

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ  
СИСТЕМИ НА ОСНОВІ СОНЯЧНИХ МОДУЛІВ  
ТА СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

Виконав студент VI курсу, групи ЕММ-61  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Гавучак І.Р.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Коваль В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Вакуленко О.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Шелестовський Б.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2020

---

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 67 сторінок, 21 аркуш презентації, 19 ілюстрації, 2 таблиці та 20 використаних першоджерел.

Мета роботи - дослідження роботи енергоустановок на базі фотоелектричних перетворювачів із акумулюванням електроенергії конденсаторами високої ємності.

У роботі розглянуто: принципи побудови наноструктурованих суперконденсаторів; комбіновані енергоустановки на основі суперконденсаторів; математична модель електроенергетичної системи на основі сонячних модулів з енергоємним конденсатором; експериментальні дослідження сонячної електроенергетичної системи з енергоємним конденсатором; конструкцію фотоелектричної системи акумулювання електроенергії із суперконденсатором.

Ключові слова: СОНЯЧНА БАТАРЕЯ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА БАТАРЕЯ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, АКУМУЛЯТОР

## ЗМІСТ

### ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Сонячна енергетика .....	8
1.2 Застосування накопичувачів енергії у відновлюваній енергетиці.....	10
1.3 Суперконденсатори.....	11
1.4 Висновки до розділу .....	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	17
2.1 Комбіновані енергоустановки на основі суперконденсаторів.....	17
2.2 Типова схема комбінованої енергоустановки.....	19
2.3 Типова схема суперконденсаторної системи накопичення енергії .....	21
2.4 Застосування набраних суперконденсаторів в автомобільному транспорті.....	22
2.5 Опис запропонованої конструкції фотоелектричної системи акумулювання електроенергії із суперконденсатором .....	24
2.6 Висновки до розділу .....	24
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	26
3.1 Особливості електричного навантаження .....	26
3.2 Режими роботи і параметри накопичувача енергії.....	27
3.3 Фотоелектричне перетворення сонячної енергії .....	30
3.4. Моделювання сонячної електроенергетичної систем .....	32
3.5 Математична модель сонячної електроенергетичної системи з ємнісним енергоємним накопичувачем .....	37
3.6 Експериментальні дослідження імпульсного енергоємного конденсатора .....	42

3.7 Висновки до розділу .....	53
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	55
4.1 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки .....	55
4.2 Можливість виникнення статичної електрики та заходи боротьби з нею.....	56
4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час .....	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	65

## ВСТУП

Актуальність теми. Створення високоефективних автономних фотоелектричних енергетичних установок в першу чергу визначається використанням джерел енергії (сонячних і акумуляторних батарей) з покращеними техніко-економічними показниками. Однак навіть при найдосконаліших джерелах енергії, енергетична установка може мати невисокі енергетичні характеристики через нераціональне використання їх можливостей. Тому, при проектуванні високоефективних автономних фотоелектричних енергетичних установок, повинні вирішуватися завдання як розробки (використання) сонячних батарей (СБ) з по підвищеним ККД і акумуляторних батарей (АБ) з поліпшеними технічними характеристиками, так і завдання системного проектування фотоелектричних систем і енергетичних установок з метою підвищення їх енергетичної ефективності.

Основним недоліком електрохімічних акумуляторів електроенергії є необхідність перетворення її у інші види. Одним із нових методів зберігання електроенергії у чистому вигляді без перетворень є її накопичення у конденсаторах великої ємності. На сучасному етапі розвитку науки та технологій вдалося досягти ємності у тисячі фарад, що забезпечує стійкий ґрунт для подальших досліджень в напрямку їх використання для акумулювання електроенергії від поновлювальних джерел енергії.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи - дослідження роботи енергоустановок на базі фотоелектричних перетворювачів із акумулюванням електроенергії конденсаторами високої ємності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд публікацій за темою кваліфікаційної роботи.
2. Запропонувати математичну модель сонячної електроенергетичної системи на основі застосування енергоємного конденсатора.

3. Дослідити роботу сонячної електроенергетичної системи у складі якої є суперконденсатор.
4. Встановити спосіб яким можна збільшити потужність і ККД сонячної батареї.
5. Експериментально встановити чи застосування в електроенергетичних установках суперконденсаторів покращує характеристики сонячних модулів чи ні.

**Об'єкт дослідження:** процеси у електричних колах із суперконденсаторами.

**Предмет дослідження:** фотоелектрична система акумулювання електроенергії із суперконденсатором..

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Розроблено математичну модель сонячної електроенергетичної системи на основі застосування енергоємного конденсатора, що дозволяє оцінювати її ККД в режимах безперервного і імпульсного підключення навантаження.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Встановлено, що застосування в електроенергетичних установках енергоємних конденсаторів істотно покращує характеристики сонячних модулів. Так, якщо потужності, що виділяються на навантажувальних опорах 0,4 і 0,3 Ом становили відповідно 44,2 та 40,8 Вт, то при використанні енергоємних конденсаторів ці потужності зросли до 360 Вт і 500 Вт відповідно на початку процесу.

**Апробація.** Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на ІХ Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2020 року. ТНТУ [1].

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань (20 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 67 сторінок, 2 таблиці, 19 рисунків.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Сонячна енергетика

Сонячна енергетика розглядається як один з можливих додаткового тільних джерел енергопостачання в найближчому майбутньому. Однак уже в даний час економічно вигідно використовувати сонячні енергоустановки для цілей водопостачання дрібних споживачів, опріснення води, електропостачання малопотужних об'єктів. Розрахункові і експериментальні дослідження виконані в нашій країні і за кордоном, дозволяють сподіватися, що найближчим часом будуть створені економічно прийнятні сонячні генератори, потужністю до 5 кВт. Сонячні енергоустановки економічно вигідно використовувати в районах, що лежать між 35-й і 50-й паралелями, тобто в тих районах, річне число сонячної активності не менше 6000.

Перетворення сонячної енергії в електричну може здійснюватися як за допомогою установок прямого перетворення, так і за допомогою ефективних динамічних перетворювачів [2].

В даний час досить добре відпрацьовані і знайшли практичне застосування сонячні енергетичні установки, що працюють за принципом прямого перетворення енергії. До таких установок відносяться напівпровідникові фотоперетворювачів (рис. 1.1) і сонячні термоелектричні генератори. Основні переваги таких генераторів визначаються відсутністю рухомих частин, малою інерційністю, автономністю і можливістю гнучкого оптимізації режимів роботи системи генератор-навантаження.

Однак енергоустановки з використанням напівпровідникових фотоперетворювачів мають в даний час порівняно високу вартість, а для отримання установки потужністю в сотні ват і одиниці кіловат необхідно значне збільшення площі фотоперетворювачів.

Тому пошук і розробка нових ефективних методів перетворення сонячної енергії для автономних енергоустановок малої потужності перед собою ставлять важливу задачу.





Рисунок 1.1 – Сонячні енергоустановки

Одне з можливих рішень цього завдання укладено в розробці спеціальних концентраторів сонячної енергії.

Сонячні енергетичні установки найдуть своє практичне застосування в районах з великою сонячною активністю в якості автономних енергоджерел на віддалених с.-г. об'єктах.

Фотоелектричні перетворювачі володіють значними потенційними перевагами:

- не мають рухомих частин, що значно знижує вартість обслуговування,
- термін служби модулів досягати, до 100 років при незначному зниженні експлуатаційних характеристик;
- не вимагають високої кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- ефективно використовують як пряме, так і розсіяне (дифузне) випромінювання;
- придатні для створення установок будь-якої потужності.

Найбільш практичне застосування в світі отримали гібридні сонячно паливні електростанції з параметрами [2]: ККД 13,9%, температура пара 371 °С, тиск пари 100 бар, вартість електроенергії, що виробляється 0,08- 0,12 USD / кВт год, сумарна потужність в США 400 МВт при вартості 3 USD / Вт. Сонячна електростанція (СЕС) працює в піковому режимі при відпускній ціні за 1 кВт год електроенергії в енергосистемі: з 8 до 12 год. - 0,066 USD і з 12 до

18 ч.- 0,353 USD [3]. ККД СЕС може бути збільшений до 23 % - середнього ККД системних електростанцій, а вартість електроенергії знижена за рахунок комбінованого виробництва електричної енергії і тепла.

Розрахунок і досвід експлуатації СЕС показує, що погодинне вироблення електроенергії, пропорційна зміні сонячної радіації протягом дня, в значній мірі відповідає денного максимуму навантаження в енергосистем [4,3].

Оскільки питома вартість СЕС не залежить від її розмірів і потужності, в ряді випадків доцільно модульне розміщення СЕС на даху сільського будинку, котеджу, ферми. Власник СЕС буде продавати електроенергію енергосистемі в денний час, і купувати її у енергетичній компанії по іншому лічильнику в нічні години. Перевагою такого використання, крім політики заохочення малих і незалежних виробників енергії, є економія на опорних конструкціях і площі землі, а також суміщення функції даху і джерела енергії.

При модульному розміщенні СЕС 1 млн. кВт здатна забезпечити електроенергією 500000 сільських будинків і котеджів.

## **1.2 Застосування накопичувачів енергії у відновлюваній енергетиці**

З розвитком електроенергетичних систем, зростанням потужностей агрегатів, що генерують енергію, стає все більш гострою проблема накопичення енергії. виправити цей недолік можливо шляхом створення накопичувачів енергії (НЕ) - реверсивних пристроїв для часткового або повного поділу в часі вироблення і споживання енергії. У накопичувачах енергії здійснюється акумулювання енергії, одержуваної з електроенергетичної системи (СЕС) (рис.1.2), її зберігання та видача при необхідності назад в енергосистему [5].

Електроенергетичну систему як єдине ціле при наявності достатнього числа акумулюючих пристроїв можна орієнтувати на середнє по споживання енергії. Це дасть значний економічний ефект, який залежить від типу акумулюючих енергію пристроїв - накопичувачів і їх характеристик. Суттєве

значення для отримання економічного ефекту і підвищення керованості СЕС має також правильна розстановка акумулюючих пристроїв [5,6 62,66].

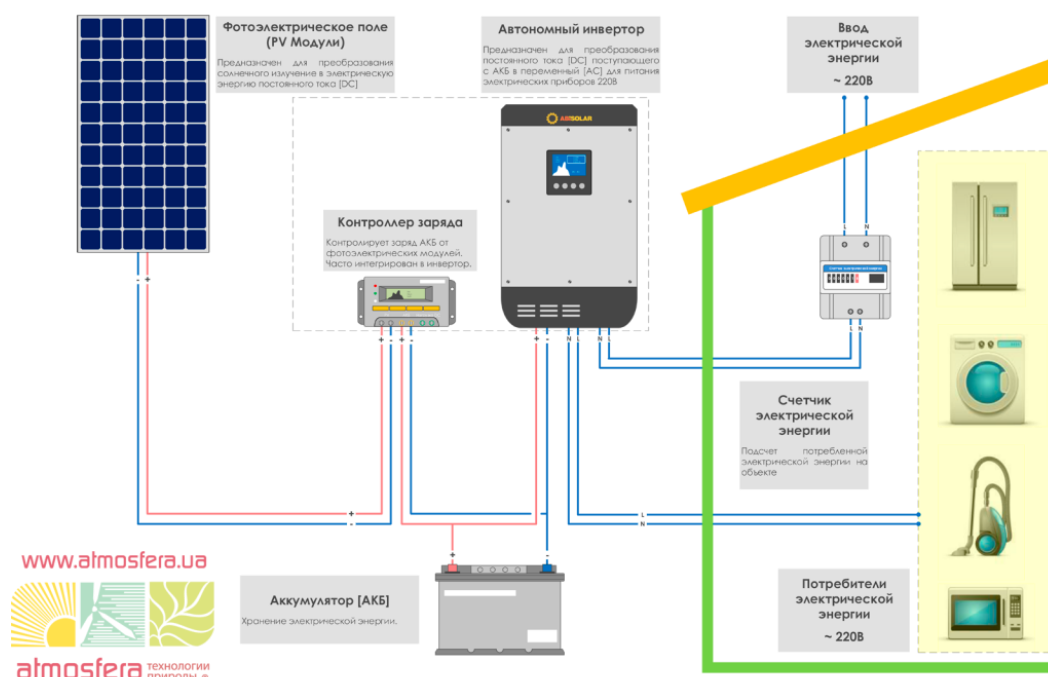


Рисунок .2 – Приклад СЕС

У ряді вітчизняних і зарубіжних робіт розглянуті основні характеристики накопичувачів різних.

В електроенергетичних системах, зокрема сонячних найбільш ефективно застосування енергоємних конденсаторів ( ЕК ). Дослідженнями встановлено, що ефективність роботи сонячних електроенергетичних систем визначається величиною енергоємності накопичувачів електричної енергії та частотою підключення до них навантаження.

### 1.3 Суперконденсатори

Суперконденсатори - накопичувачі електричної енергії, які по своїм технічним характеристикам знаходяться між конденсаторами і акумуляторами. Відмінними особливостями суперконденсаторів є висока потужність ( щодо АКБ), велика запасється енергія ( щодо конденсаторів ), велика напруження (500 000 циклів ) і тривалий термін служби до 25 років [6]. Конструктивно

суперконденсатори - це електролітичні конденсатори дуже великої ємності (рис. 1.3). Електроди суперконденсаторів виконані з алюмінієвої фольги з нанесеним на неї спеціальним вуглецевим матеріалом. Електроди розділені сепаратором, просоченим органічним електролітом. Накопичення електричного заряду в суперконденсаторів відбувається за рахунок утворення подвійного електричного шару на кордоні розділу середовищ електрода і електроліту. При зарядці суперконденсатори випадково розподілені іони в електроліті переміщуються до поверхні електрода протилежного полярності. Таким чином, подвійний електричний шар утворюється на кордоні розділу електроліту і обох електродів. Подвійні електричні шари з'єднані між собою послідовно .



Рисунок 1.3 – Суперконденсатор ( суперконденсатор)

Основні особливості роботи суперконденсаторів : - при зарядці-розрядці суперконденсаторів немає хімічних реакцій ( електростатичний принцип роботи ), цим обумовлена їх висока потужність, здатність швидко заряджатися, велика напруженість і тривалість терміну служби в порівнянні з хімічними джерелами струму - іншою важливою особливістю роботи суперконденсаторів є відсутність діелектрика як в традиційному конденсаторі. Діелектриком в суперконденсаторі служить межа розділу подвійного електричного шару, товщина якої близько  $10^{-9}$  м. Завдяки легкому корпусу відстані між протилежними зарядами, а також застосування в якості електродів вуглецевого матеріалу (рис. 1.4), що має високорозвинену структуру з великою площею

поверхні, суперконденсатори мають в 1000 разів більшу ємність в порівнянні з традиційними електролітичними конденсаторами [7].



Рисунок 1.4 – Внутрішня будова суперконденсатора

За питомою потужності і запасами енергії суперконденсатори займають проміжне положення між традиційними конденсаторами і акумуляторами .

Досить високий в порівнянні з традиційними конденсаторами рівень запасеної питомої енергії суперконденсаторів дозволяє використовувати їх в якості джерел струму. Таким чином, суперконденсатори є альтернативою широко поширеним хімічним джерелам струму в певних областях застосування. У порівнянні з акумуляторами суперконденсатори мають меншу питому енергію, але при цьому є ряд істотних переваг і особливостей [8,9] :

1) суперконденсатор - потужне джерело струму. У порівнянні з акумуляторами суперконденсатори володіють більш високою питомою потужністю, великими струмами розрядки, більш високим рівнем ККД завдяки відсутності хімічних реакцій, зарядка-розрядка суперконденсатори чисто фізичний процес.

2) суперконденсатори - швидкі акумуляторні джерела струму постійної готовності. У порівнянні з акумуляторами суперконденсатори здатні швидко заряджатися, що дає можливість застосовувати їх в режимі постійного циклування ( зарядки-розрядки ).

3) суперконденсатори не обслуговуються, довговічні джерела струму. У порівнянні з акумуляторами суперконденсатори мають велике напрацювання 500 000 циклів зарядки-розрядки, тривалий термін служби до 25 років і не вимагають обслуговування.

4) суперконденсатори невибагливі в експлуатації джерела струму. Не сприйнятливі до рівня заряду ( немає ефекту пам'яті, що не бояться глибокого розряду ), є можливість зарядки суперконденсаторів в різних режимах і різних рівнях струму, суперконденсатори захищені від неправильної полярності.

5) суперконденсатори - джерела струму для суворих умов експлуатації. Мають широкий діапазон температури середовища при експлуатації до -50 (-60) ... + 65 ° С, володіють високою стійкістю до перепадів температур і механічних впливів.

#### Функціональне призначення суперконденсаторів [10]

1) при провалах напруги або відключення основного джерела струму суперконденсатори служать надійними резервними джерелами струму для штатного завершення роботи обладнання, підтримання роботи системи, для збереження, передачі або видалення даних ; для управління клапанами, засівками, заслінками, поворотними системами.

2) суперконденсатори застосовуються в якості моста при перемиканні джерел струму, що живлять апаратуру.

3) суперконденсатори використовуються в якості тимчасового буфера для накопичення електричної енергії.

4) суперконденсатори служать потужним імпульсним джерелом струму.

5) суперконденсатори застосовуються спільно з хімічними джерелами струму для підвищення потужності, ефективності використання акумуляторів, захисту їх від великих розрядних струмів.

б) суперконденсатори використовуються в якості резервного або основного джерела струму в важкодоступній, віддаленій апаратурі, в системах одноразового застосування .

Застосування спільно з хімічними джерелами струму Переваги спільного використання хімічних джерел струму та суперконденсаторів :

1) суперконденсатори здатні зарядитися від розрядженого джерела і забезпечити необхідний рівень видається потужності ;

2) суперконденсатори збільшують термін служби хімічних джерел, захищають їх від великих струмів розрядки, роблять режим експлуатації більш м'яким ;

3) суперконденсатори дозволяють економити простір і масу в апаратурі : для забезпечення необхідного рівня потужності : хімічний джерело замінюється на джерело меншого розміру + суперконденсатор ;

4) при несправності хімічного джерела енергії суперконденсатора досить для коректного завершення роботи обладнання і збереження даних, при короткочасних провалах напруги на джерелі суперконденсатори здатні підтримати роботу апаратури .

Модулі на основі суперконденсаторів [11](рис. 1.5).

Одним з основних обмежень в застосуванні суперконденсаторів є їх порівняно невисока номінальна напруга - 2,7В. Для збільшення номінального напруги, а також запасається енергії на нашому підприємстві розробляються і виготовляються модулі на основі суперконденсаторів. Модулі являють собою готове рішення надійного резервного джерела струму, що відповідає вимогам замовника. Модулі складаються з паралельно або послідовно з'єднаних суперконденсаторів на платі в корпусах виконанні з різними варіантами виводів. Модулі можуть мати різну конфігурацію, форму і матеріал корпусів. У складі модулів суперконденсатори захищені від перенапруги за рахунок застосування активних і пасивних систем балансування. Додатково модулі можуть бути оснащені системами контролю залишку заряду, а також DC / DC перетворювачами на вході і виході .



Рисунок 1.5 - Модулі на основі суперконденсаторів

#### 1.4 Висновки до розділу

1. В результаті аналізу джерел за темою роботи встановлено, що в даний час досить добре відпрацьовані і знайшли практичне застосування сонячні енергетичні установки, що працюють за принципом прямого перетворення енергії.

2. В електроенергетичних системах, зокрема сонячних найбільш ефективно застосування енергоємних конденсаторів ( ЕК ). Дослідженнями встановлено, що ефективність роботи сонячних електроенергетичних систем визначається величиною енергоємності накопичувачів електричної енергії та частотою підключення до них навантаження.

3. Не дивлячись на недоліки конденсаторів і вдосконалення літій-іонних акумуляторів, внаслідок безперервного зростання потреби електронного обладнання в енергоємних джерелах живлення малих габаритів інтерес до суперконденсаторам посилюється



## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Комбіновані енергоустановки на основі суперконденсаторів

У комбінованих енергетичних установках КЕУ (рис.2.1) одночасно працюють джерело енергії та джерело потужності. Для забезпечення надійної роботи споживача у стаціонарному та перехідному режимах відповідно. Перше джерело працює у тривалому (стаціонарному) режимі роботи, а друге у перехідних режимах, коли необхідна значна потужність.



Рисунок 2.1 - Види енергетичних установок

Очевидно, що КЕУ методично володіє безперечними перевагами перед традиційним як за експлуатаційними характеристиками, так і за економічними та екологічними показниками.

Саме суперконденсатори це ті джерела потужності, що забезпечують максимальні навантаження споживача в перехідному режимі.

При використанні суперконденсаторів в якості джерел потужності з'являється додаткова можливість рекуперації енергії гальмування. При цьому на основі суперконденсаторів будується система накопичення енергії, яка в певний час є додатковим джерелом енергії. Таким чином, комбінована енергетична установка стає системою з двох енергетичних джерел. Реалізація енергозберігаючих технологій заснована на використанні комбінованих або гібридних енергетичних установок, в яких використовуються фізично рознесене джерело енергії і джерело потужності. При цьому джерело енергії (основне джерело енергетичної установки) - двигун внутрішнього згорання, стаціонарне електроживлення, акумуляторна батарея або батарея паливних елементів, забезпечує роботу системи в стаціонарному режимі роботи, а джерело потужності (додаткове джерело енергетичної установки) - система накопичення енергії на базі суперконденсаторів - забезпечує роботу системи в перехідних режимах.

На рис. 2.2 наведені типи комбінованих енергоустановок, в яких реалізуються енергозберігаючі технології з використанням систем накопичення енергії.



Рисунок 2.2 - Типи енергозберігаючих енергетичних установок.

Використання суперконденсаторів для накопичення енергії у КЕУ забезпечує значну економію матеріальних ресурсів. Так, наприклад, в США середнє промислове підприємство має близько 66 провалів напруги глибиною в 10 % від номіналу і тривалістю 0,1 сек. Наслідки одного такого провалу оцінюється в 20000 доларів США для енергосистем потужністю 500кВт. Таким чином, річна економія від використання систем комфортного електроживлення становить більше одного мільйона доларів тільки для одного підприємства.

## 2.2 Типова схема комбінованої енергоустановки

Розглянемо функціональну схему комбінованої енергоустановки на прикладі комбінованої енергоустановки транспортних засобів, що включає в себе рухову установку, генератор, електродвигун, систему накопичення енергії і систему управління (рис.2.3).

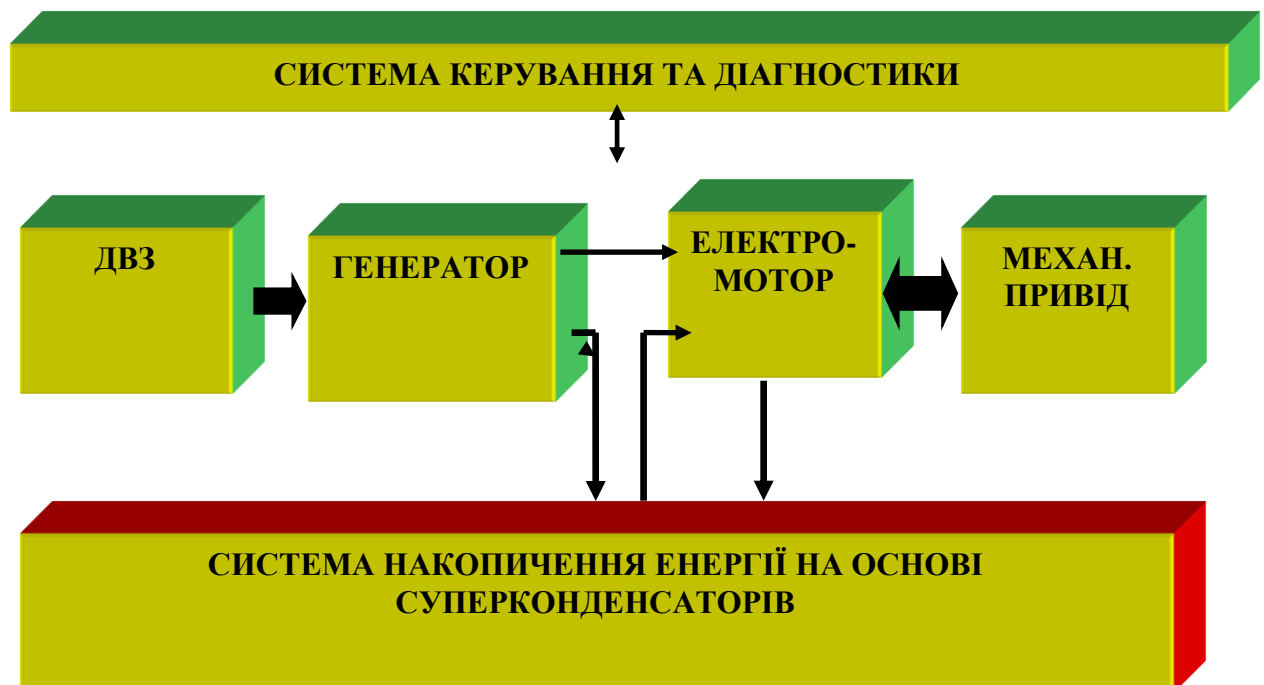


Рисунок 2.3 - Функціональна схема гібридної енергетичної установки

Рухова установка являє собою двигун внутрішнього згоряння, найчастіше дизельного типу, або газову турбіну, що володіє більш високою ефективністю та низьким рівнем шкідливих викидів.

Генератор і електродвигун являють собою електричну машину як правило змінного струму, що працює за спеціальними алгоритмами під контролем системи управління.

Система накопичення енергії, побудована на базі суперконденсаторів, включає в себе пристрої, необхідні для реалізації циклів накопичення енергії від генератора і від електромотора в режимі рекуперації, і віддачі енергії в момент рушання або розгону.

Система управління та діагностики призначена для реалізації керуючих впливів водія, забезпечення спільної роботи всіх агрегатів комбінованої енергоустановки, а також вирішення завдань діагностики, контролю та інформування.

Найбільш поширена функціональна схема комбінованої енергоустановки, виконана за принципом послідовного з'єднання агрегатів (рис.2.3), працює таким чином: генератор, механічно пов'язаний з руховою установкою у вигляді ДВЗ або газової турбіни, живить електромотор, що приводить у рух механічний привід транспортного засобу. Оскільки потужність рухової установки вибирається з розрахунку забезпечення режиму руху з постійною швидкістю, в режимі рушання й розгону електродвигун живиться також від системи накопичення енергії, виконаної на базі суперконденсаторів. Спочатку система накопичення енергії живиться від генератора, а далі після забезпечення спільно з генератором розгону транспортного засобу, заряджається в процесі гальмування від електромотора, що працює в режимі генератора.

### 2.3 Типова схема суперконденсаторної системи накопичення енергії

Система накопичення енергії незалежно від кінематичних особливостей схем побудови комбінованих енергоустановок складається з батареї суперконденсаторів, пристроїв їх заряду і розряду, випрямляча змінного струму і перетворювача постійного струму в змінний, а також системи управління, діагностики та контролю. Функціональна схема системи накопичення енергії наведена на рисунку 2.4.

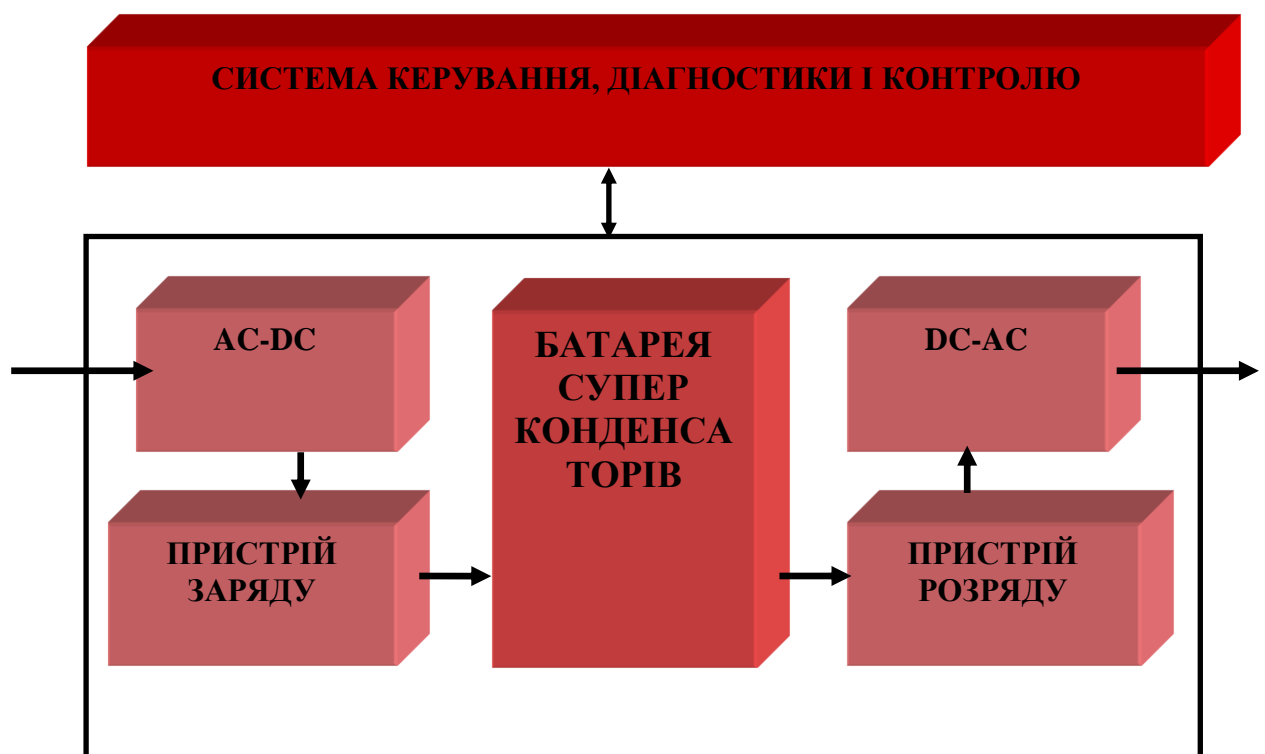


Рисунок 2.4 - Функціональна схема системи накопичення енергії на базі суперконденсаторів

Батарея суперконденсаторів служить для накопичення електроенергії в обсязі, достатньому для забезпечення режиму рушання й розгону транспортного засобу при зниженій до забезпечення рівня рівномірного руху потужності рухової установки, а також для рекуперації кінетичної енергії руху транспортного засобу в електричну при його гальмуванні.

Випрямляч змінного струму (AC-DC) і перетворювач постійного струму в змінний (DC-AC) служать для забезпечення робочого режиму функціонування батареї суперконденсаторів серед агрегатів, що працюють на змінному струмі. Особливістю роботи цих пристроїв є широкий діапазон напруг і частот використовуваного змінного струму.

Пристрій заряду служить для забезпечення накопичення енергії в батареї суперконденсаторів в умовах безперервного зниження напруги, джерела заряду, що характерно для здійснення рекуперації енергії в режимі гальмування транспортного засобу.

Пристрій розряду служить для оптимізації процесу віддачі енергії при розряді батареї суперконденсаторів шляхом узгодження нестационарних навантажень.

Система управління діагностики та контролю забезпечує функціонування системи накопичення енергії в автоматичному режимі на основі оперативного аналізу інформації про поточні значення параметрів пристроїв системи накопичення енергії шляхом формування керуючих впливів за заданими алгоритмами.

## **2.4 Застосування набраних суперконденсаторів в автомобільному транспорті**

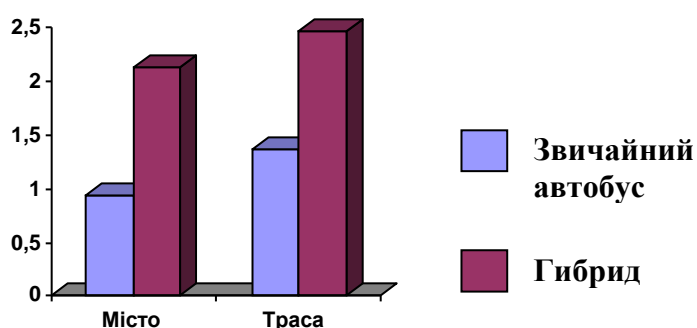
Циклічний режим руху автотранспорту в місті в найповнішій мірі це відноситься і до міського автобусу - транспорту, експлуатація якого, ведеться практично в 100 % -му режимі внутрішньо-міських пасажирських перевезень, і який є основним забруднювачем повітряного басейну великих міст. Проблема створення економічного та екологічно чистого автобуса є однією з пріоритетних проблем міського пасажирського транспорту та її рішенням в даний час зайняті провідні автобусобудівні фірми світу.

Першим гібридним автобусом з суперконденсаторною системою накопичення енергії був проект Дослідницького центру Національного

Управління з авіації і космонавтики США. Метою розробки була економія палива і зниження в 10 разів шкідливих викидів в порівнянні з прийнятими в США нормативами. Гібридний автобус був випробуваний на полігоні в Транспортному Дослідницькому Центрі Огайо в вересні 1998 за діючими в США навантажувальним циклами і нормативами [12].

Випробуваний електробус мав масу  $\sim 17$  тонн. Комбінована енергоустановка, що складається з ДВЗ, генератора і суперконденсаторна системи накопичення енергії постачала електричною енергією тяговий електродвигун, а також всі допоміжні системи і пристрої. Тяговий електродвигун мав максимальну потужність 150 кВт при масі - 160 кг. В електробусі використаний ДВЗ - генератор потужністю 50 кВт, при напрузі від 250 до 360 В. ДВЗ - п'ятициліндровим однорядним об'ємом 2,3 літра, в якості палива використаний природний газ. Система накопичення енергії представляла собою батарею з 30-ти суперконденсаторів, здатну накопичити 1600 кДж енергії ( $\sim 20$  фарад при напрузі 400 В). Маса блоку становила  $\sim 840$  кг. Результати експериментальних досліджень гібридного автобуса, що свідчать про його безперечні переваги перед автобусами зі звичайними енергетичними установками наведені на рис.2.5.

Пробіг в км на 1 літр палива



Співвідношення шкідливих викидів

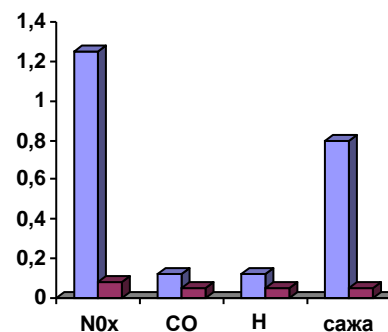


Рисунок 2.5 - Переваги гібридного автомобільного транспорту

## **2.5 Опис запропонованої конструкції фотоелектричної системи акумулювання електроенергії із суперконденсатором**

Запропонована схема відрізняється від інших тим, що містить суперконденсатор, увімкнений паралельно до сонячної батареї (рис. 2.17). Напруга на батареї (суперконденсаторові) 2,5 В. Новим у даній схемі є підвищувальний DC/DC перетворювач, який являє собою імпульсне навантаження, що збільшує величину напруги сонячної батареї до 14,7 В, що достатньо для зарядки акумуляторної батареї від контролера заряду.

В процесі роботи системи при підключенні навантаження до контролера першочерговий відбір енергії іде із сонячної батареї. При піковому наростанні навантаження енергія споживається із суперконденсатора. У випадку, якщо енергії сонячної батареї недостатньо, контролер під'єднує акумуляторну батарею.

## **2.6 Висновки до розділу**

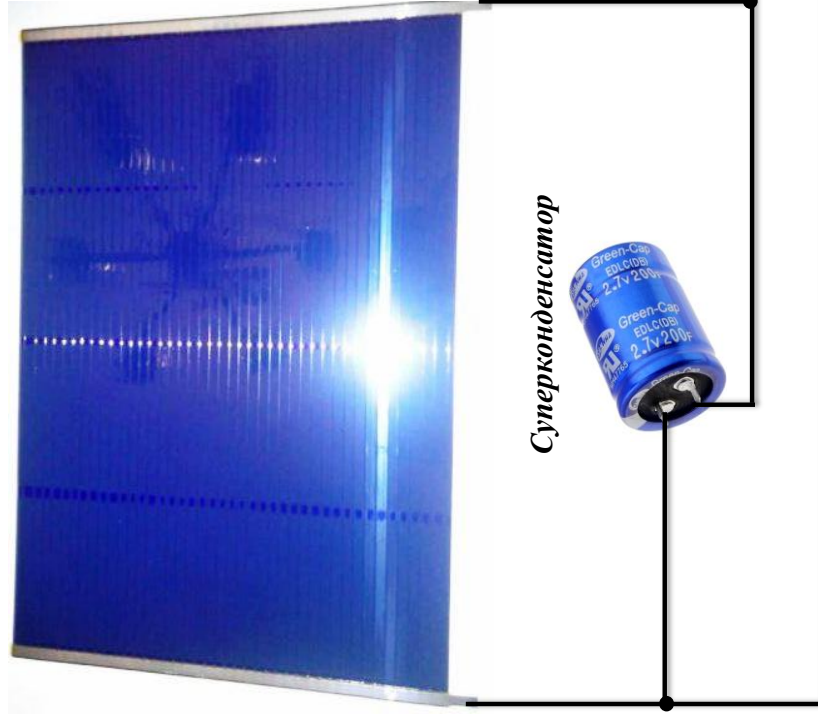
1. Питома запасена енергія суперконденсатора більш, ніж в 10 разів вище аналогічного параметра існуючих складених суперконденсаторів з електролітом на основі водного розчину гідроксиду калію;

2. Суперконденсатор може бути покладено в основу розробки модельного ряду наноструктурованих складених суперконденсаторів нового покоління.

3. Актуальним є використання комбінованих енергоустановок, що складаються з фізично рознесених джерел енергії та потужності, що дозволяє не тільки подолати потенційну надмірність звичайних енергоустановок, а й отримати дворазову економію ресурсів і десятикратне підвищення рівня екологічності.



*Сонячна батарея*



*Суперконденсатор*



*Контролер заряду*



*DC/DC  
перетворювач*



*Навантаження*



*Хімічний  
акумулятор*



Рисунок 2.6 - Підключення елементів фотоелектричної системи акумулювання електроенергії із суперконденсатором

## 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Особливості електричного навантаження

Режими електроспоживання споживачів енергії протягом доби змінюються в широких межах.

Створення об'єднаних енергосистем (ОЕС) забезпечує ряд техніко-економічних переваг. Так, об'єднання різних споживачів, навантаження яких в загальному випадку має імовірнісний характер, повинно привести до ущільнення графіка навантаження. Об'єднання теплових і гідравлічних станцій дозволить вирівняти графік завантаження паротурбінних енергоблоків. Укрупнення енергосистем сприяє підвищенню надійності енергопостачання, зниженню витрат на резервування та збільшенню одиничних потужностей енергоблоків. Ці ж завдання вирішуються за допомогою наддалеких ліній електропередач (ЛЕП), що проходять через кілька часових поясів. Включення подібних ліній до складу системи призводить до згладжування графіків навантаження об'єднаної системи. Однак статистичний аналіз показує, що, незважаючи на об'єднання споживачів, ущільнення добових графіків навантаження не відбувається. Більше того, максимуми навантаження систематично ростуть, а відносні мінімуми падають. Пояснюється це в основному зростанням споживання електроенергії в побуті і зменшенням числа підприємств, працюючих в нічний час.

Як відомо, під час провалу навантаження споживана потужність падає в окремі дні до 65 % від максимуму. У вихідні дні графік істотно змінюється - зменшуються максимум і мінімум, але час проходження їх залишається незмінним.

Графіки навантаження характеризуються такими параметрами:

– *коефіцієнтом мінімуму:*

$$\beta = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}, \quad (3.1)$$

де  $P_{min}$  - нічний мінімум навантаження;

$P_{max}$  - денний максимум навантаження (чим менше  $\beta$ , тим більше нерівномірний графік навантаження);

– коефіцієнтом заповнення (щільністю навантаження)  $\gamma$  рівним відношенню добового споживання енергії  $P(t)$  до максимально можливого  $P_{max}$ :

$$\gamma = \int_0^{24} P(t) dt / (24P_{max}) \quad , \quad (3.2)$$

– числом годин  $T_{об}$  використання максимуму (найбільшого) навантаження

$$T_{об} = \int_0^{24} P(t) dt / (P_{max}) \text{ або } T_{об} = 24\gamma \quad , \quad (3.3)$$

– регульованим діапазоном потужностей

$$\Delta P_{рег} = P_{max} - P_{min} \quad . \quad (3.4)$$

У 1970 р значення коефіцієнта мінімуму навантаження для ОЕС Північного Заходу  $\beta = 0,56$ , а в 1980 г.-  $\beta = 0,54$ . У 1980 р в СЕС ФРН ця величина знизилась до 0,42; Англії - 0,32; США коливалася в межах 0,3 - 0,4 [13].

Динамічною характеристикою графіків є швидкість  $P_v$  зростання навантаження - похідна потужності електроспоживання за часом:

$$P_v = dP / dt \quad , \quad (3.5)$$

де значення  $P_v$  в момент початку проходження ранкового максимуму навантаження і нічного мінімуму становить 1-3 % в хвилину [13].

### 3.2 Режими роботи і параметри накопичувача енергії

Накопичувач енергії зобов'язаний працювати і в аварійних режимах: різких (у тому числі і короткочасних) зниження і підвищення навантаження, коливання, відключеннях генеруючого обладнання і т, д, при виникненні аварійних ситуацій необхідно, щоб НЕ, по-перше, з достатньою швидкістю

видавав або споживав необхідну кількість енергії, і, по-друге, володів би достатньою маневреністю і аварійною енергоємністю для демпфірування коливань. Маневреність НЕ характеризується: часом реверсу потужності, необхідним для переведення його з режиму видачі енергії в режим споживання і навпаки та величиною, що характеризує швидкість зміни споживаної або видаваної ним потужності  $P_v = dP / dt$  в аварійних режимах, пов'язаних з відключенням частини генеруючих потужностей або навантажень. НЕ працює аналогічно до шунтового накопичувачу [13].

У всіх зазначених нормальних і аварійних режимах повинен дотримуватися баланс потужностей у вузлі підключення НЕ.

$$\begin{cases} P_{нав} \pm P_n + P_z = 0 \\ Q_{нав} + Q_{фкп} + Q_n + Q_z = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

де  $P_{нав}$ ,  $P_z$ ,  $Q_{нав}$ ,  $Q_z$  - відповідно активні і реактивні потужності, що втікають (навантаження) і витікають вузли (генерація);

$P_n$ ,  $Q_n$  - активна і реактивна потужності, споживані НЕ;

$Q_{фкп}$ , - реактивна потужність фільтрокомпенсуючих пристроїв, які можуть бути встановлені на шинах НЕ. Оскільки НЕ повинен працювати протягом часу, обумовленого з графіка навантаження, його робоча енергоємність

$$E_{н.роб} = \int_0^{t_{роб}} P_n(t) dt, \quad (3.7)$$

де  $t_{роб}$  - час роботи накопичувача ( $t_{роб} = \max(t_{зар}, t_{роз})$ )  $t_{зар}$ ,  $t_{роз}$  - відповідно час роботи НЕ в режимах накопичення (заряду), віддачі (розряду).

З конструктивних міркувань розряджати НЕ повністю не рекомендується, тому його повна енергоємність  $E_n > E_{н.роб}$ .

Значення так званого мінімального рівня накопиченої енергії (іноді застосовується термін «мертвий обсяг»)  $E_0$  неоднаково для різних типів НЕ. Воно повинно визначатися в кожному конкретному випадку і, крім того, для

всіх типів НЕ виходячи з технічних вимог для забезпечення нормальної роботи акумулюючого елемента (АЕ). Наприклад, для механічних накопичувачів - мінімальна частота обертання маховика, для хімічних накопичувачів (ХН) - мінімально допустимий рівень розряду і т. д. Для НЕ величина  $E_0$  вибирається з урахуванням забезпечення нормальної роботи перетворювач, а для ГАЕС повинні враховуватися також як екологічні так і вимоги, які забезпечують нормальну роботу водокористувачів.

Повна енергоємність накопичувача з урахуванням аварійних складових буде становити

$$E = E_0 + E_{н.роб} + E_{ав} \quad , \quad (3.8)$$

де  $E_{ав}$  - аварійна енергоємність, необхідна для демпфірування коливань, що виникають в СЕС в будь-якому з його режимів роботи.

Таким чином, можна виділити чотири параметри НЕ, що визначають його функціональні можливості в СЕС: 1) максимальна потужність накопичувача  $P_n$ ; 2) повна енергоємність  $E_n$ ; 3) час роботи  $t_{роб}$ ; 4) час реверсу потужності  $t_{рев}$ .

Для з'ясування можливості та доцільності використання будь-яких типів НЕ в енергосистемі необхідно визначити її вимоги до них, тобто окреслити межі значенні режимних параметрів - мінімально допустимої потужності  $P_n$ , енергоємності  $E_n$ , часу роботи  $t_{роб}$  і часу реверсу потужності  $t_{рев}$ .

Накопичувачі енергії можна використовувати як багатофункціональні пристрої, здатні при роботі сучасних енергосистем вирішувати задачі:

- забезпечення споживача, що має змінний графік навантаження електроенергією при постійному завантаженні генераторів СЕС; постійних напруг із заданим ступенем точності в деяких точках; статичної стійкості можливих режимів роботи систем із заданим запасом; заданих меж динамічної стійкості систем;

- регулювання потоків обмінних потужностей між СЕС.

Рішення перерахованих вище завдань складно, що зумовлено великим зв'язком об'єктів регулювання, нелінійністю процесів в СЕС, багатогранністю

сталих режимів з можливих припущень. В зв'язку с цим дані завдання доцільно розбити на розв'язувані послідовно часткові підзавдання забезпечення:

- споживачів, що мають змінний графік навантаження електроенергії при постійному завантаженні генераторів СЕС;
- статичної стійкості і заданих показників якості перехідних процесів систем при малих збуреннях;
- динамічної стійкості системи при великих збуреннях.

Такий поділ раціональний, так як він відповідає ранжуванню процесів за часом їх перебігу; враховує основні фактори, що характеризують функціонування сучасних СЕС; дозволяє застосовувати приватні методи дослідження для вирішення кожної підзадачі. Для їх успішного вирішення необхідно створення серії моделей НЕ, що діють в СЕС: фізичних, математичних та економічних. Інформація для складання таких моделей може бути отримана в основному з допомогою експериментів на реальному НЕ.

### **3.3 Фотоелектричне перетворення сонячної енергії**

В 1954 з'явилося коротке повідомлення про розробку сонячного елемента с ККД близько 6 %, а в 1958 р на борту радянських і американських супутників працювали кремнієві сонячні батареї, що постачають електроенергією електронну апаратуру.

За минулий час ККД сонячних елементів різко зріс, чому сприяло краще розуміння фізичних явищ, що відбуваються в сонячних елементах, створення все більш досконалих технологічних прийомів їх виготовлення і розробка нових удосконалених конструкцій елементів з різноманітних напівпровідникових матеріалів.

Протягом останніх декількох десятиліть розробляється теорія фотоелектричного ефекту в напівпровідниках з р-п – переходом, що дозволила описати характеристики фотоперетворювачів, пояснити реально одержувані значення КПД і вказати шляхи їх підвищення. Втрати потужності в

фотоперетворювачах, пов'язані з дією фундаментальних законів фізики, привели до поняття «граничного теоретичного КПД», яке дозволяє визначити можливості фотоелектричного способу перетворення енергії і зробити вибір найбільш перспективного напівпровідника. Основні фізичні обмеження ККД пов'язані з наявністю «забороненої зони напівпровідника»  $E_g$  і відповідно «червоної» межі фотоефекту. Максимально можливий ККД перетворювачів сонячного випромінювання поблизу поверхні Землі складає близько 28 % і відповідає ширині забороненої зони арсеніду Галлія ( $E_g = 1.4$  eV); для кремнію ( $E_g = 1.1$  eV) граничний теоретичний ККД дорівнює 26 %, тобто дещо менше, проте за середнім значенням реальних ККД, технологічності створення фотоелектричних структур, вартості отримання напівпровідника необхідної кристалічної форми і його розповсюдження в природі кремній не має собі рівних серед напівпровідників. Тому основна ідеологія широкомасштабного використання фотоелектричного перетворення сонячної енергії ґрунтується на застосуванні кремнієвих фотоперетворювачів.

### 3.4. Моделювання сонячної електроенергетичної системи

Складання математичної моделі електроенергетичної системи, відображають основні фактори, що впливають на досліджувані процеси, і наближено враховує (або зовсім не враховує) чинники, що незначно впливають на досліджувані процеси, є першим етапом дослідження.

Формування математичної моделі - це складання моделей окремих елементів досліджуваної системи і зв'язок їх між собою. Основними елементами НЕ акумулюючий елемент (АЕ), пристрій управління (ПУ) і система управління, при розгляді яких будемо виходити з детального математичного опису і подальшого спрощення.

*Система управління накопичувачем енергії.*

Для успішної роботи НЕ як у нормальних, так і в аварійних режимах необхідно мати можливість регулювання потужності, що протікає через нього,

в залежності від зміни параметрів режиму СЕС. Так, наприклад, при відхиленні частоти від встановленої, пов'язаному з порушенням балансу потужності (тобто у разі зменшення або збільшення навантаження, коли або відсутня можливість регулювання потужності, що генерується станціями, або регулятори не «встигають» відреагувати на різку зміну навантаження), НЕ повинен змінювати споживану або видану потужність так, щоб виконувався її баланс в точці його підключення. Тобто, система управління накопичувачем повинна бути забезпечена блоком, що змінює віддавану потужність відповідно цьому відхиленню. Накопичувач енергії можна використовувати і для регулювання напруги.

Використання НЕ потребує детального вивчення можливостей їх роботи в енергосистемах. Для цього необхідно мати фізичні моделі НЕ, які повинні:

- повністю і адекватно відображати поведінку НЕ в енергосистемі при перехідних процесах;
- бути недорогими в експлуатації і допускати установку і стикування з наявними фізичними електродинамічними моделями СЕС;
- допускати проведення великого числа експериментів.

Для того щоб модель адекватно відображала поведінку НЕ в енергосистемі, необхідно щоб збігалися відповідні критерії подібності для оригіналу і моделі  $\pi_{ior}$  і  $\pi_{im}$

$$\pi_{ior} = \pi_{im} = idem \quad (3.9)$$

(переклад лат. *idem* – те ж).

$\pi_{ior}$   $\pi_{im}$  критерії подібності оригіналу і моделі:

$$\pi_{ior} = f_i(x_{ior} \dots x_{ior} \dots x_{ior}) \quad (3.10)$$

$$m_T = m_i = m_{cmx} \quad (3.11)$$

де  $x_{ior}$  і  $x_{im}$  - відповідні параметри оригіналу і моделі. З умови (3.9) слідує

$$\pi_{ior} / \pi_{im} = I$$



$$\frac{f_i(x_{1op} \dots x_{jop} \dots x_{mop})}{f_i(x_{1m} \dots x_{jm} \dots x_{mm})} = 1$$

В більшості випадків  $f_i(x_1 \dots x_j \dots x_m)$  має вигляд одночлена. Тому

$$\frac{(x_{1op})^{\alpha_1}}{(x_{1m})^{\alpha_1}} \times \dots \times \frac{(x_{jop})^{\alpha_j}}{(x_{jm})^{\alpha_j}} \times \dots \times \frac{(x_{mop})^{\alpha_m}}{(x_{mm})^{\alpha_m}} = 1$$

$$(-\infty < \alpha < \infty)$$

Але  $(x_{jop} / x_{jm}) = m_j$ , де  $m_j$  - коефіцієнт подібності, або масштаб подібних параметрів. Тоді  $m_1^{\alpha_1} x_1 \dots x_j m_j^{\alpha_j} x_j \dots x_m m_m^{\alpha_m} = 1$ . Число отриманих співвідношень масштабів дорівнює числу критеріїв подібності. Ці співвідношення, іноді називаються індикаторами подоби, дозволяють визначати параметри фізичної моделі за відомими даними оригіналу. Число критеріїв подібності завжди менше числа параметрів. Аналогічне співвідношення існує і між числами індикаторів подібності і масштабів. Тому частина масштабів слід вибирати довільно, отже, частина параметрів моделі також довільна. Однак і на значення цих параметрів, що називаються незалежними, накладаються обмеження, пов'язані з зручністю проведення експерименту, вартістю фізичної моделі і т. п. З цих позицій, наприклад, слід прагнути до того, щоб масштаб часу був рівний одиниці, тобто  $m_t = 1$ , що створює ряд переваг при постановці та проведенні експерименту.

В даному випадку НЕ характеризується наступним набором параметрів:

$E_n$  - енергоємність НЕ;

$P_n$  - максимальна потужність;

$U_{нПУ}$  - напруга ПУ;

$I_{нАЕ}$  - максимальний струм, що протікає через АЕ;

$I_0$  - мінімальний струм, що протікає через АЕ;

$E_0$  - мінімальний рівень накопиченої енергії («мертва ємність»), визначений умовами роботи перетворювача і завданнями, які НЕ повинен вирішувати.

Розглянемо фізичну модель ємнісного накопичувача. До режимних параметрів НЕ додадуться:

$L_n$  - індуктивність АЕ;

$C_n$  - ємність АЕ;

$r_{вн}$  - еквівалентний опір мережі;

$T_n$  - постійна часу НЕ.

Мають місце наступні співвідношення між ними:

$$P = I_n U; E_n - E_0 = P_n t_{роб};$$

$$E = 0,5 C_n U_n^2$$

$$T = C_n r_{вн}$$

На основі отриманих співвідношень можуть бути знайдені критерії подібності, а отже, і зв'язок між значеннями параметрів моделі і оригінала.

Методом інтегральних аналогів (опускаючи очевидні перетворення) отримаємо критерії подібності:

$$\pi_1 = T_n / t, \pi_2 = U_{в.о} / U_d, \pi_3 = \alpha$$

$$\pi_4 = (C_n U_{в.о}^2) / (P_n T_n);$$

$$\pi_5 = U_{в.о}^2 / (Q_n X_k), \pi_6 = \gamma;$$

$$\pi_7 = U_{в.о}^2 / (P_n X_k).$$

Враховуючи співвідношення, що зв'язує роботу перетворювача з мережею змінного струму, знайдемо критерії гомохронності

$$\pi = \omega t.$$

На базі отриманих критеріїв визначимо відповідні їм системи індикаторів подібності (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Критерії та індикатори подібності

Критерій подібності	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$
Індикатор подібності	$m_T/m_t = 1$	$\frac{m_{U_{B.O}}}{m_{U_d}} = 1$	$m_a = 1$	$\frac{m_c m_{U_{B.O}}^2}{m_p m_x} = 1$
Критерій подібності	$\pi_5$	$\pi_6$	$\pi_7$	$\pi_8$
Індикатор подібності	$\frac{m_{U_{B.O}}^2}{m_Q m_x} = 1$	$m_f = 1$	$\frac{m_{U_{B.O}}^2}{m_p m_x} = 1$	$m_f m_x = 1$

Критерій гомохронності є одним з найважливіших при створенні моделі НЕ і стикування її с фізичною моделлю СЕС. Якщо частоту фізичної моделі  $f_m$  вибрати рівною частоті оригіналу  $f_{op}$  ( $f_m = f_{op}$ ), то  $m_f = 1$ , що дозволяє використовувати при дослідженнях звичайну вимірну і реєструючу апаратуру, хоча і збільшує габарити фізичної моделі. Рівність масштабів і одиниці дозволяє застосовувати в перетворювачах моделі і оригінала ідентичну елементну базу. Решта п'ять індикаторів подібності пов'язують вісім масштабів, а саме:  $m_b$ ,  $m_t^*$ ,  $m_{U_{B.O}}$ ,  $m_c$ ,  $m_p$ ,  $m_Q$ ,  $m_x$ , де, що  $m_t$  і  $m_f$  - масштаби часу в колах постійного і змінного струму. В загальному випадку  $m_t \neq m_t^*$ . Масштаби  $m_c$ ,  $m_x$ ,  $m_p$  доцільно вибрати довільно. Вважати їх незалежними. Це пов'язано з необхідністю найбільшого спрощення при підборі елементів для фізичної моделі. В інших умовах можна прийняти інші рішення.

Прологарифмувавши п'ять індикаторів подібності, складемо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \ln m_t - \ln m_f + 0 + 0 + 0 = 0 \\ 0 + 0 + \ln m_{U_{s.o}} - \ln m_U + 0 = 0 \\ -\ln m_t + 0 + 2\ln m_{U_{s.o}} + 0 + 0 = \ln m_p - \ln m_c \\ 0 + 0 + 2\ln m_{U_{s.o}} + 0 - \ln \varrho = \ln m_X \\ 0 + 0 + 2\ln m_{U_{s.o}} + 0 + 0 = \ln m_p + \ln m_X \end{cases}$$

Отже, отримана система лінійних рівнянь с п'ятьма невідомими, вирішуючи яку, знайдемо:

$$m_T = m_t = m_c m_X$$

$$m_Q = m_p$$

$$m_{U_{s.o}} = m_{U_d} = (m_p m_X)^{1/2}$$

Решту необхідних для створення фізичної моделі масштаби отримаємо із загальновідомих закономірностей, наприклад:

$$m_t = m_p / m_U; m_E = m_p m_t = m_U^2 m_c$$

Якщо виходити з інших умов і прийняти в якості незалежних масштабів інший набір  $m_i$ , то отримаємо відмінні від знайдених вище співвідношення між параметрами оригіналу і моделі, хоча процеси будуть подібні протікаючим в оригіналі.

### 3.5 Математична модель сонячної електроенергетичної системи з ємнісним енергоємним накопичувачем

Як було зазначено, потужність, що віддається сонячним модулем (СМ) в навантаження, і його ККД залежать від співвідношення опору навантаження і внутрішнього опору цього джерела. Із збільшенням навантаження ККД джерела монотонно зменшується, а потужність досягає максимум при рівності цих опорів. Між тим, що віддається потужність і ККД СМ в області великих навантажень можна збільшити, якщо перейти до імпульсного живлення навантаження і використовувати проміжний накопичувач енергії.

На схемі (рис. 3.1) сонячна батарея (СБ) представлений з ЕРС  $E$  і внутрішнім опором  $R$ , підключена до енергоємного конденсатора з високою ємністю  $C$  (ЕК), активне навантаження з опором  $R_n$  із періодом  $T$  підключається на час  $t_n$  до енергоємного конденсатора з допомогою ключа  $K$ .

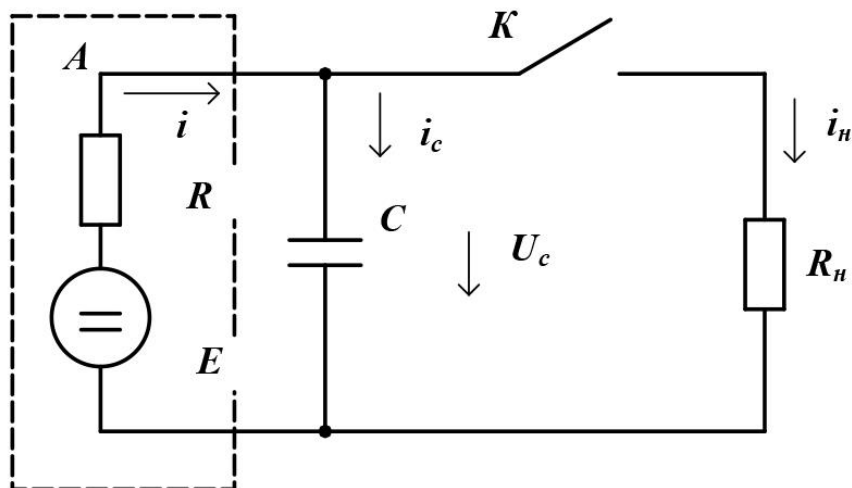


Рисунок 3.1 - Електрична схема СЕС

Для періодів часу, коли ключ замкнений, можна скласти систему рівнянь [14]:

$$\begin{cases} i \cdot R + i_n \cdot R_n = E; & n \cdot T \leq t \leq (n+q) \cdot T \\ U_c - i_n \cdot R_n = 0; \\ C \frac{dU_c}{dt} - s + i_n = 0; \end{cases} \quad (3.12)$$

де  $q = t_n / T$  – тимчасовий коефіцієнт імпульсного підключення навантаження з опором  $R_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ );  $U_c$  – напруга на ємності  $C$ ;  $i$  – струм, що протікає через  $R$ ;  $i_n$  – струм, що протікає через ємність  $C$ ;  $t$  – час.

Для моментів часу, коли ключ  $K$  розімкнений, буде справедливо

$$RC + \frac{dU_c}{dt} + U_c = E; \quad (n+q)T \ll t \ll (t+n)T \quad (3.13)$$

Розв'язок рівнянь (3.12), (3.13) для сталого режиму відносно напруги  $U_c$  має вигляд

$$U_c = \begin{cases} \frac{E}{a} \left( 1 + AE^{-at/T_n} \right), nT \leq t \leq (n+q)T; \\ E \left( 1 - BE^{-t/T_n} \right), (n+q)T \leq t \leq (n+1)T; \end{cases} \quad (3.14)$$

де  $T_n = RC$  – постійна часу ЕК:  $a = 1 + R/R_n$

$$A = (a-1)(1 - e^{-(T-t_n)/T_n}) / (1 - e^{-(T-(1-a)t_n)/T_n});$$

$$B = (1 - 1/a)(1 - e^{-at_n/T_n}) / (1 - e^{-(T-(1-a)t_n)/T_n});$$

Для випадку, коли опір навантаження  $R_n$  підключено до ЕК, то виділена потужність буде

$$P_n = U_c^2 / R_n = \frac{E^2 R_n}{(R + R_n)} (1 - e^{-at/T_n})^2 \quad (3.15)$$

При цьому, перший співмножник визначає потужність, що виділяється в навантаженні при безперервному її живленні.

При цьому, середнє за період  $T$  значення цієї потужності буде

$$\bar{P}_n = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} P_n dt \quad (3.16)$$

або врахуванням (3.15)

$$\bar{P}_n = P_n \left\{ q + 2 \frac{T_n A}{aT} \left[ 1 - e^{-aqT/T_n} + \frac{A}{4} (1 - e^{-2aqT/T_n}) \right] \right\}$$

Для високих частот (за умови  $T \ll T_n$ ) підключення  $R_n$  до ЕК можна записати

$$\bar{P}_n = P_n a^2 q / (1 + (a-1)q)^2 \quad (3.17)$$

Аналіз залежності потужності  $P_n = \overline{P}_n / P_n$  від тимчасового коефіцієнта  $q$  імпульсного підключення навантаження (рис. 3.2) показує, що для всіх  $a > 2 (R_n < R)$  середня за період потужність  $\overline{P}_n$  досягає максимального значення при

$$P_{max} = \frac{a^2}{4(a-1)^2} \quad (3.18)$$

і при тимчасовому коефіцієнті підключення навантаження, рівному

$$q_{opt} = \frac{1}{a-1} \quad (3.19)$$

Як випливає з виразу (3.18), максимальне значення  $P_{max} > 1$ . Це показує, що середня за період потужність в навантаженні в режимі імпульсного живлення (для певних значень  $q$ ) може бути більше, ніж в режимі неперервного живлення навантаження. Встановлено, що при живленні від СБ навантажень, опір яких малий в порівнянні з її внутрішнім опором, збільшувати в навантаженні потужність можливо шляхом імпульсного живлення і застосування в СЕС енергоємні конденсатори.

Для її оцінки ефективності передачі енергії від СБ до навантаження в режимі імпульсного живлення визначена потужність, що розвивається ЕРС  $E$  сонячної батареї:

$$P = Ei = \begin{cases} EC \frac{dU_c}{dt}, nT \leq t \leq (n+q)T; \\ E \left( C \frac{dU_c}{dt} + \frac{U_c}{R_n} \right), (n+q)T \leq t \leq (n+1)T. \end{cases} \quad (3.20)$$

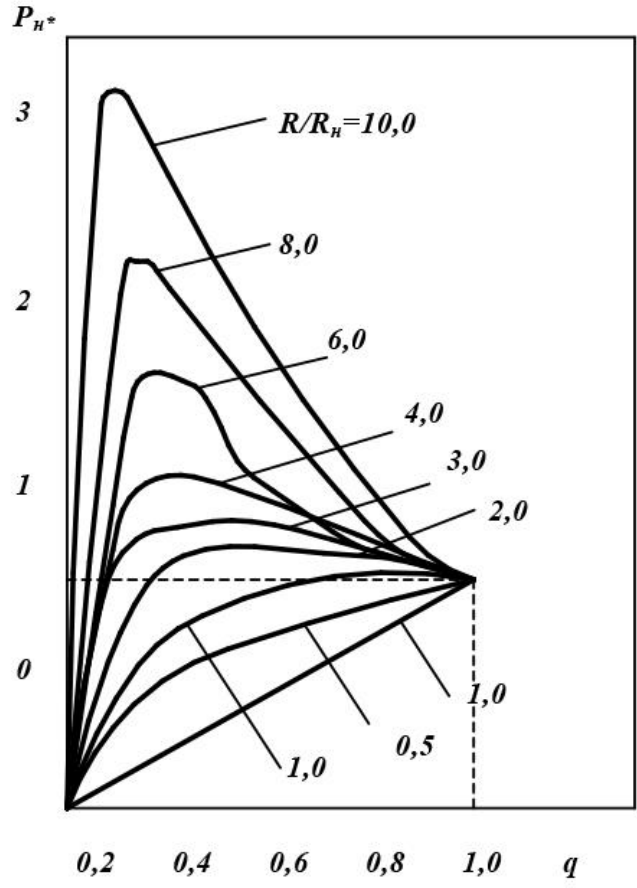


Рисунок 3.2 - Графіки залежності  $P_n = f(q)$

З урахуванням рівняння (3.26) отримаємо

$$P = EI = \begin{cases} EI(1 + (1 - I_c / I))Ae^{-at/T_n}, nT \leq t \leq (n + q)T; \\ EI_c B e^{-(t-t_n)/T_n}, (n + q)T \leq t \leq (n + 1)T, \end{cases} \quad (3.21)$$

де  $I = E / (R + R_n)$ ;  $I_c = E / R$ .

Середнє за період  $T$  значення цієї потужності [13,14]

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt, \quad (3.22)$$

а з урахуванням (3.33) маємо



$$\bar{P} = P \left( q + \frac{(a-1)T_n}{aT} \frac{(1 - e^{-aqT/T_n})(1 - e^{-T(1-q)/T_n})}{1 - e^{-T(1-(1-a)q)/T_n}} \right) \quad (3.23)$$

де  $P = EI$  – потужність СБ в режимі неперервного живлення.

З урахуванням, що  $T \ll T_n$  цей вираз може бути спрощено

$$\bar{P} = P \frac{aq}{1 + (a-1)q} \quad (3.24)$$

ККД СБ визначається відношенням середніх значень потужності, що розвивається ЕРС  $E$ , і потужності навантаження. Використавши вираз (3.29), (3.36), отримаємо:

$$\bar{\eta} = \bar{P}_n / \bar{P} = \eta \frac{a}{1 + (a-1)q} \quad (3.25)$$

де  $\eta = \frac{P_n}{P}$  – ККД джерела в режимі неперервного живлення.

Аналіз залежності  $\eta = \bar{\eta} / \eta = f(q)$  (рис. 3.3) показує, що для всіх навантажень  $\eta > 1$ , Тобто ККД джерела в режимі імпульсного живлення навантаження більше, ніж в режимі безперервного живлення. Цей ефект посилюється з підвищенням величини навантаження і зменшенням значення  $q$ .

Таким чином, при значних навантаженнях  $R_n < R$  застосування імпульсного живлення з використанням ЕК дозволяє підвищувати потужність, що віддається в навантаження СБ, а відповідно і його ККД. Отже застосування імпульсного режиму живлення навантаження автономних сільськогосподарських об'єктів дає можливість зменшувати встановлену потужність СБ, а також їх масогабаритні характеристики.

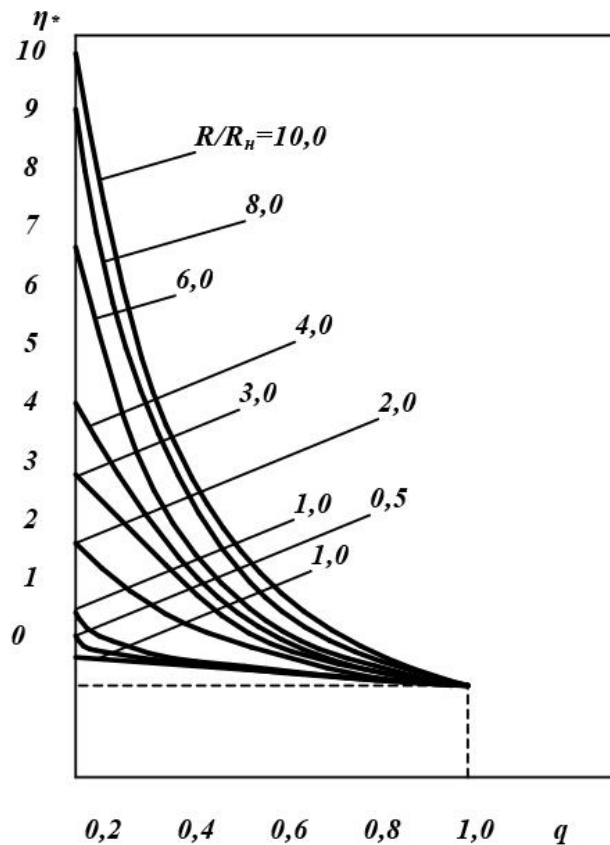


Рисунок 3.3 - Графіки залежності  $\eta = f(q)$

### 3.6 Експериментальні дослідження імпульсного енергоємного конденсатора

За останні роки розроблено новий клас електротехнічних пристроїв емнісного типу з високою щільністю накопичення електричної енергії (до декількох джоулів на кубічний сантиметр), що одержали назву в СРСР молекулярних накопичувачів, імпульсних конденсаторів надвисокої енергоємності "Екон" за кордоном - Японія) - "Супер" "золотих" конденсаторів.

Дані пристрої за своїми зарядно-розрядними характеристиками є аналогами конденсаторів надвисокої енергоємності (фарадного діапазона), а їх принцип дії, відкритий ще в 1887 році Гельмгольцем, заснований на зарядженні подвійного електричного шару, сформованого на міжфазній границі електронного провідника і інертного електроліту.

Накопичення енергії в традиційних конденсаторах здійснюється електричним полем в обсязі діелектрика, розташованого між різнойменно зарядженими обкладками.

Для конденсатора з плоскими паралельними обкладками одиничною площею  $1 \text{ см}^2$ , розташованих на відстані  $a$ , значення питомої ємності  $C$ , та граничної щільності енергії  $W$ , визначаються, як відомо, діелектричною проникністю  $\varepsilon$  і напругою пробою  $E$ , діелектрика:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{1}{a} \quad (3.26)$$

$$W = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \quad (3.27)$$

Гранична щільність енергії таких конденсаторів - порядку  $1 \text{ Дж/см}^3$  при  $E=106 \text{ В/см}$ . Щільність енергії близько  $0,1 - 0,5 \text{ Дж/см}^3$  реалізована у високовольтних конденсаторах з тонкими діелектричними плівками, а також в низьковольтних електричних конденсаторах з оксидним діелектриком і об'ємно-пористими електродами.

Як зазначалося, зарубіжними фірмами останні роки приділяється серйозна увага розробкам конденсаторів, в яких використаний діелектричний шар (ДЕШ).

У ході інформаційного патентного пошуку виявлено, що провідними фірмами, якими освоєно випуск кількох видів конденсаторів з ДЕШ, є дві японські фірми: "Мацусіта", "Ніппон" і американська фірма "Сохіо" (відділення "Стандарт ойл"). До них активно приєдналися японські фірми "Ніппон Конденсор", "Хітачі", "Елна", "Фьюдзю", "Тое Босекі", "Каю Секізі", "Мурат Мануфія". При аналізі патентів виявлено 5 патентів і заявок, що представляють інтерес для даної теми.

Конденсатори з ДЕШ зарубіжних фірм володіють гарними характеристиками при низьких температурах у порівнянні з гальванічними елементами і використовуються як резервні малопотужні джерела струму в цих

умовах. Вони не ефективні при розрядах великими струмами протягом короткого часу.

Істотною перевагою накопичувачів енергії з ДЕШ є можливість накопичення великої кількості енергії, що значно перевершують енергію традиційних конденсаторів. При цьому внутрішній опір елементів є обмежуючим параметром для зняття великих питомих потужностей. Тому зусилля зарубіжних фірм направлені на підвищення цього параметра.

Суперконденсатори володіють наступними характерними особливостями, важливими при проектуванні систем електростартерного пуску:

- надвисокі щільності електричної ємності, заряду та енергії, котрі можуть досягатися в межах, відповідно,  $100 \text{ Ф/см}^3$ ,  $100 \text{ К/см}^3$ ,  $50 \text{ Дж/см}^3$  в обсязі пористого електрода;
- малий внутрішній опір, що дозволяє досягати питомої потужності імпульсного розряду близько  $10 \text{ Вт/см}^3$ ;
- мала величина власної постійної часу заряду і розряду в діапазоні 0,025 - 5 с;
- малий струм витоку на одиницю накопиченого заряду і можливість тривалого зберігання заряду протягом десятків-сотень годин;
- теоретично необмежену кількість циклів перезарядки, великий термін збереження і стійкість до струмів короткого замикання.

Розробляються різні за розмірами базові конструкції елементів ІКЕ. Ємність елементів перекриває діапазон від 1 Ф до 1000 Ф при мінімальній величині внутрішнього опору близько 0,001 Ом.

Додаткові особливості та переваги суперконденсатора.

- пожежовибухобезпека;
- висока механічна міцність при статичних та динамічних впливах;
- стійкість до короткочасних впливів високих перенапруг;
- відсутність обслуговування в процесі експлуатації;
- висока надійність, великий термін зберігання та експлуатації;
- широкий діапазон робочих температур.

Імпульсні конденсаторні елементи (ІКЕ) конструктивно представляють собою певну кількість послідовно або послідовно-паралельно з'єднаних поодиноких конденсаторних накопичувальних елементів (КЕ).

Питома (максимальна або пікова) потужність  $W_{yd}$  імпульсного розряду ІКЕ (струм короткого замикання) при даних масогабаритних показниках, насамперед, визначається повним внутрішнім опором.

Постійна часу саморозряду  $\tau_{ym}$  характеризує час зберігання енергії в зарядженому і потім від'єднаному від зарядного пристрою накопичувальному елементі. Даний параметр визначається інтенсивністю паразитних електрохімічних процесів на міжфазних поверхнях електродів. Величина  $\tau_{ym}$  тим більше, чим вище електрохімічна інертність матеріалу електрода в діелектричному середовищі і вище чистота застосовуваних матеріалів. При підвищенні напруги заряду КЕ і робочої температури  $\tau_{ym}$  зменшується.

Ресурс ІКЕ характеризується або тривалістю напрацювання при постійно діючій напрузі, або кількістю циклів повного заряду-розряду. Дані характеристики тим вище, чим менше робоча напруга (і питомі показники енергопотужностей) і тим нижча робоча температура.

Діапазон робочих температур обмежений знизу температурою мінус (60 - 40) ° С зверху - (100 - 120) ° С. Проте практично максимальна температура може бути істотно нижче через стійкості електродних і конструкційних матеріалів.

Таким чином, залежно від експлуатаційних вимог (мінімальна і максимальна робочі температури, напрацювання при робочій напрузі, кількість зарядно-розрядних циклів, показники надійності) повинна бути встановлена відповідно максимально допустима величина робочої напруги  $U_{el} < U_{np}$ .

Необхідні значення робочої напруги, що запасується, енергія внутрішнього опору, динамічні характеристики і т.д. можуть бути отримані в процесі оптимізації, з одного боку, електричної схеми виробу (кількість послідовних і паралельних КЕ), так і, з іншого боку параметрів самого КЕ.

Кожен з КЕ характеризується наступними значеннями параметрів:

$C_{el}$  – електрична ємність, Ф;

$R_{el}$  – внутрішній опір, Ом;

$U_{el}$  – напруга заряду, В.

Кількість, послідовно з'єднаних КЕ,  $N$  визначається допустимою напругою КЕ, максимальною робочою температурою і потрібним ресурсом ІКЕ [15,16]. Взаємозв'язок питомих, геометричних параметрів КЕ і електричних характеристик виробу визначається наступними співвідношеннями:

- номінальна напруга виробу

$$U_{ном} = N \cdot U_{el} \quad (3.28)$$

- внутрішній опір виробу

$$R_{вн} = N \cdot R_{el} = \frac{R_{уд} - N}{S} \quad (3.29)$$

- електрична ємність виробу

$$C_{изо} = \frac{C_{el}}{N} = \frac{C_{уд} \cdot N}{S} \quad (3.30)$$

- запасена енергія виробу

$$E_{зан} = \frac{C_{зан} \cdot U_{ном}^2}{2} = N \cdot \frac{C_{el} \cdot U_{el}^2}{2} \quad (3.31)$$

В області більш коротких тривалостей розрядних імпульсів (менше 0,01 с) використання ІКЕ стає менш ефективним порівняно з традиційними конденсаторами практично за всіма технічними застосуванням, за винятком режимів, в яких потрібна видача серії коротких імпульсів протягом обмеженого періоду часу.

ІКЕ, у порівнянні з первинними і вторинними хімічними джерелами струму (ХДС), має істотно (в 10 - 100 разів) меншу величину питомої енергії. У порівнянні з ХІТ переваги ІКЕ реалізуються в області досить коротких розрядів (менше 5 - 10 с) за рахунок більш високої питомої потужності (в 2 - 10 разів) при істотному (в 10 - 10<sup>3</sup> разів і більше) зростанні кількості циклів повного заряду -розряду.

ІКЕ слід розглядати як перспективні пристрої, які дозволять комплексно вирішувати проблеми сучасних СЕС. Вони можуть бути встановлені практично в будь-якій точці СЕС, а також для вирівнювання графіків навантаження та підвищення її стійкості.

Випробуванню піддавалася КЕУ, що складається з СБ з'єднаної паралельно з ІКЕ-8/14 в кількості 2-х штук сумарною місткістю 200 Ф.

#### *Етапи проведення експериментальних досліджень*

Мета експериментальних досліджень та їх результати - підтвердження можливості використання ІКЕ для стабілізації напруги КЕУ при підключенні імпульсних навантажень.

Випробування проводилися при температурі повітря. + 28 ° С.

Випробування проводилися в приміщенні лабораторії кафедри енергозбереження та енергетичного менеджменту.

На першому етапі досліджень була визначена вольт-амперна характеристика СБ, до якої підключали навантажувальні опору номіналів: 10; 6; 3,2; 2; 0,77; 0,4; 0,3 Ом.

На другому етапі - до СБ приєднували постійне навантаження з опором 2 Ом, потім паралельно йому підключали короткочасно (протягом 10-15с) з навантажувальним опором 0,4 і 0,3 Ом, після чого розрахунковим шляхом визначалась потужність, що виділяється на цих опорах навантаження.

На третьому етапі - до СБ паралельно підключали 2 енергоємних конденсатора, які були попередньо заряджені від СБ до напруги 12 В, і до утвореної таким чином енергоустановки приєднували постійну напругу з

опором 2 Ом. Після цього, паралельно останньому, підключали короткочасно протягом 10-15 с імпульсні навантаження 0,4; 0,3 і розраховували значення потужностей виділяються на всіх навантажувальних опорах. Результати отримання вольт-амперної характеристики СБ представлені на рис 3.4.

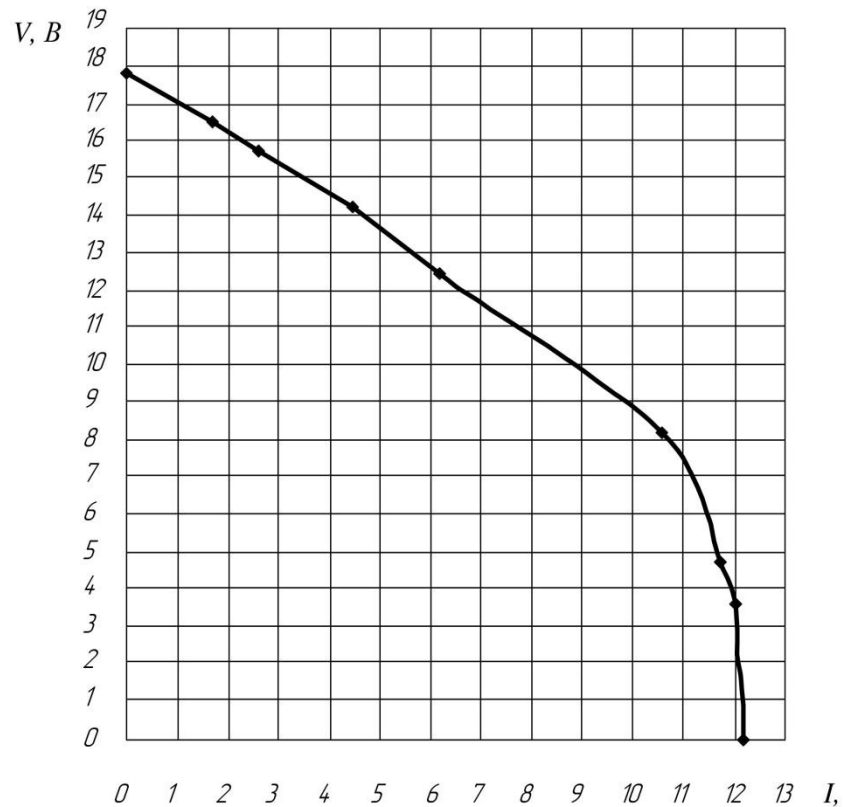


Рисунок 3.4 - Вольт-амперна характеристика сонячної батареї

Значення струму і потужності, що виділяється на навантаженні, визначали за формулами:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.32)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3.33)$$

Були також розраховані значення струмів і виділяються на навантаженнях потужності; ці результати представлені в таблиці 3.2.



Таблиця 3.2 - Значення струмів і виділяється потужності на різних навантаженнях

Опір, Ом	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
$\infty$	17,8	0,00	0,00
10	16,5	1,65	27,23
6	15,7	2,62	41,08
3,2	14,2	4,44	63,01
2	12,1	6,05	73,21
0,77	8,15	10,58	86,26
0,4	4,7	11,75	55,23
0,3	3,65	12,17	44,41

Залежність потужності СБ від величини опору навантаження представлена на рис. 3.5.

З графіка видно, що максимальна потужність, що знімається з СБ при даних умовах опромінення, становить приблизно 86- 87 Вт

На другому етапі досліджень до підключеної на постійному навантаженні 2 Ом напруга на СБ зменшилася з 17,8 до 12,1 В, а виділена потужність при цьому склала 73,2 Вт. Паралельне підключення навантаження 0,4 Ом привело до падіння напруги на СБ до 4 В, при цьому на навантаженні 2 Ом потужність впала до 8 Вт. При цьому на опорах 0,4 і 0,3 Ом, також виділяється незначна потужність, обумовлена низькою напругою СБ Так, на опорі 0,4 Ом її значення становить 44,1 Вт, а на опорі 0,3 Ом 41 Вт.

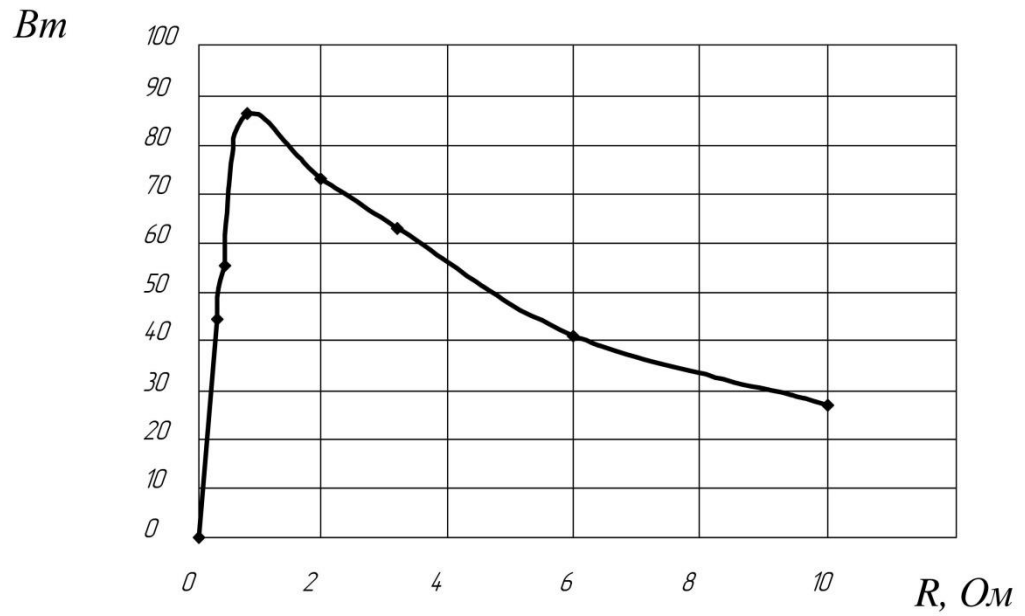


Рисунок 3.5 - Залежність потужності від опору навантаження

Характер зміни напруги СБ при описаних вище діях показаний на рис.

3.6.

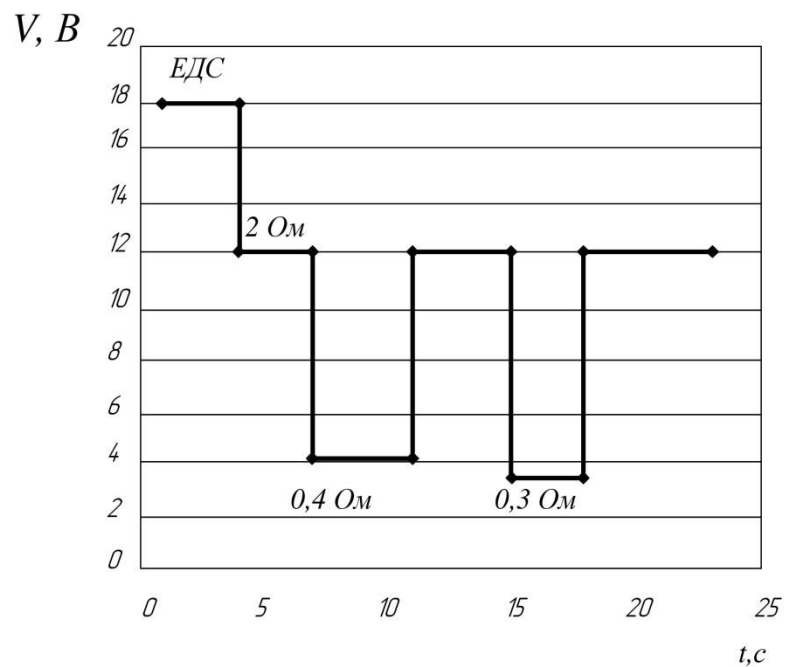


Рисунок 3.6 - Вплив імпульсних навантажень на напругу СБ

Ці результати показують, що підключення до СБ і постійно діюче навантаження 2 Ом додаткових потужних споживачів, призводить до втрати працездатності основного навантаження 2 Ом.

На третьому етапі дослідження при підключенні ЕК (ємністю 100 Ф) наявність конденсаторів великої ємності істотно змінюються зміни потужності на навантаженні. Так, при виникненні додаткового навантаження 0,4 Ом (при імпульсному її підключенні) вона монотонно знижувалася протягом 15 с з 73 до 50 Вт. Аналогічно, при підключенні імпульсного навантаження 0,3 Ом потужність на опорі 2 Ом протягом 15 с зменшилася з 73 до 45 Вт. Зміни потужності на навантаженні 2 Ом показані на рис. 3.7 і 3.8.

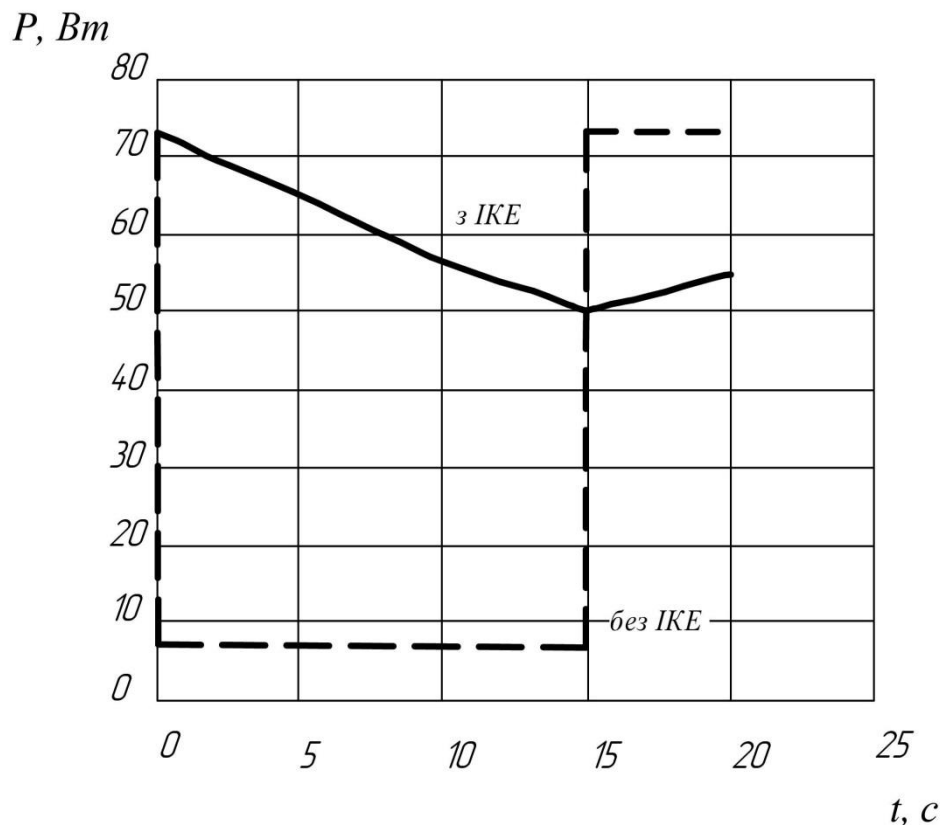


Рисунок 3.7. Потужність на навантаженні 2 Ом при підключенні імпульсного навантаження 0,4 Ом з IKE і без IKE

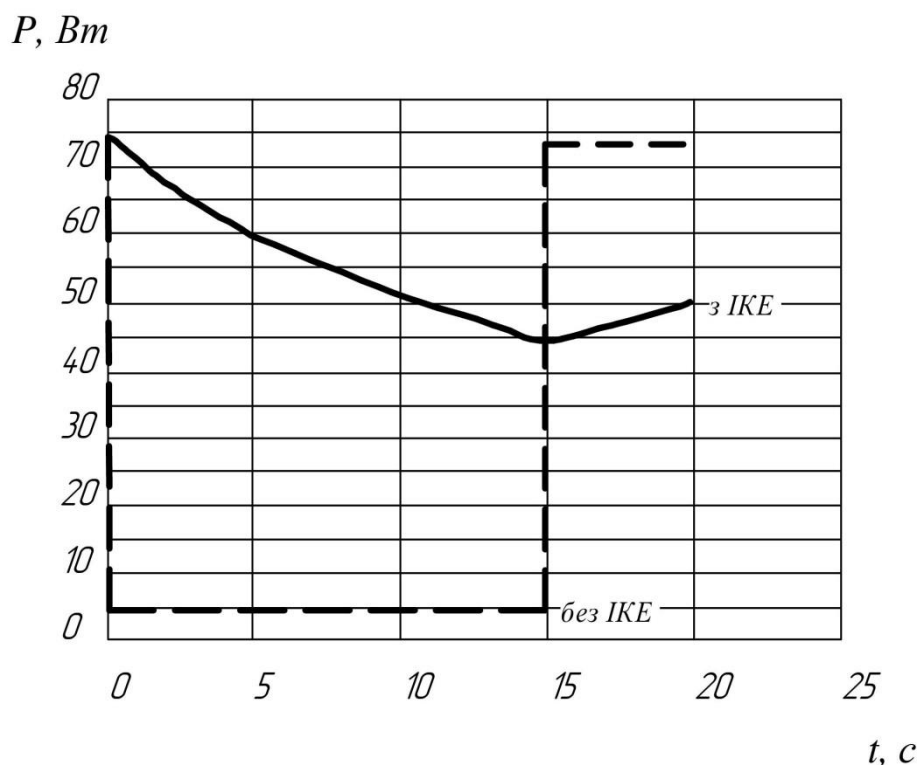


Рисунок 3.8. Потужність, що виділяється на навантаженні 2 Ом при імпульсному підключенні

З наведених графіків видно, що потужність на опорі 2 Ом при виключенні імпульсних навантажень падає значною мірою плавно: так на 5с вона становить 65 Вт і 59 Вт відповідно при імпульсних навантаженнях 0,4 Ом і 0,3 Ом.

ІКЕ були попередньо заряджені від СБ до напруги 12 В, а потім розряджалися на імпульсних навантаженнях 0,4 Ом і 0,3 Ом. На рис. 3.9 представлені значення потужності, що виділяється на імпульсних навантаженнях.

Аналіз отриманих графіків показує, що включення в електроенергетичну систему конденсаторів великої енергоємності істотно підвищує характеристики сонячних батарей. Так, якщо без ЕК потужності, що виділяються на навантажувальних опорах 0,4 Ом і 0,3 Ом становили відповідно 44,2 і 40,8 Вт, то використання ЕК дозволило збільшити дану потужність до 360 і 500 Вт відповідно на початку і до 300 і 250 Вт через 15 с. після імпульсного підключення навантажувальних опорів.

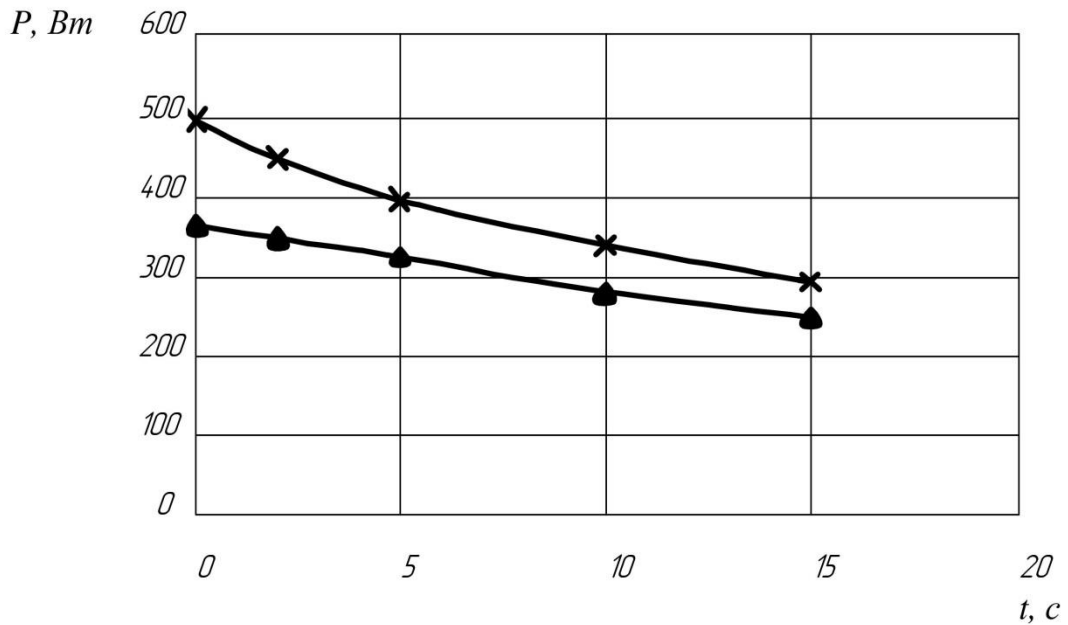


Рисунок 3.9 - Графік потужності, що виділяється на навантажувальних опорах при імпульсному живленні

### 3.7 Висновки до розділу

1. Розроблено математичну модель сонячної електроенергетичної системи на основі застосування енергоємного конденсатора, що дозволяє оцінювати її ККД в режимах безперервного і імпульсного підключення навантаження.

2. Встановлено, що основними параметрами накопичувача енергії, що визначають функціональні можливості в електроенергетичній системі є максимальна потужність накопичувача, його повна енергоємність і час роботи, а також час реверсу потужності.

3. Досліджено, що потужність що віддається сонячною батареєю в навантаження, і її ККД залежать від співвідношення опору навантаження і внутрішнього опору сонячної батареї, при цьому накопичувач енергії (енергоємний конденсатор) повинен змінювати споживану або видану ним потужність при виконанні балансу.

4. Встановлено, що потужність і ККД сонячної батареї в області значних навантажень можна збільшити шляхом переходу до імпульсного живлення

навантаження з використанням проміжного накопичувача енергії, причому вказаний ефект підсилюється зі збільшенням величини навантаження.

5. Експериментальними дослідженнями встановлено, що застосування в електроенергетичних установках енергоємних конденсаторів істотно покращує характеристики сонячних модулів. Так, якщо потужності, що виділяються на навантажувальних опорах 0,4 і 0,3 Ом становили відповідно 44,2 та 40,8 Вт, то при використанні енергоємних конденсаторів ці потужності зросли до 360 Вт і 500 Вт відповідно на початку процесу.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку.

Електротравматизм як соціальна категорія характеризується сукупністю електротравм за певний проміжок часу, їх абсолютними і відносними показниками, розподілом за тяжкістю, галузями виробництва тощо.

Як попередньо зазначалось, електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1%, а в смертельному - біля 15-20%. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80% електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пащ тою понад 1 кВ, - до 20-30%.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань

електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групи з електробезпеки [17,18].

Крім зазначеного, в порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначити наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

- струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмовідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання, тощо;

- електротравми можливі без дотику людини до струмовідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробі повітряного проміжку між струмовідними частинами, або між струмовідними частинами і людиною, чи землею;

- розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

#### **4.2 Можливість виникнення статичної електрики та заходи боротьби з нею**

Наслідки спричинені електризацією, свідчать про необхідність здійснення заходів щодо попередження небезпечної і шкідливої дії статичної електрики на організм людини.

Статична електрика - це процес утворення і розділення зарядів у просторі при контакті двох матеріалів, якщо хоча б один з них є діелектриком. Підвищений рівень статичної електрики відноситься до групи фізичних небезпечних і шкідливих виробничих факторів.



Суть електризації заключається в тому, що діелектрики за певних умов стають електрично зарядженими. При цьому заряди не виникають і не зникають, а переходять з одного електризованого тіла на інше, накопичуються на поверхнях їх стикання чи переміщуються в межах одного й того ж тіла. Статична електрика може з'являтися на тілах і через індукцію, тобто через взаємодію на відстані. В основному виробництві харчової промисловості це можуть бути процеси помелу зерна, просіювання, транспортування трубопроводах борошна, процеси, пов'язані з приготуванням цукрової пудри, перевезенням чи транспортуванням по трубопроводах спирту, сухих дріжджів, розміщенням і фільтруванням рідин; технологічні процеси, пов'язані із застосуванням плоскопасових передач, транспортерів і т.д.

Статична електрика при розділенні контактів двох тіл особливо добре проявляється в пасових передачах (транспортерах). Електричні заряди протилежних знаків з'являються на пасі і шківі при порушенні поверхні контакту в місці збігання пасу зі шківа. і йому в деяких випадках різниця потенціалів може досягати 80 кВ.

Якщо напруженість електричного поля перевищує електричну міцність середовища (повітря), то відбувається розряд статичної електрики. Основною причиною, що характеризує здатність різних матеріалів проводити струм, а також визначає їх здатність до електризації, є питомий електричний опір (Ом·м) Умовно прийнято, що при питомому електричному опорі речовин і матеріалів порядку менше 10 Ом·м заряди не накопичують і безпеки не являють. Якщо ж опір високий і велика швидкість відриву поверхні, то заряди зберігаються. Величина зарядів визначається природою матеріалу і швидкістю розділення поверхонь, тобто інтенсивністю технологічного процесу.

Розряди статичної електрики являються одними з можливих імпульсів спалахування і вибухів в харчовій промисловості, що зв'язано, в першу чергу, із застосуванням сильно електризуючих речовин і матеріалів (горючі рідини, пил органічного походження). Електризація рідин приводить до спалахування і вибухів втричі частіше, ніж електризація дрібнодисперсних матеріалів, оскільки

мінімальна енергія запалювання пилово-вітряних сумішей з 10...100 раз менше. При протіканні рідин величина заряду залежить від діелектричної сталої, її забрудненості, шорсткості стінок, швидкості протікання і діаметра труб.

Захист від статичної електрики та її небезпечних проявів повинен здійснюватись в двох напрямках: усунення електричних зарядів або зменшення їх до безпечних величин.

У харчовій промисловості статична електрика усувається заміною горючих середовищ негорючими. Для промивання ємкостей, трубопроводів, наприклад замість бензину, гасу слід використовувати пожежобезпечні розчинники (їдкий натр або калі, компоненти із рідкого скла, контакт Петрова, ОП-7 або ОП-10); підтриманням концентрації горючих речовин за межами вибуховості. Проводиться з урахуванням вимог і можливостей технологічного процесу; нанесенням на діелектричне устаткування електропровідних покриттів; відведенням зарядів від людей у виробництвах, де існує небезпека спалаху горючих сумішей розрядом з людини; зволоженням навколишнього середовища, якщо це допускається за умовами технологічного процесу. Якщо це неможливо, то може застосовуватись місцеве зволоження, шляхом направлення розпилюючого струменя на поверхні, з яких необхідно відвести статичні заряди; забезпеченням проявів заряду в тих місцях, де немає горючого і вибухонебезпечного середовища; збільшенням, об'ємної і поверхневої провідності діелектриків, які використовують для транспортування і зберігання рідин; іонізацією повітря індукційними, високовольтними, радіоактивними і комбінованими нейтралізаторами. Вибір кожного типу нейтралізатора проводиться з урахуванням середовища і характеристик іонізаторів; зміненням технологічного процесу з метою усунення причин, що сприяють появі електризації; заземлення обладнання. Заземлення обладнання - один з важливих і обов'язкових заходів до захисту від статичної електрики.

Апарати, машини, пристрої, які можуть стати джерелами виникнення зарядів статичної електрики, повинні бути заземлені не менше ніж у двох місцях незалежно від заземлення усього технологічного ланцюга.

Звичайні заземлюючі пристрої для захисту від розрядів статичної електрики об'єднують із заземлюючими пристроями для електрообладнання.

Заземлення повинно бути здійснене тільки паралельним приєднанням захисного обладнання. Допустимий опір заземленого пристрою для захисту від статичної електроенергії у вигляді малих струмів витрат допускається не більше 100 Ом.

Гнучкі трубопроводи для перекачування рідин, які здатні генерувати заряди (спирт, бензин, гас тощо), повинні мати металеве заземлене оплетення, а вихідні штуцери мають бути виконані із кольорових металів і з'єднані із заземленим металевим оплетенням.

Серед інших заходів, направлених на заземлення небезпечних проявів розрядів статичної електрики, слід відмітити такі, як заміна плоских пасів текстурними (клиновими); недопущення розприскування рідин при їх розливанні в ємності шляхом опущення завантажувальних труб на відстань не більше 0,2 м від днища приймальної посудини; зміна швидкості переміщення твердих і рідких матеріалів та ін.

#### **4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час**

На основі всебічного аналізу факторів, що впливають на стійкість роботи об'єктів енергетики, робляться висновки про ймовірність виникнення аварій, стихійних лих, терористичних актів та їх впливу на виробничу діяльність і визначаються основні напрямки (шляхи) підвищення стійкості функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу [19,20]:

1. Забезпечення надійного захисту робітників та службовців від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих і засобів ураження
2. Захист основних виробничих фондів від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих та засобів ураження, в тому числі і від вторинних вражаючих факторів;
3. Забезпечення стабільності і безперервності управління виробництвом

та ЦЗ;

#### 4. Забезпечення надійності постачання об'єкта енергоносіями.

Для надійного функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях завчасно організуються і проводяться заходи, спрямовані на підвищення стійкості їх роботи. До них відносяться:

1. Інженерно-технічні заходи (ІТЗ).
2. Технологічні заходи.
3. Організаційні заходи.

*Інженерно-технічні заходи* - заходи, спрямовані на забезпечення підвищення стійкості будівель, споруд, обладнання, енергетичних систем до впливу НС.

*Технологічні заходи* - заходи, спрямовані на здійснення підвищення стійкості шляхом зміни технологічного режиму, що виключає виникнення вторинних факторів ураження.

*Організаційні заходи* - заходи, спрямовані на завчасну розробку і планування дій керівного складу, особового складу, штабу ЦЗ, служб, невоєнізованих формувань об'єктів енергетики в умовах надзвичайних ситуацій.

Основними напрямками підвищення стійкості функціонування є наступне:

- забезпечення захисту населення і його життєдіяльності;
- раціональне розміщення виробничих сил та потужностей на території об'єкта енергетики, регіону;
- підготовка до роботи в умовах НС мирного та воєнного часу;
- підготовка до виконання робіт по відновленню об'єктів в умовах НС;
- підготовка системи управління.

Всі ці заходи повинні забезпечити максимально можливе зниження втрат і руйнувань та зменшити можливість виникнення повторних зон зараження при впливі РР, ОР та НХР. Зміст таких заходів, виходячи з галузевих і інших нормативних документів, конкретизується для кожної територіальної ланки..

Ми знаємо, що електропостачання є основою всякого виробництва. Для забезпечення надійного електропостачання в НС при його проектуванні та будівництві повинні бути враховані наступні основні вимоги, що впливають із завдань цивільного захисту:

1. Електропостачання повинно здійснюватися від енергосистем, до складу яких входять електростанції, що працюють на різних видах палива.
2. Великі електростанції слід розміщувати одну від одної і від великих міст на значних відстанях.
3. Районні понижуючі підстанції, диспетчерські пункти енергосистем та лінії електропередач необхідно розміщувати розсереджено і надійно захищати.
4. Постачання електроенергією великих міст слід передбачати від двох незалежних джерел.

Крім того, необхідно створювати автономні резервні джерела електропостачання. Для цього можна використовувати рухливі електростанції на залізничних платформах, малопотужні електростанції, не включені до енергосистеми. Система електропостачання повинна мати грозозахисту систему та захист від впливу електромагнітного імпульсу ядерного вибуху.

Енергетичні споруди та електричні мережі повинні проектуватися з урахуванням забезпечення стійкого електропостачання категорійних міст і об'єктів. Схема електричних мереж енергосистем при необхідності повинна передбачати можливість автоматичного розподілу енергосистеми на збалансовані, незалежно працюючі частини. При проектуванні енергетичних систем і їхнього об'єднання теплові (конденсаційні) електростанції слід розміщати поза зонами можливого катастрофічного затоплення. У категорійних містах припускається розміщення тільки теплоелектроцентралей незалежно від їхньої встановленої потужності з максимальним віддаленням їх від центрів житлової і промислової забудов. Нові атомні електростанції та атомні теплоелектроцентралі повинні розміщатися з урахуванням їх впливу на навколишнє середовище і радіаційну безпеку населення. На існуючих та на тих,

що проектується і будуються атомних станціях, передбачається створення систем автоматизованого контролю за радіаційною обстановкою на території станції і в зоні спостереження цих станцій, оповіщення та інформаційного забезпечення обслуговуючого персоналу і населення про радіаційну небезпеку, а також захищених пунктів керування протиаварійними діями на території станції і в пристанційних селищах.

При проектуванні схем зовнішнього електропостачання категорійних міст необхідно передбачати їхнє електропостачання від декількох незалежних та територіально рознесених джерел живлення (електростанції і підстанції), частина з яких повинна розташовуватися за межами зон можливих руйнувань. При цьому зазначені джерела і їхні лінії електропередачі повинні, як правило, знаходитися на відстані одне від одного, що виключає можливість їхнього одночасного виходу з ладу. Системи електропостачання категорійних міст повинні враховувати можливість забезпечення транзиту електроенергії в обхід зруйнованих об'єктів за рахунок спорудження коротких перемичок повітряними лініями електропередачі. Нові лінії електропередачі, що живлять особливо важливих споживачів, слід проектувати в кабельному виконанні. Для забезпечення можливості зниження електричного навантаження в категорійних містах системи електропостачання об'єктів, які не відключаються у воєнний час, повинні бути відділені від систем електропостачання інших об'єктів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Актуальним є використання комбінованих енергоустановок, що складаються з фізично рознесених джерел енергії та потужності, що дозволяє не тільки подолати потенційну надмірність звичайних енергоустановок, а й отримати дворазову економію ресурсів і десятикратне підвищення рівня екологічності.

2. Розроблено математичну модель сонячної електроенергетичної системи на основі застосування енергоємного конденсатора, що дозволяє оцінювати її ККД в режимах безперервного і імпульсного підключення навантаження.

3. Встановлено, що основними параметрами накопичувача енергії, що визначають функціональні можливості в електроенергетичній системі є максимальна потужність накопичувача, його повна енергоємність і час роботи, а також час реверсу потужності.

4. Досліджено, що потужність що віддається сонячною батареєю в навантаження, і її ККД залежать від співвідношення опору навантаження і внутрішнього опору сонячної батареї, при цьому накопичувач енергії (енергоємний конденсатор) повинен змінювати споживану або видану ним потужність при виконанні балансу.

5. Встановлено, що потужність і ККД сонячної батареї в області значних навантажень можна збільшити шляхом переходу до імпульсного живлення навантаження з використанням проміжного накопичувача енергії, причому вказаний ефект підсилюється зі збільшенням величини навантаження.

6. Експериментальними дослідженнями встановлено, що застосування в електроенергетичних установках енергоємних конденсаторів істотно покращує характеристики сонячних модулів. Так, якщо потужності, що виділяються на навантажувальних опорах 0,4 і 0,3 Ом становили відповідно 44,2 та 40,8 Вт, то при використанні енергоємних конденсаторів ці потужності зросли до 360 Вт і 500 Вт відповідно на початку процесу.

7. Виготовлено діючу модель фотоелектричної системи акумулювання електроенергії із суперконденсатором.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 25–26 листоп. 2020.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2020. – С. 86.
2. В.Мачулін, В.Литовченко, М.Стріха. Сонячна енергетика: порядок денний для світу й України // Вісник НАН України. – 2011. - №5. – С.30-39
3. A.P.Gorban', V.P.Kostylev, V.N.Borshev, A.M.Listratenko. State and prospects of a development of silicon photoconverters and batteries for the space use // Telecommunications and Radio Engineering.-2001. - V.55, No 9. - P.94-100.
4. А.В.Саченко, А.П.Горбань., В.П.Костылев, А.А.Серба, И.О.Соколовский. Сравнительный анализ эффективности фотопреобразования в кремниевых солнечных элементах при концентрированном освещении для стандартной и тыловой геометрий расположения контактов // ФТП. - 2007. - т. 41, вып.10. - С.1231-1240.
5. Matthew L.Wald. How to Build the Supergrid // Scientific American. – 2010. – v.303, n.5, November. – P.36-41.
6. Lewandowski A., Galinski M. Practical and theoretical limits for electrochemical double-layer capacitor // Journal of Power Sources. 2007. 173. P. 822–828/
7. Von Helmholtz H. Studien uber elektrische Grenzschichten.— Ann. der Physik und Chemie, 1879, Bd VII, № 7.
8. Kotz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors, Electrochimica Acta. 2000. 45. P. 2483-2498.
9. K. Denshchikov, Stacked Supercapacitor Technology – New Perspectives & Chances, Supercaps Europe – European Meeting on Supercapacitors: Development and Implementation in Energy and Transportation Techniques, Berlin, Germany, Nov.2005.
10. Denshchikov K.K., Zhuk A.Z., Izmaylova M.Y, Gerasimov A.F., New Generation of Stacked Supercapacitors, First International Symposium on Enhanced Electrochemical Capacitors, Universite de Nantes, France, June 30<sup>th</sup> – July 2<sup>nd</sup> 2009/

11. K.Denshchikov, A.Zhuk, M. Izmaylova, Specific features of energy storage of supercapacitors with ionic liquid electrolyte, COST Action 542 High Performance Energy Storages for Mobile and Stationary Applications, INRETS, Paris, France, June 5 -7, 2008.
12. J.C. Brown, D.J. Eichenberg, and W.K. Thompson, Baseline Testing of the Hybrid Electric Transit Bus, National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Centr, NASA/TM1999-208890, 1999
13. Базаров Б.А., Заддэ В.В., Стребков Д.С. и др. Новые способы получения кремния солнечного качества. Сб. "Солнечная фотоэлектрическая энергетика". Ашхабад, изд. Ылым, 1983. С. 56-59
14. Безруких П.П. О необходимости развития нетрадиционной энергетики //Электрические станции. 1991. С. 149-155.
15. Иванов С.А., Иванов А.М. Назначение и анализ работы буферного накопителя электрической энергии в комбинированных энергетических установках гибридных транспортных средств. Международная конференция «Состояние разработки и перспективы применения вентильно-индуктивных приводов в промышленности и транспорте». М.: Интерэлектро, 2001
16. 34. Патент РФ № 2130669. Солнечный фотоэлектрический модуль с концентратором и способ его изготовления/Безруких П.П., Стребков Д.С., Твердь-янович Э.В., Артемов А.А. // БИ. 1999. №14.
17. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник/М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с. – ISBN 966-8019-01-6.
18. 36. Купчик М.П., Гандзюк М.П, Степанець І Ф, Вендичанський В.Н., Литвиненко А.М., Іваненко. О. В. Основи охорони праці. - К.: Основа, 2000. - 416 с.
19. Стеблюк М.І. Цивільна оборона. К.: Знання, 2006. - 487 с.
20. Шоботов В. М. Цивільна оборона: Навчальний посібник: Вид. 2-ге, перероб. — К.: Центр навчальної літератури, 2006. — 438 с.