

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"

С. В. Губін, В. І. Білокінь, С. В. Сінченко

ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ ІМПУЛЬСНОГО ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2018

Рецензенти: д-р фіз.-мат. наук, проф. А. М. Кондратенко,
д-р техн. наук, проф. В. М. Борщов

Губін, С. В.

Г93 Вимірювання світлових характеристик фотоелектричних перетворювачів з використанням імпульсного джерела світла [Електронний ресурс]: навч. посіб. / С. В. Губін, В. І. Білокінь, С. В. Сінченко. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т", 2018. – 38 с.

Розглянуто параметри фотоелектричних перетворювачів, проаналізовано вимоги до обладнання вимірювання вольт-амперних характеристик з імпульсним освітленням.

Подано структурні схеми імпульсної установки й модуля імпульсного освітлювача. Наведено технічні характеристики й описано застосування цієї установки та модуля.

Для магістрантів, що навчаються за спеціальностями "Нетрадиційні й відновлювані джерела енергії", "Ракетні двигуни та енергоустановки літальних апаратів".

Іл. 16. Бібліогр.: 8 назв

УДК 621.7.383.08 (075.8)

© Губін С. В., Білокінь В. І.,
Сінченко С. В., 2018
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2018

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
Вступ.....	5
1 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	6
1.1 Світлові електроенергетичні характеристики ФП у режимі безпосередньої генерації фотоструму.....	8
1.2 Опосередковані електроенергетичні характеристики.....	10
1.3 Питомі характеристики, віднесені до одиниці площі ФП.....	12
1.4 Спеціальні електроенергетичні характеристики	12
1.5 Особливості динамічних властивостей фотоелектричних перетворювачів для вимірювання вольт-амперних характеристик в імпульсному режимі	13
2. ВИМОГИ ДО УСТАНОВКИ ВИМІРЮВАННЯ ВАХ З ІМПУЛЬСНИМ ОСВІТЛЮВАЧЕМ	16
2.1 Вимоги до світлового імпульсу	16
2.2 Вимоги до апертурного часу аналого-цифрового пристрою	18
2.3 Вимоги до електронного навантаження фотоелектричного перетворювача для вимірювання вольт-амперних характеристик. 20	
3 СТРУКТУРА ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ІМПУЛЬСНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВАХ.....	25
3.2 Структурна схема і опис складу імпульсної установки	25
3.3 Модуль імпульсного освітлювача.....	26
3.3.1 Призначення модуля імпульсного освітлювача.....	26
3.3.2 Технічні характеристики	27
3.3.3 Схема структурна модуля імпульсного освітлювача	27
3.3.4 Схема функціональна модуля імпульсного освітлювача та її робота.	27
3.3.5 Конструкція модуля імпульсного освітлювача	30
3.4 Модуль вимірювача.....	30
3.4.1 Призначення модуля вимірювача.....	30
3.4.2 Технічні характеристики	30
3.4.3 Структурна схема модуля вимірювача.....	30
3.4.4 Схема функціональна модуля вимірювача. Опис роботи модуля вимірювача за функціональною схемою	31
3.4.5 Конструкція модуля вимірювача	33
3.4.6 Елементна база побудови схеми модуля	33
3.5 Модуль навантаження	33
3.5.1 Призначення модуля навантаження.....	33
3.5.2 Технічні характеристики	34
3.5.2 Структурна схема модуля навантаження.....	34
3.5.3 Функціональна схема модуля навантаження	34
3.5.4 Конструкція модуля навантаження.....	36
3.5.5 Елементна база побудови схеми модуля	36
Бібліографічний список.....	37

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$\hbar$ – постійна Планка;
 η – коефіцієнт корисної дії ФП у діапазоні $0 \dots 1$ – відносна величина;
 ν – частота електромагнітних коливань світла, Гц;
 $\nu_0 \dots \nu_{\max}$ – діапазон спектральної чутливості ФП, мкм;
 F_f – коефіцієнт заповнення ВАХ;
 $G(\nu)$ – спектральна щільність випромінювання, Вт/м²;
 g_0 – інтегральний потік фотонів;
 G_i – щільність світлового потоку, Вт/м²;
 $I_{кз}$ – струм короткого замикання;
 i_o – зворотній струм насичення, мА;
 i_{opt} – оптимальне значення струму ФП з максимальною вихідною потужністю, А;
 $i_{фo}$ – фотострум за відомою щільністю потоку G_0 , мА;
 J – щільність фотоструму відносно площі ФП, А/м²;
 J_t – тепловий коефіцієнт щільності струму, А/м²°С;
 k – постійна Больцмана;
 $P_{уд}$ – питома потужність ФП, Вт/м²;
 q – абсолютна величина заряду електрона;
 Q – коефіцієнт збирання фотонів;
 R_n – послідовний резистор – параметр схеми заміщення ФП, Ом;
 $R_{ш}$ – паралельний резистор – параметр схеми заміщення ФП, Ом;
 S – площа ФП;
 U_{opt} – оптимальне значення напруги ФП з максимальною вихідною потужністю, В;
 U_n – напруга навантаження, В;
 U_{xx} – напруга холостого ходу, В;
 P_n – максимальна вихідна потужність, Вт;
 R_L – послідовний опір, Ом;
 R_{sh} – шунтувальний опір р-n-переходу, Ом;
 A – діодний коефіцієнт, відносна величина;
ВАХ – вольт-амперна характеристика;
 T – абсолютна температура ФП, К;
ФЕП – фотоелектричний перетворювач;
ФП – фотоперетворювач.

Вступ

Фотоелектрична енергетика, або як її прийнято називати фотовольтаїка, за останнє десятиліття, завдяки інтенсивному розвитку, зробила значний технологічний стрибок. До серії її продукції увійшли фотоелектричні перетворювачі космічного призначення (ФПKN), виготовлені на основі напівпровідникових матеріалів групи AIII BV, а саме багатоперехідних фотоперетворювачів на германієвій підкладці та високоефективних кремнієвих монокристалічних і полікристалічних перетворювачів наземного застосування. Значні обсяги продукції, що випускається, потребують методів вимірювання з низькими затратами енергії. Наведений метод пов'язаний з імпульсними джерелами світлового потоку, що імітує сонячне випромінювання. Цей метод імпульсного вимірювання має цілий ряд фізичних особливостей, пов'язаних зі стабілізацією світлового потоку в імпульсі, синхронізацією початку вимірювань і скануванням електронного навантаження, передачею вимірюваної інформації для безпосереднього оброблення.

Призначення цього посібника полягає в ознайомленні з методом, який інтегрує в собі і процеси в імпульсних ксенонових газорозрядних джерелах світла, що найбільш точно імітують сонячне випромінювання, і в енергетичних характеристиках фотоелектричних перетворювачів, і в методах вимірювання вольт-амперних характеристик зі швидкодіючим аналого-цифровим перетворенням й дискретним електронним навантаженням.

Посібник призначений для ознайомлення з характеристиками фотоелектричних перетворювачів, які вимірювані для паспортизації, а також з організацією імпульсного вимірювання і технічним вирішенням вимірювального комплексу. Посібник дозволяє набути навичок в організації імпульсних вимірювань вольт-амперних характеристик фотоелектричних перетворювачів на основі теоретичних даних і практичної реалізації установки для таких вимірювань.

1 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

У розділі проведено аналіз комплексу параметрів, необхідних для дослідження електроенергетичних параметрів фотоелектричних перетворювачів (ФП). Розглянуто і проаналізовано такі електроенергетичні параметри ФП, що підлягають вимірюванню як у стаціонарному, так і в імпульсному режимах освітлення.

Фотоелектричний перетворювач є складним електронним пристроєм, вихідні енергетичні параметри якого залежать як від технології його виготовлення, так і від ступеня зовнішнього впливу на нього. Аналіз енергетичних можливостей ФП, необхідний як для розвитку технологічних підходів до створення ФП, так і для моделювання роботи фотоелектричної батареї (БФ), оснований на математичному описі фізичних процесів у ФП.

При математичному описі вольт-амперних характеристик (ВАХ) ФП використовується ряд різних припущень, можливість застосування яких має бути перевірена і відповідати наданому завданню моделювання ФП.

Найбільш поширеною для аналізу ВАХ ФП є еквівалентна схема ФП з зосередженими параметрами, що працює у стаціонарному режимі (рисунок 1.1).

Схема містить генератор струму G_i , що створює фотострум I_p , і має значний внутрішній опір. Величина фотоструму пропорційна освітленості ФП і визначається концентрацією незрівноважених носіїв заряду, які згенеровані світловим потоком.

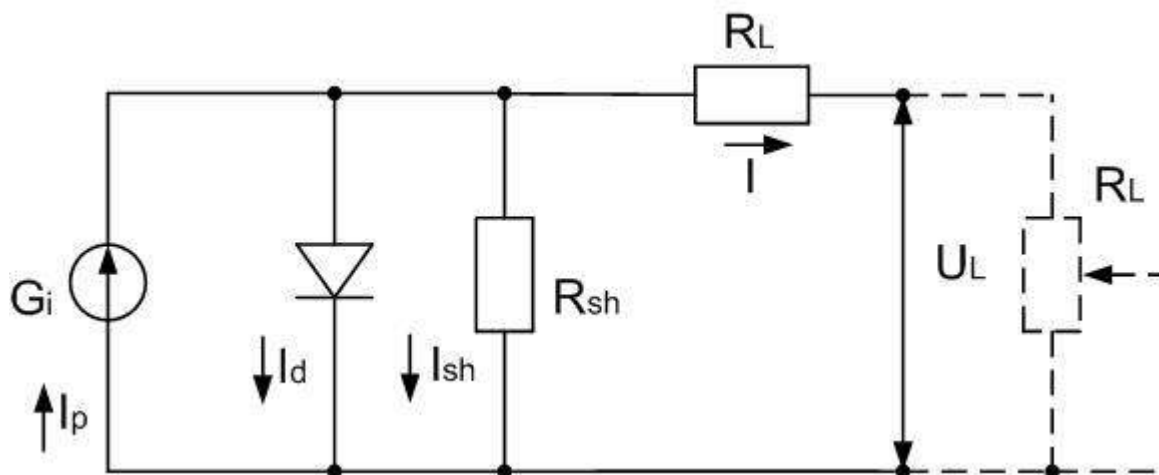


Рисунок 1.1 – Еквівалентна схема ФП, працюючого у стаціонарному режимі:

R_{sh} – шунтувальний опір р-п-переходу;

R_L – послідовний опір

У загальному випадку величину фотоструму можна визначити за виразом

$$i_{\phi} = S \cdot g_0 \cdot q \cdot Q, \quad (1.1)$$

де S – площа ФП;

g_0 – інтегральний потік фотонів;

q – абсолютна величина заряду електрона;

Q – коефіцієнт збирання (0...1), що характеризує долю зібраних р-п-переходом електронно-діркових пар із усіх створених у повному світловому потоці.

Встановлено, що пропорційність залежності фотоструму від рівня освітленості не залежить від її спектрального складу, змінюється лише абсолютне значення фотоструму. При відомому спектральному складі випромінювання, що падає на ФП, функція генерації може бути подана у вигляді інтеграла монохроматичних складових з числом фотонів:

$$dg_0 = \frac{G(\nu) \cdot d\nu}{2\pi \cdot \hbar \cdot \nu}, \quad (1.2)$$

де $G(\nu)$ – спектральна щільність випромінювання, Вт/м²;

ν – частота електромагнітних коливань світла, Гц;

$\hbar$ – постійна Планка.

Таким чином, фотострум може бути виражений формулою:

$$i_\phi = S \cdot q \cdot \int_{\nu_0}^{\nu_{\max}} Q(\nu) \cdot \frac{G(\nu) \cdot d\nu}{2\pi \cdot \hbar \cdot \nu}, \quad (1.3)$$

де $\nu_0 \dots \nu_{\max}$ – діапазон спектральної чутливості ФП, мкм.

Для реальних зразків ФП з монокристалічного кремнію значення щільності фотоструму при опроміненні ФП сонячним світлом в умовах АМ0 становить $j_\phi = 35 \dots 40$ мА/см². При цьому для аналізу ФП і моделювання його характеристик використовують співвідношення пропорційності

$$i_\phi = i_{\phi 0} \frac{G}{G_0}, \quad (1.4)$$

де G – щільність світлового потоку, Вт/м²;

$i_{\phi 0}$ – фотострум за відомою щільністю потоку G_0 , мА.

Струм діода описується відомою залежністю для р-п-переходу, що визначається як:

$$i_{\text{дб}} = i_0 \cdot \left(e^{\frac{q(U_H + i_H \cdot R_n)}{AkT}} - 1 \right), \quad (1.5)$$

де i_0 – зворотній струм насичення, мА;

U_H – напруга на навантаженні, В;

A – діодний коефіцієнт (у різних джерелах може трактуватися як параметр ВАХ ФП), відносна величина;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура ФП, К.

Встановлено, що зворотний струм насичення залежить тільки від температури і може бути виражений формулою

$$i_o = i_{oo} \cdot \frac{e^{-\frac{E_g}{kT}}}{e^{-\frac{E_g}{kT_0}}} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^3, \quad (1.6)$$

де i_{oo} – значення струму насичення при температурі T_0 , мА;

E_g – ширина забороненої зони напівпровідника при температурі 0 К, електронвольт.

Струм навантаження еквівалентної схеми ФП відповідно до закону Кірхгофа, визначають за формулою

$$i_H = i_\phi - i_d - i_{ш}, \quad (1.7)$$

Підставивши у вираз (1.7) відповідні значення струмів, отримаємо найбільш поширену модель ВАХ ФП [1, 8]:

$$i_H = i_\phi - i_0 \cdot \left(e^{\frac{q(U_H + i_H R_{п})}{AkT}} - 1 \right) - \frac{U_H + i_H R_{п}}{R_{ш}}. \quad (1.8)$$

У більшості випадків аналізу ВАХ ФП приймаються значення $R_{ш} \rightarrow \infty$, а $R_{п} \rightarrow 0$, що спрощує основне рівняння до вигляду

$$i_H = i_\phi - i_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_H}{AkT}} - 1 \right). \quad (1.9)$$

Однак зневага значеннями $R_{п}$ може призвести до значних похибок при аналізі ВАХ ФП, особливо значень I_H струму короткого замикання $I_{кз}$. Допущення значень $R_{ш} = \infty$ призводить до менших похибок опису ВАХ, але при високоточному аналізі його облік також необхідний.

1.1 Світлові електроенергетичні характеристики ФП у режимі безпосередньої генерації фотоструму

Користуючись рівнянням (1.8), розглянемо світлові електроенергетичні характеристики ФП у режимі безпосередньої генерації фотоструму. Умовно їх можна розділити на: прямі, тобто одержувані методом безпосередніх вимірів; непрямі – визначені розрахунком результатів прямих вимірювань; питомі – енергетичні характеристики ФП, що зведені до одиниці площі ФП при фіксованих значеннях освітленості та температури; спеціальні енергетичні характеристики ФП.

До основних електроенергетичних параметрів ФП можна віднести:

1. **Струм короткого замикання $I_{кз}$** (рисунок 1.2). Значення струму короткого замикання може бути виміряне безпосередньо у послідовному ланцюзі ФП як $I_{кз} = i_H$ при $R_H = 0$. Однак при цьому існує похибка, обумовлена наявністю $R_{п}$ з кінцевим значенням і відповідним падінням напруги на ньому $U_H = i_H R_{п}$. Спосіб компенсації такої залишкової напруги

розглянемо далі, при аналізі основної схеми вимірювання параметрів ФП. Аналітично $I_{\text{кз}}$ може бути описаний, аналогічно виразу (1.3), у діапазоні спектральної чутливості ФП:

$$I_{\text{кз}} = \int_{\lambda_0}^{\lambda_{\text{max}}} C(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (1.10)$$

де $C(\lambda)$ – спектральна чутливість ФП, $\text{мА/м}^2 \cdot \text{мкм}$:

$$C(\lambda) = \frac{I_{\text{кз}}(\lambda)}{E(\lambda)}, \quad (1.11)$$

що відповідає струму короткого замикання ФП – $I_{\text{кз}}(\lambda)$ $\text{мА/м}^2 \cdot \text{мкм}$, який генерується при освітленні його монохроматичним випромінюванням одиничної інтенсивності $E(\lambda)$, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{мкм}$;

$\lambda_0 \dots \lambda_{\text{max}}$ – діапазон спектральної чутливості ФП, мкм .

Таким чином, можна зробити висновок, що струм короткого замикання ФП в основному визначається значенням фотоструму; отже, він пропорційний рівню освітленості ФП і відповідає спектральній чутливості ФП, а також має певну залежність від температури ФП, зумовлену температурною залежністю зворотного струму насичення ФП (1.6) і кінцевим значенням $R_{\text{п}}$.

2. Напруга холостого ходу U_{xx} (рисунок 1.2). Значення напруги холостого ходу може бути виміряне при розімкненому ланцюзі навантаження ФП, тобто $R_{\text{н}} = \infty$, тоді $U_{\text{xx}} = U_{\text{н}}$ і $i_{\text{н}} = 0$. Користуючись виразом (1.9), можна записати:

$$U_{\text{xx}} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{i_{\phi}}{i_0} - 1 \right). \quad (1.12)$$

Отже напруга холостого ходу при фіксованому значенні температури ФП визначається величиною фотоструму, а також при фіксованому значенні фотоструму пропорційна (з допущенням незначної зміни зворотного струму

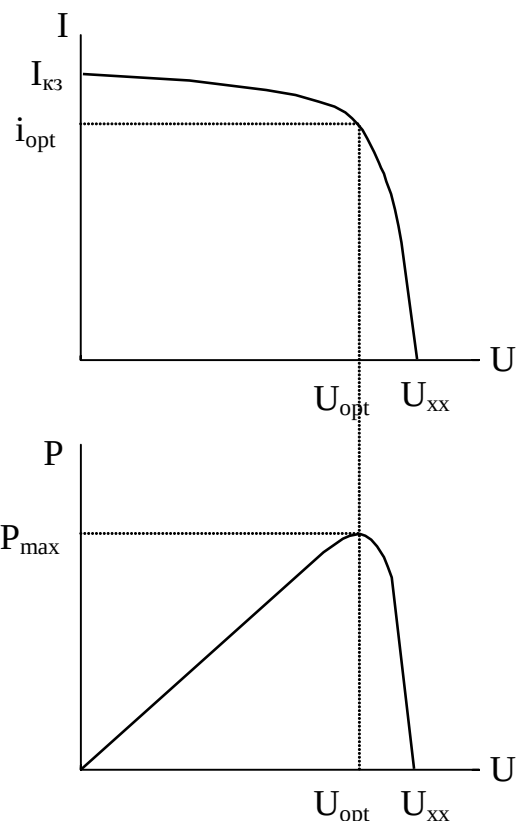


Рисунок 1.2 – Вольт-амперна і вольт-ватна (показники потужності) характеристики ФП

насичення I_0 від температури) температурі ФП.

3. **Поточні значення напруги і струму навантаження U_H , I_H** (рисунок 1.2), позначаються у межах $0 < R_H < \infty$. Показники напруги і струму визначаються безпосередньо на вихідних контактах ФП підключенням вольтметра і амперметра, при цьому значення температури і освітленості ФП мають бути зафіксовані, що очевидно з виразу (1.10).

Кількість точок виміру ВАХ ФП визначається згідно з вимогами до точності вимірювання ВАХ і завданнями, які вирішуються при вимірюванні ВАХ ФП.

1.2 Опосередковані електроенергетичні характеристики

До непрямих електроенергетичних характеристик ФП можна віднести характеристики, одержані в результаті оброблення виміряних параметрів:

1. **Вихідна потужність ФП** у різних точках ВАХ ФП може бути визначена як

$$P_i = U_i \cdot i_i \quad (1.13)$$

при зміні $0 < R_H < \infty$.

Відносно потужності ФП необхідно зазначити таке: її значення можна отримати і безпосередніми вимірами при підключенні ватметра до вихідних контактів ФП, однак у практиці досліджень ФП більшого поширення отримав метод непрямого визначення P_i , як більш точний і менш кошковий.

2. На потужнісній (вольт-амперній) характеристиці ФП можна бачити існування точки, що відповідає максимальній вихідній потужності, яка в практиці аналізу енергетичних характеристик ФП отримала визначення $P_{\max}$ і являє собою критерій оптимізації. Наявність оптимальних точок на ВАХ і потужнісних характеристиках ФП зумовлена істотною нелінійністю ВАХ ФП. Відповідно до (1.13) вихідна потужність ФП на навантаженні може бути записана так:

$$P_H = U_H \cdot i_H = U_H \cdot \left(i_{\phi} - i_0 \cdot \left(e^{\frac{q(U_H - i_H R_H)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{U_H + i_H R_H}{R_{\text{ш}}} \right). \quad (1.14)$$

Очевидно, що для $\frac{dP}{dU_H} = 0$ існують значення U_{opt} й i_{opt} , при яких значення P_H максимальне, тобто

$$P_{\max} = U_{\text{opt}} \cdot i_{\text{opt}}. \quad (1.15)$$

Таким чином, найважливішими характеристиками ВАХ ФП є значення струму і напруги ФП, а також значення оптимальної потужності, відповідне цим точкам ВАХ.

3. **Коефіцієнт заповнення ВАХ F_f** (філ-фактор) є важливою характеристикою ФП, яка витікає з наявності $P_{\max}$. Значення F_f може бути знайдено з виразу

$$F_f = \frac{P_{\max}}{U_{xx} \cdot I_{K3}}. \quad (1.16)$$

Відповідно до наведеної формули, коефіцієнт заповнення ВАХ ФП наближається до одиниці. Аналітично F_f можна визначати тільки за наближеними залежностями і основаними на рівнянні (1.8) при допущенні, що $R_{\text{ш}} = \infty$ чи $R_{\text{п}} = 0$.

Додатковими характеристиками форми ВАХ ФП є співвідношення, які можна використовувати для спеціального аналізу характеристик ФП:

$$n_U = \frac{U_{\text{opt}}}{U_{xx}}; \quad n_i = \frac{i_{\text{opt}}}{I_{K3}}. \quad (1.17)$$

4. **Коефіцієнт корисної дії η** . Одна з найбільш істотних енергетичних характеристик ФП визначається з формули

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E \cdot S}. \quad (1.18)$$

Відносно ККД ФП, необхідно дати додаткові пояснення, як правило, не наведені у літературних джерелах або повністю не розкриті. Справа в тому, що значення падаючого світлового потоку E є інтегральною функцією зі спектральним розподілом. З огляду на цю обставину, можна сказати, що для визначення η потрібно указувати на умови освітленості ФП. Для заатмосферного сонячного випромінювання прийнята середня за рік освітленість (сонячна постійна) з енергетичною щільністю з рівнем 1360 Вт/м^2 у спектральному діапазоні $0 < \lambda < \infty$ (практично від 0,1 до 10 мкм за розподілом Джонсона), що визначається при нульовій атмосферній масі АМ0. При цьому дуже важливими є засіб (болометри, фотопомножувачі, фотоелектричні, термоелектричні та інші датчики) і метод вимірювання (спектрально залежний або спектрально незалежний) падаючого випромінювання, які вносять основну частку похибки у визначення ККД ФП.

1.3 Питомі характеристики, віднесені до одиниці площі ФП

При порівняльному аналізі енергетичних можливостей фотоперетворювачів прийнято використовувати питомі характеристики, віднесені до одиниці площі ФП. Рівень енергетичної освітленості для ФПКП приймається таким, що дорівнює умовам АМ0, а рівень температури фіксується на певному значенні (25°C чи 40°C). Використовуються такі характеристики:

1. Питома потужність ФП:

$$P_{уд} = \frac{P_{max}}{S}; \quad \left[\frac{мВт}{см^2} \right], \left[\frac{Вт}{м^2} \right], \quad (1.19)$$

де S – повна площа ФП, тобто фотоактивна площа ФП з урахуванням площі контактних площадок.

2. Щільність фотоструму:

$$J_{кз} = \frac{I_{кз}}{S}; \quad J_{opt} = \frac{I_{opt}}{S}; \quad \left[\frac{А}{м^2} \right], \left[\frac{А}{м^2} \right], \quad (1.20)$$

тобто під щільністю або питомою щільністю, фотоструму розуміють значення струму ФП короткого замкнення, або в оптимальній точці ВАХ, віднесені до повної площі ФП.

1.4 Спеціальні електроенергетичні характеристики

Спеціальні електроенергетичні характеристики використовуються для розширеного аналізу енергетичних можливостей ФП, визначення градувальних характеристик ФП, що застосовуються як метрологічні, для побудови та уточнення математичних моделей ФП. До таких характеристик відносять:

1) тепловий коефіцієнт напруги, що показує зміну напруги холостого ходу від підвищення температури і має від'ємне значення:

$$U_{txx} = \frac{\Delta U_{xx}}{\Delta t} \left[-\frac{мВ}{^{\circ}C} \right]; \quad (1.21)$$

2) тепловий коефіцієнт струму, або щільності струму для одиничної поверхні перетворювача, він показує зміну струму короткого замикання (щільності) від підвищення температури і має позитивне значення:

$$I_{tkз} = \frac{\Delta I_{кз}}{\Delta t} \left[\frac{мкА}{^{\circ}C} \right]; \quad J_{tkз} = \frac{\Delta I_{кз}}{\Delta t \cdot S} \left[\frac{мкА}{^{\circ}C \cdot см^2} \right], \quad (1.22)$$

3) залежність струму короткого замикання ФП від освітленості та температури для відомої площі, або щільність струму для одиничної площі (градувальна характеристика ФП, яка зазвичай задається таблицею), що застосовується як датчик освітленості:

$$I_{\text{кз}}=f(E, T^{\circ}); \quad (1.23)$$

4) залежність напруги холостого ходу ФП від освітленості та температури (зазвичай задається таблично), що може застосовуватись для датчика температури:

$$U_{\text{хх}}=f(E, T^{\circ}); \quad (1.24)$$

5) спектральну чутливість ФП для фіксованих значень температури, яка віднесена до одиничної площі:

$$C(\lambda) = \frac{I_{\text{кз}}(\lambda)}{\Delta E(\lambda)} \left| \begin{array}{l} 0 < \lambda < \max; \\ T^{\circ} = \text{const} \end{array} \right. \quad (1.25)$$

6) параметри схеми заміщення ФП: $R_{\text{п}}$, $R_{\text{ш}}$, A ;

7) динамічні характеристики ФП:

– залежність бар'єрної ємності р-п-переходу від напруги ФП:

$$C_{\text{б}}=f(U), \quad (1.26)$$

– залежність дифузійної ємності р-п-переходу від температури:

$$C_{\text{д}}=f(i_0, T^0). \quad (1.27)$$

Ці характеристики використовуються при аналізі та моделюванні динамічних властивостей ФП.

Увесь широкий спектр наведених електроенергетичних параметрів ФП може бути визначений у результаті вимірювання вольт-амперних характеристик ФП при різних рівнях освітленості та температури.

1.5 Особливості динамічних властивостей фотоелектричних перетворювачів для вимірювання вольт-амперних характеристик в імпульсному режимі

Для ефективної роботи сонячних елементів при імпульсному освітленні необхідне дотримання ряду умов:

– оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника має бути достатньо значним, щоб забезпечити поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;

– електрони і дірки, що генеруються при освітленні, мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох боків активного шару;

– сонячний елемент повинен мати значну висоту бар'єру в напівпровідниковому переході;

– повний опір, уключений послідовно з сонячним елементом

(виключаючи опір навантаження), має бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності (джоулево тепло) у процесі роботи;

– структура поглинального шару має бути однорідною по всій активній області сонячного елемента, щоб виключити закорочування і вплив шунтуючих опорів на характеристики елемента.

Це в основному виконується для моно- і полікристалічних фотоелектричних перетворювачів і практично для всіх тонкоплівкових, що дозволяє використовувати імпульсний режим освітленості для зняття характеристик.

Також важливими факторами є: урахування динамічних властивостей фотоперетворювачів і, перш за все, час відгуку (час насичення) фотоперетворювача і, відповідно, параметри ємностей, як реактивної складової.

При моделюванні систем освітлення, термостабілізації, навантаження і вимірювання необхідно провести аналіз перехідних процесів. Це пояснюється наступним. По-перше, тривалість світлового імпульсу має бути порівняно більшою, ніж перехідні процеси у фотоперетворювачах. А, по-друге, з досвіду існуючих аналогів можна зробити висновок, що система навантаження фотоперетворювача мусить враховувати ємність. Передбачається, що її ємність, принаймні, повинна бути на порядок нижче, ніж вихідна ємність фотоперетворювача.

Складні процеси у фотоперетворювачі полягають у тому, що він поглинає фотони сонячного світла і вивільняє електрони, що розділяються р-п переходом, тобто, як тільки на фотоперетворювач подається навантаження, електричний струм буде протікати по ланцюгу зовнішнього навантаження. Оскільки фотоперетворювач, поданий світлоіндукованим джерелом струму, паралельно з яким вбудований діод, то діод і визначає вихідну характеристику. Через дефекти матеріалу і омичні втрати, у матеріалах підкладки напівпровідника, провідника і контактів, фотоперетворювач також вмикає послідовний і шунтовий опір. Наявність названих складових вимагає спеціальної схеми вимірювання, так званої чотирьохзондової, де ланцюги електричного навантаження і вимірювання струму розділені з ланцюгом вимірювання напруги. На рисунку 1.3 зображена модель фотоперетворювача із такою схемою вимірювання.

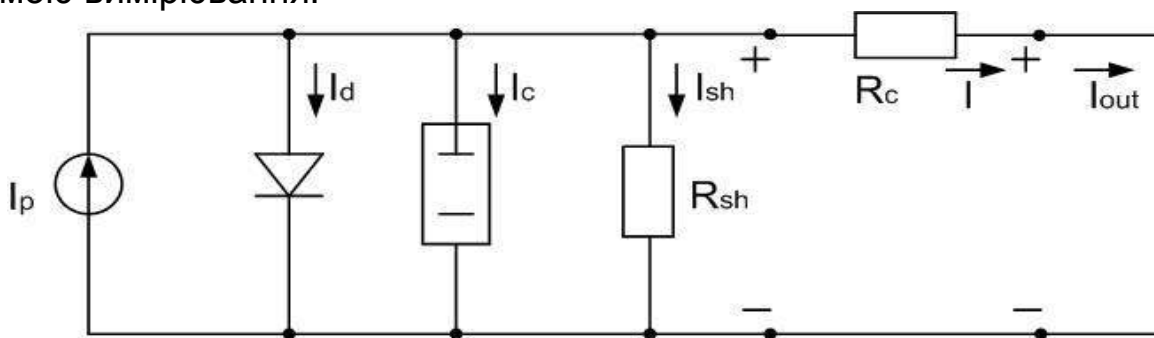


Рисунок 1.3 – Модель ФП з чотирьохзондовою схемою

Фотоелектричні перетворювачі, в більшості випадків, вмикаються на електронне навантаження, яке має змінну ємність. Одна з таких схем електронного навантаження – перетворювач Кука. На рисунку 1.4 зображено його схема і діаграма, яка пояснює принцип роботи.

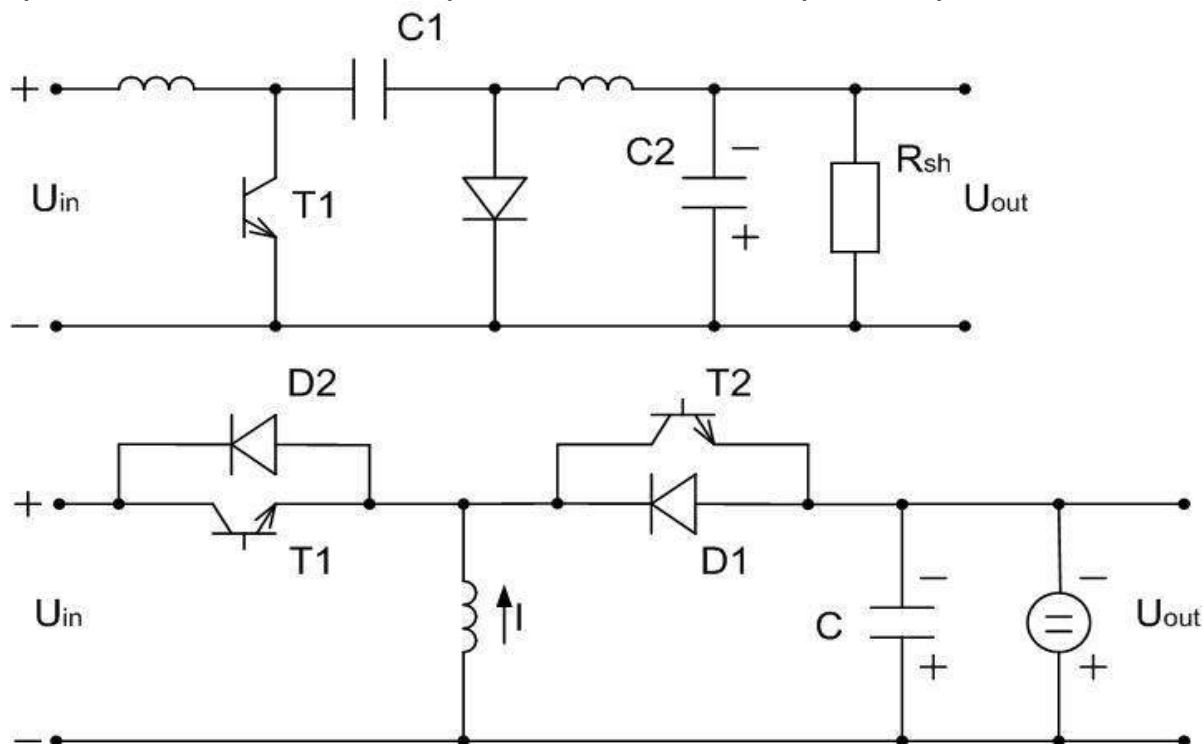


Рисунок 1.4 – Перетворювач Кука

На інтервалі замкненого транзистора, у вхідному дроселі $L1$ наростає струм $I1$ і запасасться енергія, що забирається від джерела вхідної напруги. При цьому буферний конденсатор $C1$ через індуктивність $L2$ передає енергію до накопичувального конденсатора $C2$, від якого живиться навантаження, дане опором R . На другому інтервалі транзистор $T1$ вимкнений, струм проводить діод D , що відкривається під дією ЕРС самоіндукції дроселя $L2$ зі струмом $i2$. Струм накопичувального індуктора $L1$ заряджає конденсатор $C1$, заповнюючи віддану їм енергію у конденсатор $C2$ на попередньому інтервалі часу.

Перевагами цієї схеми є:

- безперервний, а не імпульсний характер вхідного струму перетворювача, що не потребує наявності вхідного LC-фільтра, обов'язкового для інших схем;
- безперервний характер струму дроселя $L2$, який живить вихідний ланцюг перетворювача, що зменшує необхідні значення накопичувального конденсатора;
- можливість отримання нульової пульсації вихідного струму при створенні відповідної величини магнітного зв'язку між обмотками дроселів $L1$ і $L2$;
- можливі схеми перетворювача Кука із гальванічною розв'язкою завдяки трансформатору.

2. ВИМОГИ ДО УСТАНОВКИ ВИМІРЮВАННЯ ВАХ З ІМПУЛЬСНИМ ОСВІТЛЮВАЧЕМ

2.1 Вимоги до світлового імпульсу

Світловий імпульс є кількісною характеристикою імпульсного світлового потоку. Цей параметр є дуже важливим для пристроїв, що імітують реальне сонячне випромінювання штучними джерелами світла, для вимірювання параметрів і характеристик фотоелементів і фотоелектричних модулів. За наявності концентратора при імітації випромінювання можна використовувати імпульсний імітатор до дослідження фотоелектричних модулів з концентраторами світлового потоку.

Відома значна кількість винаходів, що відносяться до сонячної енергетики, зокрема до пристроїв, які дозволяють імітувати реальне сонячне випромінювання. Наприклад, такі штучні джерела світла містять фонові світлодіоди, з'єднані світловодом з першим світлофільтром, що поглинає світло непотрібного спектру, імпульсну ксенонову лампу, діафрагму, другий світлофільтр, що коригує спектр випромінювання імпульсної ксенонової лампи, лінзу Френеля, або параболічне дзеркало, і просторовий фільтр для вирівнювання щільності світлового потоку по площі.

Світловий імпульс має бути таким, щоб сумарна освітленість і спектральний склад світлового потоку, що падає на поверхню фотоелемента, був максимально наближений до стандартного сонячного спектру. Необхідно, щоб вихідна апертура світлодіода була максимальна, – це забезпечить високий показник ефективності перерозподілу вихідного потоку. Тут, під ефективністю мається на увазі відношення повного потоку, що вийшов з коліматорної лінзи, до потоку світлодіода, на якому лінзу встановлено.

У пристрої використовується імпульсна ксенонова лампа класу ХОР без фонового підсвічування. Лінійні лампи класу ХОР мають діаметр 12 мм, їхня сумарна довжина становить 241...698 мм залежно від потужності лампи.

Спектр потоку, випромінюваного цими лампами, як і у всіх ксенонових ламп, має безперервний діапазон – від 200 до 1000 нм.

Колірна температура цих ламп дорівнює 5600 К. Як правило, імпульсні ксенонові лампи працюють у баластному ланцюзі резонансного типу. Також їм потрібні електронний пристрій для запалювання близько 10 кВ і, для більшої потужності, трансформатор, щоб підвищити напругу ланцюга до напруги, яка необхідна лампі. Ці лампи мають миттєве запалюванням з коротким періодом повторного запалювання, їм не потрібен час для нагріву.

Лампи цього класу мають термін служби від 250 до 500 годин при 20 % втрати світлових характеристик після 250 відпрацьованих годин.

Лампи класу ХОР не потребують примусового повітряного

охолодження. Вони не виділяють озон. Але оскільки вони дають короткохвильове УФ-випромінювання, то мають працювати при захисному екрані, щоб не завдати шкоди очам і шкірі людини. Через високу стартову напругу користувачі ламп мають бути ізольовані від джерел світла.

Робоче положення для цих ламп універсальне. На рисунку 2.1 зображений зовнішній вигляд такої лампи.

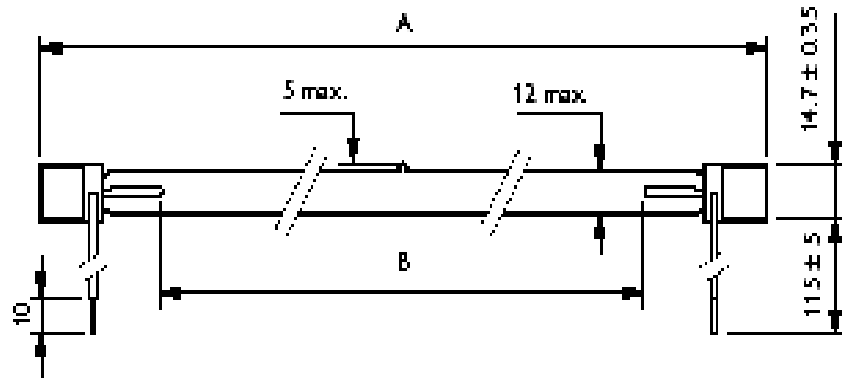


Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд лампи XOR

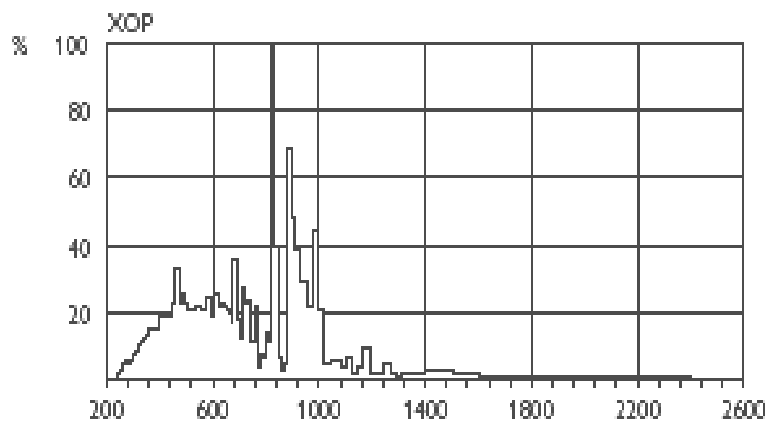


Рисунок 2.2 – Спектральний склад випромінювання лампи XOR

У відповідності до вимог вимірювання, імпульсне освітлення має забезпечувати:

- рівень енергетичної освітленості у площині фотоелектричного перетворювача, що випробується 1360 Вт/м^2 з допуском $\pm 2,5 \%$;
- колімований світловий потік на площі $0,6 \times 0,6 \text{ м}^2$ з допуском на нерівномірність $\pm 2,5 \%$ і на площі $0,1 \times 0,1 \text{ м}^2$ з допуском на нерівномірність $\pm 1 \%$;
- установлення вузлів кріплення випробовуваних фотоелектричних перетворювачів за нормаллю до імітованого сонячного випромінювання у межах кутів $\pm 5^\circ$;
- спектральний діапазон світлового випромінювання відповідно до розподілу спектрального випромінювання Сонця (по Джонсону) у діапазоні довжин хвиль $0,2 \dots 2,5 \text{ мкм}$ з інтегральним допуском $\pm 2,5 \%$;
- формування світлового імпульсу тривалістю $10 \text{ мс} \pm 1 \%$ з

формуванням підпалу і гасіння імпульсної лампи;

- видачу сигналу синхронізації початку і кінця вимірювання на блок вимірювання вольт-амперних характеристик ФП за вбудованим датчиком освітленості;

- роботу в умовах при температурі $+15^{\circ}\text{C} \dots +35^{\circ}\text{C}$, відносній вологості 80 %, нормальному атмосферному тиску;

- роботу від однофазної мережі змінного струму 50/60 Гц з напругою 220В $\pm$ 10/-15 %.

У комплекті з лампою необхідно використовувати аналог стробоскопічного ефекту. Для лампи типу ХОР-15 найбільш придатним є рішення, як у стробоскопі Acme BF-1500NA.

Цей пристрій має такі технічні характеристики:

- стробоскоп потужністю 1500 Вт;
- керування: автономна робота, аналоговий контролер;
- регульована яскравість і частота спалахів (1...12 Гц);
- тип лампи: PHILIPS ХОР-15 (у комплекті);
- розміри: 448 × 126 × 115 мм;
- маса – 5 кг.

2.2 Вимоги до апертурного часу аналого-цифрового пристрою для імпульсних вимірювань вольт-амперних характеристик

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) змінює зовнішньо-аналоговий сигнал у цифровий код і передає код на шину даних інтерфейсної плати. У кожного АЦП існує свій апертурний час. Апертурною затримкою є той інтервал часу від активного фронту синхроімпульсу до моменту, коли пристрій вибірки-зберігання на вході АЦП запам'ятає значення вибірки. Цей параметр дозволяє користувачеві ввести випередження синхроімпульсу щодо бажаного моменту захоплення відліку вхідного сигналу.

У лабораторному пристрої було використано АЦП типу AD7895. Це високошвидкісний 12-бітний АЦП, який працює від однополярного джерела живлення + 5 В і реалізований у 8 вивідних mini-DIP і SOIC корпусах. Прилад містить 3,8 мкс АЦП послідовного наближення, пристрій вибірки-зберігання, що задає генератор і високошвидкісний послідовний інтерфейс.

AD7895 видає результат перетворення сигналів зі швидкісного послідовному інтерфейсу. Цей двопровідний послідовний інтерфейс має послідовний вхід тактових імпульсів і послідовний вихід даних, синхронізованих з цими зовнішніми тактовими імпульсами.

Додатково до традиційних статичних характеристик, таких як лінійність і абсолютна і відносна похибки, для AD7895 визначені динамічні характеристики: коефіцієнти нелінійних спотворень і шуму.

На рисунку 2.3. зображено функціональну схему цього пристрою.

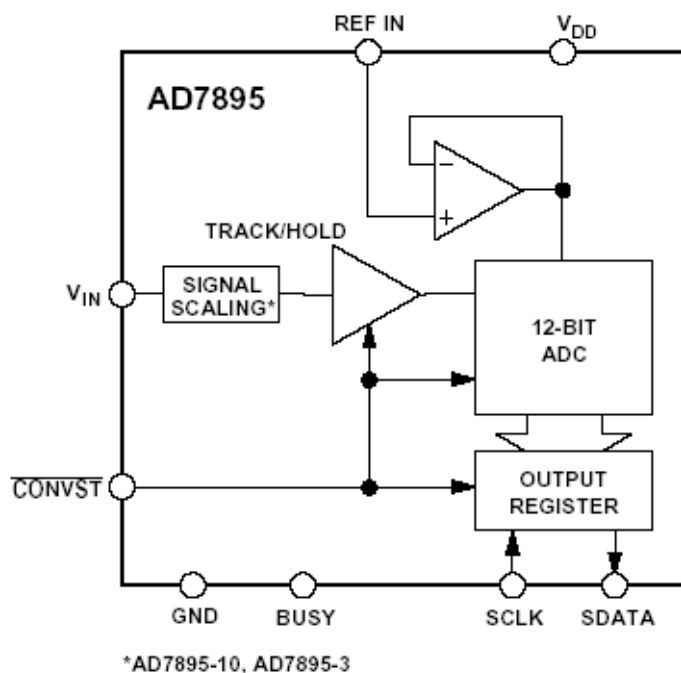


Рисунок 2.3 – Функціональна схема AD7895

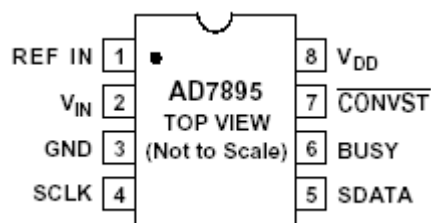


Рисунок 2.4 – Розташування виводів пристрою AD7895

Випускаються прилади різних модифікацій, що відрізняються вхідним динамічним діапазоном: ± 10 В (AD7895-10), ± 2.5 В (AD7895-3), від 0 В до 2.5 В (AD7895-2). Усі модифікації працюють від однополярного джерела живлення + 5 В і мають потужність споживання не більше 20 мВт.

Пристрій AD7895 має режим високошвидкісного перетворення і, для застосування у пристроях з малим споживанням, автоматичний режим зі зниженим споживанням, в якому після завершення перетворення прилад переходить до режиму очікування, активізуючись тільки при ініціалізації наступного перетворення.

Цей пристрій найбільш задовольняє вимогам імпульсного вимірювання, оскільки він дає можливість за чотири мілісекунди провести всі необхідні вимірювання. Його апертурний час дозволяє зробити щонайменше 1000 вимірювань за половину часу імпульсного освітлення фотоелектричного перетворювача.

2.3 Вимоги до електронного навантаження фотоелектричного перетворювача для вимірювання вольт-амперних характеристик

Електронне навантаження – це особливий тип силового вимірювача, призначений для імітації навантаження як первинних, так і вторинних джерел електроживлення. Електронне навантаження здатне не тільки виступати в ролі навантажувального елемента, як цю роль раніше виконували і до сих пір виконують реостати, але і в ролі засобу вимірювання, здатного забезпечити вимірювання основних параметрів джерел живлення. Електронні навантаження постійного струму можуть емулювати режими постійного струму (Constant Current або CC), постійного опору (Constant Resistance або CR), постійної напруги (Constant Voltage або CV), динамічного навантаження і короткого замикання. Електронні навантаження змінного струму можуть емулювати режими постійного струму (CC), постійного опору (CR), коефіцієнта амплітуди (Constant Factor або CF), коефіцієнта потужності (Power Factor або PF) і короткого замикання. Електронні навантаження також можуть імітувати статичні та динамічні режими навантаження, існуючи у реальних умовах експлуатації джерел живлення. Для того, щоб повніше уявити порядок застосування електронного навантаження для тестування параметрів джерел живлення, необхідно звернутися до основних функцій самих джерел живлення (ДЖ).

Незалежно від типу ДЖ вони виконують одну з двох функцій. Перша – служити джерелом напруги (змінної або постійної), здатним підтримувати вихідну напругу при зміні струму навантаження. Це найбільш поширені ДЖ – генератори, акумуляторні батареї, хімічні джерела струму тощо. Друга – служити джерелом струму (знову ж змінного або постійного), здатного підтримувати струм у навантаженні при зміні падіння напруги на навантаженні. Ці ДЖ застосовуються, наприклад, при заряді акумуляторних батарей, коли необхідно забезпечити незмінну величину струму заряду. Такий парк приладів, як лабораторні ДЖ, мають в собі ці дві функції одночасно – вони здатні забезпечувати режим стабілізації напруги і струму.

Електронні навантаження, як уже зазначалося вище, мають кілька режимів роботи. Розглянемо їх докладніше.

Режим постійного струму (ПС)

У режимі постійного струму через електронне навантаження буде протікати струм відповідно до заданого значення струму на електронному навантаженні, і це значення струму буде підтримуватися постійним при зміні значення вхідної напруги ДЖ. Схема заміщення і графік залежності «напруга-струм» наведені на рисунку 2.5.

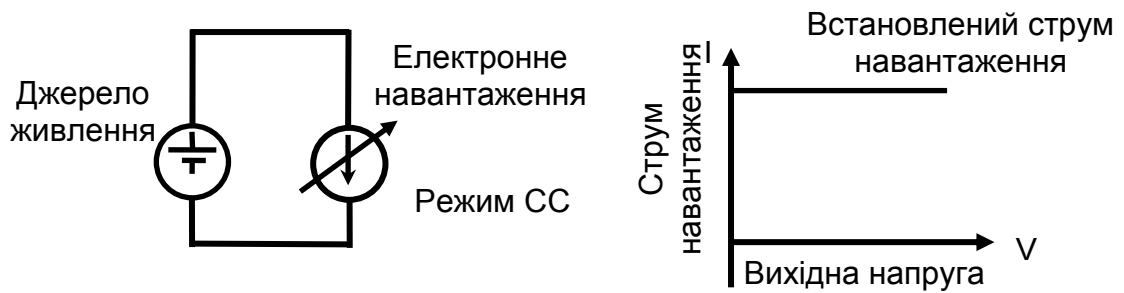


Рисунок 2.5 – Схема заміщення та графік залежності режиму ПС

Режим постійного струму може бути використаний для тестування джерел напруги і визначення їх основних параметрів – похибки установки вихідної напруги і нестабільності вихідної напруги. Похибка установки вихідної напруги – це різниця між номінальним значенням вихідної напруги (значенням вихідної напруги, яке має бути на виході нерегульованого ДЖ у відповідності з його параметрами або встановлене значення вихідної напруги на виході регульованого ДЖ) і його виміряним дійсним значенням. Нестабільність вихідної напруги при зміні струму навантаження – це різниця між вихідною напругою без навантаження (струму) і вихідною напругою при максимальному навантаженні (струмі). Електронні навантаження мають власні вбудовані електронні вимірювальні прилади – вольтметр і амперметр, що дозволяє безпосередньо проводити вимірювання основних параметрів ДЖ. Зазвичай електронні навантаження, мають похибки вимірювання напруги не гірше 0,1 % і струму не гірше 0,2 %. З огляду на те, що більшість лабораторних ДЖ має похибку установки вихідної напруги близько 0,5 %, уніфіковані модулі живлення AC\DC – 3 ... 13 %, акумулятори – близько 1 %, а побутові генератори змінного струму близько 5 %, то похибки вимірювання напруги електронними навантаженнями цілком відповідають рішенням цих задач.

Не всі електронні навантаження мають можливість чотиризондового підключення до ДЖ. Багато виробників з метою зменшення вартості електронного навантаження цю можливість виключають.

Важливим параметром електронного навантаження у режимі постійного струму є мінімальна напруга на навантаженні, що забезпечує задану силу струму.

Режим постійної напруги (ПН)

У режимі постійної напруги через електронне навантаження буде протікати струм відповідно до заданого значення струму на джерелі живлення, який знаходиться в режимі стабілізації напруги, і це значення напруги буде підтримуватися постійним при зміні значення вхідного струму джерела живлення. Схема заміщення і графік залежності «напруга-струм» наведені на рисунку 2.6.

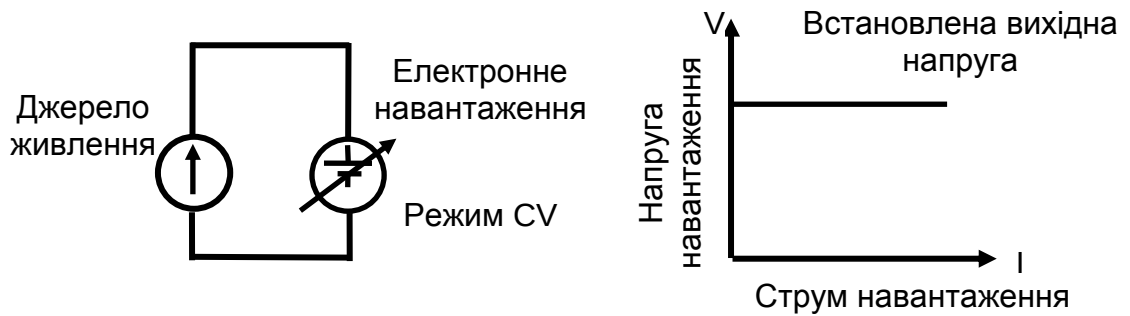


Рисунок 2.6 – Схема заміщення і графік залежності напруги від струму

Режим ПС використовується для тестування джерел струму. Часто ним користуються при визначенні характеристик обмеження за струмом джерел живлення. Так само його можна застосовувати для тестування зарядних пристроїв і цілком для аналізу ФП у режимі стабільного струму.

Режим постійного опору (ПО)

У режимі постійного опору на електронному навантаженні встановлюється значення опору, тобто через навантаження буде протікати струм, лінійно пропорційний вхідній напрузі відповідно до заданого опором. Схема заміщення і графік залежності напруга – струм наведені на рисунку 2.7.

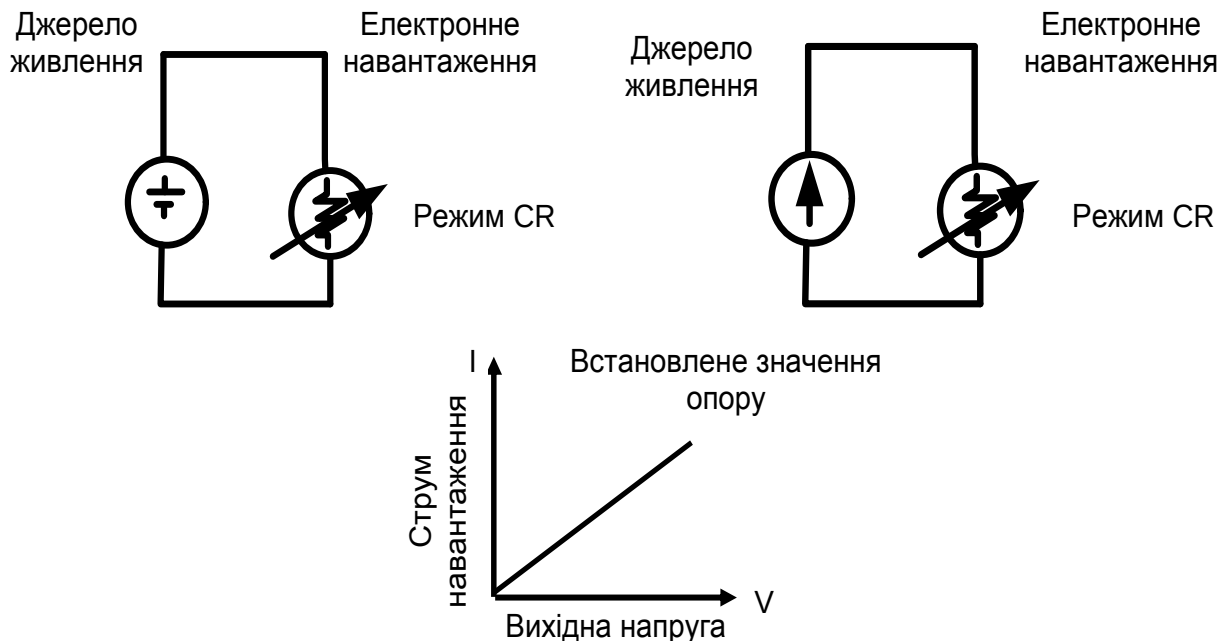


Рисунок 2.7 – Схема заміщення і графік залежності напруги від струму у режимі постійного опору

Режим ПО може використовуватися для тестування джерел напруги (струму) при визначенні гранично можливих (мінімальних і максимальних) значень струму, що генерується. На перший погляд, за наявності режимів ПН і ПС, здається, що режим ПО великого сенсу не

має, але це не так. Насправді, при використанні режиму П, при визначенні навантажувальної спроможності ДЖ треба бути гранично обережним, особливо, якщо тестуванню піддаються імпульсні ДЖ. Наприклад, імпульсне ДЖ з вихідними параметрами 5 В і 50 А не в змозі забезпечити струм у навантаженні при напрузі 0...5 В. Схема захисту від короткого замикання визначить режим електронного навантаження ПС як режим короткого замикання і вимкне джерело живлення від навантаження, оскільки електронне навантаження навіть при напрузі 2 В відбиратиме від джерела живлення струм 50 А. Для цього випадку оптимальним рішенням є режим ПО, при якому струм у навантаженні наростає пропорційно вихідній напрузі. Схема захисту від короткого замикання ДЖ у цьому випадку не буде вимикати джерело від навантаження.

Динамічне навантаження

Найчастіше ДЖ експлуатуються і перевіряються в статичному режимі – коли скидання і додавання навантаження відбуваються епізодично, або навантаження поступово змінюється. В цьому випадку компенсаційна схема стабілізації вихідної напруги ДЖ здатна підтримувати її задане значення. Але останнім часом широке застосування отримали динамічні навантаження, що мають режим роботи, коли скидання і додавання навантаження відбуваються практично миттєво від холостого ходу до максимального значення. Наприклад, робота комп'ютерного жорсткого диску, при дії якого через нього протікає різний струм. При цьому частота змінення навантаження знаходиться в межах від одиниць герц до одиниць кілогерц. Такий режим роботи ДЖ носить назву «динамічний». Динамічний режим застосовується для тестування перехідних процесів у джерелах живлення. При роботі у динамічному режимі електронні навантаження періодично переключаються між двома навантажувальними значеннями. На рисунку 2.8 зображено схему заміщення і форму струму електронного навантаження у динамічному режимі.

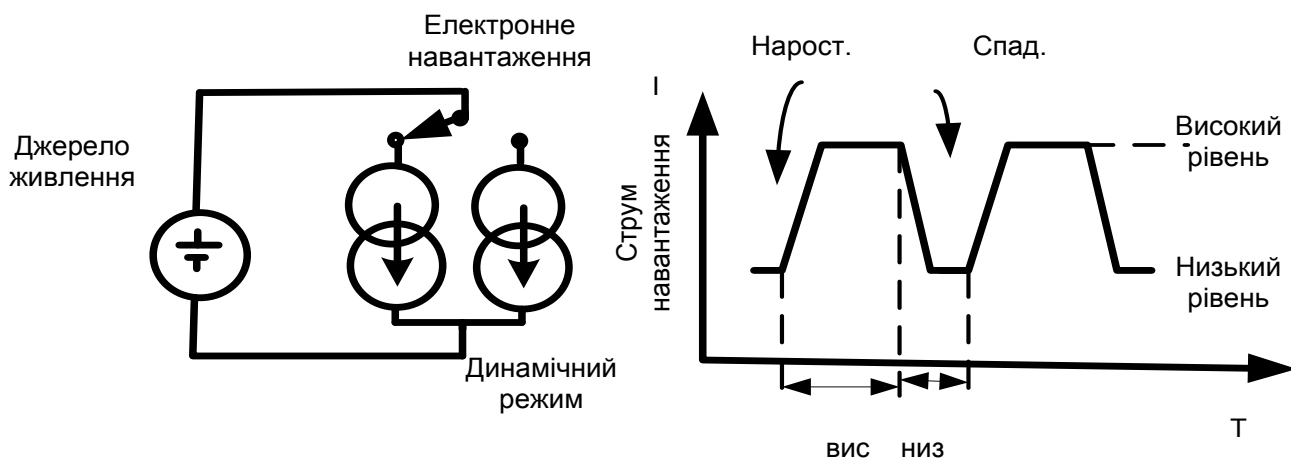


Рисунок 2.8 – Схема заміщення і форма струму електронного навантаження в динамічному режимі

У динамічному режимі нестабільність напруги (струму) і перехідні процеси в джерелах живлення можуть бути оцінені шляхом вимірювання їх вихідної напруги для різних комбінацій значень сили струму (великий / малий), тривалості протікання великих / малих струмів і швидкості їх зміни в часі.

Режим короткого замикання

Джерела живлення постійного струму мають дуже малий внутрішній опір. Тому схеми їх захисту мають вмикатися при досягненні межі по вихідному струму, наприклад в умовах короткого замикання, що захищає джерело живлення від пошкодження. Навантаження КЗ можуть емулювати режим короткого замикання одним натисканням кнопки. Таким чином, немає необхідності використовувати зовнішні короткозамикачі при тестуванні джерел живлення. При цьому значення струмів і напруг короткого замикання будуть відтворюватись на вимірювальних приладах електронного навантаження.

Системи навантаження для вимірювання параметрів фотоелементів

Вимірювачі ВАХ і ВВХ забезпечують тестування активних і пасивних нелінійних компонентів електронних схем і екстракцію із знятих характеристик електрофізичних параметрів напівпровідникових приладів та шарів. Вони побудовані на базі джерел-вимірювачів, що забезпечують одночасно формування тестового впливу напруги (або струму) на прилад, що тестується необхідним навантаженням у ланцюзі при здійсненні вимірювання результуючих струму і напруги. Активні компоненти тестуються за допомогою двохканальних систем (один канал реєструє вихідний струм та/або напругу, інший канал формує вхідну дію на керуючу дію приладу (база або затвор транзистора)). Пасивні елементи можуть тестувати одноканальні системи. Найцікавіший аналог для цього типу приладів навантаження американської компанії Keithley Instruments.

Це універсальна система для вимірювань вольт-амперних характеристик і вольт-фарадних характеристик на постійному струмі, а також в імпульсному режимі для напівпровідникових приладів і тестових структур на напівпровідниковій пластині у напівпровідниковому виробництві. Вона має модульну багатоканальну архітектуру і настроює конфігурацію, підтримуючи до восьми вимірювальних модулів і додаткових модулів

Система має значні можливості з автоматичного тестування:

- батоканальний вимір ВАХ;
- вимірювання ВАХ у частотному діапазоні від 1 кГц до 10 МГц з модулями високої та середньої потужності;
- інтерактивний інтерфейс, завдяки якому навіть недосвідчений користувач може відразу без допомоги програміста приступити до вимірювань, які займають трохи часу;
- імпульсні вимірювання з опціями;

- аналіз з екстракцією електрофізичних параметрів напівпровідників. Поєднання таких властивостей покладене в електронне навантаження лабораторної установки.

3 СТРУКТУРА ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ІМПУЛЬСНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВАХ

3.1 Загальна характеристика

На основі аналізу даних з вимірювальних комплексів визначення ВАХ ФП і модулів ФП у режимі імпульсного освітлення розроблені основні елементи установки, що призначена для вивчення згідно з курсом. У цьому розділі наведено схемо-технічні рішення основних модулів і дано приклад елементної бази для реалізації з обмеженим бюджетом.

Інформаційно-керуючий комплекс імпульсних вимірювань ВАХ структурно складається з таких пристроїв:

- ПЕОМ з монітором і необхідними периферійними пристроями;
- адаптер сполучення ПЕОМ з імпульсною установкою;
- імпульсна установка;
- ксенонова лампа;
- контрольний фотодатчик;
- фотоелектричний перетворювач або фотоелектрична батарея, що випробовуються.

3.2 Структурна схема і опис складу імпульсної установки

Установка структурно складається з трьох основних пристроїв (модулів)

- модуля імпульсного освітлювача;
- модуля вимірювача;
- модуля навантаження ФП і фотобатареї.

Структурну схему імпульсної установки наведено на рисунку 3.1.

Конструктивно всі модулі установки розміщені у загальному корпусі.

Електроживлення модулів здійснюється від однофазної промислової мережі загального призначення з параметрами 220 + 10В...-15В, спільним мережним кабелем. Споживання від мережі становить не більше 180 ВА.

Модулі установки при виконанні вимірювань працюють узгоджено за рахунок керування від загальної програми комп'ютера.

Модуль імпульсного освітлювача забезпечує формування світлового потоку із заданими параметрами за інтенсивності та спектру шляхом ініціювання ксенонової лампи і стабілізації режиму її роботи протягом робочого імпульсу.

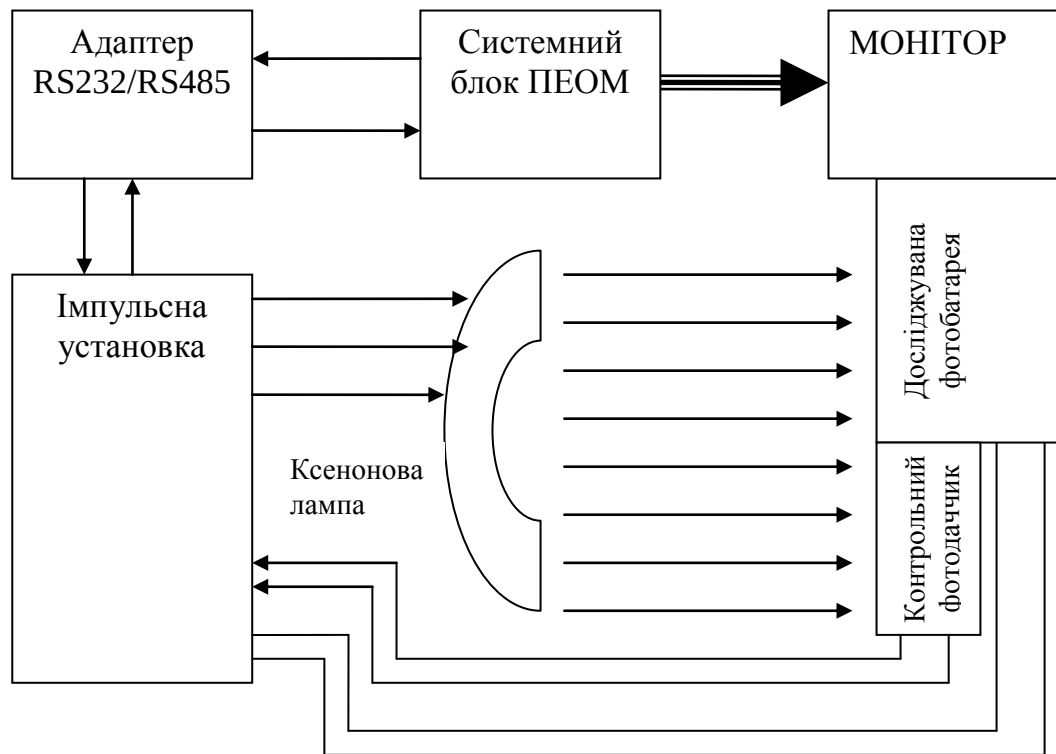


Рисунок 3.1 – Схема структурна імпульсної установки

Модуль вимірювача забезпечує вимір (перетворення в цифровий код) сигналу напруги на затискачах випробуваної ФП чи фотобатареї, сигналу струму у вихідному ланцюзі ФП або фотобатареї (значення струму надходить до навантаження) і сигналу тарованого датчика світлового потоку, що розміщується в зоні освітлення. Процес вимірювання за тривалістю перевищує тривалість робочого імпульсу і захоплює ділянки перехідних процесів при підпалі й виході на заданий режим ксенонової лампи та при її вимкненні.

Модуль навантаження фотоперетворювача чи фотобатареї забезпечує зміну номіналу навантаження, підключеного до затискачів випробовуваних ФП чи фотобатареї протягом робочого імпульсу від стану, близького до короткого замикання, до стану, близького до холостого ходу.

У початковому стані (до підпалу лампи) навантаження перебуває в стані, близькому до короткого замикання. Цей стан зберігається до виходу лампи на стаціонарний режим випромінювання зі стабільними параметрами. Далі змінюється номінал навантаження за певним законом.

3.3 Модуль імпульсного освітлювача

3.3.1 Призначення модуля імпульсного освітлювача

Модуль імпульсного освітлювача призначений для формування

світлового потоку за заданими параметрами з інтенсивності й спектру, шляхом підпалу ксенонової лампи і стабілізації режиму її роботи протягом робочого імпульсу.

3.3.2 Технічні характеристики

- Напруга, що підводиться до аноду ксенонової лампи (відносно катоду) – 200...350 В постійного струму.
- Амплітуда імпульсної напруги, що підводиться до електроду підпалення ксенонової лампи (відносно катоду) – до 10 кВ.
- Миттєва електрична потужність, що підводиться до анодного ланцюга ксенонової лампи на стадії стабілізованого випромінювання – 10...17 кВА.
- Тривалість імпульсу стабілізованого випромінювання 10...12 мс.
- Електрична потужність, споживана від мережі живлення не більше 200 ВА.

3.3.3 Схема структурна модуля імпульсного освітлювача

Модуль імпульсного освітлювача структурно складається з таких вузлів:

- розділовий трансформатор живлення модуля освітлювача з плавким запобіжником і окремим тумблером вмикання;
- двотактний інвертор заряду накопичувача анодного ланцюга ксенонової лампи;
- схема живлення ланцюга запалювання ксенонової лампи;
- накопичувач заряду живлення анодного ланцюга ксенонової лампи;
- ключ живлення анодного ланцюга ксенонової лампи;
- стабілізатор струму анодного ланцюга ксенонової лампи;
- контролер керування роботою модуля імпульсного освітлювача;
- допоміжні джерела живлення контролера, ланцюгів зсуву стабілізатора струму анода, стабілізатора напруги накопичувача, інтерфейсу зв'язку з ПЕОМ, ключа живлення анодного ланцюга, схеми вимірювання напруги накопичувача;
- роз'єм підключення установки до ксенонової лампи.

3.3.4 Схема функціональна модуля імпульсного освітлювача та її робота

Функціональну схему модуля показано на рисунку 3.2

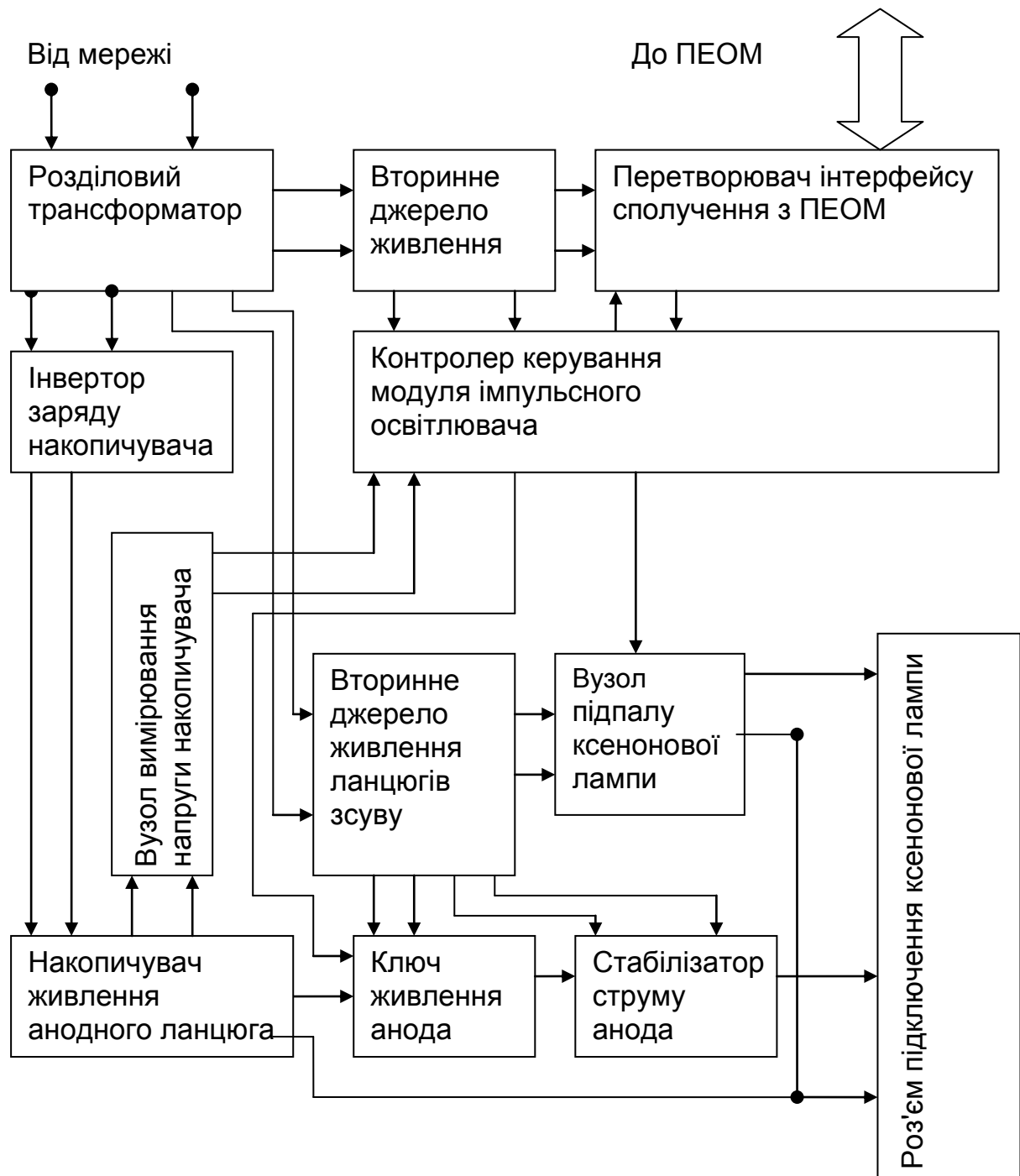


Рисунок 3.2 - Схема функціональна модуля імпульсного освітлювача

При включенні електроживлення напруга вихідних обмоток розділового трансформатора через відповідні випрямлячі, С-фільтри подається на забезпечення вторинного джерела живлення контролера керування модуля, живлення інвертора заряду, живлення ланцюгів зсуву елементів схеми модуля, живлення схеми підпалу. У цьому стані модуль освітлювача готовий до прийому команд керування від ПЕОМ. Накопичувач живлення анодного ланцюга при цьому не заряджений, ключ живлення анодного ланцюга лампи закритий, ключ запалювання закритий, ключі стабілізатора струму лампи відкриті за рахунок напруги

вторинного джерела зсуву цих ключів. Контролер модуля виконує програму-монітор, що забезпечує приймання команд керування від ПЕОМ у будь-який момент часу. У цьому стані модуль освітлювача може перебувати тривалий час до запуску програми, що керує від ПЕОМ. При запуску програми спочатку надходить команда вмикання інвертора заряду накопичувача. Інвертор забезпечує підвищення напруги заряду накопичувача в порівнянні з випрямленою напругою відповідної вторинної обмотки розділового трансформатора. У схемі інвертора передбачено обмеження максимальної напруги заряду. Крім того, при роботі контролера по окремому каналу вимірювання проводиться контроль напруги заряду накопичувача і в момент досягнення програмно заданого значення інвертор вимикається, і заряд накопичувача припиняється. Інформація про напругу заряду накопичувача виводиться на екран монітора ПЕОМ.

Починаючи з моменту досягнення заданого значення напруги накопичувача можливий підпал ксенонової лампи і формування робочого імпульсу опромінення ФП або фотобатарей.

Запуск процесу забезпечується надходженням відповідної команди з ПЕОМ на контролер керування і формуванням сигналу вмикання ключа живлення анодного ланцюга. При вмиканні зазначеного ключа напруга накопичувача подається на вхід стабілізатора струму анодного ланцюга лампи. Оскільки ключі стабілізатора струму у вихідному стані відкриті, ця напруга прикладається до аноду лампи позитивним полюсом. Негативний полюс напруги накопичувача безпосередньо з'єднується з катодом лампи. Для запуску лампи необхідно подати високу напругу на електрод запалювання. У схемі живлення електроду підпалу також є конденсаторний накопичувач невеликої ємності (0,1 мкф). На відміну від накопичувача у анодному ланцюзі, ланцюжок заряду цього накопичувача діє постійно з моменту вмикання живлення розділового трансформатора, від окремої обмотки цього трансформатора. Струм заряду цього накопичувача обмежений резистором відповідного номіналу. Напруга заряду визначається параметрами схеми, не обмежується і не контролюється в процесі виконання вимірювань. Ланцюг заряду не вимикається на час розряду накопичувача при формуванні імпульсу запалювання. Надходження команди на підпал призводить до розряду накопичувача через первинну обмотку автотрансформатора підпалу. Негативний полюс накопичувача підпалу і один з відводів вторинної високовольтної обмотки також з'єднані з катодом ксенонової лампи. Зазначені дії призводять до формування високовольтного імпульсу на вторинній обмотці автотрансформатора. Під дією імпульсу запалювання в ксеноновій лампі виникає газовий розряд, струм розряду протягом 2 мс досягає номінального значення. У цей момент за сигналами датчиків струму, встановлених у схемі стабілізатора струму анодного ланцюга, формуються сигнали зворотного зв'язку на керуючі входи ключів стабілізатора струму, що призводить до обмеження величини струму на

рівні апаратно-заданого значення і, відповідно, до стабілізації інтенсивності випромінювання ксенонової лампи. Тривалість робочого імпульсу обмежується подачею команди на вимикання ключа живлення анодного ланцюга. Вимкнення ксенонової лампи можливо також при зниженні напруги накопичувача нижче гранично допустимого. Обмеження тривалості імпульсу струму запобігає перегріванню лампи та опромінюваних ФП або фотобатареї, а також скорочує тривалість підзарядки накопичувача у анодному ланцюзі до заданого значення. Завершується цикл формування робочого імпульсу включенням інвертора заряду для підготовки наступного запуску.

3.3.5 Конструкція модуля імпульсного освітлювача

Лабораторний екземпляр модуля імпульсного освітлювача зібраний на двосторонній печатній платі. Електронні компоненти змонтовані методом пайки на місця, відповідно, до топології печатної плати. Компоненти в DIP-виконанні встановлені в монтажні панельки, змонтовані на макетній платі.

3.4 Модуль вимірювача

3.4.1 Призначення модуля вимірювача

Модуль вимірювача призначений для вимірювання (перетворення в цифровий код) сигналу напруги на затискачах випробовуваних ФП чи фотобатареї, сигналу струму у вихідному ланцюзі ФП чи фотобатареї (струму, що віддається в навантаження) і сигналу тарованого датчика світлового потоку, що розміщується в зоні освітлення.

3.4.2 Технічні характеристики

- Число каналів вимірювання-3.
- Швидкодія схеми перетворення аналог \ код – 20000 перетворень \ сек.
- Розрядність результату перетворення – 12 двійкових розрядів.
- Полярність вимірюваних сигналів позитивна щодо входу GND.
- Об'єм пам'яті ОЗП кожного каналу – 4096 слів.

3.4.3 Структурна схема модуля вимірювача

Модуль вимірювача структурно складається з таких вузлів:

- розділовий трансформатор живлення модуля з плавким запобіжником і окремим тумблером вмикання;
- вторинне джерело живлення контролера керування модуля освітлювача і перетворювача інтерфейсу зв'язку контролера з ПЕОМ;

- перетворювач інтерфейсу зв'язку контролера з ПЕОМ;
- вузол синхронізації;
- аналого-цифрові перетворювачі сигналів датчиків напруги і струму випробовуваних ФП чи фотобатареї та сигналу контрольного фотодатчика;
- вхідні пристрої каналів напруги і струму ФП чи фотобатареї (шунт струму, дільник напруги, операційний підсилювач сигналу струму);
- вхідні пристрої каналу контрольного фотодатчика (операційний підсилювач сигналу, джерело еталонної напруги, мультиплексор входу операційного підсилювача);
- оперативний пристрій;
- клеми підключення модуля вимірювання до випробовуваних ФП чи фотобатарей;
- клеми підключення модуля вимірювання до контрольного фотодатчика.

3.4.4 Схема функціональна модуля вимірювача. Опис роботи модуля вимірювача за функціональною схемою

Схема функціональна модуля наведена на рисунку 3.3.

При вмиканні електроживлення напруга вихідних обмоток розділового трансформатора через відповідні випрямлячі, С-фільтри подається на живлення вторинного джерела живлення контролера керування модуля, перетворювача інтерфейсу зв'язку контролера з ПЕОМ і вузла синхронізації модуля. У цьому стані контролер керування модуля освітлювача готовий до приймання команд керування від ПЕОМ. При цьому вузол синхронізації формує безперервні послідовності синхроімпульсів, необхідні для роботи аналого-цифрових перетворювачів (далі АЦП) і оперативної пам'яті (далі ОЗП). Вплив синхроімпульсів на елементи схеми блокується вихідними сигналами контролера до початку виконання програми вимірювання. Робота модуля вимірювача узгоджується з роботою модуля імпульсного освітлювача і модуля навантаження загальною програмою ПЕОМ, що керує всіма модулями.

При запуску програми спочатку надходять команди початкової установки функцій портів уведення-виведення мікроконтролера і окремих виводів, у тому числі команди установки режимів роботи каналу послідовного інтерфейсу SPI мікроконтролера (число бітів обміну, швидкість, модифікація і фазування сигналів), і далі вже з використанням інтерфейсу SPI встановлюється режим роботи мікросхем ОЗП. При виконанні циклу вимірювань, за командою від ПЕОМ, контролер модуля виконує відключення інформаційних входів і ланцюгів тактування мікросхем ОЗП від відповідних виходів мікроконтролера і підключення інформаційних входів мікросхем ОЗП до інформаційних виходів

відповідних АЦП, а ланцюгів тактування до ланцюгів схеми синхронізації.

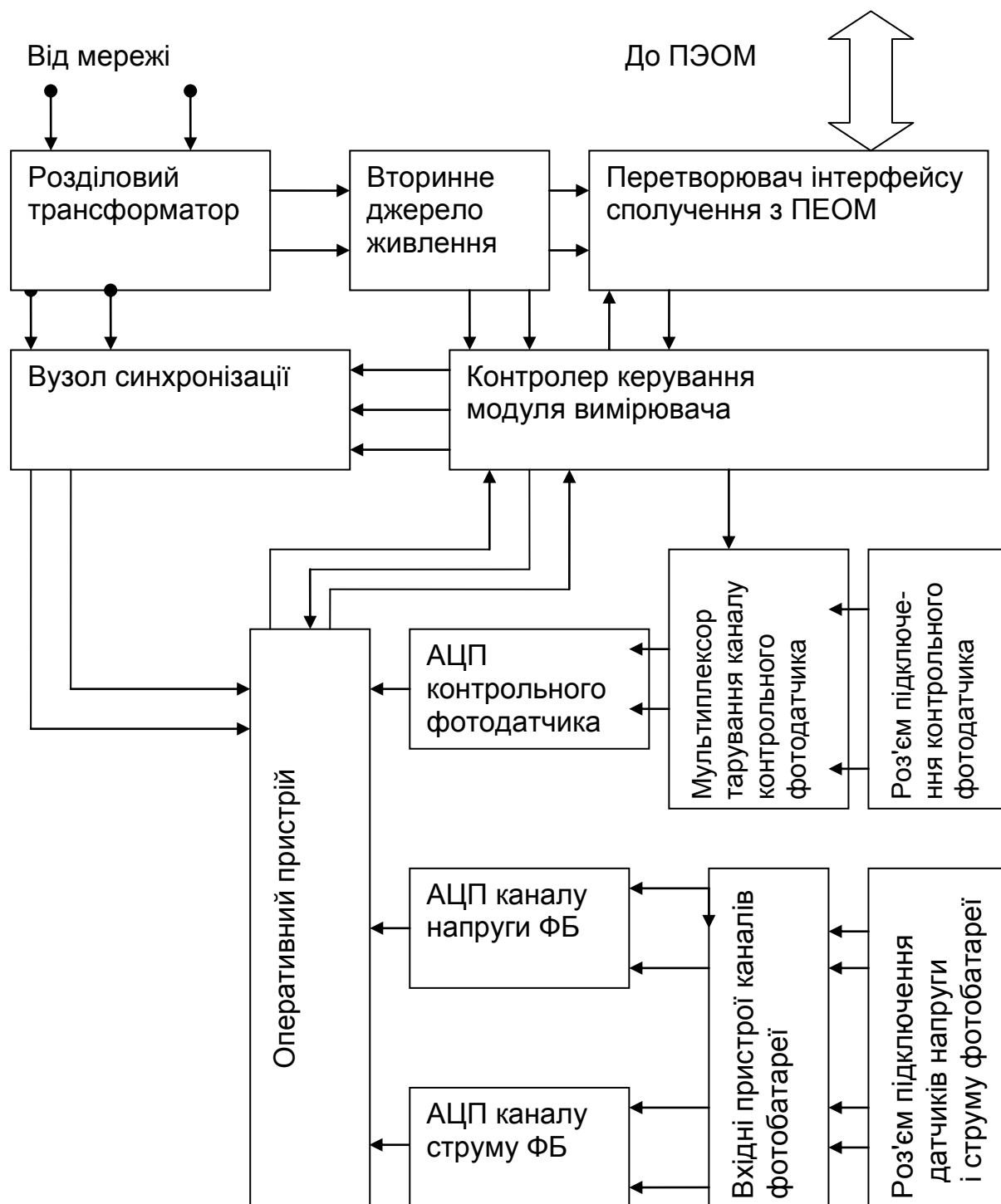


Рисунок 3.3 – Схема функціональна модуля вимірювача

Також на час циклу вимірювань розблокується вплив імпульсів запуску АЦП і імпульсів тактування АЦП. Таким чином, забезпечується чергування операцій синхронного запуску АЦП-1, АЦП-2, АЦП-3 і перепис результатів перетворення в ОЗП. Узгодження в часі з роботою модуля освітлювача здійснюється таким чином, що вимірювання починаються раніше підпалу ксенонової лампи і завершуються після

повного вимкнення лампи. Такий алгоритм забезпечує реєстрацію перехідних процесів (фронтів) запалювання і вимкнення лампи. Після завершення операції безпосереднього вимірювання контролер виробляє зворотнє перемикання ланцюгів синхронізації АЦП і ОЗП, встановлюється режим читання даних ОЗП через інтерфейс SPI у мікроконтролер і передача з мікроконтролера в ПЕОМ по каналу послідовного обміну USART з перетворенням в стандарт RS485. У циклі вимірювання запис даних у мікросхеми ОЗП здійснюється одночасно за трьома каналами від відповідних АЦП, а при читанні даних з ОЗП вичитування проводиться по черзі з кожної мікросхеми.

3.4.5 Конструкція модуля вимірювача

Лабораторний екземпляр модуля вимірювача зібраний на макетній двосторонній печатній платі з наскрізними отворами для монтажу електронних компонентів методом пайки з кроком 2,54 мм. Електронні компоненти у DIP-виконанні встановлені в монтажні панельки, змонтовані на макетній платі. Електронні компоненти у SMD-виконанні змонтовані на печатній платі, виготовленій промисловим способом. З'єднання елементів відповідно з принциповою електричною схемою виконані за допомогою одножильного мідного лудженого дроту з вініловою ізоляцією.

3.4.6 Елементна база побудови схеми модуля

У модулі навантаження використані перспективні електронні компоненти середнього степеня інтеграції:

- KP1533ID3, 74 HC574N – мікросхеми логіки;
- AD7595 – швидкодіючі аналого-цифрові перетворювачі;
- AD680 – джерело опорної напруги;
- FM25CL64 – мікросхеми оперативної пам'яті;
- 1N5819 – діоди Шотткі;
- JAMICON – електролітичні конденсатори

3.5 Модуль навантаження

3.5.1 Призначення модуля навантаження

Модуль навантаження ФП і фотобатареї призначений для змінення номіналу навантаження, що підключене до затискачів випробовуваних ФП і фотобатареї протягом робочого імпульсу від стану, близького до короткого замикання, до стану, близького до холостого ходу.

3.5.2 Технічні характеристики

- Мінімальний опір - 0.0023 Ом.
- Максимальний опір - 32000 Ом.
- Число дискретних значень номіналів навантаження в зазначеному діапазоні – 64572.
- Допустима величина струму через навантаження при тривалості імпульсу 10 мс ...10 А.

3.5.2 Структурна схема модуля навантаження

Структурно модуль навантаження складається з таких вузлів:

- вторинне джерело живлення;
- оперативний пристрій;
- зсувний регістр;
- пристрій гальванічного поділу;
- вузол електронних ключів;
- матриця високостабільних резисторів;
- роз'єми з'єднання з модулем вимірювача.

3.5.3 Функціональна схема модуля навантаження

Опис роботи модуля навантаження виконано за функціональною схемою.

Схему функціональну модуля зображено на рисунку 3.4.

Керування роботою модуля навантаження здійснюється від контролера модуля вимірювача. Модуль навантаження забезпечує змінення номіналу навантаження, підключеного до виходу випробовуваних ФП, чи фотобатареї за певним законом, що задається при налаштуванні установки в цілому. Змінення номіналу навантаження здійснюється комутацією резисторів матриці за допомогою швидкодіючих електронних ключів.

Таким чином, робота модуля навантаження складається з двох етапів. На першому з них керуюча програма ПЕОМ через контролер модуля вимірювача записує в ОЗУ модуля навантаження коди номіналів навантаження, сформовані при налагодженні. Записані коди зберігаються при відключенні живлення модуля. У циклі вимірювання вольт-амперної характеристики випробовуваних ФП чи фотобатареї, за командами ПЕОМ, що надходять до модуля навантаження через контролер модуля вимірювача, здійснюється синхронне з перетвореннями АЦП вичитування з ОЗП послідовного коду, відповідного чергового значення номіналу навантаження. Вичитування проводиться в інтервалі між перетвореннями АЦП. Послідовний код перетворюється у паралельний за допомогою зсувного регістра. З

виходів регістра, що переміщує сигнали окремих розрядів 16-розрядного двійкового коду, надходять на входи осередків гальванічної розв'язки і далі на входи електронних ключів.

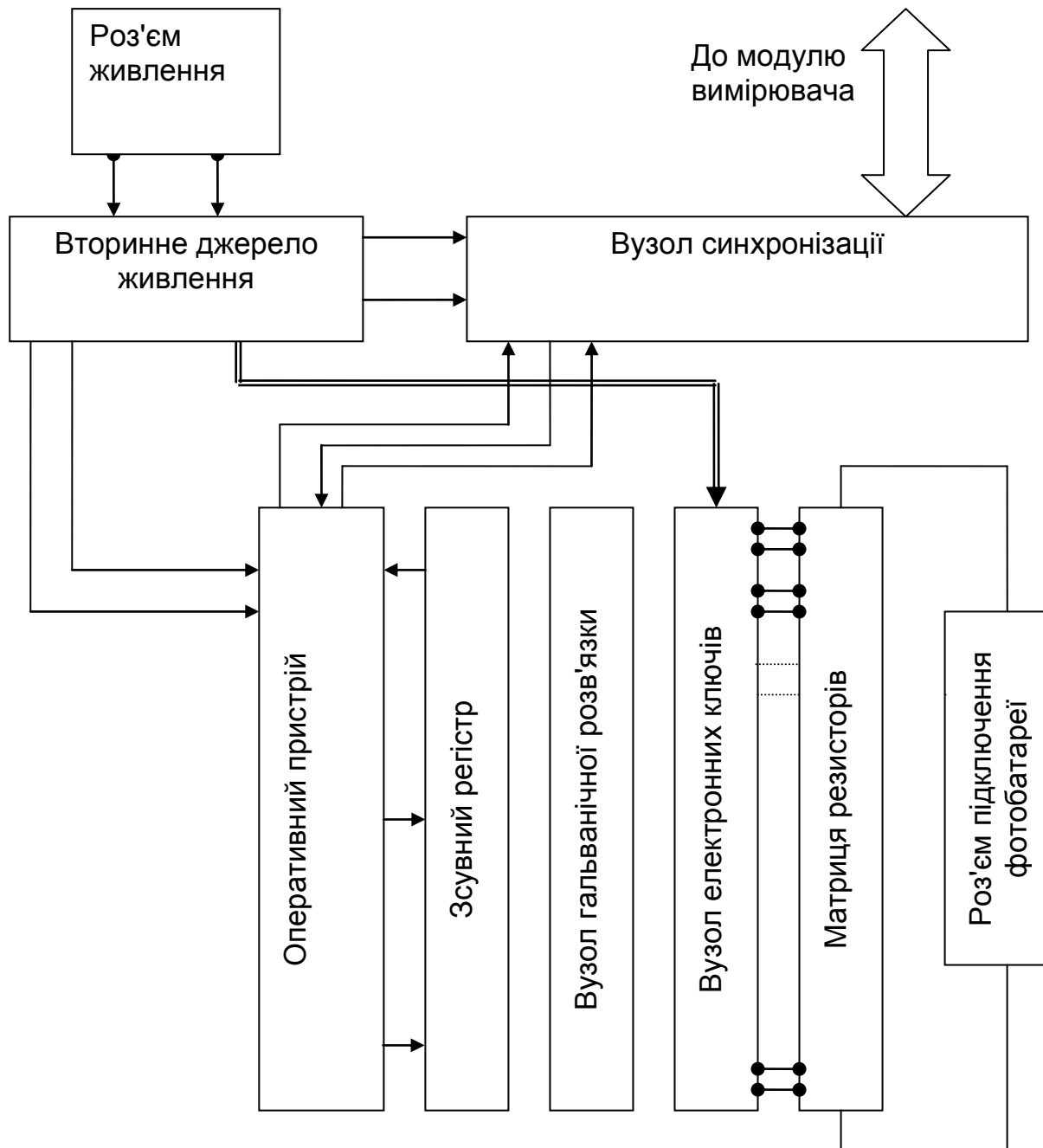


Рисунок 3.4 - Схема функціональна модуля навантаження

Зсув входів ключів виконується гальванічно розділеними між собою і від інших елементів схеми напругами вторинного джерела (загальне число таких виходів-16- відповідає розрядності коду і числу ключів). Залежно від комбінації станів ключів, формується відповідний набір резисторів, увімкнених у ланцюг навантаження. Виведення резисторів з

комбінації забезпечується їх закорочуванням електронними ключами. Зовнішні затискачі послідовного ланцюжка резисторів підключаються до вихідних клем випробуваної фотобатареї.

3.5.4 Конструкція модуля навантаження

Лабораторний екземпляр модуля навантаження зібраний на макетній двосторонній печатній платі з наскрізними отворами для монтажу електронних компонентів методом пайки з кроком 2.54 мм. З'єднання компонентів, відповідно до схеми принципової електричної, виконані за допомогою одножильного мідного лудженого дроту з вінілової ізоляцією.

Елементи в уніфікованому виконанні (мікросхеми пам'яті) змонтовані на печатній платі, виготовленій промисловим способом.

3.5.5 Елементна база побудови схеми модуля

У конструкції модуля навантаження використані перспективні електронні компоненти середнього ступеня інтеграції:

- КР1533ІДЗ, 74 НС574N – логічні мікросхеми.
- РС817 sharp – оптопари.
- IRF2804 – польові транзистори.
- FM25CL64 – мікросхеми оперативної пам'яті.
- ОСПТМН-1 – високоточні резистори.
- 1N5819 – діоди Шотткі.
- JAMICON – електролітичні конденсатори.

Бібліографічний список

1. Колтун, М. М. Солнечные элементы / М. М. Колтун. – М. : Наука, 1987. – 192 с.
2. Евдокимов, В. М. Расчет последовательного и шунтирующего сопротивлений по вольт-амперной характеристике солнечного элемента / В. М. Евдокимов. //Гелиотехника. 1972, № 6. – С. 16–22.
3. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
4. Рыбкин, С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках/ С. М. Рыбкин, – М. : Физматгиз, 1963. – 496 с.
5. Андреев, В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев – Л. : Наука, 1989. – 310 с.
6. Бобрович, И. В. Влияние интенсивности освещения на сопротивление растекания фотопреобразователей / И. В. Бобрович, В. М. Евдокимов, А. Ф. Милованов, С. В. Рябиков // Солнечная фотоэлектрическая энергетика. Ашхабад: Ылым – 1983. – С. 31–36.
7. Евдокимов, В. М. Проблемы теории и перспективы повышения эффективности фотопреобразования/ В. М. Евдокимов // Фотоприемники и фотопреобразователи; под ред. Ж. И. Алферова, Ю. В. Шмарцева. – Л. : Наука, 1986. – С. 148–180.
8. Раушенбах, Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах; пер. с англ. — М. : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

Навчальне видання

**Губін Сергій Вікторович
Білокінь Володимир Іванович
Сінченко Світлана Володимирівна**

**ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ ІМПУЛЬСНОГО ДЖЕРЕЛА СВІТЛА**

Редактор Є. О. Александрова

Зв. план, 2018

Підписано до видання 27.06.2018

Ум. друк. арк. 2,1. Обл.-вид. арк. 2,38. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001