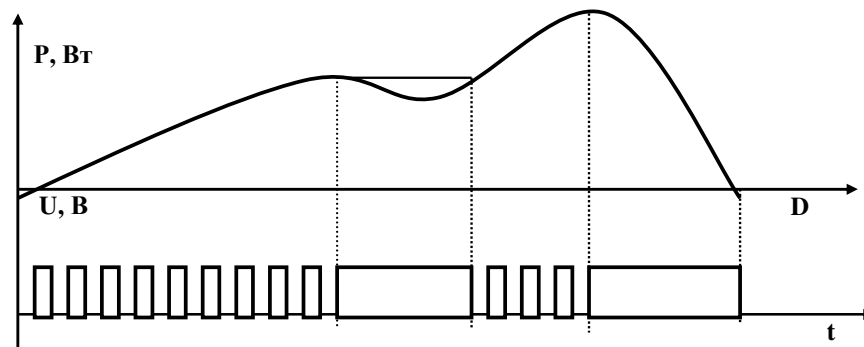


Рисунок 4.12 - Робота системи керування в частково затіненому фотоеlementі

Коли кінець буде досягнуто, на виході СС з'явиться логічна 1 або 0. Якщо кінець не є абсолютним, у наступному циклі з'явиться серія низьких і високих сигналів. Потім сигнал від виходу СС до цифрового автомата (СА) DA реконструюється за допомогою таблиці перетворення (табл. 4.1).

У таблиці 4.1 - Q_n - стан виходу змінного струму в n-му такті, Q_{n+1} - стан виходу змінного струму в n + 1-му такті, X - сигнал з виходу СС, С - такт. Якщо СА відображає нижню частину сигналу, сигнал СС потрібно інвертувати.

Сигнал з виходу змінного струму подається на генератор, який створює трохи коротший тактовий імпульс, але цього достатньо, щоб записати фактичний код ШІМ-генератора в регістр RG 3.

Таблиця 4.1 - Таблиця перетворення цифрових автоматів

<i>запит ати_{ні}</i>	<i>Який +1</i>	<i>X</i>	<i>C</i>
0	1	1	1
1	0	0	1
0	1	0	1
1	1	0	1
1	1	1	1
0	0	0	0

Тому в кінці процесу «випалу» відповідної потужності на фотоелемент в RG 3 буде код ШІМ, відповідний абсолютному максимальному значенню.

Другим кроком у системі є збереження цього коду на вході ЦАП. Повторення процесу знаходження кінцевої точки може бути виконано відразу після певного інтервалу часу або коли потужність, що знімається з фотоелемента, зменшиться до деякого заданого значення.

4.3 Пристрій для корекції характеристик струму і напруги акумуляторного фотоелектричного перетворювача

Безпосередньо використовувати фотоелектричні перетворювачі для тестування та адаптації потужних пристроїв як джерела енергії недоцільно через необхідність завжди мати високий рівень освітленості, що призводить до споживання енергії (ККД фотоелектричних перетворювачів низький ~10%, а Неефективне) саме світлове джерело ~ 10 - 30%).

Цю проблему можна вирішити за допомогою обладнання, що імітує характеристики фотоелементів. Відомий пристрій [40], який моделює коефіцієнт струму (VAC) за допомогою методу кусково-лінійної апроксимації. Алгоритм роботи приладу полягає у формуванні наближеної лінії із заданим піковим значенням, великому положенні робочої точки в апроксимованій лінії та переході від однієї наближеної лінії до іншої, коли робоча точка досягає власного значення напруги (віднімаючи власне IV приблизно на 10% менше).

Недоліками цього рішення є низька швидкодія (також відсутні механічні засоби для переходу від однієї наближеної лінії до іншої), низька точність відтворення ВАХ, особливо в зоні, де фотоелектричний перетворювач працює найбільш ефективно, що, очевидно, ні. Лінійний (поділений на приблизну похибку лінійності) і не може змінювати перехідні процеси через зміни освітлення.

Щоб подолати ці недоліки, ми створили пристрій, який служить аналогом I/V фотоелемента, використовуючи фотодіодний І/С оптрон, який покладається на фотодіодні схеми вводу/виводу та фотодіода. Струм оптрона генерується в струмі навантаження [21]. Напруга навантаження - це посилена напруга фотодіодної оптрони. Рисунок 1 Принципова електрична схема пристрою 4.13.

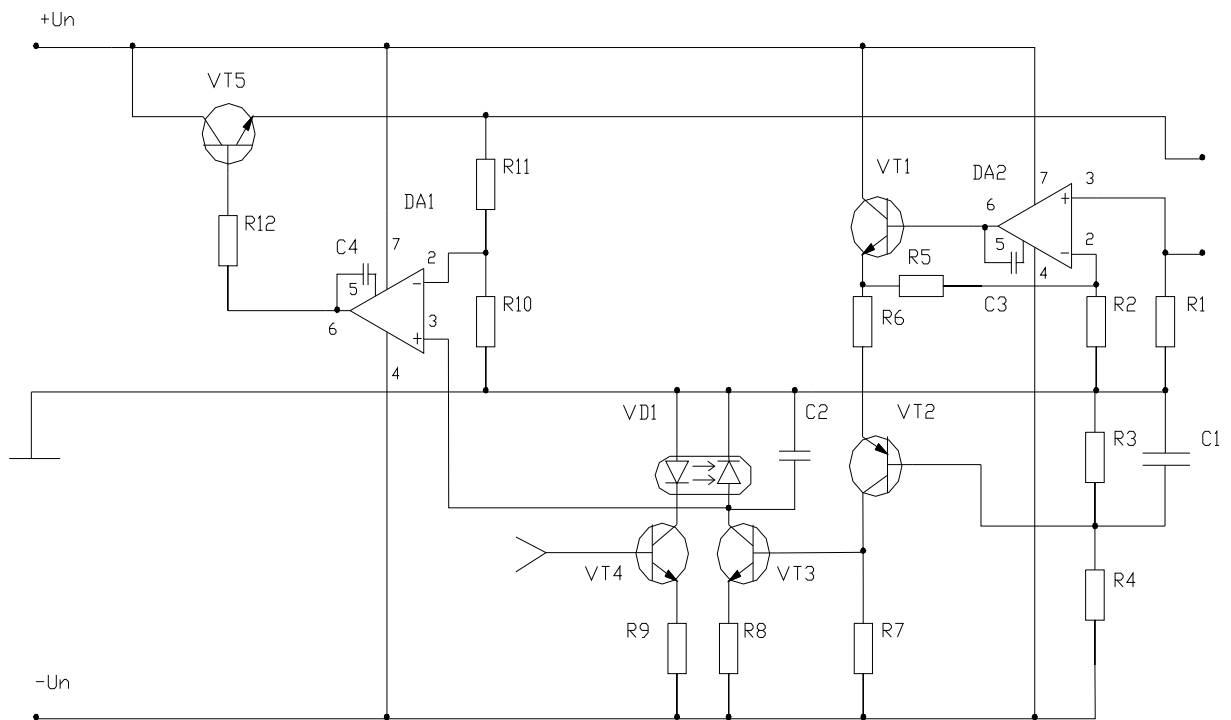


Рисунок 4.13 - Електрична схема пристрою моделювання вольт-амперної характеристики

Акумуляторний фотоелектричний перетворювач

Коефіцієнт передачі напруги пристрою (DC):

$$K_u = \frac{U_n}{U_n} = \frac{K_2 R_n}{(1 + \beta K_2)(R_n + R_{\partial.m.}) + r_{\phi.\partial.} K_1 K_2 G R_{\partial.m.}}, \quad (4,8)$$

Коефіцієнт посилення струму в приладі:

$$K_i = \frac{I_n}{I_n} = \frac{-r\phi.\partial.K_2}{(1 + \beta K_2)(R_n + R_{\partial.m.}) + r\phi.\partial.K_1 K_2 G R_{\partial.m.}}, \quad (4, 9).$$

де тягар наміру U_n

U_n - напруга на фотодіоді оптрона, де $R_n = \infty, U_n = U_{x.x}$ фотодіод не має напруги навантаження); $U_{x.x}$.

I_n - Струм навантаження;

I_n - струм фотодіодної оптрони (при $R_n = 0, I_n = I_{k.з.}$, де $I_{k.з.}$ - замикання фотодіодної оптрони;

K_1 - коефіцієнт посилення першого підсилювача напруги;

K_2 - коефіцієнт підсилення вторинного підсилювача напруги;

β - Коефіцієнт передачі дільника напруги;

G - провідність пропускання першого джерела керування струмом;

R_n - Опір навантажень (як правило, більш складний);

$R_{\partial.m.}$ - Резистори в перетворювачах струму в напругу;

$r\phi.\partial.$ - Опір нелінійного фотодіодного оптрона.

З формул 4.8 і 4.9 видно, що при зміні коефіцієнта пропускання дільника напруги β , коефіцієнта підсилення напруги K_1 та K_2 опору перетворювача струму в напругу характеристики сонячних фотоелектричних перетворювачів IV типу з різними $R_{\partial.m.}$ значеннями є $I_{k.з.}$ змінюються $U_{x.x.}$.

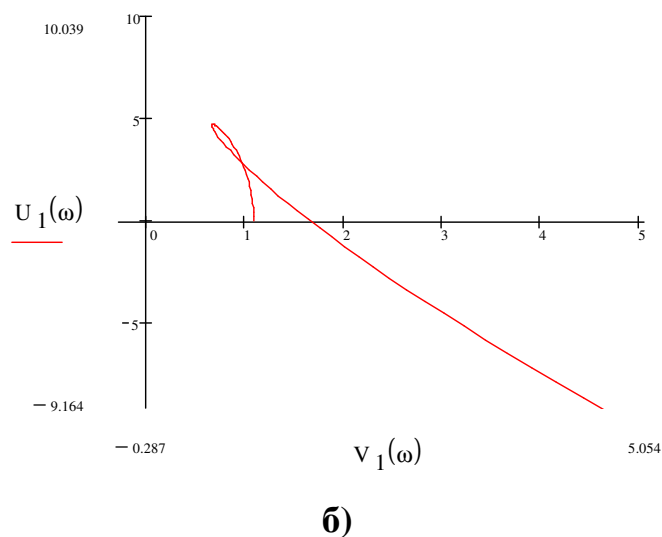
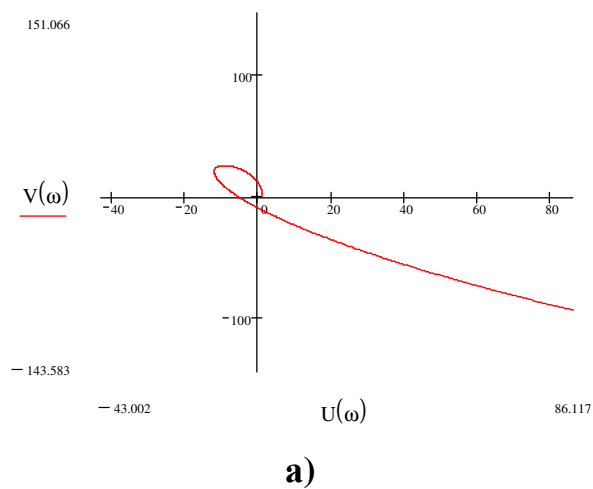
Вхідний опір пристроїв, що працюють з сонячними фотоелектричними перетворювачами, може мати реактивну складову. Таким чином, двигун для імітації сонячних фотоелектричних перетворювачів батареї IV повинен мати можливість працювати з різними типами навантажень, тобто зберігати стабільність роботи, незважаючи на складний характер навантажень.

З метою аналізу стійкості двигуна при використанні різних видів навантажень (активного, активно-ємнісного, індуктивно-активного) визначено коефіцієнт передачі двигуна на змінному струмі;

$$K_u = \frac{R_n}{(1 + j\omega T_2 + (j\omega T_6)^2) \cdot (R_n + R_{\partial.m.}) + Z \cdot \frac{K_3 \cdot K_4 \cdot (1 + j\omega T_1)}{(1 + j\omega T_2) \cdot (1 + j\omega T_3) \cdot (1 + j\omega T_5 + (j\omega T_4)^2)}}$$

Знаменник коефіцієнта передачі машини з активним характером навантаження є поліном шостого ступеня, а з навантаженням індуктивного активного характеру – поліном сьомого ступеня, тому використовувати алгебраїчний критерій стійкості недоцільно.

Для дослідження стійкості приладу використовувався частотний критерій Михайлова (який використовується для дослідження систем із замкнутими негативними петлями) [17]. Результати дослідження стабільності годографа Михайлова показані на рис. 4.14. Годографи 4.14 а, б, в відповідають стабілізуючому пристрою.



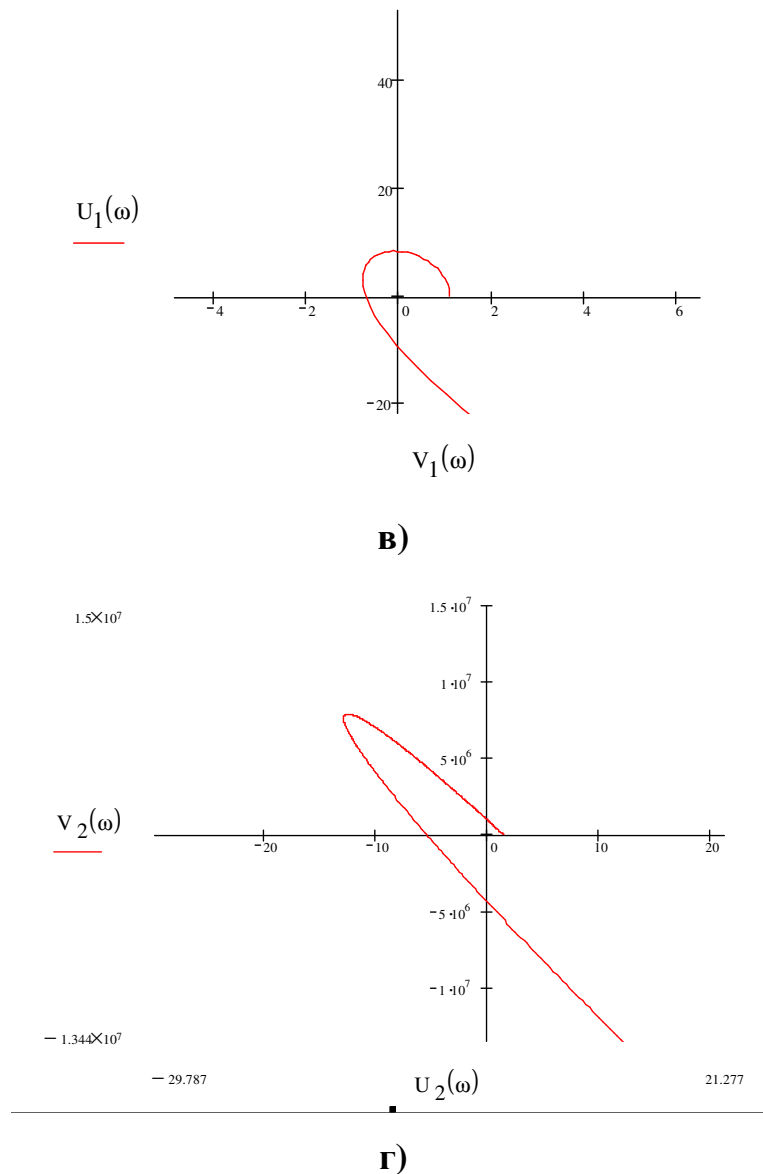


Рисунок 4.14. Михайлов одразу записав:

- а - стабілізуючий пристрій з активним навантаженням;**
- б - нестійке обладнання з активним індуктивним навантаженням;**
- в - стійкий пристрій з активним індуктивним навантаженням;**
- г - стійкий пристрій з активним працездатним навантаженням**

У цьому пристрої використовуються транзистори КТ502, КТ503 і КТ819, операційний підсилювач К574УД1А, постійні резистори С2-23 і С5-16МВ. Для електронної пошти використовуйте елементи з такими термінами:

$R1 = 0,175 \text{ Ом}$, $R2 = 1 \text{ кОм}$, $R3 = 1,5 \text{ кОм}$ SP4-1, $R4 = 3,6 \text{ кОм}$, $R5 = 2 \text{ кОм}$, $R6 = 3,3 \text{ кОм}$, $R7 = 1,1 \text{ кОм}$, $R8 = 3,6 \text{ кОм}$, R_{hm} , R_{hm} , R_{hm} , R_{hm} $R1 = 1,4 \text{ кОм}$

1 кОм, $R_{11} = 20$ кОм, $R_{12} = 2$ кОм, $C_1 = 10$ мкФ і оптронний діод AOD 101B, компонент працює зі струмом короткого замикання $I_{kc} = 2,9$ А, напругою холостого ходу $U_{xx} = 13$ В (напруга живлення ± 15 В)

Цей сигнал подається на базу транзистора VT 4 для імітації зміни зовнішніх умов (освітлення). Таким чином, ця дослідницька система забезпечує не тільки встановлені методи роботи, але й перехідні процеси, що дозволяє досліджувати пристрої, що працюють з фотоелектричними перетворювачами в умовах, наближених до природних.

4.4 Пристрій для підвищення ефективності накопичувальної системи

Як згадувалося в розділі 1 вище, підтримка АВ потребує великих трудовитрат і багато часу. Через відносно високу вартість акумуляторів неоптимальна робота акумуляторів може призвести до скорочення терміну служби, тим самим збільшуючи експлуатаційні витрати всієї системи.

Без автоматизації та контролю процесу завантаження та розвантаження неможливо було б покращити роботу АВ для забезпечення її надійної та довгострокової роботи.

Ми повністю уточнили декілька стандартів. Найвідомішими з них є контроль електронної густини, викидів газів і напруги акумулятора. Контроль напруги елемента добре підходить для практичного використання, оскільки цей стандарт не потребує додаткового обладнання [33] (електродів порівняння, датчиків електролітичної густини тощо), а результати є задовільними. Значення напруги батареї ракети залежить від режиму роботи. Коли батарея використовується в режимі зарядки постійного струму, різниця напруг заряду і розряду батареї (10 елементів послідовно) повинна бути дуже малою - 0,3-0,5В.

Коли акумулятор знаходиться в режимі розряду, напруга розрядженого акумулятора може досягати мінімально допустимого значення. Для автоматичного керування завданням шихта-АВ розроблено автомат керування.

Прототип розробленого пристрою отримав назву «ПаВЗА М», як описано в [21]. На відміну від прототипу, пристрій використовує більш стабільне джерело опорної напруги та використовує триконтактні керовані кремнієві комутаційні

елементи замість електромеханічних перемикачів для перетворення потужності, реалізуючи можливість роботи з кислотно-лужними батареями. Це досягається шляхом перемикання . Намір посилення.

Роль плати в заряджанні батареї пристрою показано на малюнку 2. 4.15 Компаратори K1 і K2 дозволяють змінювати струм навантаження відповідно до напруги батареї (компаратори мають невеликий гістерезис, щоб запобігти багаторазовому активуванню вимикача живлення). Якщо напруга акумулятора перевищує порогову напругу пристрою, S1 вмикає та вимикає джерело струму.

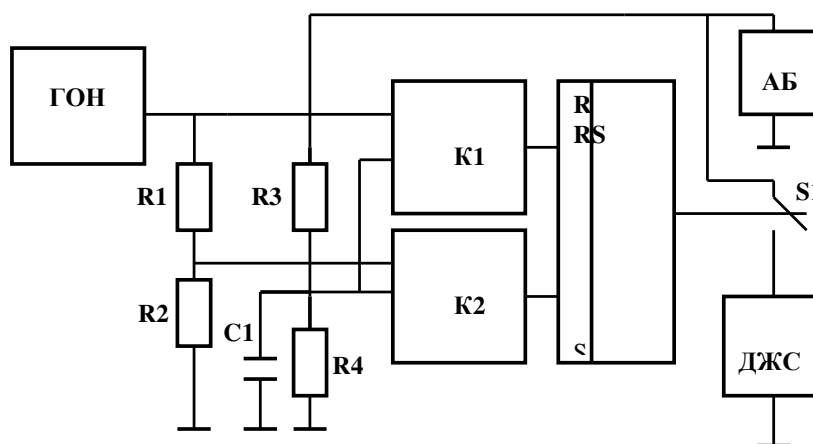


Рисунок 4.15 – Діаграма вимог до обладнання

Управління зарядом батареї:

GON-генератор опорної напруги R1, R2. R3, R4, C1 - дільник напруги акумулятора і фільтр K1, K2 - компаратор;

RS-тригер AB-акумуляторна батарея;S1-перемикач живлення

Якщо напруга батареї падає нижче нижнього порогу спрацьовування, перемикач S1 підключає джерело струму навантаження до навантаження. Змінюючи поріг спрацьовування, можна досягти різних режимів роботи машини: режим посилення, режим постійної зарядки.

Якщо вам потрібен більш точний контроль стану батареї, рекомендуємо використовувати на вашому пристрої Amp Hours. Необхідність виражати години в амперах пояснюється тим, що напруга батареї залежить тільки від її заряду та величини струму, що протікає через неї. Використання ампер-годин з

цим пристроєм дозволить передбачити обмеження в постачанні електроенергії споживачам у періоди відсутності постачання відновлюваної енергії.

Для вирішення проблеми автоматизації енергосистеми на базі ВДЕ створено пристрій у пристрої керування зарядом акумулятора (КПЗА), призначений для контролю та управління процесами зарядки акумуляторів від відновлюваних джерел енергії та мереж змінного струму (~220 В, 50 Гц) [35].

Подібна робота була описана [15-17,21]. Цей пристрій побудовано за модульним принципом і складається з дев'яти повнофункціональних модулів (рис. 4.16).

Усі А1 відстежують стан батареї (АВ). Відповідно до стану АВ 0"на виході модуля формується логічний сигнал «АБО» 1". Усі фотоелементи контролю стану А2. Якщо FВ генерує достатню потужність, на виході модуля з'являється логіка " " 1", інакше - " " 0". Модуль А3 контролює стан мережі змінного струму - 220 В, 50 Гц. 1"На виході модуля;0"

Якщо на виході модуля А1 є логіка 1", значить, модуль аналізує сигнали з виходу модулів А1..А3. Якщо в курсорі цих модулів з'являється « 1"» 1". з'являється в курсорі цих модулів ".

Ця плата є частиною модуля А6 і підключається до АВ лише в тому випадку, якщо її «логіка» перевищує логіку модуля А2 0", тобто коли запалювання не дозволяє АВ, що є а. річ

Модуль А7 захищає АКБ від коротких замикань у ланцюгах навантаження та споживача та обмежує струм, що видається АКБ, до встановленого рівня.

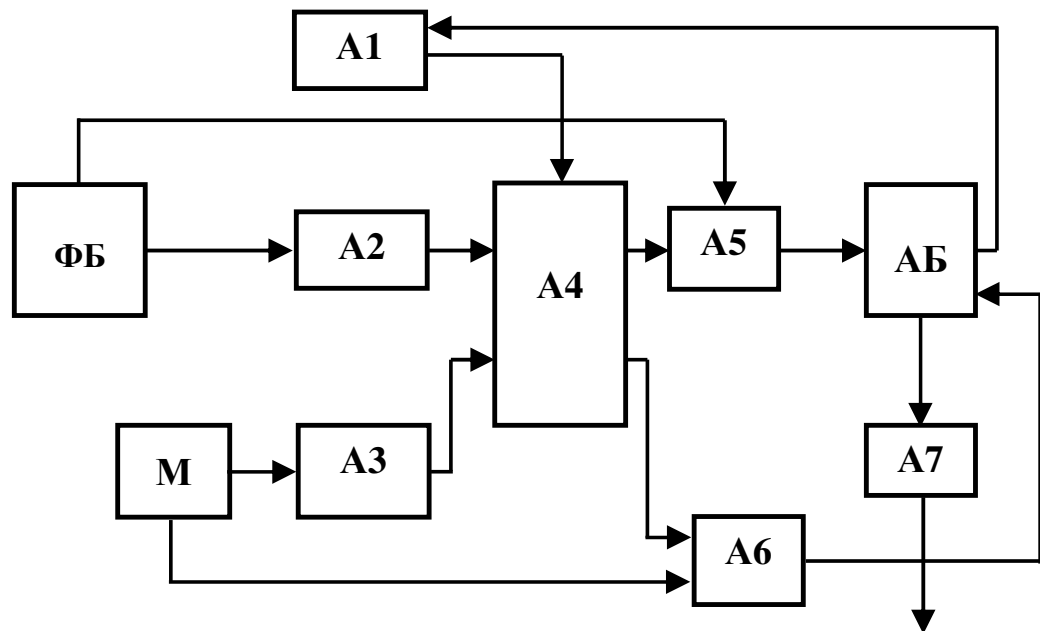


Рисунок 4.16-Схема структури пристрою КПЗА:

АБ- акумуляторна батарея; А1 - А7 — модуль

Робота модуля А1 складається з порівняння напруги на АВ з постійною напругою високої напруги. Якщо напруга на АКБ менше ліміту, модуль генерує «логіку» на виході 1'', що АКБ необхідно увімкнути. Якщо напруга на АКБ дорівнює порогу або перевищує його, на вихідному модулі з'являється «логіка» 0''.

Робота модуля А2 полягає в порівнянні напруги в FB з опорною напругою. Якщо концентрація в FB перевищує концентрацію концентрації, в аномальному модулі формується «логіка» 1''.

Модуль А3 є детектором змінної напруги. Якщо в мережі є напруга, на модулі виводу з'являється «Logic» 1''.

Модуль А4 обробляє сигнали, що надходять з виходів модулів А1..А3 на його входи, і змінює модулі А5,.А6. Модуль із подвійним квадроциклом.

Модуль А5 є ключовим транзистором для потужних польових транзисторів.

У модулі А6 використовується імпульсний зарядний пристрій, що забезпечує номінальне навантаження АВ.

Модуль А7 також використовує сильні польові транзистори.

Кожен модуль конструкції незалежний один від одного і система може бути виготовлена в залежності від наявності того чи іншого джерела енергії. Наприклад, якщо є тільки FB і основне живлення (~ 220 В, 50 Гц), система може бути оснащена модулями А1, А2, А3, А4, А5, А6, А7 і модулями А4, А7. Логіка Цей перемикач встановлено на 0”2-дюймовому вході з вовняною коробкою.

Пристрій КПЗА може працювати від кислотних і лужних батарей, які забезпечуються модулем А1, де співвідношення напруги та струму залежить від типу використовуваної батареї.

Вихідний модуль А7 можна підключити до інвертора постійного струму 12 В - 220 В, 50 Гц.

Пристрій може використовуватися як автоматизована установка в автономних енергосистемах на основі ВДЕ.

4.5 Висновки цього розділу

Створено пристрій для підтримки системи АБ-ФБ на максимальній потужності. Теоретично перевірено ефективність використання таких пристроїв у системах АБ-ФБ, особливо при зміні умов освітлення, які є найбільш типовими характеристиками природних умов.

Можна застосовувати для керування заряджанням батареї та керування процесом зарядки батареї.

ВИСНОВКИ

З метою забезпечення ефективної роботи автономних енергетичних систем на основі відновлюваних ресурсів та стабільного забезпечення споживачів електроенергією в магістерській роботі досліджується процес перетворення та накопичення електроенергії в АБ, що дозволить підвищити ефективність автономних енергетичних систем. На базі ВДЕ встановили принципи вдосконалення.

Аналіз результатів, отриманих у даній роботі, приводить до наступних результатів.

1. З метою підвищення точності математичного опису процесу електричного кола, що містить оптичний перетворювач, запропоновано часткову лінійну апроксимацію ВАХ оптичного перетворювача, при якій лінії апроксимації перетинаються в точці максимальної потужності. Це дозволяє: Ми використовуємо математичний інструмент лінійних диференціальних рівнянь для розрахунку електричних кіл з оптичними перетворювачами. Найбільша відносна похибка запропонованої апроксимації не перевищує 7,4% порівняно з тонкою лінійною апроксимацією.

2. Для забезпечення тестування та калібрування пристроїв, що використовують фотоелектричні елементи, запропоновано метод моделювання ВАХ фотоелектричних елементів. Цей метод передбачає використання регульованої установки (фотодіодів) і двох негативних зворотних зв'язків за струмом і струмом. В результаті ми відтворили характерну область ВАХ на створеному випробувальному стенді та змодельовали зміни зовнішніх умов (освітлення).

3. З метою дослідження продуктивності незалежної системи накопичення енергії на основі фотоелектричних елементів розроблено математичну модель процесу зарядки електрохімічних елементів фотоелектричних елементів. В результаті аналізу моделі виникла необхідність використання автоматичної системи регулювання заряду батареї для забезпечення максимального відбору потужності через фотоелектричні елементи. Справедливість моделі перевірена експериментально.

4. З метою підвищення ефективності енергосистем на основі фотоелектричних та електрохімічних елементів проведено розрахунки системи автоматичного обслуговування фотоелектричних елементів у точці максимальної потужності на основі впливу параметрів перетворювачів зворотної полярності. Досліджено стабільність та якість перехідного процесу системи, фотоелектричного елемента та батареї. Давайте розберемося, як вибрати максимальну потужність з напівзатінених фотоелементів. На основі цього виготовлено пристрій, який автоматично контролює заряд акумулятора від фотоелементів. Використання цього пристрою в системі електропостачання на основі фотоелектричної системи в деяких випадках збільшило використання фотоелектричної енергії в середньому на 15-20%. До 60 відсотків.

5. Вживалися заходи щодо захисту трудящих і громадян. Здається, що для освітлення кімнати потрібно три лампи в ряд. Мінімальна освітленість приміщення, де постійно контролюється процес, $E = 75$ лх.

Список використаних джерел

1. 10 Examples of Successful Wind Energy Solutions. *State of Green*. URL: <https://stateofgreen.com/en/news/10-examples-of-successful-wind-energy-solutions/> (date of access: 05.11.2024).
2. An autonomous solar power station: main types, components and methods of increasing autonomy. *Könnner & Söhnen Stromerzeuger ▹ Generatoren k&s | Könnner & Söhnen Notstromaggregat und Gartentechnik*. URL: <https://koenner-soehnen.com/en/articles-list/standalone-solar-power-system> (date of access: 05.11.2024).
3. Andriienko R. I., Klen K. S. Simulation Modeling of an Autonomous Power Supply System Based on Solar Panels in Real Time. *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2022. Vol. 27, no. 3. URL: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.268903> (date of access: 05.11.2024).
4. Examples of Renewable Energy: Solar Energy, Wind Energy, etc. *Homepage | Yayasan Indonesia CERAH (CERAH)*. URL: <https://www.cerah.or.id/publications/article/detail/examples-of-renewable-energy-solar-energy-wind-energy-etc> (date of access: 05.11.2024).
5. Hussein K.H., Muta J., Hoshino T., Osakada M. Maximum photovoltaic power tracking. An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions // *IEE Proc. Generat Transmiss. And Distrib.* – 1995. – №1. - C. 59 – 64.
6. Hybrid Power Generation by Using Solar and Wind Energy: Case Study / P. Jenkins et al. *World Journal of Mechanics*. 2019. Vol. 09, no. 04. P. 81–93. URL: <https://doi.org/10.4236/wjm.2019.94006> (date of access: 05.11.2024).
7. Industrial Solar Rooftop System Service Provider. *Onix Renewable Limited - independent power producers (IPP) and EPC Company in Renewable Sector*. URL: <https://onixrenewable.com/hybrid-power-plant.html> (date of access: 05.11.2024).
8. Power supply of autonomous systems using solar modules / A. V. Yurchenko et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 81. P. 012112. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/81/1/012112> (date of access: 05.11.2024).

9. Zahedi A. Sustainable Power Supply Using Solar Energy and Wind Power Combined with Energy Storage. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 52. P. 642–650. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.120> (date of access: 05.11.2024).

10. Голик О. П. Аналіз можливостей задоволення енергетичних потреб автономного споживача за рахунок відновлюваних джерел енергії / О. П. Голик, Р. В. Жесан, Я. В. Степанова // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / Вип. 25, Ч.ІІ – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 155-161.

11. Денисюк С. П. Принципи побудови автономних систем енергопостачання на базі нетрадиційних джерел енергії / С. П. Денисюк // Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії: Державний комітет з енергозбереження України, НАН України, АТ “Укренергозбереження”. – 1999. – № 2. – С. 39-42.

12. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина 1 : навч. посіб. / О. П. Голик, Р. В. Жесан, І. В. Волков [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2020. – 192 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/9295>

13. Єрохов В. Ю., Дружинін А. О., Єрохова О. В. Construction of hybrid autonomous and backup power supply for complex solar systems. *Technology audit and production reserves*. 2015. Vol. 2, no. 1(22). P. 33. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.41412> (date of access: 05.11.2024).

14. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Львів: Афіша, 2002. – 320 с.

15. Кирпатенко І. М. Автоматизація процесів акумулювання електричної енергії відновлюваних джерел // Винахідник і раціоналізатор. – 1999. - № 1-2. – С. 34 – 35.

16. Кирпатенко І. М. Кусково – лінійна апроксимація вольт – амперної характеристики фотобатареї // Технічна електродинаміка. – 2002. - №4. – С. 11 – 13.

17. Кирпатенко І. М. Система резервного електроживлення жилих та промислових об'єктів // Технічна електродинаміка. Темат. вип. Проблеми сучасної електротехніки, част. 3. - 2000. - С. 74 – 75.

18. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 05.11.2024).

19. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 10.11.2024).

20. Конституція України : від 28.06.1996 № 254к/96-ВР : станом на 1 січ. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text> (дата звернення: 02.11.2024).

21. Кудря С. О., Яценко Л. В., Кирпатенко І. М., Васько В. П. Методи підвищення ефективності застосування обладнання на основі відновлюваних джерел енергії в комбінованих енергетичних системах // Винахідник і раціоналізатор. – 1999. - №1-2. – С. 43.

22. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 07.11.2024).

23. Пат. 42410 А Україна. МКВ G06G7/62. Пристрій для моделювання вольт-амперної характеристики: Пат. 42410 А Україна. МКВ G06G7/62/ Кирпатенко І. М. (Україна); Інститут електродинаміки НАН України. - №2001021157; Заявлено 19.02.2001; Опубл. 15.10.2001, Бюл. №9 – 4с.

24. Петергеря Ю. С. Забезпечення умов відбирання максимальної потужності від автономних джерел живлення // Техн. електродинаміка. – 2000. - №3. - С. 28 – 32.

25. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Від 25.07.2006. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення: 13.11.2024).

26. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с. URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> (дата звернення: 18.11.2024)

27. Практикум із охорони праці: Навч. Посібник / [Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Сторожук В.М. та ін.]; За ред. к.т.н. В.Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 352с.

28. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV : станом на 30 жовт. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 05.11.2024).

29. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 10.11.2024).

30. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 11.11.2024).

31. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 05.11.2024).

32. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 06.11.2024).

33. Разак А. Нестационарні процеси в електричних колах з фотоелектричними джерелами живлення: Дис... канд. техн. наук: 05.14.08. – К., 1998. - 139 с.

34. Савчук А. Й. Нетрадиційні способи та засоби видобутку електроенергії: [навчальний посібник: частина перша] / Савчук А. Й. – Чернівці: Рута, 2002. – 58 с.

35. Щербина О. М. Енергія для всіх: [технічний довідник з енергоощадності та відновлюваних джерел енергії / Вид. 4-е, допов. і перероб.] – Ужгород: Вид-во В. Падяка, 2007. – 340 с.

ДОДАТКИ