

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА  
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

першого (бакалаврського) рівня освіти

на тему:

«АВТОНОМНЕ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ  
УСТАНОВКОЮ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ З РОЗРОБКОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЇ  
СХЕМИ РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ»

Виконав: студент 4-го курсу

групи Ен –41 спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_ Возняк П. В.

Керівник: \_\_\_\_\_ Гальчак В. П.

Рецензент: \_\_\_\_\_

**ДУБЛЯНИ 2024**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА  
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський) рівень  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис)

к.т.н., доцент Сиротюк С. В.  
(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Возняку Павлу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Автономне енергозабезпечення фотоелектричною установкою житлового будинку з розробкою електричної схеми регулятора струму навантаження»

керівник роботи к.ф.-м.н., доцент Гальчак В.П.  
(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП 641/к-с від 27.11.23 року

2. Строк подання студентом роботи 13.06.24

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 Вихідні дані та обґрунтування кваліфікаційної роботи

2 Розрахунок електричної мережі

3 Вибір електричного устаткування та організація релейного захисту

4 Охорона праці та довкілля

5 Організаційно-економічна частина

Висновки

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	<i>Городецький І. М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва</i>	27.11.23	27.11.23	

7. Дата видачі завдання 27.11.22 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Аналіз вихідних даних для обґрунтування структури фотоелектричної установки та актуальності кваліфікаційної роботи</i>	27.11.2023 – 21.01.2024	
2	<i>Розробка структури та обґрунтування елементів фотоелектричної установки</i>	22.01.2024 – 29.02.2024	
3	<i>Розробка схеми регулятора струму навантаження</i>	1.03.2024 – 29.03.2024	
4	<i>Аналіз небезпечних ситуацій та заходів безпеки при монтажних роботах та сервісному обслуговуванні фотоелектричних установок</i>	27.11.2023 – 15.12.2023	
5	<i>Аналіз потенційних загроз довкіллю та заходів з їх попередження</i>	1.04.2024 – 19.04.2024	
6	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	23.04.2024 – 11.05.2024	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	3.06.2024 – 13.06.2024	

Студент

Возняк П. В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Гальчак В. П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

**УДК 621.311.243:620.9.93.**

Возняк П. В. «Автономне енергозабезпечення фотоелектричною установкою житлового будинку з розробкою електричної схеми регулятора струму навантаження». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024, 49 с. текстової частини, 3 таблиці, 17 рисунків, 13 джерел посилання.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка проєктних рішень організації роботи автономної фотоелектричної установки у режимі узгодженої потужності генерації, акумулювання та споживання.

Для досягнення поставленої мети, необхідно розробити електричну схему регулятора струму навантаження з автоматичним розподілом фотоструму між споживачами відповідно їх потужності та пріоритету живлення.

Проведено аналіз ефективності енергетичних перетворень у сонячних елементах, модулях і фотоелектричних установках виявлено умови їх оптимізації. Вдосконалено схему комутації силових елементів у для роботи у типових умовах експлуатації автономних фотоелектричних установок, у якій передбачено додаткові функції захисту від аварійних режимів. Схему шунтового регулятора фотоструму доповнено блоками обмеження струму навантаження відповідно пріоритетності споживачів фотоелектрики та індикації інтервалів обмежувальних напруг.

**Ключові слова:** сонячна енергія, фотострум, автономне електропостачання, акумулятор, зарядний пристрій, комутатор навантажень

## ЗМІСТ

	ВСТУП	6
1	АВТОНОМНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ УСТАНОВКИ	7
	1.1 Обґрунтування актуальності кваліфікаційної роботи .....	7
	1.2 Вимоги до сонячної системи автономного електропостачання .....	7
	1.3 Типова структура автономної фотоелектричної установки ...	8
	1.4 Типові втрати їх профілактика та мінімізація .....	10
	1.5 Фотоелектричний потенціал сонячної енергії .....	11
2	СТРУКТУРА ТА ЕЛЕМЕНТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ	14
	2.1 Сонячні елементи та їх енергетика .....	14
	2.2 Енергетика сонячного модуля н прикладі KV55M .....	18
	2.3 Енергетика акумулятора у фотоелектричній установці .....	22
3	РОЗРОБКА РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ	30
	3.1 Вибір схеми комутації фотоелектричної установки .....	30
	3.2 Алгоритм роботи базової схеми .....	32
	3.3 Розробка схеми регулятора струму навантаження .....	35
	3.4 Блок індикації та розподілу струму навантаження .....	38
	3.5 Вибір акумулятора і параметрів його роботи .....	40
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ	43
	4.1 Загальні питання безпеки роботи з сонячними панелями .....	43
	4.2 Умови безпечної роботи з акумуляторами .....	44
	4.3 Потенційні загрози довкіллю .....	45
	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	46
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	48
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	49

## ВСТУП

Надійність електропостачання прийнято характеризувати кількістю, тривалістю та частотою перерв в електропостачанні. Останнім часом ці показники важко утримувати на належному рівні не тільки у прифронтових регіонах, а й по усій території України внаслідок пошкодження генеруючих потужностей та мереж електропостачання. Можливості їх швидкого відновлення не завжди сприятливі, тому значного поширення набувають засоби резервного електропостачання. Потужні генератори на базі двигунів внутрішнього згоряння переважно використовують для живлення об'єктів критичної інфраструктури.

Для індивідуальних користувачів ринок пропонує широкий вибір малопотужних генераторів, а як альтернативу – засоби сонячного електропостачання малої потужності з великим запасом автономності. Популярність таких систем швидко зростає, тому розвивається бізнес з їх встановлення і сервісного обслуговування, а з боку користувачів – попит на окремі комплектуючі та інформаційний супровід з ефективного використання нових технологій.

## РОЗДІЛ 1

### АВТОНОМНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ УСТАНОВКИ

#### 1.1 Обґрунтування актуальності кваліфікаційної роботи

Фотоелектричні установки автономного електропостачання прості в експлуатації, легко вписуються в існуючі схеми і не вимагають спеціально підготовленого персоналу для технічного обслуговування. До її недоліків насамперед відносять невисоку потужність та нестабільність параметрів генерованого фотоструму, високу вартість обладнання при малій продуктивності сонячних панелей. Крім того у регіонах, віддалених від центрів сервісного обслуговування, фотоелектричні установки зазвичай комплектують самостійно з доступних і не завжди оптимально сумісних елементів. Для їх налагодження і технічного обслуговування потрібні додаткові фінансові затрати та інтелектуальні зусилля.

Системи автономного електропостачання від фотоелектрики ефективні лише за умови їх раціональної експлуатації, яка полягає в економному витрачанні завжди дефіцитної електроенергії. Частково подолати цю невідповідність вдається зустрічним кроком – пристосуванням потреб споживача до особливостей надходження сонячної енергії. Відтак метою дипломного проекту є максимальне використання потенціалу сонячної енергії, зменшення непродуктивних втрат у ланцюжку енергетичних перетворень від сонячної панелі до корисного навантаження. Її пропонується частково подолати технічними рішеннями з узгодження роботи усіх елементів установки і раціоналізацією графіків споживання фотоелектрики з обмеженням роботи потужних навантажень.

## **1.2 Вимоги до сонячної системи автономного електропостачання**

Фотоелектричні системи автономного електропостачання зазвичай використовують у віддалених від електромереж об'єктах: дачних будинках, господарських об'єктах, туристичних притулках автоматичних ретрансляторах, навігаційних постах тощо. Специфіка генерування та розподілу фотоелектрики накладає певні обмеження на комплектацію електроспоживаючих пристроїв, графік їх роботи, режими навантаження, робочу напругу і поточну потужність споживання тощо.

Схема комутації елементів автономної фотоелектричної установки складаються з таких основних елементів: сонячного модуля, силового транзистора регулювання струму фотомодуля, акумулятора з блокуючим діодом, транзистора струму зовнішнього кола схеми керування зарядним струмом. До найпростіших зазвичай відносять фотоелектричні установки з одним споживачем енергії фотоструму.

Побутові фотоелектричні установки домогосподарств зазвичай живлять кілька типових споживачів різного призначення з ручним розподілом їх вмикання/вимикання. В автономних системах завжди накладаються додаткові обмеження у вигляді сумарної потужності одночасного живлення приладів та черговості їх вмикання з метою резервування акумульованої фотоелектрики на кілька діб тривалої негоди або інших нештатних ситуацій. Зазвичай їх комплектують енергоощадними приладами (високого класу енергоефективності) і значно рідше використовують автоматичне обмеженням загальної потужності навантаження, та диференційований розподіл точок приєднання з врахуванням їх потужності та великих пускових струмів.

## **1.3 Типова структура автономної фотоелектричної установки**

Автономні фотоелектричні установки зазвичай komponують з типових елементів: фотомодуля, акумулятора з діодом блокування розрядного струму



через фотомодуль, опором навантаження і двома силовими транзисторами [1]. При цьому можливі лише два варіанти комутації фотомодуля і транзистора керування фотострумом за схема, наведеними на рисунку 1.1.

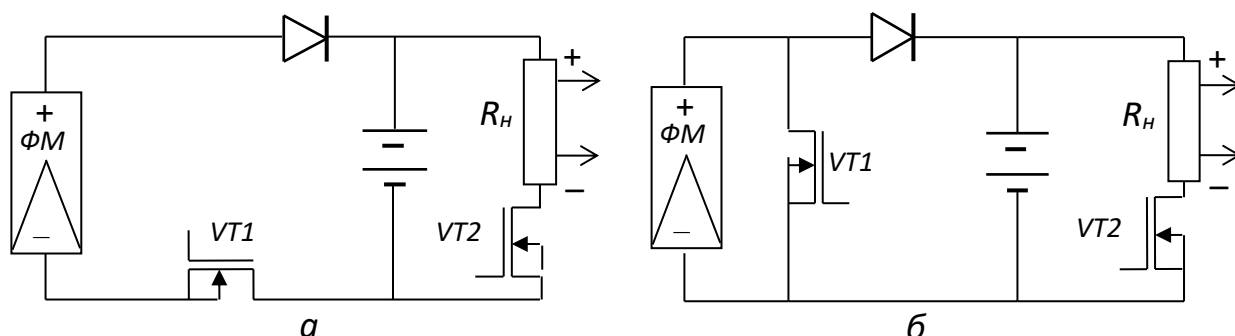


Рисунок 1.1 – Варіанти комутації фотомодуля і обмежувального транзистора  $T_1$ : а) – послідовний; б) шунтовий.

У першому варіанті керування фотострумом здійснюється транзистором  $T_1$ , послідовно розміщеним між замкненим контуром з акумулятора і ланки з двох опорів – навантаження  $R_n$  і транзистора керування струмом споживання  $VT_2$ . У ній весь фотострум рівний сумі зарядного – через акумулятор та корисного – через послідовну ланку з опору навантаження і обмежувального транзистора  $T_2$ . Заряджання акумулятора відбувається тільки при відкритому опорі транзистора  $T_2$  і одночасно з живленням корисного навантаження, а за його відсутності – баластного з відповідною нераціональним недовикористанням потенціалу фотомодуля.

За схемою на рис. 1.2, режимом зарядного процесу керують зміною провідності транзистора  $T_1$  з паралельний відводом частини фотоструму через корисне навантаження. При повному заряджанні акумулятора і відсутності навантаження фотомодуль переводиться у цілком безпечний для себе стан короткого замикання шунтовим транзистором  $T_1$  з відповідним недовикористанням потенціалу фотомодуля. Струми шунтування можуть вивести з ладу транзистор тому усі силові транзистори komponувати з тепловими радіаторами, або використовують енергетичних польові транзистори з низьким опором при великих струмах пропускання.

У процесі експлуатації фотоелектричної установки можливе перевищення напруги на елементах комутації зарядного струму наприклад коли переплутано полярність модуля і акумулятора. Така ситуація часто трапляється з недосвідченим користувачами. Для запобігання цим явищам в енергетичних польових транзисторах вмонтовано внутрішній двосторонній стабілітрон (freewalk-діод). Польові транзистори з freewalk-діодом IRFZ40 та IRFZ40F1 випускаються фірмою SGS-THOMSON .

#### 1.4 Типові втрати їх профілактика та мінімізація

Модернізація уже діючої фотоелектричної системи нерідко супроводжується зміною режимів її роботи. Тому при їх проектуванні та налагодженні потрібно дотримуватися відомих рекомендацій, напрацьованих за результатами експлуатації подібних установок і описаних у загальнодоступних виданнях.

За далеко неповними даними, запозиченими з спеціалізованої літератури [1, 2] та інформаційної мережі Інтернет, втрати потенціалу сонячної енергії у ланцюжку перетворень фотомодуль – споживач фотоелектрики розподіляються у процентному відношенні наступним чином у порядку послідовності перетворень енергії:

- неоптимальна орієнтація фотомодуля.....5
- втрати через запиленість поверхні .....5
- температурні втрати потужності фотомодуля ..... 16% при 60° С
- втрати від електричного неузгодження елементів установки.....10
- омичні втрати у кабелі зниження.....5
- втрати на комутацію зарядного струму.....7
- втрати на живлення схеми регулятора заряду.....7
- втрати в акумуляторі.....не менші за 15

З їх врахуванням загальна ефективність використання енергетичного потенціалу фотомодуля в реальних умовах експлуатації як правило не перевищує 50 %.

Останні три позиції переліку втрат залежить виключно від ефективності роботи схеми керування фотострумом у ланцюжку фотомодуль – регулятор зарядки – акумулятор.

Найважче діагностувати втрати в акумуляторах внаслідок постійної зміни режимів зарядно-розрядних процесів, коефіцієнт корисної дії яких при номінальних режимах не досягає 85%. Тому максимум добового розподілу генерованої фотоелектрики бажано узгоджувати у часі з максимумом освітленості фотомодуля прямими сонячними променями. Тому при живленні від автономних фотоелектричних установок, більшість енергоємних процесів бажано виконувати вдень за схемою прямого живлення від фотомодуля, без проміжного її акумуляування. При цьому важливо дотримувати вимогам пріоритетності вмикання тих чи інших приладів, віддаючи перевагу резервуванню енергії в акумуляторі на випадок нештатних ситуацій чи тривалої негоди.

### 1.5 Фотоелектричний потенціал сонячної енергії

Потік сонячної енергії кількісно характеризують інтенсивністю – потужністю, перенесеною променями через 1 м<sup>2</sup> освітленої поверхні, перпендикулярно до їх напрямку. У сонячній енергетиці інтенсивність сонячних променів прийнято позначати літерою  $G$  і кількісно оцінювати в енергетичних оптичних одиницях – Вт/м<sup>2</sup>. Таку ж розмірність має енергетична освітленість поверхні  $E$ , рівна добутку інтенсивності на косинус кута освітлення  $\theta$ :

$$E = G \cdot \cos\theta \quad (1.1)$$

Сонячні панелі зазвичай освітлюються скісними променями з поточними значеннями кутів освітлення, розрахованими відносно сторін

світу, нахилу до площини горизонту рівного відхиленню її нормалі від напрямку на Сонце. Поточна продуктивність стаціонарних фотоелектричних панелей практично пропорційна сумарній енергетичній освітленості  $E$  трьома потоками сонячної радіації – прямим  $G_b$ , дифузним  $G_d$  та відбитим від поверхні ґрунту і довкілля  $G_p$ . У найпростішому випадку рівномірно яскравого неба [2, 3], її розраховують за такою формулою:

$$E = G_{t\beta} = R_{\beta}(\tau)G_{bh} + G_{dh} \frac{1 + \cos\beta}{2} + G_{th}\rho \frac{1 - \cos\beta}{2}, \quad (1.2)$$

де:

$$R_{\beta} = \frac{G_{b\beta}}{G_{bh}} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (1.2)$$

$G_{bh}$ ,  $G_{dh}$  і  $G_{th}$  – прямий, дифузний і потоки сонячної енергії до поверхні ґрунту та їх сумарний потоки їх сумарний і  $G_{th}$ ;  $\theta$  – кут освітлення поверхні фотопанелі сонячними променями;  $\theta_z$  – кут відхилення Сонця від zenіту;  $\beta$  – кут нахилу фотомодуля горизонтальної поверхні ґрунту;  $\rho$  – коефіцієнти відбивання поверхні ґрунту у напрямку фотопанелі.

Для проектних розрахунків зазвичай використовують середні значення інтенсивності з у кліматичного довідника України [4]. На рисунку 1.2 її представлення у вигляді стовпчикової діаграми погодинних експозицій  $I$ .

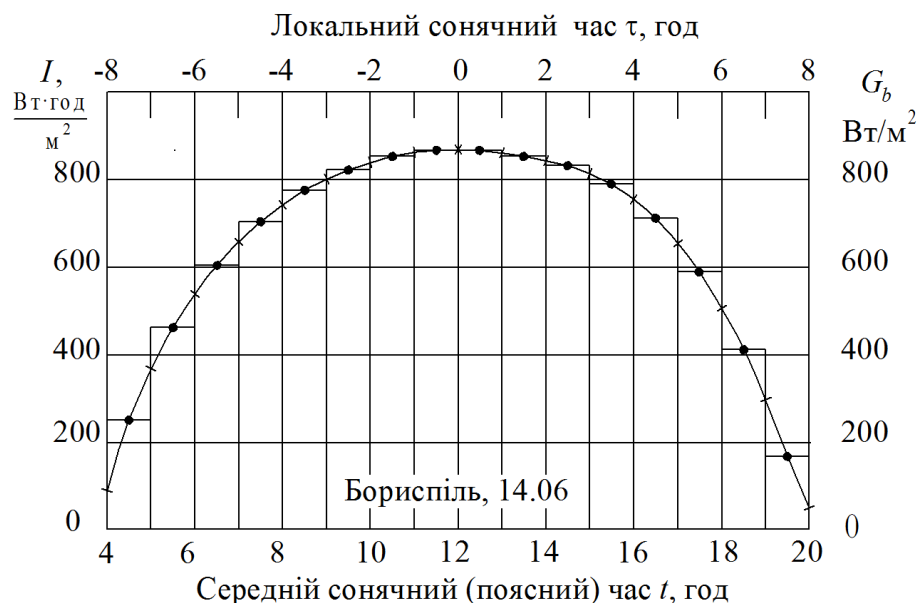


Рисунок 1.2 – Діаграма погодинних експозицій  $I$  у  $\text{Вт}/\text{год}\cdot\text{м}^2$

з точками середніх значень інтенсивності сонячних променів  $G_b$  у  $\text{В}/\cdot\text{м}^2$  [5]

Годинна експозиція поверхні площею  $1 \text{ м}^2$  у Вт·год чисельно рівна її енергетичній освітленості у  $\text{Вт}/\text{м}^2$  (див рис. 1.2), тому значення, з актинометричних баз даних, можна відразу підставляти у формули (1.1) та (1.2) для потоків сонячної енергії. Сумарна площа під обвідною кривою рівна денній енергетичній експозиції приймача сонячної енергії у Вт·год, значення якої також наводиться у віх довідниках актинометричних величин.

Електрична потужність фотопанелі не перевищує значення, рівного добутку її енергетичної освітленості  $E$  на площу  $S$  і коефіцієнт корисної дії (к.к.д.)  $\eta$ :

$$P_{\text{ел}} = \eta ES \square G_{b\beta} \cos \theta \quad (1.4)$$

У випадку нормальної до променів поверхні максимальна потужність генерується тільки у полудень, і змінюється з кутом нахилу та відхиленням від напрямку на Сонце.

Найпоширенішим приймачем сонячної енергії є стаціонарна поверхня, орієнтована у південному напрямку з кутом нахилу  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ . Поточні кути її освітлення протягом дня зазвичай розраховують за такою формулою:

$$\cos \theta(\tau) = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega \tau + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \quad (1.5)$$

де;  $\varphi$  – географічна широта місцевості у градусах;

$\omega = 17$  град/год – кутова швидкість обертання Землі навколо власної осі;

$\tau$  – момент часу відрахованого відносно полудня, [год];

$\delta$  – сонячне схилення станом на поточний день року з порядковим номером дня у році  $n$ , яке зазвичай розраховують за формулою Купера [1]:

$$\delta = \delta_0 \sin \frac{284 + n}{365} \quad (1.6)$$

Умови роботи силових елементів фотоелектричної установки розраховують на екстремальні режими освітлення фотомодуля, які можуть значно перевищувати полудневий максимум при аномально прозорій атмосфері або додаткових потоках сонячної енергії, наприклад відбитих дзеркальними поверхнями.

## РОЗДІЛ 2

### СТРУКТУРА ТА ЕЛЕМЕНТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

#### 2.1 Сонячні елементи та їх енергетика

Сонячна енергія перетворюється в електричну у сонячних елементах, поперечний переріз яких відповідає схемі, наведений на рисунку 2.1 [1].

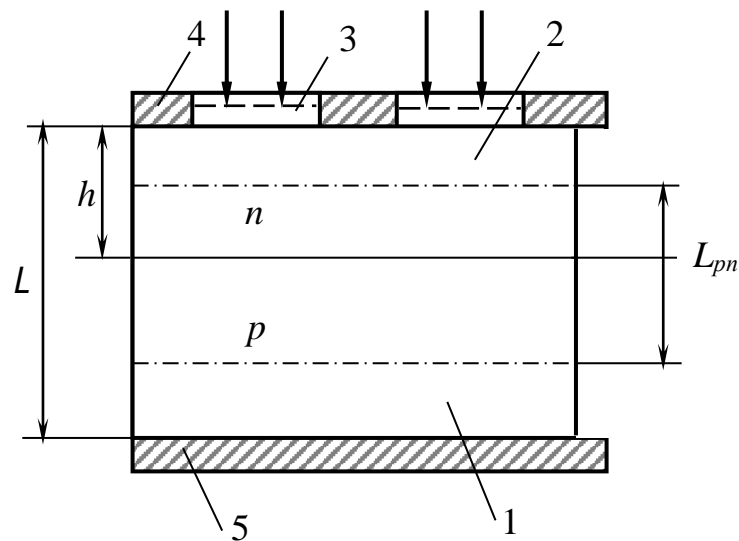


Рисунок 2.1 – Схематична будова планарного сонячного елемента

Шар 1 з напівпровідника  $p$ -типу, покритий тонкою кристалічною плівкою кремнію  $n$ -типу 2, поверх якої нанесено металеві смужки 4 для відводу фотоструму. Планарна конструкція герметизована полімерною плівкою просвітлюючого шару 3 для ефективного пропускання світла і зверху закінчується скляним покриттям – на схемі не показаним. Натомість нижня поверхня напівпровідника  $p$ -типу покрита суцільним металевим контактом 5, також прикритого полімерною плівкою. Сучасні сонячні елементи перетворюють світлову енергію в електричну енергетичним к.к.д. порядку 18...22% за теоретичної межі у 28%.

При освітленні  $p$ - $n$  переходу між металевими та напівпровідниковими контактами виникають зустрічних потоків вільних зарядів обох знаків, які

називають фотострумом  $I_\phi$ . Його значення залежить від провідності матеріалів напівпровідника, концентрації носіїв зарядів та рухливості.

На противагу фотоструму зворотній темновий струм  $I_s$ , термостимульованих зарядів обох знаків, який зростає з температурою і зменшує фотоелектрорушійну силу основного струму. Цю особливість заступних схем сонячних елементів позначають діодом, напрям якого вказує на полярність джерела та напрям фотоструму, як на рисунку 2.2.

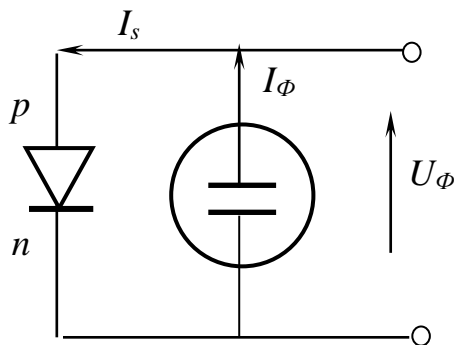


Рисунок. 2.2 – Заступна електрична схема сонячного елемента.

Значення фотонапруги  $U_\phi$ , фотоструму  $I_\phi$  і темнового струму  $I_s$  разом з температурою  $T$  пов'язані таким співвідношенням:

$$U_\phi = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_\phi}{I_s} + 1 \right). \quad (2.1)$$

У зовнішньому колі сонячного елемента з опором  $R_n$  виникає струм навантаження  $I_n$ , а фотонапруга спадає до рівня напруги на його клеммах  $U_n$ . Обидва зовнішні параметри пов'язані з внутрішніми такими співвідношеннями відповідно:

$$I_n = I_\phi - I_s \left( e^{\frac{eU_n}{kT}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

$$U_n = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_\phi - I_n}{I_s} + 1 \right); \quad (2.3)$$

Електричні параметри зовнішнього кола сонячного елемента на практиці визначають із експериментальних навантажувальних вольт

амперних (ВАХ) та вольт-ватних характеристик, як на рисунку 2.3 у вигляді двох кривих для при сталій температурі та освітленості.

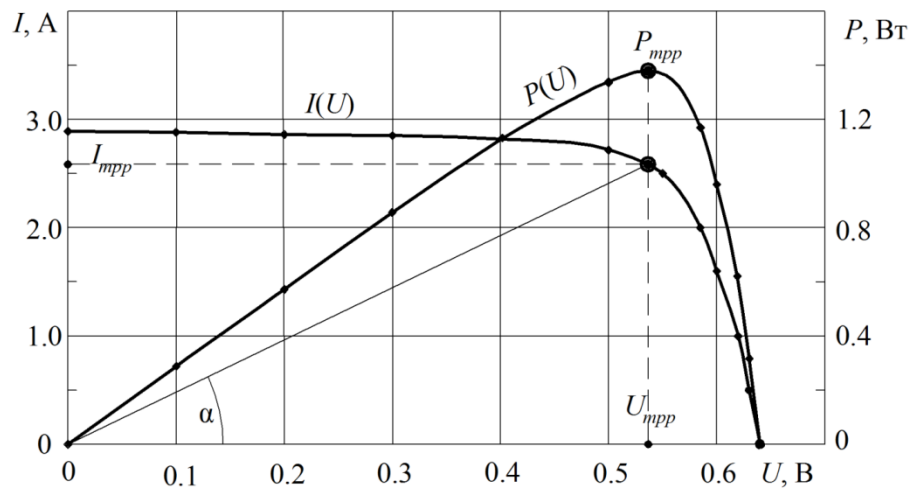


Рис. 2.3. Вольтамперна  $I(U)$  і вольт ватна  $P(U)$  характеристики кремнієвого сонячного елемента при стандартній освітленості АМ-1,5 і температурі  $0^{\circ}\text{C}$ , з точкою оптимальної потужності  $P_{mpp}$

Подібними залежностями характеризують і фотоелектричні модулі – блоку з кількох десятків сонячних елементів. Потужність навантаження  $P_n$  та його опір  $R_n$  розраховують за відомими співвідношеннями:

$$P_n = I_n U_n; \quad R_n = \frac{U_n}{I_n} = \text{ctg } \alpha, \quad (2.3)$$

або графічно – через площу прямокутника та кут нахилу його діагоналі  $\alpha$ .

Через великий внутрішній опір сонячних елементів, вольт-амперні та вольт-ватні характеристики можна побудувати для всіх режимів навантаження: від короткого замикання (кз) до неробочого або холостого ходу: (нх) та (хх) відповідно. Так само вони можуть необмежений час працювати у режимі короткого замикання, при якій уся сонячна енергія перетворюється на теплову. При цьому потрібно забезпечити умови тепловідводу для запобігання деструкції напівпровідникових матеріалів при надмірних перевищеннях їх температури.

У технічній документації на сонячні елементи наводять їх електричні характеристики необхідні для розрахунку параметрів фотоструму тільки для



сталої температури та умов освітлення, відповідного стандарту, наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Типові технічні характеристики кремнієвого сонячного елемента

Стандартна форма	Псевдоквадрат
Розмір елемента, мм	102,8x102,8
Площа сприймаючої поверхні, м <sup>2</sup>	0,38
Товщина, мкм	320±50
Напруга холостого ходу, В	0,58
Номінальна напруга, В	0,47-0,48
Номінальний струм, А	3,15
Струм короткого замикання, А	3,25
К.к.д, %	14,5
Вихідна потужність, Вт/елемент	1,5
Примітка: Величини виміряні при стандартних параметрах: 1000 Вт/м <sup>2</sup> , t <sub>сер</sub> = 25 <sup>0</sup> С	

Типові зміни вольт-амперних характеристик сонячного елемента при відхиленні зовнішніх умов від стандартних значень схематично відображають графічними залежностями, як на рисунку 2.4 [7] .

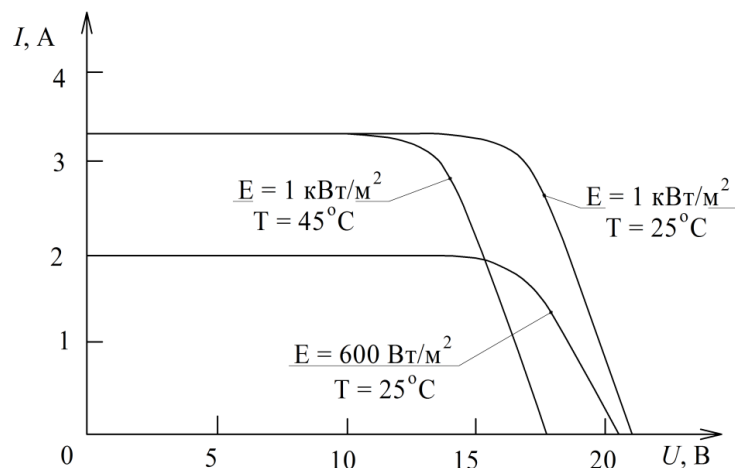


Рисунок 2.4 – Зміни ВАХ сонячного елемента з температурою та освітленістю

Коефіцієнт корисної дії сонячних елементів зменшується з температурою за лінійною залежністю [1]:

$$\eta = \eta_0 - \alpha \Delta T, \quad (2.4)$$

де:  $\eta_0$  – початкове значення к.к.д.при нижчій температурі;  $\alpha \approx -0,004 \text{ K}^{-1}$  – температурний коефіцієнт.

## 2.2 Енергетика сонячного модуля н прикладі KV55/12/24M

Діюча фотоелектрична установка житлового будинку оснащена чотирма фотомодулями вітчизняного виробництва KV55/12/24M «Квазар» номінальною потужністю 55 Вт кожен [8]. Вони складається з 36 сонячних елементів у формі квадрата розміром 102,5×102,5 мм із зрізаними кутами (псевдоквадратів) [4]. Фотомодуль призначений для індивідуального, комерційного та промислового використання. Його технічні характеристики приведені у табл. 2.2, як правило, відображають у технічному паспорті фотомодуля кожного типорозміру. При паралельному з'єднанні 4-х фотомодулів напруга не зміниться, і струми зростають учетверо, а при послідовному – навпаки.

Таблиця 2.2

Технічні характеристики сонячних елементів та фотомодуля KV55/12M

Матеріал сонячного елемента	Кристалічний кремній
Розмір елемента, мм	102,5x102,5x±2,0
Кількість елементів, шт	36
Габаритні розміри, мм	995x455x34
Площа сприймаючої поверхні, м <sup>2</sup>	0,38
Скляне покриття, мм	3
Маса, кг	6
Довжина кабеля, см	70 ... 90
Переріз провідників, мм <sup>2</sup>	1,5 ... 4,0
Максимальна потужність, Вт	55 ± 5%

Струм короткого замикання, А	3,30
Напруга холостого ходу, В	21,7
Струм у точці максимальної потужності, $I_{mpp}$ , А	3,00

## Продовження таблиці 2.1

Напруга у точці максимальної потужності, $U_{mpp}$ , В	17,0
К.к.д. модуля, %	14,9
Температурний коефіцієнт потужності	- 0,48 % / °С
Температурні межі	- 40 ... +80 °С
Номінальна напруга, В	12
Допустима напруга на фотомодулі, В	600
Точність параметрів	± 5 %
Примітки: 1) Величини виміряні при стандартних параметрах: 1000 Вт/м <sup>2</sup> , $t_{сер} = 25^{\circ}\text{C}$ ; 2) Часова стабільність: 90% потужності через 10 років і 80% через 20 років	

Фотомодулі цього типорозміру зазвичай використовуються індивідуальними, комерційним та промисловими структурами для електропостачання будинків, водяних pomp зрошувальних систем, у віддалених населених пунктах та будинках, а також наземних системах навігації. Найчастіше їх комутують на номінальне значення потужності 200 ... 220 Вт з параметрами генерації у точці максимальної потужності  $P_{mpp}$ .

Енергетичні характеристики сонячного модуля не є простою сумою таких для сонячних елементів. До того ж поточні умови освітлення і температури фотомодуля постійно змінюються, тому пов'язані з цими характеристиками умови генерації не можна відтворити масштабуванням вольт амперної і вольт ватної характеристик сонячних елементів. Для кожного модуля їх будують окремо за безпосередньо виміряними величинами на інсоляційному майданчику, або оцінюють основні параметри ВАХ за емпіричних співвідношеннями.

Енергетичні характеристики не є простою сумою фото е.р.с. та струмів сонячних елементів через додаткові втрати енергії, на з'єднувальних провідниках та інші конструкційні особливості. Їх сумарна дія на заступній схемі фотомодуля, що на рис. 2.5, відображена ефективними опорами втрат

– шунтовим  $R_{ш}$  та послідовним  $R_{п}$ . Натомість діод відображає сумарні втрати за рахунок темнових струмів у кожному елементі, а напрям його вмикання – на полярність джерела струму. Втрати внаслідок перетікання зарядів через кромку площини  $p-n$  переходу також включені у значення шунтового опору.

Вольтамперна характеристика фотомодуля подібна до такої для сонячного елемента, але на практиці її також визначають експериментально вимірюванням струму і напруги на змінному опорі навантаження при сталому освітленості його поверхні. У режимі короткого замикання опір навантаження відсутній ( $R_{н} = 0$ ), а його функцію в замкнутому колі фото генератор - навантаження виконує послідовний опір  $R_{п}$ . Тоді, згідно закону Ома для повного кола, послідовний опір можна визначити експериментально за нахилом вольт амперної характеристики до осі струмів у точці  $I_{кз}$  (див. рис. 2.3) через відношення приростів напруги та струму:

$$R_{п} = \frac{\Delta U_{кз}}{\Delta I_{кз}} \quad (2.5)$$

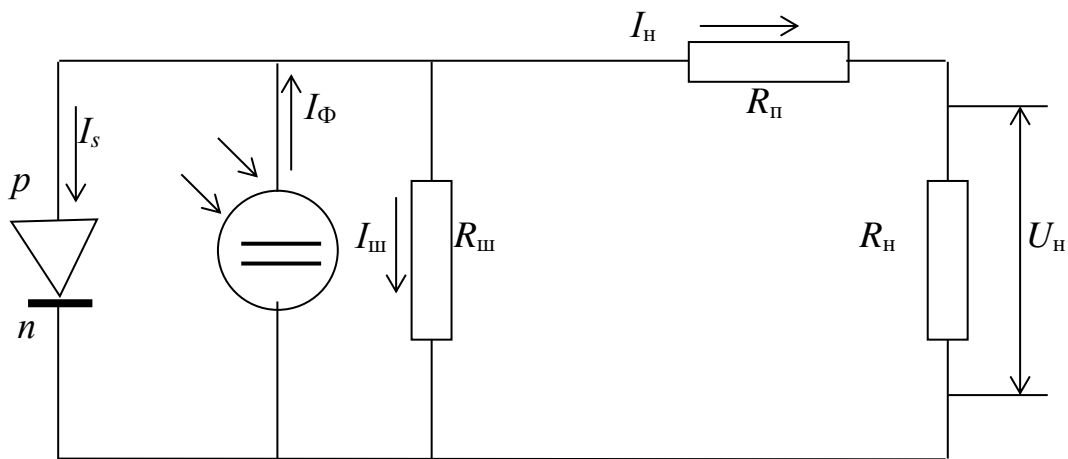


Рис. 2.5. Заступна схема фотомодуля з опорами: шунтовим  $R_{ш}$ , послідовним  $R_{п}$  та навантаження  $R_{н}$

Натомість у режимі неробочого ходу значення  $R_{п}$  прямує до безмежності і напруга  $U_{нх}$  рівна напрузі на шунтовому опорі  $R_{ш}$ , який також

можна розрахувати за відношенням приростів напруги до струму, але уже поблизу точки  $U_{нх}$  вольт амперної характеристики:

$$R_{ш} = \frac{\Delta U_{нх}}{\Delta I_{нх}} \quad (2.6)$$

Сумарний опір корисного навантаження визначають через відношення напруги до струму у відповідній точці навантажувальної (вольт амперної) характеристики фотомодуля відповідно закону Ома для ділянки кола:

$$R_{н} = U_{н} / I_{н} \quad (2.7)$$

Максимальній потужності відповідає  $P_{mpp}$  точка максимуму вольт-ватної характеристики (ВВХ) або точці вольт амперної характеристики з максимальним добутком струмів і напруги

$$P_{max} = (I \cdot U)_{max} \quad (2.8)$$

Обидва множники називають номінальними характеристиками фотомодуля, які завжди менші від максимальних струму  $I_{кз}$  та напруги  $U_{кз}$  відповідно. Усі чотири величини разом з максимальною потужністю наводять у технічній характеристиці кожного фотомодуля (див. табл. 2.1).

У моменти вмикання чи вимикання кола навантаження різко змінюється напруга на послідовному опорі  $R_{п}$ , що викликає затухаючі коливання у повному електричному колі. Амплітуда і декремент їх затухання залежить від струму навантаження  $I_{н}$ , ємності та індуктивності елементів кола. Нелінійні коливальні процеси можуть пошкодити електронні елементи схеми керування [9], але їх негативну дію можна компенсувати додатковими фільтрами.

Миттєва електрична потужність фотомодуля пропорційна енергетичній освітленості  $E$  та площі сприймаючої поверхні  $S$  і оцінюється за співвідношенням:

$$P = \eta \cdot S \cdot E \quad (2.7)$$

Протягом короткого періоду, коли умови освітлення можна вважати сталими, то при сталому опорі навантаження продуктивність фотомодуля

пропорційна тривалості освітлення  $\tau$ . Але протягом дня енергетична освітленість та к.к.д. фотоелектричного перетворення постійно змінюється разом з нею і генерована потужність. Якщо знехтувати ефектом від зміни к.к.д. з температурою фотомодуля, то поточна потужність приблизно рівна добутку двох змінних протягом дня величин

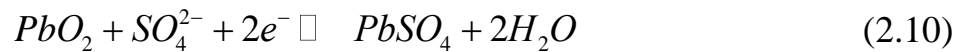
$$P(\tau)=\eta(\tau)\cdot S\cdot E(\tau) \quad (2.8)$$

Відак для повного використання потенціалу енергії сонячних променів, ще потрібно постійно узгоджувати вихідну потужність фотомодуля з навантаженням таким чином, щоб струм і напруга на клеммах відповідали точці максимальної потужності вольт амперної характеристики фотомодуля.

### **2.3 Енергетика акумулятора у фотоелектричній установці**

Проміжне акумулювання енергії фотоструму компенсує нерівномірне надходження сонячної енергії протягом дня, чим підвищує показники надійності автономного енергопостачання у короткотривалі періоди – вночі. Акумулятор автономних малопотужних фотоелектричних установок протягом дня переважно працює ще у буферному режимі – компенсації пікових вантажень та забезпечує стабільність напруги живлення при значних пускових струмах. Але при великих розрядних струмах, які перевищують номінальні значення, буферний режим несприятливий для акумулятора і може бути причиною його дочасного вичерпання його ресурсу.

Зарядно-розрядний процес в акумуляторах відбувається внаслідок оборотних електрохімічних реакцій з циклічним переносом мас і зарядів матеріалу електродів у розчин електроліту і навпаки. Свинцевий акумулятор складається з двох пластин електродів: один – металевий ( з елементарного свинцю), а другий – з його оксиду  $PbO_2$ . При їх зануренні у розчин сірчаної кислоти свинцевий електрод заряджаються позитивно, а окислений – негативно внаслідок таких оборотних електрохімічних реакцій:



При розряджанні на поверхнях обох електродів відкладається продукт реакції  $PbSO_4$  у спочатку вигляді окремих дрібних кристаликів, які з часом утворюють ніздрювату полікристалічну масу нерівномірної товщини. Другий продукт реакції – вода – зменшує концентрацію електроліту а відтак напругу на електродів. Оборотноість реакції забезпечують штучною зміною потенціалу електродів прикладанням вищої напруги до клем акумулятора або їх змиканням опором навантаження. У першому випадку відбувається заряджання акумулятора з відновленням електродів, а у другому їх розчинення в електроліті.

При тривалому розряджанні поступово нарощується товщина і щільність полікристалічної маси, яка утруднює площу контакту електролітом. У результаті багатократного повторення зарядно-розрядних циклів ефективна поверхня контакту обох електродів зменшується і як наслідок – падає ємність акумулятора. За незмінного циклічного режиму роботи фотоелектричної установки, уповільнення процесів деградації акумулятора і продовження терміну його експлуатації досягають зменшенням розрядних струмів та глибини розрядки акумулятора. Такі обмеження на практиці найпростіше реалізувати збільшенням ємності акумулятора, яку чисельно характеризують кількістю електрики ампер-годинах (А·год), а не у кулонах.

Поточний стан акумулятора часто оцінюють за напругою на його клемі, при сталому значенні номінального розрядного струму  $I_n$  протягом 20 год. За таких обмежень на електродів акумулятора накопичується шар  $PbSO_4$ , який більша частина якого розкладається при оберненому процесі заряджання з відновленням поверхні електродів до початкового стану. Але не виключається його поступове нарощування нерозчиненого залишку з кожним наступним зарядно-розрядним циклом, кількість яких відповідає

умовам експлуатації акумулятора. Номінальну ємність акумулятора зазвичай вказує виробник за результатами 20-годинної розрядки повністю зарядженого акумулятора сталим струмом до мінімально допустимого рівня  $C_{\text{доп}}$ . Його зазвичай приймають рівним 20-кратному значенню номінального зарядного струму

$$C_n = 20I_n \quad (2.11)$$

У той час поточна ємність акумулятора  $C$  може бути як меншою номінальної або навіть перевищувати її.

Зарядна ємність  $C_z$  рівна кількості електрики внесеної а в акумулятор при його заряджанні, а розрядна  $C_p$  навпаки відданій при розряджанні до мінімально допустимого стану:

$$C_z = C - C_d ; \quad C_p = C - C_{\text{доп}} \quad (2.12)$$

Зарядна ємність завжди більша за розрядну внаслідок роботи з переміщення зарядів з точки нижчого потенціалу до вищого. Тому зарядний стан акумулятора зазвичай оцінюють відносно його номінальної ємності, використовуючи її зв'язок з напругою неробочого  $U_{\text{нх}}$  ходу на клеммах акумулятора – при розімкненому колі живлення. Обидві величини пов'язані між собою такими емпіричними співвідношеннями:

$$U_{\text{рк}} = 11,40 + 0,0017 \times 100C / C_n \quad (2.13)$$

$$C = \frac{U_{\text{рк}} - 11,40}{0,17} C_n \quad (2.14)$$

На практиці користуються графічно залежністю, наведеною на рисунку 2.6.

Номінальну ємність зазвичай встановлює виробник за результатами 20-годинної розрядки повністю зарядженого акумулятора сталим струмом до мінімально допустимого рівня  $C_{\text{доп}}$ , від якого можна забезпечити повторне зарядження акумулятора без помітної зношування електродів. Це значення мінімально допустимої залишкової ємності називають розрядною  $C_p$ . При більших розрядних ступенях напруга мінімально допустима напруга на акумуляторі зменшується, а при менших навпаки – зростає.



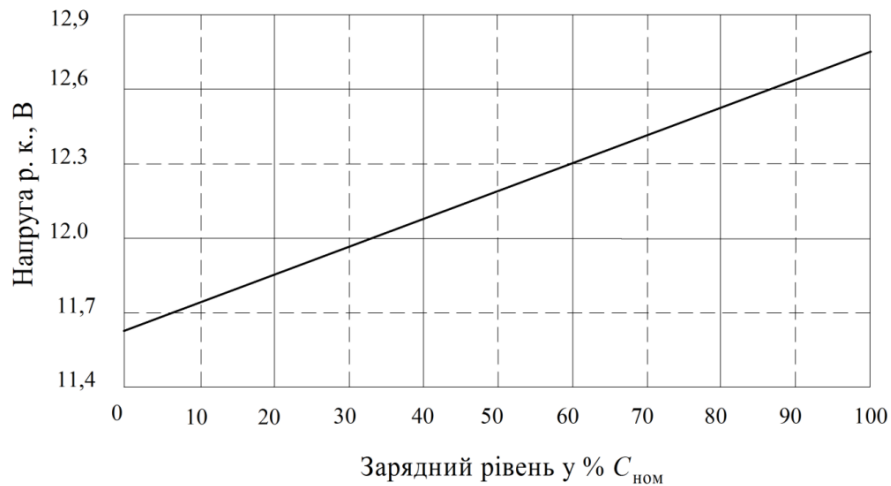


Рисунок 2.6 – Залежність напруги розімкненого кола від заряду акумулятора

Зарядний стан акумулятора зручно виражати у відносних величинах, як частку або відсоток номінальної розрядної ємності, які називають ступенем (рівнем) заряду. Причому використовують два напрямки відліку: за ступенем заряду або навпаки – за ступенем розрядки. Нульовому ступеню зарядки (або  $0\%C_n$ ) відповідає мінімально допустима ємність акумулятора, а одиниці (або  $100\%C_n$ ) – номінальна ємність. За ступенем розрядки відлік проводять у протилежному напрямку [6]. З часом акумулятор втрачає здатність зберігати енергію, тому після зменшення відносної ємності до рівня  $80\%C_n$  його виводять з експлуатації.

Розрядні і зарядні струми різних за типом і ємністю акумуляторів зручно вимірювати у «природних» для них одиницях, чисельно рівних тривалості розрядки номінальної ємності. Наприклад акумулятор номінальною ємністю 60 А·год протягом 10 год розряджається 6-амперним струмом, значення кого записують так:  $I_{10} = C/10$  або  $0,1C$ . Натомість 3-амперний струм розряджає його протягом 20 год і його позначають як  $I_{20} = C/20$  або  $0,05C$ .

Зарядний процес прискорюють підвищенням зарядної напруги. При цьому зростають непродуктивні втрати за рахунок зростання опору електроліту і поляризації електродів, але з підвищенням температури акумулятора. При розряджанні відбувається обернений процес з втратами такої ж природи, які зростають з підвищенням розрядного струму. Спрощена

схема зарядно-розрядного процесу акумулятора, на якій вказано поточні зміни напруг на його, клеммах наведено на рисунку 2.7.

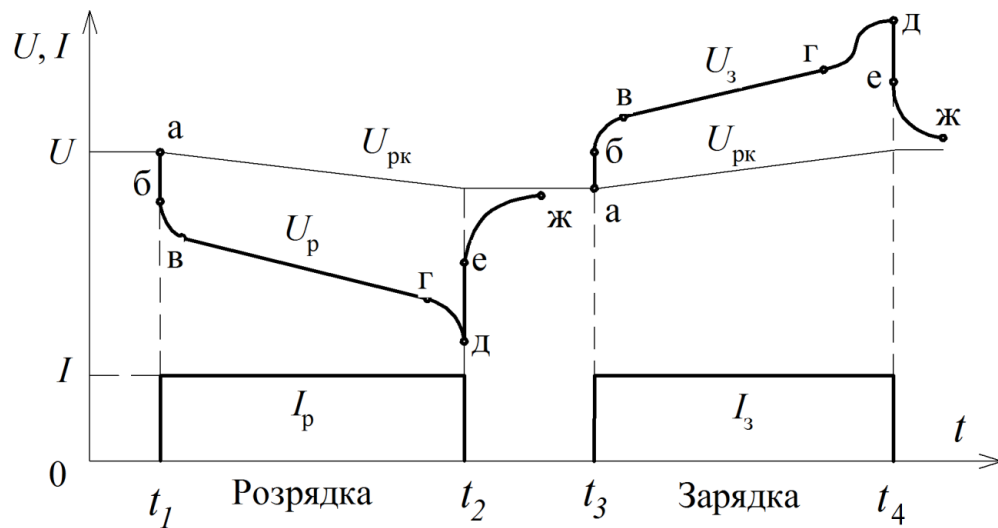


Рисунок 2.7 – Енергетична схема зарядно-розрядного циклу акумулятора:

$U_{рк}$  – напруга розімкненого кола;  $U_p$ ,  $U_з$  – напруга розрядження і зарядження відповідно;  $I_p$ ,  $I_з$  розрядний і зарядний струми відповідно; ділянки а-б, де – спад напруги на активному опорі; б-в, е-ж – напруги поляризації;

Усі опори всередині акумулятора можна умовно звести до суми активного опору електроліту проходженню струму  $R_a$  та опору поляризації електродів  $R_n$ . Спади напруги на них залежать від величини розрядного  $I_p$  чи зарядного  $I_з$  струмів, які на рисунку для наочності їх прийнято однаковими. За рахунок зменшення обох струмів можна зменшити різницю між обмеженими пунктиром площами і відповідно підвищити ефективність обох ділянок зарядно-розрядного циклу.

Внаслідок обох процесів зарядно-розрядного циклу на клеммах акумулятора виділяється енергія розряду  $W_p$ , значно менша за вхідну енергію заряду  $W_з$ . Їх відношення рівне к.к.д. зарядно-розрядного циклу, який ще називають коефіцієнтом віддачі по енергії  $\eta_w$ :

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_з} \quad (2.15)$$

Глибину (амплітуду) зарядно-розрядного циклу характеризують зміною зарядної  $\Delta C$  (*charge*) та розрядної  $\Delta D$  (*discharge*) ємності [7]. Їх відношення називають коефіцієнтом віддачі за ємністю або ефективністю заряду  $\eta_q$ ,

$$\eta_q = \frac{\Delta D}{\Delta C} \quad (3.2)$$

Зарядну ефективність (або віддачу за ємністю) свинцево-кислотних акумуляторів за невеликих зарядного і розрядного струмів  $I < 0,1C$  в області ємностей від 10 до 75...80% $C_n$  приймають рівною 0,95 або 95% [13,18]. Ефективність після заряджання понад 75...80 % $C_n$  різко зменшується. Відтак у системах автономного електропостачання від фотоелектрики вищого ступеня зарядженості доцільніше уникати, як і відповідних форсованих режимів так заряджання чи розряджання.

З міркувань продовження ресурсу акумулятори не рекомендують розряджати нижче рівня 30% $C_n$ . А з метою мінімізації втрат, ємність акумулятора слід використовувати в інтервалі від 30 до 80% $C_n$  – тобто доцільно використовувати лише 50% номінальної ємності. На цій ділянці за сталих струмів зарядно-розрядні характеристики практично лінійно змінюються з часом, а енергетичну ефективність зарядно-розрядного циклу можна розрахувати за такими співвідношеннями:

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_z} = \frac{\bar{U}_p}{\bar{U}_z} \cdot \frac{D}{C} = \eta_u \cdot \eta_q \quad (2.16)$$

де відношення середніх зарядної і розрядної напруг  $\eta_u = U_p / U_z$  – називають коефіцієнтом зменшення напруги.

Швидкість заряджання акумуляторів зростає при збільшенні напруги на його клеммах, але при цьому її ефективність обмежується поляризаційними явищами. Одночасно підвищенням ступеня зарядки збільшується напруга розімкненого кола  $U_{pk}$  і для продовження зарядного процесу необхідне випереджуюче зростання зарядної напруги. При наближенні до номінального

зарядного стану додаються ще втрати на газовиділення через інтенсифікацію електролізу. Відповідно зменшується ефективність зарядно-розрядного циклу. Відтак додатковою умовою ефективної роботи системи фотомодуль-акумулятор при змінних режимах освітлення і навантаження є відповідність точки максимальної потужності генерації і сумарній потужності споживання у зовнішньому колі. За наявності кількох споживачів, узгодження реалізують оперативним перерозподілом генерованої потужності між двома паралельно сполученими споживачами – акумулятором і корисним навантаженням. Такий перерозподіл має виконувати комутатор струмів навантаження з функцією пріоритетності вмикання кожного навантаження.

Напруга фотомодуля у точці оптимальної потужності при стандартному освітленості AM1,5 значно перевищує інтервал зарядних напруг кислотного акумулятора. Обидві напруги зближаються при підвищенні температури фотомодуля і менш помітно при зміні його освітленості, як показано на рисунку 2.8.

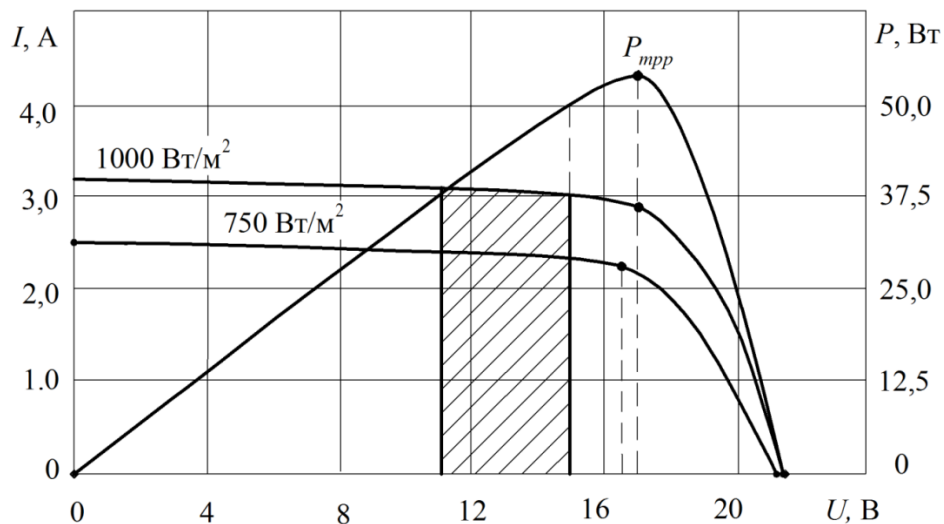


Рисунок 2.8 – Інтервал оптимальних зарядних струмів та напруг  
Точка  $P_{mpp}$  практично завжди правіша інтервалу оптимальних зарядних напруг, навіть без використання  $P_{mpp}$  регуляторів зарядного струму. Відтак надлишкову потужність генерації між двома пунктирними прямими на рис. 2.8, можна скерувати на паралельне живлення корисного навантаження,

мінімізуючи надмірні втрати дефіцитної фотоелектрики під час енергетично неефективного заряджання акумулятора понад номінальну ємність.

Якщо протягом дня продуктивність фотомодуля недостатня для повного заряджання акумулятора, то потрібно частково обмежити струм навантаження до рівня, живлення тільки найнеобхідніших приладів. При цьому функція обмеження має вмикатися і вимикатися автоматично, відповідно поточному значенню напруги на клеммах акумулятора. За відсутності запиту на фотоелектрику з боку корисного навантаження, усю генеровану потужність доцільно використовувати на дозарядку акумулятора або компенсацію енергії саморозряду. Відповідний графік режимів зарядно-розрядного процесу наведений нижче на рисунку 2.9 [7].

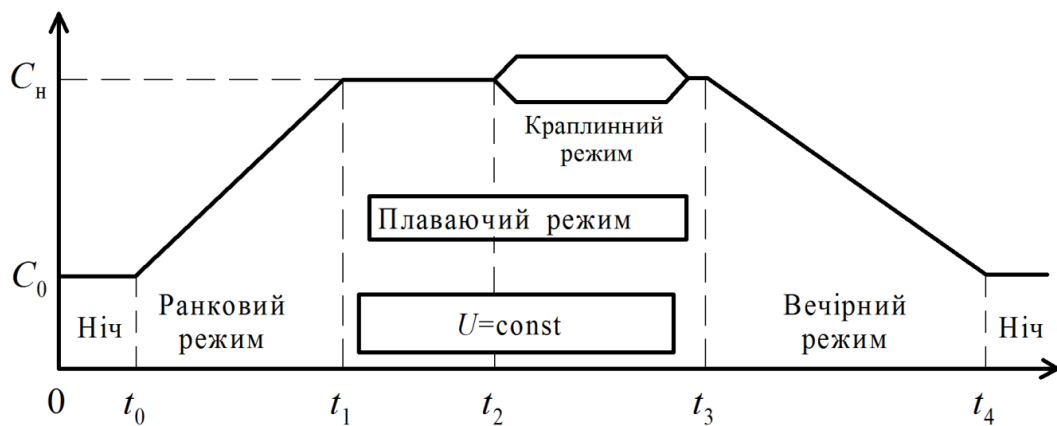


Рисунок 2.9 – Добовий алгоритм заряд-розрядного циклу акумулятора  
Ємність акумулятора у складі ФЕУ зазвичай рекомендують [3,7]

вибирати такою, щоби протягом 4-х годин (до полудня) зарядити до рівня 75...80% $C_n$ , а решту світлового дня дозаряджати до вищого можливого рівня під час технологічних перерв живлення приладів корисного навантаження. Якщо такий графік зарядно-розрядного циклу проводити у межах від мінімального рівня  $C_{\min} = 30\% C_n$  до максимального 80%  $C_n$ , з використанням лише половини номінальної ємності, то показник ефективності заряду  $\eta_q \rightarrow 1$ . Тоді для накопичення добового запасу енергії потрібно обирати акумулятор удвоє більшої номінальної ємності за добову продуктивність фотомодуля.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ

#### 3.1 Вибір схеми комутації ФЕУ

Фотоелектрична установка складається з чотирьох фотомодулів типу KV55M загальною потужністю 220 Вт. При їх паралельному з'єднанні максимальний струм у точці максимальної потужності рівний 12А, а у випадку короткого замикання не перевищує 13,2 А. За таких струмів для комутації фотомодулів необхідно використовувати силову електроніку з малими втратами, захистом елементів, чутливих до перенапруг при комутації нелінійних елементів, та інших небезпечних явищ.

У наведених на рисунку 2.4 двох варіантах схеми комутації, вітки акумулятора і корисного навантаження паралельні клемам фотопанелі. Поточні характеристики цих трьох елементів фотоелектричної установки взаємопов'язані і протягом дня постійно змінюються внаслідок незалежно діючих природних та експлуатаційних процесів. Тому максимальної ефективності фотоелектричної установки можна досягнути постійним узгодженням змінних показників роботи кожного елемента системи.

В ідеальному випадку сонячні панелі генерують фотострум з параметрами точки максимальної потужності, а корисне навантаження, разом з акумулятором, споживають усю генеровану фотоелектрику з мінімальним побічним втратами. Ідеальний зарядний пристрій скеровує частину фотоелектрики на заряджання акумулятора з мінімальним втратами і без відхилення фотопанелі від режиму генерування у точці максимальної потужності, а решту енергії – віддає корисному навантаженню.

Для організації паралельного живлення акумулятора та споживача необхідно ускладнити схему пристрою, який при наближенні напруги на акумуляторі до заданого зарядного рівня, вмикає дозвіл на паралельну роботу інших споживачів. Тоді процес зарядки продовжується у так званому

плаваючому режимі з мінімальним зарядним струмом. Подібним чином слід розподіляти навантаження між споживачами першої та другої черги важливості з метою узгодження точки максимальної потужності  $P_{mpp}$  корисного навантаження.

На рисунку 3.1 наведена існуюча схема комутації силових елементів фотоелектричної установки, яка цим вимогам відповідає лише частково, бо не передбачає механізму зміни струмів навантаження. У схемі комутації також передбачено запобігання аварійній внаслідок випадкового перевищення зарядного струму і перезарядки акумулятора. Найчастіше це відбувається завдяки атмосферним явищам, тому для відповідного захисту елементів ФЕУ у схему внесено варистор – резистор з різким зменшенням опору при перевищенні порогової напруги. А для захисту від перегріву силових транзисторів при великих струмах їх обов’язково монтують з охолоджувальним радіаторами.

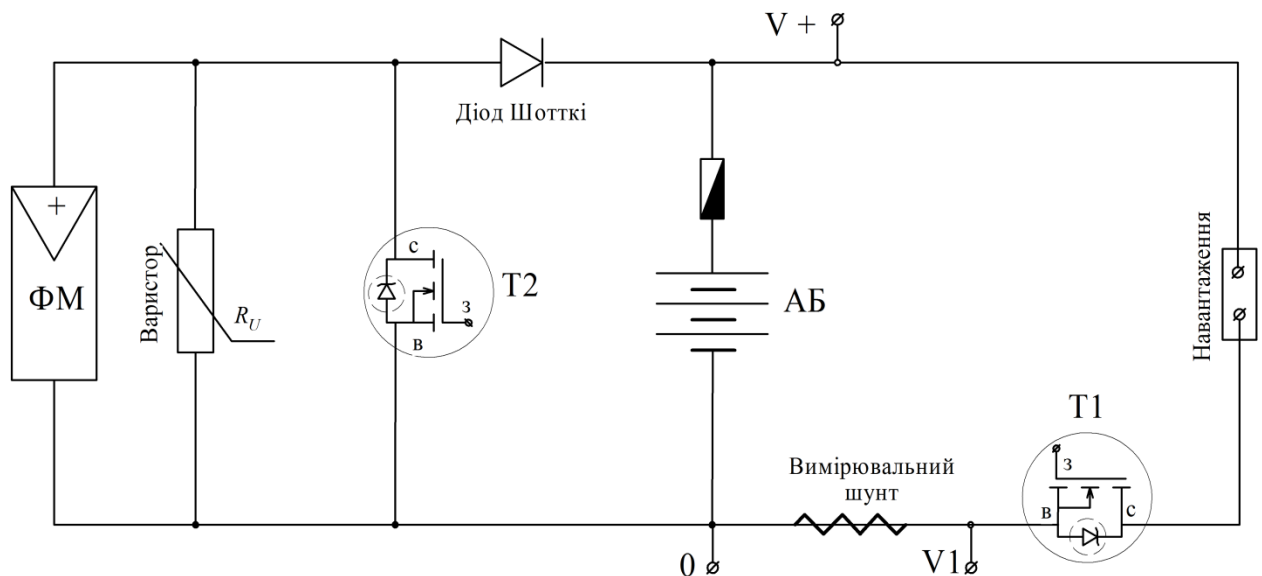


Рисунок 3.1 – Схема комутації силових елементів фотоелектричної установки з додатковим вимірювальним шунтом

Згідно вимог міжнародних стандартів, необхідно передбачити відповідне схемне блокування екстраструмів що виникають при перехідних процесах на нелінійних елементах схеми: двопозиційних регуляторів з широтно-імпульсною модуляцією зарядного струму або перетворювачах

напруги. Небезпека пошкодження комутаційного транзистора іноді трапляється з недосвідченим користувачами при неправильно зібраній схемі, з переплутаною полярністю модуля і акумулятора. Від останнього захищає плавкий запобіжник, ввімкнений послідовно з акумулятором.

У схемах комутації доцільно використовувати енергетичні польові транзистори з внутрішнім двостороннім стабілітроном (freewalk-діодом). Вони витримують тривалий аварійний режим без руйнування за умови доброго тепловідводу, що видно на прикладі заведених у таблиці 3.1 з характеристиками польових транзисторів IRFZ40 та IRFZ40F1 відомої фірми SGS-THOMSON microelectronics.

Таблиця 3.1

## Характеристики енергетичних польових транзисторів

Познач.	Параметр	Значення		Од. вим.
		IRFZ40	IRFZ40F1	
$U_{DS}$	Напруга сток-витік ( $U_{GS}=0$ )	50	50	В
$U_{DGR}$	Напруга сток-затвор ( $R_{GS}=20 \text{ К}\Omega$ )	50	50	В
$U_{GS}$	Напруга затвор-витік ( $U_{GS}=0$ )	$\pm 20$		В
$I_D$	Струм стоку при $20^\circ\text{C}$	50	27	А
$I_D$	Струм стоку при $100^\circ\text{C}$	35	19	А
$I_{DM}$	Струм стоку (імпульсний)	200	200	А
$P_{tot}$	Розсіювана потужність	150	45	Вт
$T$	Температурний інтервал	-65...175		$^\circ\text{C}$

### 3.2 Алгоритм роботи базової схеми

Схему керування режимами навантаження пропонується розробити доповненням до існуючого шунтового регулятора зарядного струму, наведеного на рис. 3.2, який працює за таким алгоритмом.

Нехай на момент вмикання схеми акумулятор розряджено нижче номінального рівня. Тоді у точці  $C$  між стабілітроном  $D3$  та резистором  $R3$



встановиться опорна напруга  $U_{on} = 8\text{ В}$ , яка через потенціометри  $P_1$  і  $P_2$  подається на входи, компараторів  $IC1a$  та  $IC1b$  збірки  $LM324$ . У лівий компаратор  $IC1b$  опорна напруга  $U_{on}$  подається на інвертувальний вхід 6 і порівнюється з потенціалом точки  $A=U_c$ , який рівний половині напруги між клемми акумулятора.

Оскільки на момент вмикання схеми акумулятор частково розряджений, то опорна напруга більша за середню:  $U_{on} > U_c$ . На виході лівого компаратора та затворі польового транзистора  $T_2$  встановлюється початковий додатній потенціал. Транзистор  $n$ -типу з таким потенціалом затвора закритий, і весь фотострум скеровується на зарядку акумулятора. Про стан зарядки сигналізує зелений світлодіод, заживлений з виходу лівого компаратора.

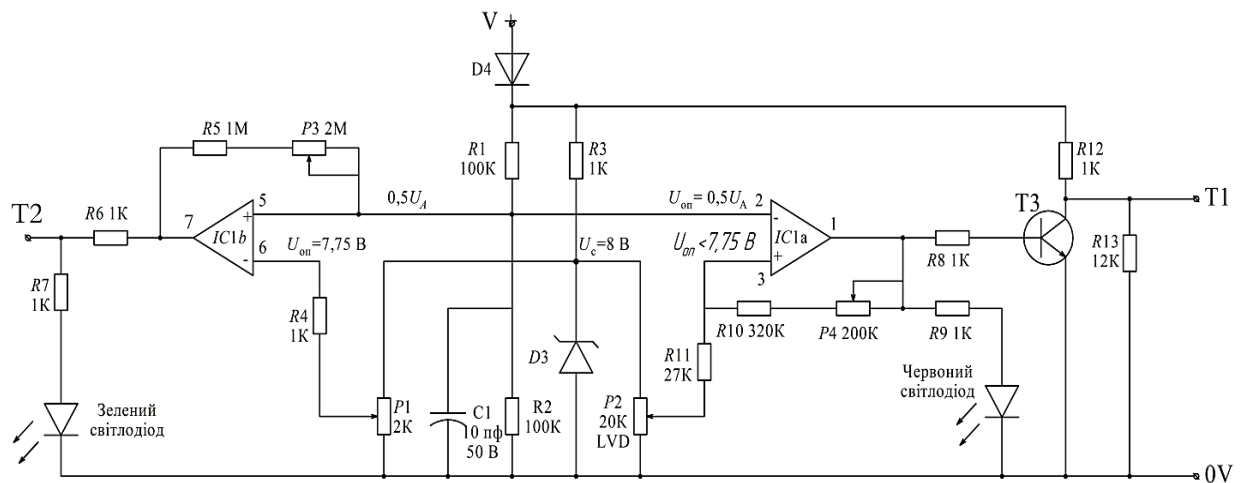


Рисунок 3.2 – Схема шунтового регулятора зарядного струму

Вихід правого компаратора у початковий момент має низький рівень (логічний нуль), який подається на базу транзистора  $T_3$ . За такої на пруги на базі транзистора  $T_3$  залишається закритим. Останній струму не проводить, тому потенціал його колектора є додатнім і рівним потенціалу середньої точки між резисторами  $R_{12}$  і  $R_{13}$ . Під цим же потенціалом знаходиться і затвор польового транзистора  $T_1$ , який керує струмом живлення для корисного навантаження. Оскільки транзистор  $T_1$  також відноситься до  $n$ -типу, то живлення корисного навантаження блокується до завершення зарядки

акумулятора. Про заборону живлення корисного навантаження сигналізує червоний світлодіод, що живиться з виходу правого компаратора.

У процесі зарядки напруга на кінцях варистора зростає і залишається рівною напрузі на клеммах акумулятора. Якщо при досягненні заданого рівня заряду акумулятора (наприклад понад 14,5 В) відсутній запит на генеровану фотомодулем потужність, помітно зростає провідність шунтуючого варистора, який обмежує зарядний струм – регулятор переходить на режим дозарядки зменшеним струмом. Натомість за наявності споживача напруга на клеммах не перевищує поріг спрацювання варистора і акумулятор працює у буферному режимі – одночасної зарядки у «плаваючому» режимі та підтримки живлення споживача.

Значення опорних напруг на обох компараторах можна змінювати за допомогою двох потенціометрів  $P_1$  та  $P_2$ , тому зміна знаку потенціалу на їх виходах може відбуватися неодноразово. Завдяки цьому можна вибирати рівень напруги, при якому допускається вмикання корисного навантаження при продовженні процесу зарядки. Така особливість дозволяє керувати величиною зарядного струму за гнучким алгоритмом відповідно до зміни потреби у фотоелектриці.

Після досягнення заданої напруги зарядки потенціали опорної і контрольної напруг на лівому компараторі зрівнюються. На його виході змінюється полярність на від'ємну. При цьому відкривається шунтовий польовий транзистор  $T_2$  фотомодуль закорочується, зарядка і живлення корисного навантаження припиняється. Одночасно гасне зелений світлодіод, який вказує на відсутність фотоструму. Якщо ввімкнути живлення навантаження обмеженої потужності при наближенні напруги на акумуляторі до стану насичення, то контрольна напруга зростати не буде і використання енергії фотомодуля продовжиться до заходу Сонця.

### 3.3 Розробка схеми регулятора струму навантаження

Наведена вище схема шунтового регулятора не наділена функцією обмеження споживаної потужності, що загрожує дочасній розрядці акумулятора понад встановлений мінімальний рівень. Тому, за прогнозованого дефіциту зарядної ємності доцільніше розробити додатковий захист від перевищення струму навантаження, так само як і від екстраструмів короткого замикання. Його пропонується реалізувати розширенням правої частини схеми шунтового регулятора, що дозволяє мінімізувати затрати на придбання нових елементів.

За схемним рішенням на рисунку 3.3, у коло живлення струм подається лише при перевищенні опорної напруги на вході 3 компаратора IC1a над потенціалом точки А, який рівний половині напруги акумулятора. Тоді на виході 1 компаратора IC1a встановлюється стійкий нульовий потенціал (логічний нуль), який при подачі на базу ключа транзистора Т4 закриває його. Відповідно на затвор силового транзистора Т1 подається додатній сигнал через проміжний резистор R12.

У типову схему комутації ФЕУ внесено вимірювальний шунт для контролю за величиною струму кола споживання (рис. 3.3). Завдяки йому між виходом транзистора навантаження Т1 і спільною контрольною точкою 0V, виникає різниця потенціалів лише при наявності струму живлення. Він пропорційний споживаному струму і подається на вхід 12 компаратора IC1d. З точки С стабілітрона D3 через резистивний подільник R19 – P5 на вхід 13 цього ж компаратора подається невелика стабілізована додатна напруга  $\Delta U_c$ . За умови  $V1 < \Delta U_c$ , на виході 14 зберігається стійкий низький рівень 0V (стан логічного нуля). Такий же рівень має вхід 10 та вихід 8 другого компаратора IC1c, які сполучені резисторами R14 і R20, а також напруга на електролітичному конденсаторі C4, сполученого з ними через резистор R17.

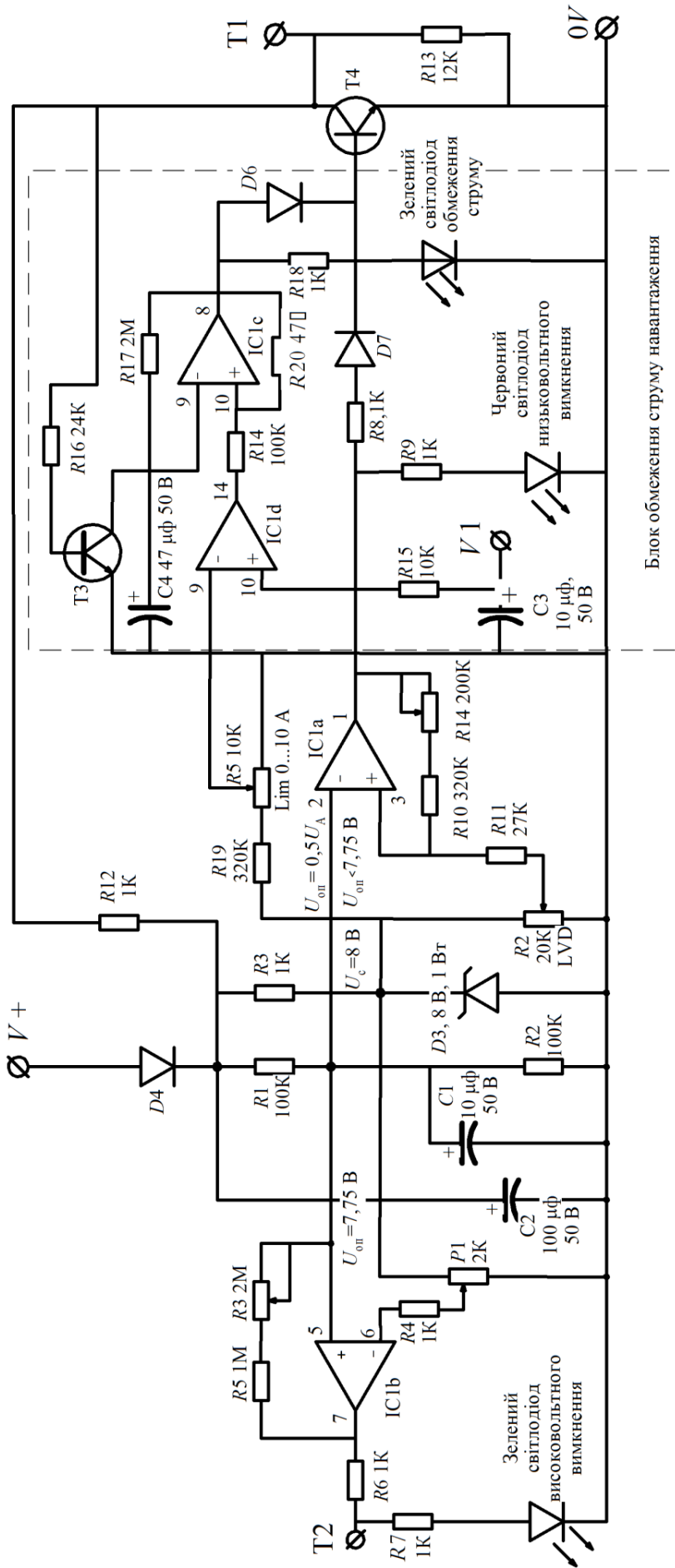


Рисунок 3.3 – Схема вдосконаленого шунтового регулятора

з обмеженням струму споживання

При перевищенні обумовленого рівня споживаної потужності, потенціал на вході 12 (сполученої з вимірювальним шунтом) також перевищує встановлений опорний потенціал входу 13, а на виході 14 початковий нульовий рівень змінюється високим рівнем +12 В (логічною одиницею). Цей сигнал через ланцюжок  $R14 - R20 - D6$  подається на базу  $T4$  і вхід 8, заряджає конденсатор  $C4$  через резистор  $R17$ , а також підвищує потенціал інверсного входу 9 компаратора  $1C1c$ .

У початковий момент перевищення струму споживання, внаслідок спаду напруги на резистивному подільнику, напруга на вході 10 досягає 8 вольт, а на виході 8 компаратора  $1C1c$  +4 В. У момент зрівнювання потенціалів входів 10 і 9 на виході 8 формується високий рівень, потенціал якого з одного боку відкриває транзисторний ключ  $T4$ , а з другого – заряджає електролітичний конденсатор  $C4$ . За відкритого транзисторного ключа  $T4$  падає потенціал затвору силового транзистора  $T1$  і струм живлення припиняється.

Конденсатор  $C4$  має велику ємність, тому заряджається і розряджається через великий опір  $R17 = 2 \text{ МОм}$  порівняно довго, і з його завершенням напруга на інверсному вході 9 стає рівною напрузі конденсатора. Але протягом тривалого часу зарядки потенціали виходу 14 і входу 10 знову відновились до початкового нульового рівня через відсутність напруги зміщення на струмовимірювальному шунті. Внаслідок зміни потенціалу 10 відносно 9 на виході 8 компаратора  $1C1c$  також відновлюється початковий нульовий рівень, але з певною затримкою у часі, необхідному для компенсації залишкового заряду конденсатора.

У схему обмежувача струму додатково внесено електролітичний конденсатор  $C3$  з послідовно сполученим резистором  $R15$  у якості фільтра для згладжування екстраструмів комутації живлення (високочастотних гармонік). З огляду на безпеку роботи фотоелектричної установки під час грози, її необхідно заземляти. Щоб не завадити роботі схеми обмеження

струму споживання, контур заземлення з'єднано з від'ємною віткою комутаційної схеми у точці 0V з протилежно кінця вимірювального шунта.

### 3.4 Блок індикації та розподілу струму навантаження

Підвищення надійності електропостачання від автономної генератора обмеженої потужності вимагає додаткового впорядкування графіку споживання пристроями усіма електроприладами. В автономних установках з дефіцитом потужності усі споживачі доцільно розділити на групи за їх пріоритетом. Наприклад у першу чергу обмежувати тривалість роботи приладів найбільшої потужності, а в останню – найнеобхідніші, наприклад засоби зв'язку чи життєзабезпечення персоналу. Обмеження за потужністю найпростіше впорядкувати за спадом напруги на акумуляторі який пропорційний струму навантаження за допомогою комутатора напруг. Його пропонується виконати розширенням функцій інтегральної мікросхеми IC1LM3914 для індикації напруг постійного струму [11] за допомогою світлових індикаторів, на виходах від 11 до 18 включно, які ще подаються на зовнішню клемну колодку, як це показано на рисунку 3.4

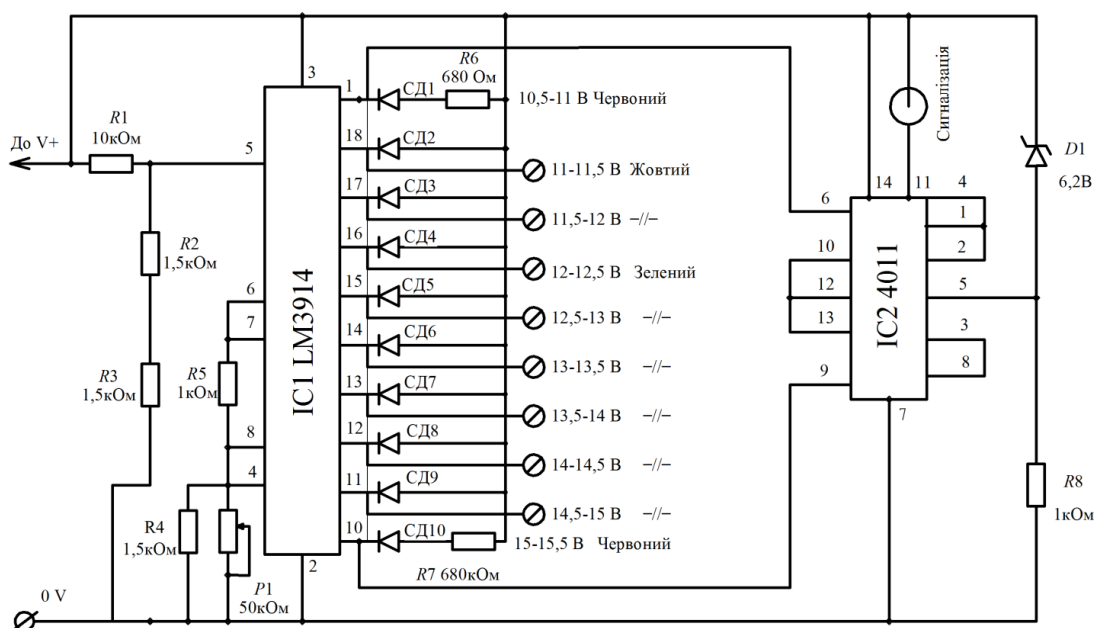


Рисунок 3.4 – Схема індикації та комутації струмів на базі мікросхеми IC1LM3914

Інтервал напруг 11 - 11,5 В наприкінці розряду акумулятора виділено для живлення найнеобхідніших приладів, які будуть відімкнені ще до повного розряджання акумулятора нижче ємності 10%  $C_{\text{ном}}$  (див. графік на рисунку 2.6). У нижчому діапазоні напруг спрацьовує аварійна сигналізація. Натомість живлення двох інших групи навантажень передбачається подавати тільки при вищих значеннях напруги в інтервалах 15,5 - 12 В і 12 - 12,5 В. При зменшенні напруги на акумуляторі за нижчу межу виділеного інтервалу спрацьовують контакти релейних вимикачів. Розроблена схема проходження керуючих сигналів до контактів вмикання відповідних груп навантажень, наведеною на рис. 3.5.

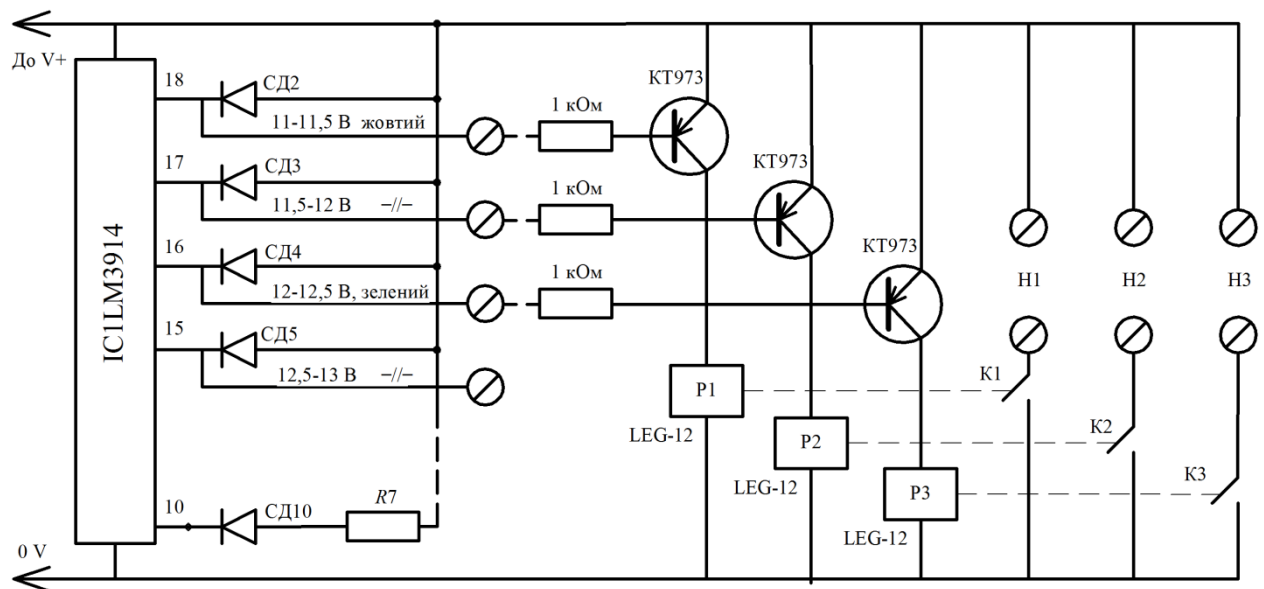


Рисунок 3.5 – Схема перемикача навантажень за їх пріоритетом

Наведена схема може обмежувати малопотужних споживачів з великими пусковими струмами. Так само як нагальна необхідність проведення термінових робіт при нештатних ситуаціях. Для таких випадках потрібно забезпечити можливість живлення потужніших приладів безпосередньо з клем акумулятора за будь-якого зарядного стану акумулятора.

### 3.5 Вибір акумулятора і параметрів його роботи

Для безпеки акумулятора при роботах з пристроями великої потужності важливо не перевищити допустимих розрядних струмів та недопустимого зменшення напруги на клеммах. Важливим експлуатаційним критерієм також є тривалість розрядки акумулятора у понад номінальних режимах навантаження, що приводить до дочасного зменшення його ємності. Для таких умов експлуатації у ланцюг аварійного живлення доцільно ввести додаткові контрольно вимірювальні прилади. Від можна уникнути небезпечних для персоналу режимів експлуатації акумуляторів, передчасного зменшення їх ємності та зростання втрат на їх обслуговування.

Розрядні струми акумуляторів прийнято характеризувати в одиницях ємності: наприклад струм розрядки акумулятора ємністю 50 А·год величиною 0,1С рівний  $0,1 \cdot 50 = 5$  А. Для такого показника встановлено відому залежність напруги на клеммах акумулятора від часу розрядки до безпечного нижнього рівня залишкової напруги. Її графічну ілюстрацію наведено на рисунку 3.6, де суцільними лініями показано величину розрядного струму, вираженого в одиницях номінальної ємності.

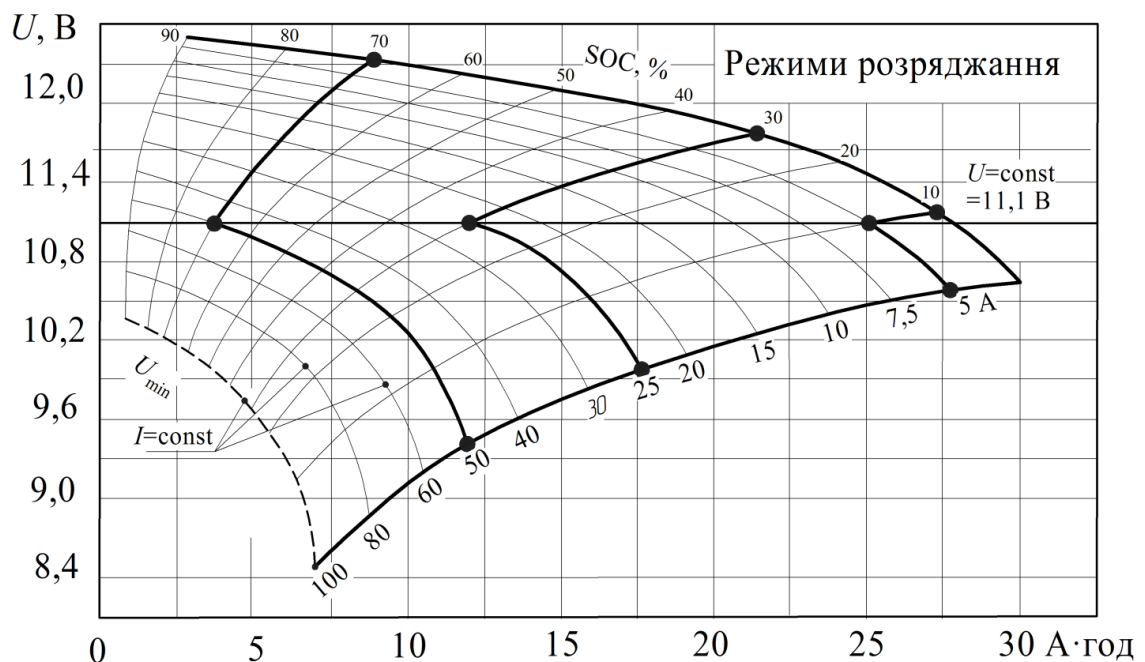


Рисунок 3.6 – Безпечні режими розрядання акумулятора



Пунктирною лінією окреслено нижню межу напруги розрядки, перехід через яку істотно скоротить термін експлуатації акумулятора. Повна розрядка акумулятора до рівня нижче  $C_{\text{доп}}$  і тривале перебування у цьому стані заперечує можливість його відновлення через незворотну хімічну реакцію відновлення елементарної сірки. Натомість обмеження глибини розрядки дозволяє суттєво збільшити ресурс роботи акумулятора, який вимірюють кількістю заряд-розрядних циклів. Наприклад, при циклічній розрядці свинцевих акумуляторів до рівня, не нижчого на 30% номінальної ємності, ресурс акумулятора зростає до 1200 циклів, що у 3,3 рази перевищує тривалість роботи при звичних глибших розрядженнях.

Дуже важливим фактором для безперебійної роботи акумуляторів є правильний вибір величини зарядного струму, значення якого наводиться у технічній документації виробника. Найчастіше рекомендують струм величиною  $I_z = 0,1C$ , за якого номінальна ємність досягається протягом 10 год. Такий режим зарядки допустимий влітку, коли тривалість сонячного сяйва перевищує 10 год. Натомість взимку, коли тривалість дня зменшується до 8 год доцільно перейти на режим з підвищеним струмом  $I_z = 0,2C$  або, що краще для надійності роботи акумулятора – зменшити ємність акумулятора вдвоє.

Якщо для збільшення ресурсу акумулятора глибину розрядки обмежити рівнем у  $100 - 30 = 70\%$ , замість зазвичай прийнятих 50%, то ємність акумулятора слід вибирати на 70% вищою за середньодобову потребу споживання акумуляованої накопиченої енергії.

Автомобільні акумулятори великої ємності зазвичай працюють при великих струмах: енергоощадний зарядний струм акумулятора ємністю 90 А·год становить 9 А, тоді як струм 4-х паралельних фотомодулів KV55 у точці оптимальної потужності не перевищує 13,2 А. В автономних інсталяціях автомобільні акумулятори не бажано заряджати до рівня понад 80% номінальної ємності через підвищені втрати дефіцитної електрики фотоелектричної генерації.

Якщо для продовження ресурсу акумулятора використовувати тільки половину його номінальної ємності, то 90 А·год акумулятор може при мінімальних втратах накопичувати та віддавати електричну енергію в об'ємі

$$W_{\text{ел}} = 0,5 \times 90 = 45 \text{ А}\cdot\text{год або } 45 \times 12 = 540 \text{ Вт}\cdot\text{год} = 0,54 \text{ кВ}\cdot\text{год}$$

Згідно даним, наведеними на сайті Американського аерокосмічного агентства [5], середньодобове надходження сонячної енергії на поверхню в околицях Львова, нахилену під кутом  $50^\circ$ , влітку становить 4,33, а взимку – 1,47 кВт·год/м<sup>2</sup>. За середнього к.к.д фотоелектричного перетворення фотомодулів  $\eta = 14,9\%$  чотири фотомодулі генерують 0,981 та 0,506 кВт·год/м<sup>2</sup> або 81,7 і 42,2 А·год/м<sup>2</sup> відповідно. Відтак для умовних 4-х модулів KV-55M влітку доцільно використовувати акумулятор ємністю у 160, а взимку – 80 А·год. Якщо ж протягом року використовувати тільки акумулятор великої ємності, то взимку він буде працювати у сприятливіших умовах з меншими струмами та рівнем розрядки, що сприяє подовженню терміну його експлуатації при мінімальних втратах зарядно-розрядного циклу.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ**

#### **4.1 Загальні питання безпеки роботи з сонячними панелями**

Сонячні панелі складені з сонячних модулів, які генерують постійний струм напругою близько 22 при розімкненому зовнішньому колі та близько 15 вольт при розімкненому. При їх комутації у сонячні батареї напруга зростає до рівня, яка при збігу обставин може становити реальну небезпеку персоналу. Тому правила поводження з ними такі ж як і при роботі на електроустановках змінного струму. Монтаж, експлуатація і технічне обслуговування системи сонячного електропостачання вимагає відповідного рівня технічних знань і дотриманням загальних правил техніки безпеки при електромонтажних та налагоджувальних роботах.

#### **Робоче місце та оцінка ризиків**

Усі роботи, як правило, ведуть на висоті, поряд з повітряними лініями електропередачі, які вимагають додаткових організаційних заходів для безпеки. Перед початком робіт потрібно відвідати об'єкт з метою виявлення потенційних небезпек на місці монтажних робіт. Наприклад обмежити зону роботи огороженням, перебачити відповідне екіпірування – захисні каски, рукавички, нековзне спецвзуття.

Сонячні панелі та батареї та монтажні засоби часто громіздкі та незручні для переміщення на монтажному майданчику обмеженої площі. Тому будь-які операції з панелями з ними повинні виконуватися як мінімум удвох, щоб уникнути будь-яких травм або пошкоджень.

При монтажних роботах елементи фотоелектричних установок можуть випадково опинитися під напругою ві сонячних панелей, тому важливо дотримуватися запобіжних заходів – попередньо знеструмити об'єкт, перевірити відсутність напруги, не працювати під навантаженням. Металеві корпуси панелей потрібно заземлювати для відводу високовольтних імпульсів комутаційних напруг та впливу атмосферної електрики.

## 4.2 Умови безпечної роботи з акумуляторами

Для зняття і перенесення акумуляторної батареї треба одягати спеціальний одяг, гумові фартухи, чоботи і рукавички, так як електроліт руйнівню діє на одяг і взуття і може викликати опіки шкіри. При потраплянні рідини або електроліту на органи тіла потрібно змити їх рясним струменем 10% -го розчину соди або розчину нашатирного спирту у воді.

Після роботи з акумуляторами і перед прийняттям їжі необхідно ретельно вимити руки гарячою водою з милом. Забороняється палити, а також зберігати продукти і їжу в робочих приміщеннях, пов'язаних з обслуговуванням і ремонтом акумуляторів. \

Батареї акумуляторів необхідно утримувати в чистоті; періодично (через кожні 15 днів) протирати їх поверхню чистою ганчіркою, попередньо злегка змоченою в 10% -му розчині нашатирного спирту для нейтралізації сірчаної кислоти, і потім ретельно витирати сухою ганчіркою. У працюючих акумуляторів слід систематично прочищати отвори в корках, для профілактики засмічення і зростання надлишкового тиску газів усередині комірок, для запобігання випучуванню та руйнуванню стінок.

Затискачі батареї і наконечники проводів необхідно очищати від оксидів і змащувати технічним вазеліном для запобігання від подальшого окислення. Контакт між затискачами і наконечникам проводів і клемми акумуляторів батареї повинен бути досить щільним, для запобігання їх ковзанню, іскрінню, короткому замиканню з швидкому розряджанню та можливою розгерметизацією. Тому приміщення з акумулятором повинно бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією.

При роботі з акумуляторами всередині приміщень слід користуватися тільки вибухозахисними лампами напругою живлення не вищими за 12 в. У разі користування вилкою навантаження попередньо відкрити герметизуючі корки для запобігання скупченню газів всередині вибухонебезпечних газів.

Також не можна близько нахилитися до розгерметизованих, через небезпеку подразнень слизової оболонки та очей заряджання акумуляторних

батареї не можна користуватися вилкою навантаження через можливе відіскріння на клеммах

### **4.3 Потенційні загрози довкіллю**

Серед усіх компонентів фотоелектричних установок довкіллю загрожують тільки акумулятори електроенергії. Вони мають шкідливі речовини, які за неправильної утилізації можуть призвести до забруднення ґрунту, води та повітря, негативно впливаючи на здоров'я людей і тварин. Тому масивні токсичні елементи конструкції акумулятора елементи свинець, кислоти та інші вимагають особливого підходу під час утилізації. Використані акумулятори не можна викидати разом з побутовими відходами, бо наявні в них хімічні речовини можуть потрапити до ґрунту і водних джерел. А при їх нагріванні вони можуть виділяти токсичні гази та речовини у повітря. З метою запобігання таким явищам, на законодавчому рівні у точках роздрібного продажу організують обмін відпрацьованих акумуляторів на нові.

Для підприємців, які в установленому порядку своєчасно не передали на утилізацію відпрацьовані акумулятори, навіть передбачена адміністративна відповідальність у вигляді штрафу від одного до трьох неоподатковуваних мінімумів доходів громадян, а на посадових осіб - від п'яти до десяти неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

## ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Економічні показники роботи автономних фотоелектричних установок здебільшого оцінюють за опосередкованими показниками з оціночними критеріями отриманої вигоди. Такими, як от прибуток від введення у господарську діяльність покинутих об'єктів або розвиток нових напрямків діяльності, які не потребують потужного електропостачання тощо.

Для автономних систем, які працюють в умовах негарантованого сервісного обслуговування, одним з найважливіших економічних показників є зменшення експлуатаційних витрат на обслуговування, придбання та заміну окремих комплектуючих. Найчастіше виходять з ладу акумулятори через жорсткі режими експлуатації в реальних умовах. Розроблена схема дозволяє значно продовжити його ресурс у 2-3 рази за рахунок оптимізації режимів зарядно-розрядних процесів та раціоналізації добових графіків їх розвантаження. Крім того, через зменшення ємності акумуляторів до рівня нижчого за 80% номінальної, свинцеві акумулятори зазвичай змінюють кожні два-три. Але при їх експлуатації у циклічних зарядно-розрядних процесах з використанням тільки 50% номінальної ємності, їх змінюють значно рідше – приблизно кожні 5 років.

Зарядну ємність акумулятора визначимо через значення енергоощадного зарядний струму, рівного  $0,1C_n$ , який для 4-х паралельних фотомодулів KV-155 не перевищує  $3 \times 4 = 12$  А. Тоді умові мінімізації втрат енергії відповідають зарядно-розрядного струмам, не більших за  $0,1C_n$ , акумуляторів номінальної ємності  $C_n = 120$  А·год. Вони з мінімальними втратами здатні резервувати близько  $0,5 \times 120 \text{ А} \cdot \text{год} \times 12 \text{ В} = 720 \text{ Вт} \cdot \text{год} \approx 0,72$  кВт·год електроенергії, тобто більше половини денної продуктивності 4-х фотомодулів (див п. 3.5).

За ринкової вартості свинцевих акумуляторів популярних типорозмірів зазвичай не перевищує значень 40 грн за одну ампер-годину номінальної

емності, тому продовження їх ресурсу з 2-х до 5-и років зменшить щорічні експлуатаційні затрати на

$$E = (120 \times 40 / 2 - 120 \times 40 / 5) = 0,3 \times 120 \times 40 = 1440 \text{ грн/рік.}$$

Початкові затрати на вдосконалення наявного шунтового регулятора зарядного струму можна оцінити за сумарною ринковою вартістю радіодеталей та монтажних робіт з такого їх переліку:

– транзистор BC547B BENT LEAD, 1 шт	менше 15 грн/шт;
– компаратор IC1 (LM3914), 1 шт	160 грн;
– транзистор KT973, 3 шт	40 грн;
– реле LEG-12, 3 шт	60
– монтажні роботи	≈500 грн
– разом	≈775 грн

Два додаткові компаратори IC1d та IC1c входять до комплекту збірки з 4-х елементів мікросхеми IC1 базового шунтового регулятора зарядного струму.

Сумарні затрати не перевищують річної економії коштів за рахунок збільшення ресурсу акумулятора. Відтак і термін окупності розробки не перевищує одного року.

## ВИСНОВКИ

1. Малопотужні фотоелектричні установки автономного електропостачання будинку ефективні лише у режимі раціонального розподілу генерованої енергії між усіма її споживачами.
2. Схема регулятора струму навантаження розроблена на базі шунтового регулятора зарядного струму, доповненого блоками обмеження індикації струмів навантаження та схемою комутації споживачів у порядку їх пріоритету.
3. Розроблена схема з невеликим числом недорогих комплектуючих елементів нескладна для реалізації радіомонтажником.
4. Впровадження розробки підвищує надійність автономного електрозабезпечення за рахунок автоматичного обмеження потужності навантаження при перевищенні номінального струму та зниження ємності акумулятора до небезпечного рівня.
5. Прямий економічний ефект очікується від продовження ресурсу продовження ресурсу акумулятора з терміном окупності до одного року.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2008. – 135 с.
2. Duffie J., Beckman W. Solar engineering of thermal processes. 4th ed. Hoboken; New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2013. P. 910.
3. Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering. Processes and Systems. Second edition. Amsterdam: Elsevier Inc., 2014. 819 p.
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 10, Украинская ССР. Книга 1. Ленинград: Гидрометиздат, 1990. 595 с.
5. Гальчак В.П., Боярчук В.М., Сиротюк В.М., Сиротюк С.В. Параметри прямого потоку сонячної енергії при ясному небі з урахуванням прозорості атмосфери. // Відновлювана енергетика. 2029, №2. С. 22-31.
6. Сиротюк С.В., Гальчак В.П., Боярчук В.М., та ін. Порівняльна оцінка ефективності стеження за Сонцем одновісними поворотними пристроями. Відновлювана енергетика, 2022. с.1-8.
7. Mukud R. Patel. Wind and Solar Power System. – London, New York, Washington. CPC Press. – 1999. p. 350.
8. Інтернет ресурс.Режим доступу: <https://www.kvazar7.com/ua>. Дата звернення 27.05.2024р.
9. Бекиров Э.Ф. Неустойчивости в системе «фотобатарея – температурочувствительная нагрузка». // Відновлювана енергетика. 2005. №3-4, с. 13-15.
10. Daniel Koch. The LM3914 IC Driving LED Bargraph Displays. Issue 26, September 2019. Режим доступу: [https://diyodemag.com/education/the\\_classroom\\_the\\_lm3914\\_ic](https://diyodemag.com/education/the_classroom_the_lm3914_ic) . Дата звернення 27.05.2024 р.
12. Байерс Т. 20 конструкций с солнечными элементами. – М.: Мир, 1988. – 197 с.
13. Akumulatory besobslugove – podstawowe zasady konserwacji. //Elektronika praktyczna, 1996, 3, s. 15-17.