

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавр

**ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ЯК БАЗОВІ ЕЛЕМЕНТИ КОНТРОЛЬНО-
ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

Студент групи ЕП-71



Д.Є. Замятін

Науковий керівник,

к. ф.-м. н., ст. викл.



О.В. Пилипенко

Завідувач кафедри ЕЗПФ,

д-р фіз.-мат. наук, професор



І.Ю. Проценко

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційна робота бакалавра є фотоперетворювачі, їх види, властивості та застосування.

Мета цієї роботи полягає в з'ясуванні особливих властивостей та способів застосування фотоперетворювачів на даному етапі їх розвитку. Окрім цього, змодельовати роботу фотоперетворювача в різних режимах роботи.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з 2 розділів. У першому розділі міститься інформація літературного огляду про види фотоперетворювачів, їх властивості та застосування. У другому розділі йдеться про опис середовища моделювання Multisim та сам процес моделювання роботи фотодатчика з графічними та табличними даними.

У висновках наведена інформація про розглянуті види фотоперетворювачів з їх перевагами та недоліками, а також приведені результати роботи фотодатчика, що були отримані в ході моделювання його роботи.

Робота викладена на 32 сторінках, у тому числі має 24 рисунків та список з цитованої літератури з 13 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧ, ФОТОДАТЧИК, Multisim, ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОДІОДА

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ І.....	5
ВИДИ, ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	5
1.1 Загальні відомості про фотоперетворювачі	5
1.2 Сонячна електроенергетика.....	13
1.3 Вимірювання освітленості	18
РОЗДІЛ 2. Методика і техніка експерименту	20
2.1 Середовище моделювання Мультисім.....	20
2.2 Моделювання роботи фотоперетворювача	25
ВИСНОВКИ.....	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	31

ВСТУП

Різні перетворювачі неелектричних величин в електричні міцно зайняли своє місце в багатьох областях людського знання, і вже тим більше в медицині. Важко уявити сучасного лікаря, що займається діагностикою різних захворювань і їх лікуванням, і тим більше біоінженера проектує, обслуговуючого медобладнання не спирається на величезну кількість досягнень таких наук як радіоелектроніка, мікроелектроніка, метрологія, матеріалознавство. І хоча, датчики є однією з найбільш повільно розвиваються областей медичної електроніки, та й усієї електроніки в цілому, переважна більшість діагностичних і терапевтичних приладів і систем прямо чи опосередковано містять безліч самих різних перетворювачів і електродів, без яких, часом немислима робота біосистем.

Застосування фотоелектричних перетворювачів для виробництва електроенергії дозволяє комплексно вирішувати питання енергопостачання, захисту навколишнього середовища, економії викопних джерел енергії. Їх спільне використання з різними пристроями силової електроніки в системах електропостачання, з'єднаних з мережею, дозволяє отримувати багатофункціональні системи.

Таким чином, можна сказати, що дана тематика є досить актуальною в наш час у достатній кількості різних галузей. Застосування у нових сферах, всебічне дослідження ФП та проведення різноманітних експериментів з їх використанням – одні з основних завдань на даному етапі розвитку електроніки. Саме тому, можна впевнено стверджувати той факт, що моя робота має науково-практичну значимість. Окрім цього, необхідність виконання цієї роботи ґрунтується на тому, що нинішнє створення виробів електроніки потребує нових, оригінальних підходів до вирішення нагальних проблем.

Результати роботи представлені на Міжнародній конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2021» (м.Суми).

РОЗДІЛ І. ВИДИ, ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1 Загальні відомості про фотоперетворювачі

Фотоелектричними датчиками називаються вимірювальні перетворювачі, що реагують на зміну освітленості, викликане переміщенням об'єкта вимірювання. Для цих цілей підходять датчики розглянутих вище типів Т і R. Як освітлювачі можуть бути використані джерела випромінювання різних довжин хвиль, однак найчастіше застосовуються світловипромінюючі діоди (світлодіоди) або лазери. Функцією фотоелектричних перетворювачів є перетворення оптичного випромінювання в електричний сигнал. Ця функція виконується різноманітними приймачами випромінювання, які в основному відносяться до двох груп – власне фотоелектричним і тепловим.

Це випромінювання може бути:

- власним випромінюванням досліджуваного об'єкта,
- відбитим або розсіюється його поверхнею,
- частково поглинутим, якщо тіло напівпрозорої.

Ряд фотоелектричних перетворювачів використовує принцип переривання. Інтервали засвічення і переривання освітленості є в цьому випадку інформативним параметром досліджуваного процесу.

Фотоелектричні перетворювачі бувають:

- Пасивні - перетворювачі власного випромінювання досліджуваних об'єктів. Такі перетворювачі дозволяють оцінювати енергетичні, спектральні, фазові, поляризаційні характеристики випромінюваного випромінювання.

- Активні - перетворювачі, побудовані на принципі перетворення випромінювання від зовнішнього джерела, що взаємодіє з досліджуваним об'єктом, називають. Як джерела випромінювання в активних перетворювачах використовуються світлодіоди, твердотільні і напівпровідникові лазери.

Останнім часом в поєднанні з волоконними елементами почали використовуватися волоконно-оптичні лазери.

Найбільш важливим елементом, що визначає принцип роботи і можливості датчика, є фотоприймач. Застосовувані в даний час фотоприймачі можуть бути трьох типів:

- із зовнішнім фотоефектом (фотоелементи);
- з внутрішнім фотоефектом (фоторезистори);
- фотогальванічні (фотодіоди, фототранзистори).

До фотоприймача на основі *зовнішнього фотоефекту* відносяться вакуумні фотоелементи. Фотоелемент (ФЕ) являє собою скляний балон, з якого відкачано повітря. Усередині балона розміщені анод і катод. Світловий потік вибиває з катода електрони, які під впливом зовнішнього джерела живлення з ЕРС направляються до анода, створюючи електричний струм (фотострум). При відсутності освітленості фотострум зникає.

Для того щоб електрон міг вийти за межі основної маси речовини, потрібно зробити роботу A виходу (тобто мінімальну енергію, необхідну для видалення електрона з речовини), яка визначається формулою

$$A = hv - mv^2/2,$$

де h - постійна Планка; ν - частота монохроматичного випромінювання джерела світла; $h\nu$ - енергія фотона; $mv^2/2$ - кінетична енергія вилітаючого електрона.

До переваг вакуумних фотоелементів можна віднести стабільність і лінійність їх статичної характеристики (залежності фотоструму від освітленості фотокатода). Недоліками фотоелементів є малі значення фотострумів, великі габарити, трудомісткість виготовлення, крихкість скляної колби, необхідність наявності джерела високої напруги, неможливість роботи на змінному струмі і ін. З цих причин вакуумні фотоелементи практично повсюдно замінені сучасними фотоприймачами (фоторезисторами, фотодіодами, фототранзисторами і т. п.).

Фотоприймачі з *внутрішнім фотоефектом* (фоторезистори) найчастіше виконуються з тонкошарового (плівкового) напівпровідникового матеріалу,

нанесеного на підкладку і забезпеченого двома електричними виводами. Під дією світлового потоку в напівпровіднику з'являються додаткові вільні електрони, за рахунок чого збільшується електропровідність фоторезистора, а його опір зменшується.

Відомо, що внутрішній фотоефект характерний для всіх напівпровідників, проте в фоторезисторах використовують лише деякі з них, які мають найбільш високу фотопровідність. До них відносяться сульфід, селенід і теллурид кадмію, вісмуту, свинцю і талію, деякі оксиди, а також селен, германій і кремній. Найбільшого поширення набули фоторезистори, виготовлені з сірчистого свинцю, сірчистого кадмію, селениста кадмію.

Найпростіша схема включення фоторезистора показана на рис. 1а, його статична характеристика - на рисунку 1.1б

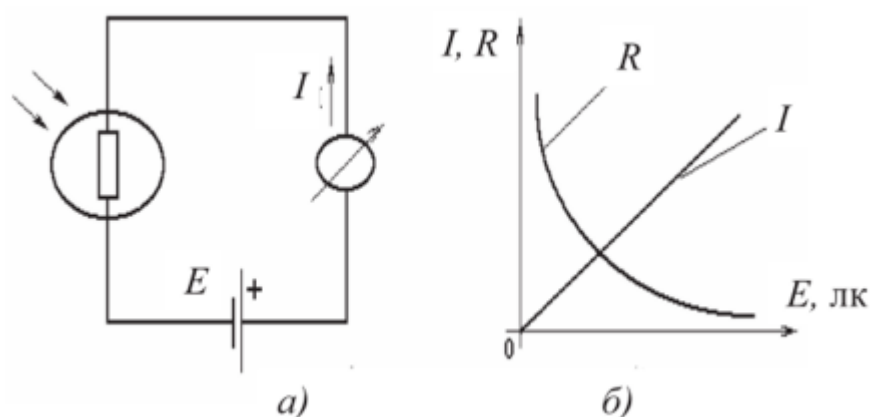


Рисунок 1.1 - Схема включення фоторезистора(а) та його характеристика(б). Адаптовано з [12]

При відсутності освітленості через фоторезистор протікає так званий темпової струм I_T дуже малої величини:

$$I_T = E / (R_T + R_H),$$

де E - ЕРС джерела живлення; R_T - темпової опір (опір фоторезистора в темряві); R_H - опір навантаження.

Опір фоторезистора при його освітленні зменшується до величини R_C , а струм в ланцюзі має значення:

$$I_c = \frac{E}{R_c + R_H}.$$

При зміні освітленості від мінімального (нульового) рівня до максимального значення опір зменшується в 500-1000 разів.

Кратність зміни опорів виражається формулою:

$$\frac{\Delta R}{R_T} = \frac{R_T - R_c}{R_T}.$$

Найважливішими параметрами фоторезисторів є: темновий опір, робоча напруга, інтегральна чутливість (відношення зміни фотоструму на одиницю потужності падаючого випромінювання (при номінальному значенні напруги живлення) та поріг чутливості (величина мінімального сигналу, реєстрованого фоторезистором, віднесена до одиниці смуги робочих частот).

Світлочутливий елемент в деяких типах фоторезисторів виконаний у вигляді круглої або прямокутної таблетки, спресованої з порошкоподібного сульфіду або селеніду кадмію, в інших він представляє собою тонкий шар напівпровідника, нанесеного на скляну підставку. В тому і іншому випадку з напівпровідниковим матеріалом з'єднані два металевих виведення (рисунок 1.2)



Рисунок 1.2 - Конструкції фоторезисторів (Приклади). Адаптовано з [12]

До переваг фоторезисторів відносяться висока чутливість, можливість використання в інфрачервоній області спектра випромінювання, невеликі габарити і можливість роботи в колах постійного і змінного струмів.

Сучасні фоторезистори мають невеликі габарити і масу, прості і надійні, реалізують безконтактне вимірювання і контроль, придатні для вимірювання

рівня рідин і сипучих тіл, використовуються в системах захисту і блокування, контролю запиленості та задимленості приміщень і в багатьох інших ситуаціях.

Фоторезистори знайшли широке застосування в різних галузях промисловості - радіоелектроніці, автоматики і телемеханіки, виміральної техніки (в тому числі для контролю переміщень і деформацій), апаратурі медичного, оборонного, побутового призначення тощо.

Недоліки фоторезисторів: погана взаємозамінність, значна інерційність, істотна залежність опору від температури. При автоматичному вимірі зазвичай використовується мостова схема з усуненням перешкод від зовнішніх засвічень (рисунок 1.3).

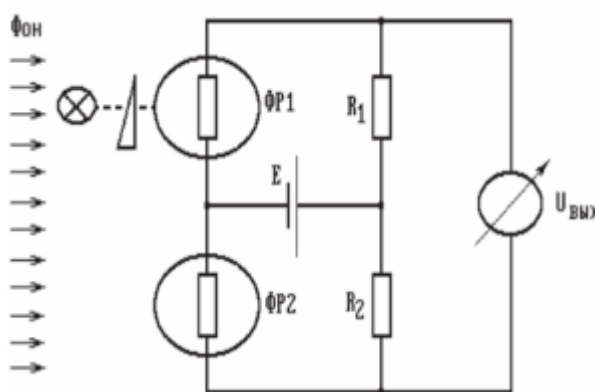


Рисунок 1.3 - Схема включення фоторезисторів для усунення впливу перешкод. Адаптовано з [12]

У два плеча моста включаються однакові фоторезистори: один сприймає тільки випромінювання фону, а інший - світло від об'єкта і фону. При цьому вплив перешкод значно зменшується за рахунок їх компенсації на двох фотоприймачах.

Фотогальванічні датчики (фотодіоди, фототранзистори) відносяться до напівпровідникових приладів і можуть працювати в двох режимах - генераторному і фотодіодному.

При роботі фотодіода (ФД) у генераторному режимі не потрібно джерело живлення, оскільки ФД безпосередньо перетворює енергію світла в електроенергію і сам є джерелом струму (рисунок 1.4). При роботі в

фотодіодному режимі (рисунок 1.5) до фотодіоду прикладається напруга зворотної полярності, т. Е. Таке, при якому звичайний діод не проводить струм. Освітлення фотодіода викликає зміна зворотного струму, в результаті чого фотодіод стає провідним в зворотному напрямку, причому його провідність (і опір) залежить від рівня освітленості.

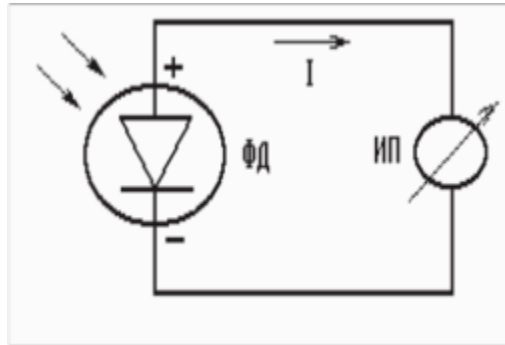


Рисунок 1.4 - Включення фотодіода в генераторному режимі. Адаптовано з [12]

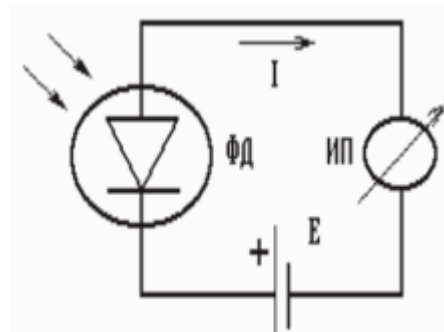


Рисунок 1.5 - Включення фотодіода в фотодіодному режимі. Адаптовано з [12]

На рисунках 1.6 ... 1.9 наведені приклади використання фотоприймачів (рисунок 1.6 - вимір лінійного переміщення; рисунок 1.7 - вимір діаметра отвору за допомогою скануючої діафрагми; рисунок 1.8 - вимір шорсткості поверхні; рисунок 1.9 - цифровий вимір лінійного переміщення).

При вимірюванні лінійного переміщення (рисунок 1.6) інтенсивність світлового потоку, що приходить на фотоприймач ФП, буде залежати від висоти підйому (тобто переміщення) заслінки, що перекриває цей потік.

Скануюча діафрагма (рисунок 1.7) по черзі переміщається з постійною швидкістю вліво і вправо.

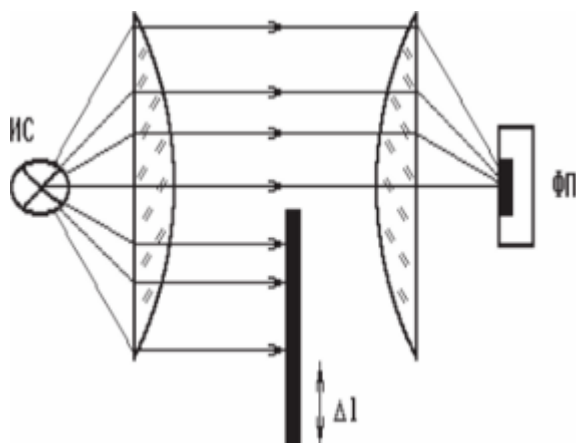


Рисунок 1.6 - Вимірювання лінійного переміщення. Адаптовано з [12]

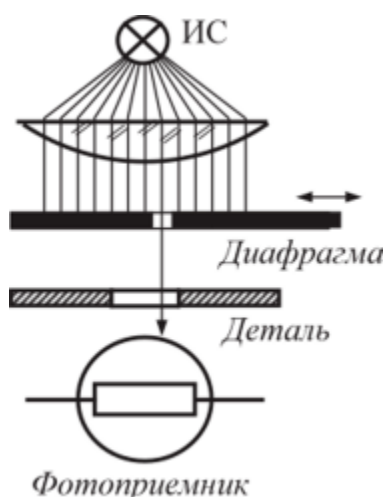


Рисунок 1.7 - Вимірювання діаметра отвору за допомогою скануючої діафрагми. Адаптовано з [12]

Тривалість дії світлового сигналу, що потрапляє на фотоприймач, а отже, і тривалість імпульсу фотоструму, буде залежати від ширини (діаметра) отвори в вимірюваній деталі. Таким чином, вимірявши тривалість імпульсу на виході фотоприймача, можна визначити і шуканий параметр. Фактично дана схема працює в бінарному режимі.

Для деталей з великим числом отворів буде формуватися її "електронний профіль". Той же принцип вимірювання використовує схема, наведена на рисунку 1.8. Тут між освітлювачем і фотоприймачем розміщується диск або

лінійка з отворами або непрозорими штрихами (до 1000 штрихів на 1 мм довжини).

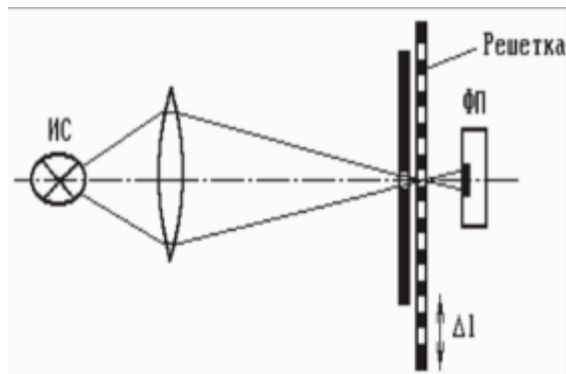


Рисунок 1.8 - Цифрове вимірювання лінійного переміщення. Адаптовано з [12]

Такий датчик перетворює лінійне переміщення в цифрову форму у вигляді послідовності імпульсів. Загальна переміщення Δl складає:

$$\Delta l = n \cdot S,$$

де n - число зареєстрованих імпульсів; S - крок штриховий (щілинний) решітки.

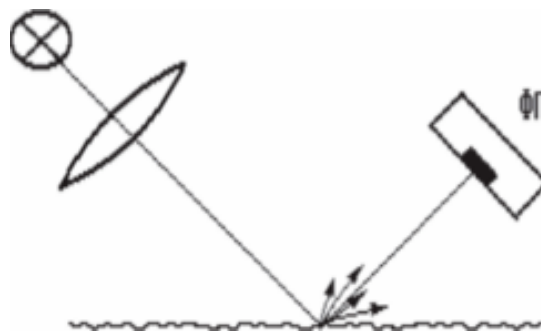


Рисунок 1.9 - Вимірювання шорсткості. Адаптовано з [12]

При вимірі шорсткості поверхні (рисунок 1.9) сфокусований світловий промінь (або промінь лазера) направляється під кутом на контрольовану поверхню. Відбитий від неї світло потрапляє на фотоприймач ФП, причому, чим менше мікронерівності поверхні, тим слабкіше розсіюється світловий потік і тим більшим буде світловий потік, що падає на ФП.

Похибка фотодатчиків для вимірювання лінійного переміщення може становити від 1 мм до 1 мкм при довжині вимірювальної бази від 8 мм до 3 м.

Нерідко такі датчики використовуються в складі фотореле, в системах включення і відключення устаткування і т.д. Загальними перевагами фотодатчиків є можливість безконтактного вимірювання як дуже великих, так і дуже малих відстаней (переміщень), відсутність зворотного впливу на вимірюваний параметр, мала маса і габарити фотоприймачів.

До їх недоліків можна віднести чутливість до запилення і забруднення, до змін температури (для напівпровідникових датчиків), вплив сторонніх джерел світла.

1.2 Сонячна електроенергетика

У наш час проявляється великий інтерес до використання поновлюваних (альтернативних) джерел енергії: сонячної, вітрової, геотермальної та ін. За рівнем надходить на Землю відновлюваної енергії Сонце є найпотужнішим з відомого-них джерел. Тому розробка пристроїв використовують сонячну енергію є однією з перспектив.

Сонячна енергетика є відносно новим способом виробництва електроенергії. Бурхливий розвиток галузі почалося в середині 2000-х років і було викликано, головним чином, політикою розвинених країн (в першу чергу, країн Євросоюзу) по зниженню залежності від вуглеводневої сировини в електроенергетиці і прагненням досягти цілей зі скорочення викидів парникових газів. Крім того, швидкому розвитку галузі сприяло зниження вартості виробництва сонячних панелей і зростання їх ефективності.

В даний час фотоелектричні перетворювачі енергії стають все більш популярними для електропостачання різних об'єктів. За останні 10 років обсяги інсталяцій фотоелектричних модулів серйозно виросли, що на певному етапі призвело до дефіциту кристалічного кремнію (основного матеріалу фотоенергетики) і до появи альтернативних технологій виробництва фотоелектричних перетворювачів.

Окремий фотоелектричний перетворювач - це напівпровідниковий прилад, який перетворює енергію фотонів в електричну енергію. Перетворення енергії світла в електрику відбувається на рівні атомної будови тіла. Кремній є найбільш поширеним матеріалом для виготовлення ФЕП. Кожен окремий ФЕП здатний виробляти напругу порівняно малої величини (близько 0,5 В), тому окремі елементи збирають в модулі, а модулі в панелі (рисунок 1. 10).



Рисунок 1.10 - Сонячна панель, модуль і фотоелектричний перетворювач.
Адаптовано з [5]

Сонячна батарея виробляє електроенергію при попаданні на її поверхню сонячного світла, це означає, що в нічний час доби сонячна панель не генерує електрику. Але, як правило, нам необхідна електроенергія цілодобово, тому в систему сонячних панелей вводиться блок акумуляторних батарей. За своїм призначенням він виконує функцію, накопичення електроенергії в момент її надлишку, і віддає в момент її нестачі.

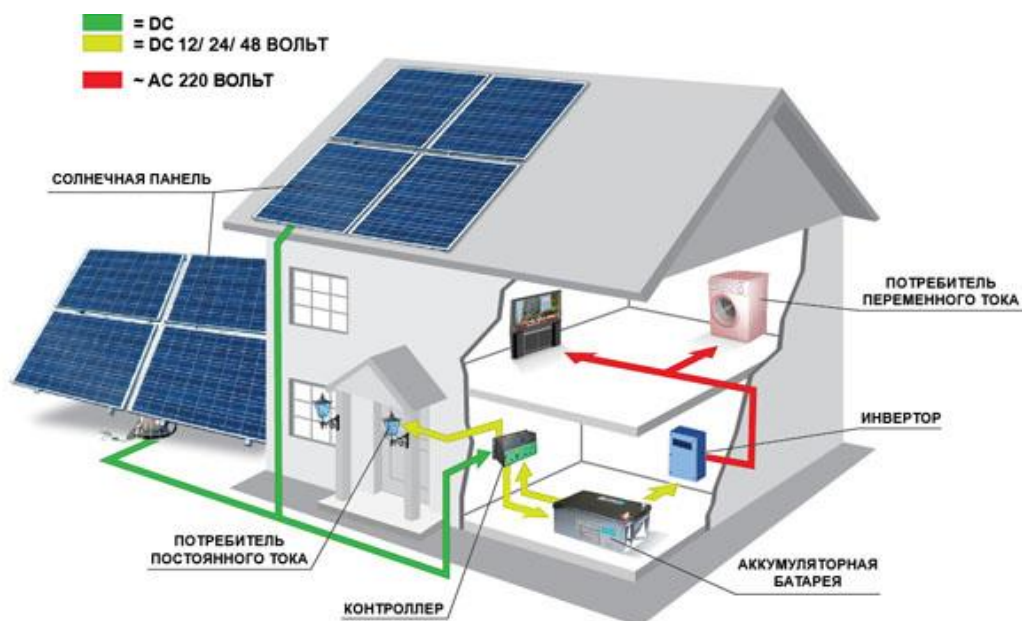


Рисунок 1.11 - Типова схема підключення сонячної панелі. Адаптовано з [5]

Об'єктом розробок і досліджень є система електропостачання, що містить модулі фотоелектричних перетворювачів і напівпровідникові перетворювальні пристрої.

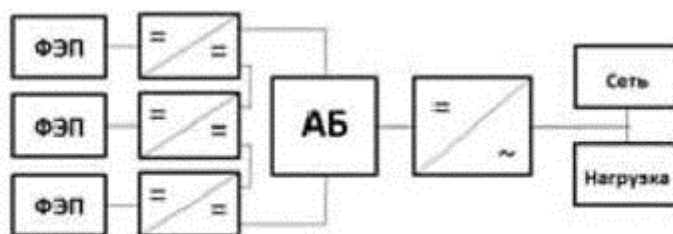


Рисунок 1.12 - Блок-схема системи електропостачання. Адаптовано з [3]

Кажучи про принцип дії ФЕП, Перетворення енергії електромагнітного сонячного випромінювання засновано на фотовольтаїчному ефекті, який виникає в неоднорідних напівпровідникових структурах при впливі на них сонячного випромінювання.

Основні переваги ФЕП:

- При роботі немає викидів забруднюючих речовин в навколишнє середовище;

- Економія викопного палива;
- Відсутність рухомих елементів, висока експлуатаційна надійність установки, забезпечують термін служби 20 і більше років;
- Знижені експлуатаційні витрати;
- Модульний принцип системи (для збільшення потужності установки досить збільшити кількість панелей) відповідно до реальної потреби користувачів.

Основні недоліки ФЕП:

- Висока питома вартість конструкції;
- Виробництво енергії постійно через обертання Землі і погодних умов;
- Необхідність очищення поверхні фотоелектричних перетворювачів від пилу. Фотоелектричний елемент складається з металевої основи, що виконує роль позитивного контакту, напівпровідників р-типу і n-типу, що утворюють р-n-перехід. На поверхні n-шару розташована металева струмознімальна контактна система..

На рисунку 1.13 зображено фотоелектричний елемент і його енергетичний баланс, який показує значний відсоток сонячного випромінювання, який не перетворюється в електричну енергію.

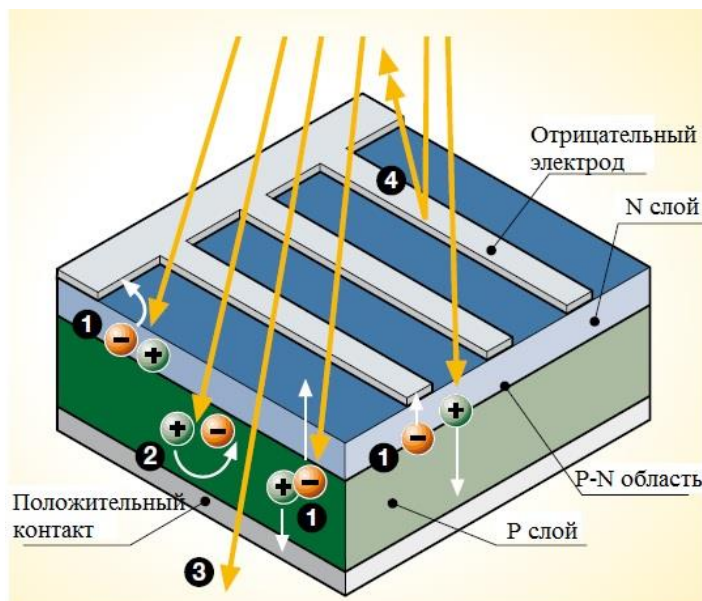


Рисунок 1.13 - Фотоелектричний одноперехідний елемент. Адаптовано з

Процес перетворення сонячного випромінювання в електрику, супроводжується наступними фізичними процесами: 1 - поділ зарядів (виникнення надлишкових електронів і дірок); 2 - рекомбінація; 3 - пропускання; 4 - відображення і затінення поверхні лицьовими контактами.

Лінзові сонячні панелі

Ефективне використання сонячної енергії в інтересах широкого розвитку екологічно чистої електроенергетики можливо лише в разі застосування досить потужних сонячних фотоелектричних установок, що мають високий ККД і відносно низьку вартість. Ці суперечливі вимоги можуть бути успішно задоволені при створенні установок з концентраторами сонячного випромінювання і високоефективними гетероструктурними фотоперетворювачами на основі арсеніду галію. Як концентраторів при цьому доцільно використовувати дешеві плоскі лінзи Френеля, об'єднані в багатоеlementні блоки, ККД яких може досягати 85-90%

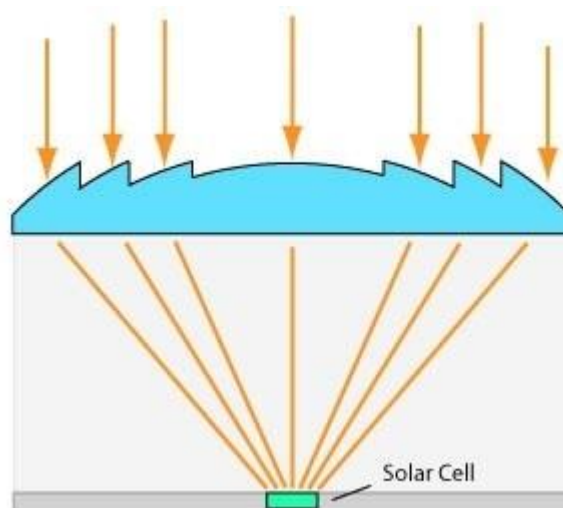


Рисунок 1.14 - Принцип дії лінзи Френеля

Оптимальна ступінь концентрації сонячного випромінювання в таких установках для наземних умов застосування становить 400-800. Це дозволяє приблизно в таку ж кількість разів зменшити площу напівпровідникових сонячних елементів (СЕ), необхідну для вироблення заданої електричної

потужності, в порівнянні з плоскими сонячними батареями, що перетворюють неконцентроване сонячне випромінювання, і дає можливість використовувати дорогі високоефективні СЕ на основі арсеніду галію без збільшення вартості установки.

Концентрування сонячного випромінювання дозволяє, крім того, підвищити ККД гетероструктурних СЕ до 35%. При таких значеннях ККД і безперервному спостереженні за Сонцем, необхідному при використанні концентраторів, питома енергоз'єм з одиниці площі променесприймаючої поверхні установки буде в 2-3 рази вище в порівнянні з нерухомими плоскими кремнієвими сонячними батареями (СБ). Відповідно менше будуть загальна площа і маса установок з концентраторами, витрата матеріалів і обсяг робіт, пов'язаних з їх створенням і монтажем.

1.3 Вимірювання освітленості

Повертаючись до фотогальванічних датчиків можна сказати, що маючи малу чутливість, високу нелінійність і дуже вузький спектр – основним застосуванням цих фотоприладів є робота в ключовому режимі: ввімкнено – вимкнено. Тому створення вимірників освітленості на них досить проблематично, хоча раніше у всіх аналогових вимірювачах освітленості застосовувалися саме ці фотодатчики.

Але на щастя нанотехнологія на місці не стоїть, а йде вперед семимильними кроками. Для вимірювання освітленості «там у них» створили спеціалізовану мікросхему TSL230R, що представляє собою програмований перетворювач освітленість - частота.

Зовні пристрій являє собою мікросхему в корпусі DIP8 з прозорої пластмаси. Всі сигнали входні і вихідні за рівнем сумісні з TTL - CMOS логікою, що дозволяє легко сполучати перетворювач з будь-яким мікроконтролером.

За допомогою зовнішніх сигналів можна змінювати чутливість фотодіода і шкалу вихідного сигналу відповідно 1, 10, 100 і 2, 10, і 100 разів. Залежність частоти вихідного сигналу від освітленості лінійна, в межах від часток герца до 1МГц. Налаштування шкали і чутливості здійснюються шляхом подачі логічних рівнів всього на 4 входи.

Мікросхема може вводитися в режим мікро споживання (5мкА) для чого є окремий вивід, хоча і в робочому режимі не особливо споживаюча. При напрузі живлення 2,7 ... 5,5В споживаний струм не більше 2мА. Для роботи мікросхеми не потрібно ніякої зовнішньої обв'язки, хіба що блокувальний конденсатор з живлення.

По суті, досить підключити до мікросхеми частотомер і отримувати свідчення освітленості, ну, мабуть, в якихось УЕ. У разі ж застосування мікроконтролера орієнтуючись на частоту вихідного сигналу можна управляти освітленістю в приміщенні, або просто за принципом «ввімкнути - вимкнути».

РОЗДІЛ 2. Методика і техніка експерименту

2.1 Середовище моделювання Мультисім

У зв'язку з широким розвитком обчислювальних пристроїв завдання розрахунку і моделювання електричних схем помітно спростилося. Найбільш відомим програмним забезпечення для конструювання, проектування та моделювання радіоелектронних схем є продукт National instruments - Multisim (Electronic Workbench).

Інтуїтивний редактор схем програми Multisim дає можливість за рахунок економії часу на малюванні залишати більше часу на конструювання. Multisim побудований так, що немає необхідності перемикатися від режиму розміщення деталей до режиму розводки, як в інших аналогічних програмах.

Multisim дозволяє працювати групі конструкторів над ідентичними схемами в реальному часі через локальну мережу або Інтернет. За допомогою Multisim можна вводити спеціальні поля для характеристики деталей, такі як вартість поставки або кращий постачальник

У цій частині роботи я розгляну найпростіші елементи для моделювання електричних схем за допомогою Multisim.

Отже, у нас є Multisim 14.2 це остання версія на момент написання роботи. Відкриємо програму і створимо новий файл за допомогою поєднання Ctrl + N.

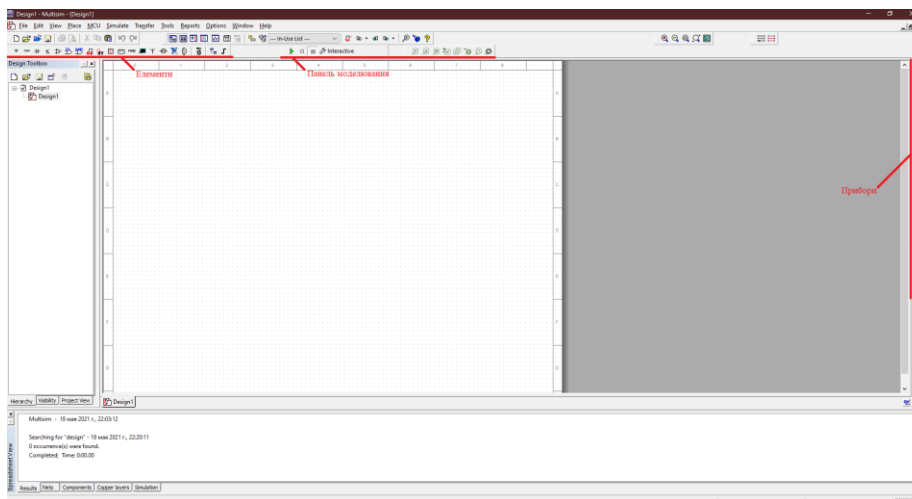


Рисунок 2.1 - Робоча зона Multisim

Після створення файлу переді мною відкривається робоча зона. По суті, робоча зона Multisim - це поле для збирання необхідної схеми з наявних елементів.

До речі коротко про елементах. Всі групи за замовчуванням розташовані на верхній панелі. При натисканні на будь яку групу, відкривається контекстне вікно, в якому можна вибрати потрібний елемент.

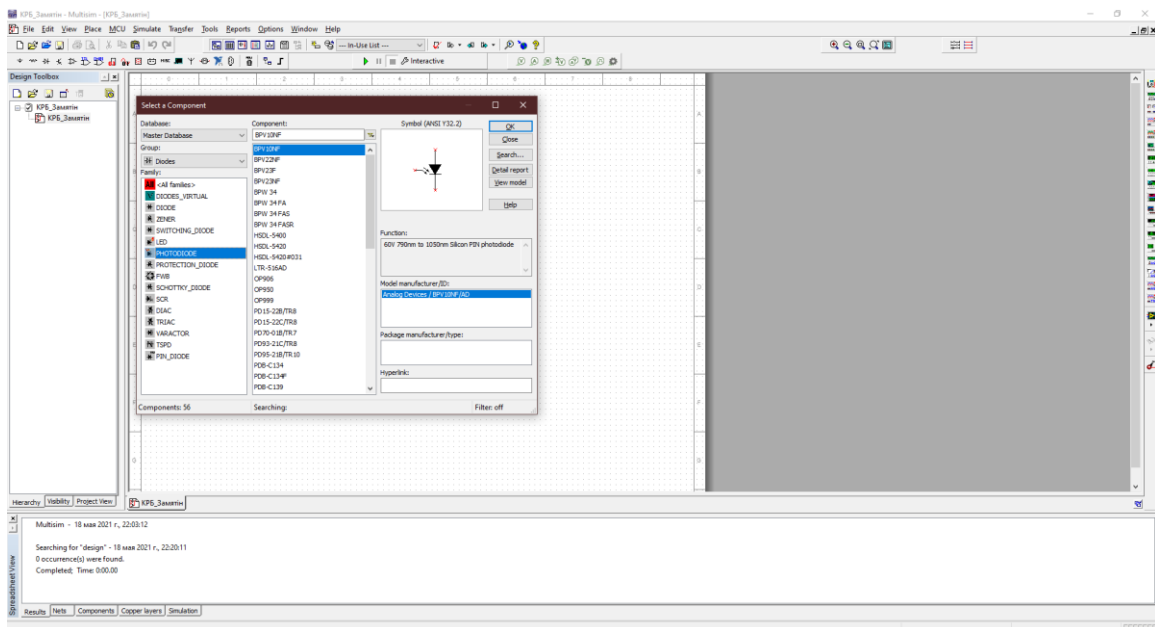


Рисунок 2.2 - Вибір компонентів

За замовчуванням використовується база елементів - Master Database. Компоненти, які містяться в ній розділені на групи.

Перерахуємо коротко зміст груп.

Sources - містить джерела живлення, заземлення.

Basic - резистори, конденсатори, котушки індуктивності тощо

Diodes - містить різні види діодів.

Transistors - містить різні види транзисторів.

Analog - містить всі види підсилювачів: операційні, диференціальні, інвертуючі

TTL - містить елементи транзисторно-транзисторної логіки

CMOS - містить елементи КМОП-логіки.

MCU Module - керуючий модуль багатопунктового зв'язку.

Advanced_Peripherals - підключаються зовнішні пристрої.

Misc Digital - різні цифрові пристрої.

Mixed - комбіновані компоненти

Indicators - містить вимірювальні прилади та ін.

З панеллю моделювання теж нічого складного, як на будь-якому відтворюючому пристрої зображені кнопки пуску, паузи, зупинки. Решта кнопок потрібні для моделювання в покроковому режимі.

На панелі приладів розташовані різні вимірювальні прилади (зверху вниз) - мультиметр, функціональний генератор, ватметр, осцилограф, плоттер Боде, частотомір, генератор слів, логічний конвертер, логічний аналізатор, аналізатор спотворень, настільний мультиметр.

Оскільки розглянутий мною проект є практично унікальним у своєму роді, порівнювати його зокрема ні з чим, тому особливо загострювати увагу на його недоліки я не буду

До переваги можна віднести такі параметри:

- Зручний, простий інтерфейс.
- Велика база компонентів.
- Приємне співтовариство.
- Можливість інтеграції з іншими продуктами.

З сумнівних недоліків я можу виділити лише відсутність офіційного перекладу на українську мову.

На наступному етапі я зібрав нескладну схему. Подивимося на емуляцію її роботи. За основу я взяв схему мультивібратора на транзисторах, де в якості навантаження підключив світлодіоди.

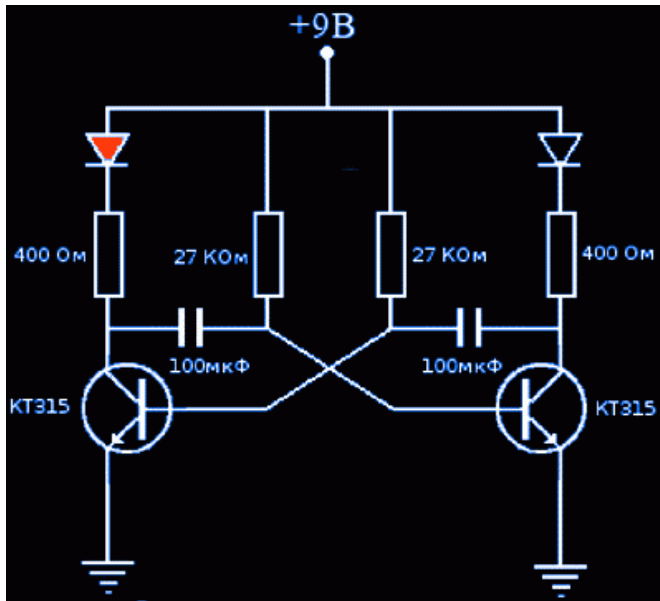


Рисунок 2.3 - Схема мультивібратора Адаптовано з [14]

Далі збираємо її зі стандартних компонентів і вмикаємо процес моделювання.

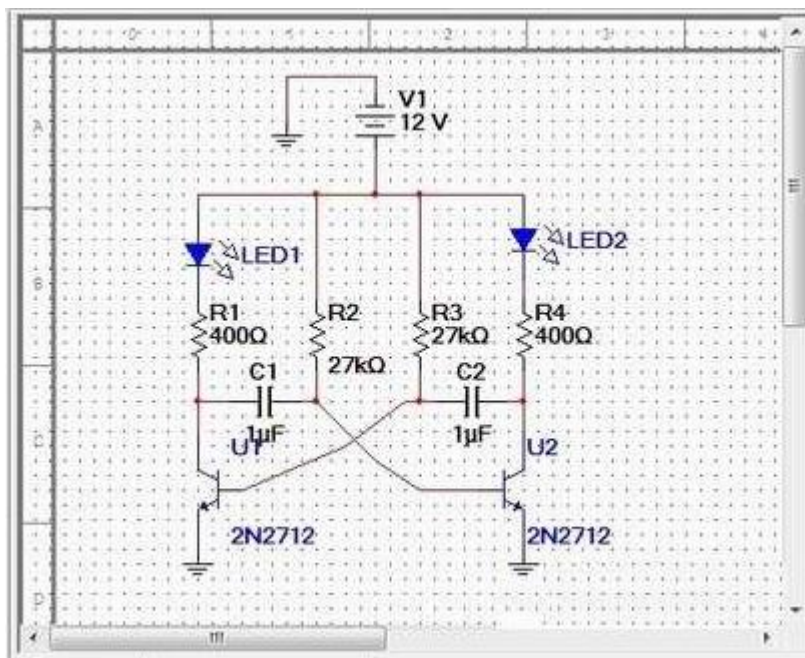


Рисунок 2.4 – Змодельована схема

При необхідності можна використовувати різні віртуальні вимірювальні прибори, наприклад осцилограф і подивитися сигнали в будь яких точках схеми.

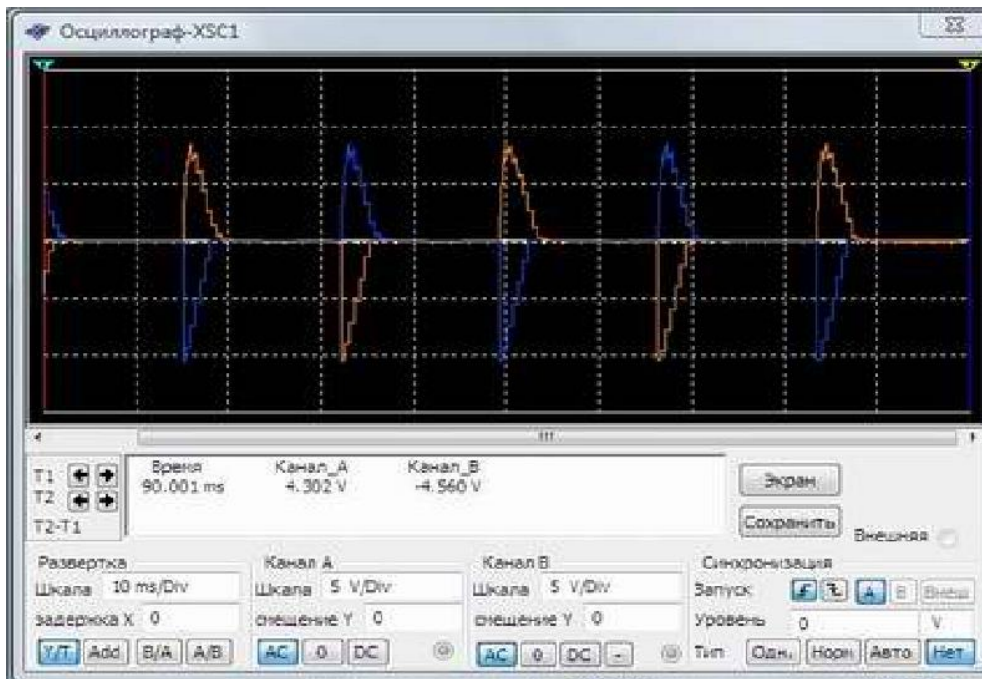


Рисунок 2.5 - Моделирование электрических цепей в электротехнике с помощью Multisim

Також зберемо простий електричний ланцюг, для цього я використаю джерело постійного струму (dc-power) та декілька опорів (resistor).

Нехай нам буде потрібно визначити струм в нерозгалуженій частині ланцюга, напругу на першому опорі і потужність на другому. Для цього нам потрібні три віртуальних вимірювальних прилади: два мультиметра і ваттметр. Перший мультиметр встановимо в режим вимірювання сили струму - амперметра, інший - вольтметра. Струмове обмотку ваттметра под'єднаємо в другу гілку ланцюга постійного струму - послідовно, обмотку напруги паралельно другому опорі.

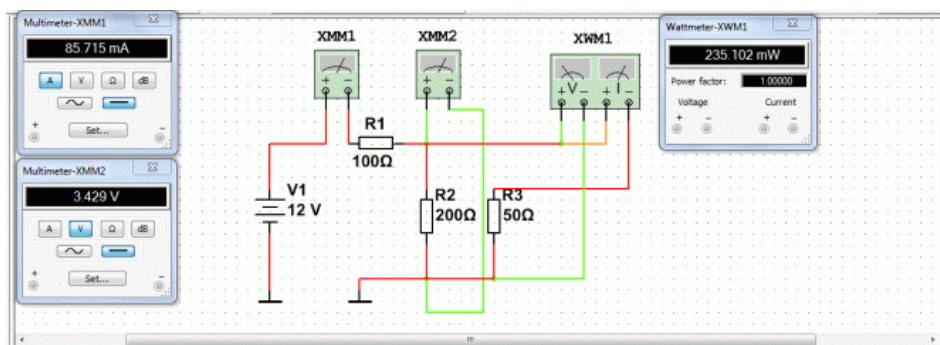


Рисунок 2.6 - Результати віртуальних вимірів

Після того, як віртуальна схема зібрана натискаємо на кнопку пуск і дивимося покази вимірювальних приладів.

Про всякий випадок за законом Ома перевіримо правильність показів віртуальних вимірювальних приладів.

$$I = \frac{U}{R_1 + \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}\right)} = \frac{12}{100 + \left(\frac{200 * 50}{200 + 50}\right)} = 85.715 \text{ мА}$$

$$U_2 = U - U_1 = U - IR_1 = 12 - 85.7 * 100 * 10^{-3} = 3.429 \text{ В}$$

$$P_3 = \frac{U_2^2}{R_3} = \frac{3.429^2}{50} = 235.1 \text{ мВт}$$

де I – струм;

U - Напруга;

R - опір;

P – Електрична напруга.

2.2 Моделювання роботи фотоперетворювача

В якості найпростішого фотодатчика можна використовувати фотодіод. Фотодіод(ФД) є діод з відкритим p – переходом.

Щоб змодельовати роботу фотодіода скористаюся описаною раніше програмою Multisim 14.2

Нижче продемонстрована схема включення фотодіода, з якої будуть зніматися навантажувальні характеристики в різних режимах.

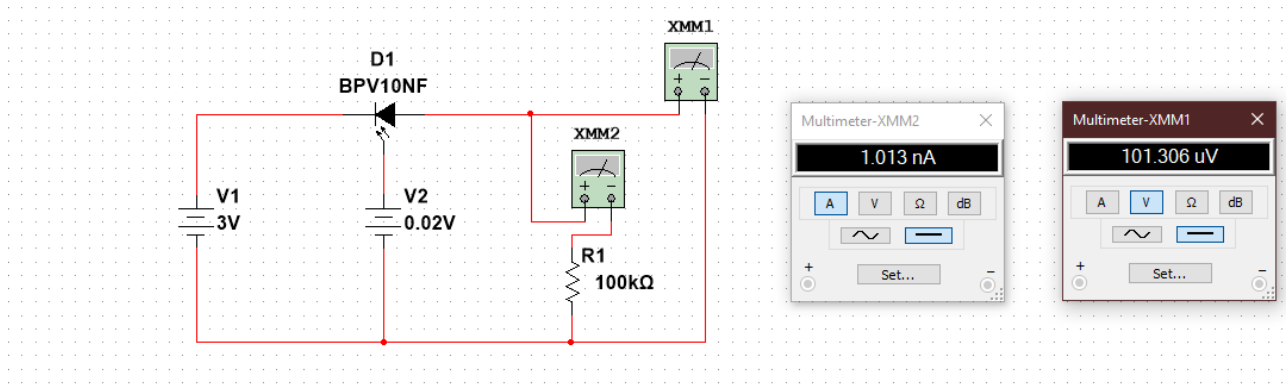


Рисунок 2.7 - Схема включення фотодіода

На даній схемі розташовані такі елементи:

- V1 – Джерело живлення;
- V2 – Джерело світла, напруга, на яку симулюють світловий потік;
- D1 – напівпровідниковий діод BPV10N, що відповідає зарубіжному маркуванню;
- R1 – опір навантаження.

В першому випадку були зняті навантажувальні характеристики фотодіода в режимі фотогенератора з генеруючою фото напругою 0,5мВ та різними значеннями опору навантаження. Оптимальні результати занесено до таблиці 1 та побудовані залежності представлені на рисунку 2.8.

Таблиця 2.1 - Навантажувальні характеристики фотодіода в режимі фотогенератора (При $V_2=0.5\text{мВ}$)

R, кОм	I_n , мкА	U_f , мВ
0.1	0.008286	0.000828572
1	0.50785	0.50785
2	0.330641	0,650119
5	0.110188	0.550400
10	0.058892	0.590027
100	0.005431	0.543213

Таблиця 2.2 - Навантажувальні характеристики фотодіода в режимі фотогенератора (При $V_2=1\text{мВ}$)

R, кОм	I_n , мА	U_ϕ , мВ
0.1	0.000008345	0.000835
1	0.000001015	0.001015
2	0.000670288	0.001349
5	0.000221592	0.001108
10	0.000117861	0.001175
100	0.000010851	0.001083

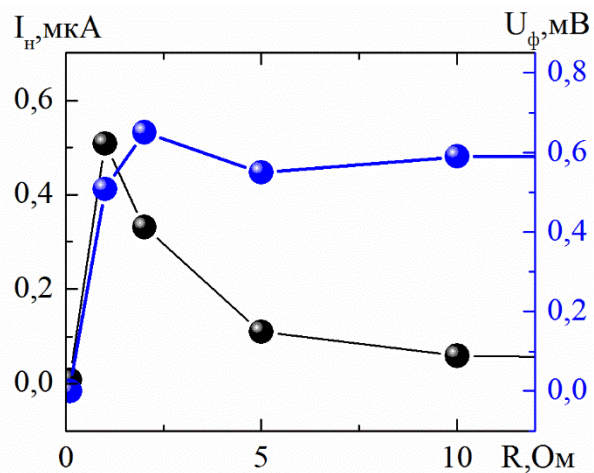


Рисунок 2.8 - Навантажувальні характеристики фотодіода в режимі фотогенератора (При $V_2=0.5\text{мВ}$)

Після вимірювання струму навантаження і фотонапруги були зняті статичні вольт-амперні характеристики фотодіода в режимі фотоперетворювача (при $R = 100 \text{ Ом}$) для двох значень світлового потоку (при $V_2 = 10 \text{ мВ}$ і при $V_2 = 20 \text{ мВ}$). Отримані дані занесені до таблиці 2.3. Також побудовані навантажувальні характеристики фотодіода в режимі фото генератора представлені на рисунку 2.9.

Таблиця 2.3 - Статистичні ВАХ фотодіода в режимі фотоперетворювача

U1, В	I _ф , мА (V2=10мВ)	I _ф , мА (V2=20мВ)
0.01	1.76768*10 ⁻⁷	1.76595*10 ⁻⁷
0.05	6.22419*10 ⁻⁷	6.22419*10 ⁻⁷
0.1	8.57474*10 ⁻⁷	8.57647*10 ⁻⁷
0.2	9.80292*10 ⁻⁷	9.80119*10 ⁻⁷
0.3	9.9816*10 ⁻⁷	9.9816*10 ⁻⁷
0.5	1.002*10 ⁻⁶	1.002*10 ⁻⁶
1	1.004*10 ⁻⁶	1.004*10 ⁻⁶

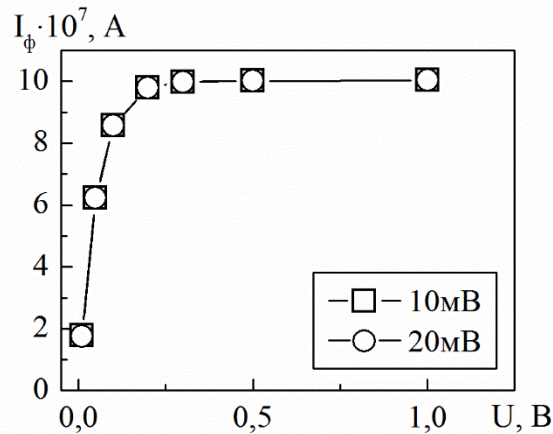


Рисунок 2.9 - Статистичні ВАХ фотодіода в режимі фотоперетворювача для двох режимів роботи

В третій частині були зняті навантажувальні характеристики фотодіода в режимі фотоперетворювача (При V1=3В) для двох значень світлового потоку. Результати вимірювань занесено до таблиці 4 та побудовано

Після вимірювання значень струму навантаження I_н і фото-напруги U (при V2=10мВ та V2=20мВ) були отримані такі дані:

Таблиця 2.4 - Навантажувальні характеристики фотодіода в режимі фотоперетворювача

R, кОм	I _н , А (V2=10мВ)	U _ф , В (V2=10мВ)	I _н , А (V2=20мВ)	U _ф , В (V2=20мВ)

0.1	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$101.253 \cdot 10^{-6}$	$1.012 \cdot 10^{-6}$	$101.253 \cdot 10^{-6}$
1	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$1.013 \cdot 10^{-3}$	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$1.013 \cdot 10^{-3}$
2	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$2.025 \cdot 10^{-3}$	$1.012 \cdot 10^{-6}$	$2.025 \cdot 10^{-3}$
5	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$5.064 \cdot 10^{-3}$	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$5.064 \cdot 10^{-3}$
10	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$10.127 \cdot 10^{-3}$	$1.012 \cdot 10^{-6}$	$10.128 \cdot 10^{-3}$
100	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$101.283 \cdot 10^{-3}$	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$101.306 \cdot 10^{-3}$

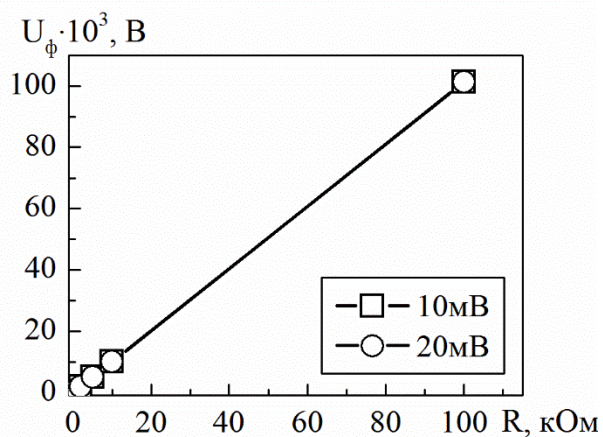


Рисунок 2.10 - Навантажувальні характеристики фотодіода в режимі фотоперетворювача для двох режимів роботи

Результати моделювання роботи фотодіода у режимі фотоперетворювача показують лінійні залежності по струму навантаження та фотонапруги. Причому струм навантаження не змінюється при зростанні величини навантажувального опору.

ВИСНОВКИ

1. В ході виконання роботи встановлено, що фотоперетворювачі – такий тип датчиків, які мають неабиякий потенціал у застосуванні в техніці та побутових приладах, оскільки вони володіють особливими фізичними властивостями: відсутність зворотного впливу на об'єкт управління (контролю) - безконтактність. Недоліками фотодатчиків є чутливість до вібрацій, ударів, погана робота в запиленій, загазованій і вологому середовищі, перешкоди від освітлювальних приладів загального освітлення.

2. Розглянуті різні види фотоелектричних перетворювачів, аналіз їх характеристик, а також методи підвищення їх ефективності. Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, пристроями для перетворення сонячної енергії в електричну є напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі (ФЕП), оскільки це прямий, одноступінчатий перехід енергії.

3. Моделювання робочих характеристик елементів контрольно-вимірювальних систем проводилось з використанням програмного забезпечення Multisim. Моделювання роботи фотоперетворювача як елемента вимірювальної системи показало ефективні результати симуляції. Робочі залежності були побудовані з використанням пакету програм фірми OriginLab

4. Проведено модулювання роботи фотоперетворювача в різних режимах роботи. Результати моделювання роботи фотодіода у режимі фотоперетворювача показують лінійні залежності по струму навантаження та фотонапруги. Причому струм навантаження не змінюється при зростанні величини навантажувального опору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зудин В.Л. Датчики: измерение перемещений, деформаций и усилий.
2. <http://elektrik.info/main/praktika/600-fotodatchiki-i-ih-primenenie.html> - Фотодатчики и их применение.
3. Крюков К.В., Сазонов В.В., Кваснюк А.А. Использование фотоэлектрических преобразователей в системах электроснабжения // Труды Всероссийской научно-практической конференции, г. Москва, 1-3 июня 2010 г. – Москва, Россия / Т.2:Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем. – 2010, Секция 5-9. – С. 111-112.
4. Калабушкина Н.М., Киселева С.В., Михайлин С.В., Тарасенко А.Б., Усанов А.Б. Традиционные и перспективные фотоэлектрические модули и их применение в фото энергетических системах // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 13 (135). – С. 10-18.
5. Солнечная энергетика [Электронный ресурс] – Режим доступа: alteco.in.ua. – (дата обращения: 23.04.2021).
6. Walker G.R., Sernia P.C. Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19. No. 4. July 2004. – С. 1130-1139.
7. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии [Электронный ресурс] – Режим доступа: gigavat.com. – (дата обращения: 24.04.2021).
8. Technical Application Papers №10. Photovoltaic plants, 2010. – 9 с.
9. Фотоэлементы. Фотоэлектрические преобразователи [Электронный ресурс] – Режим доступа: gigavat.com – (дата обращения: 24.04.2021).
10. Тугов Н.М. и др. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов/ Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков; Под ред. В.А. Лабунцова. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 576 с.
11. Алферов Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, №8. – С. 937-948.

12. https://studme.org/356827/tehnika/fotoelektricheskie_datchiki#813 –
Фотоэлектрические датчики
13. <https://www.ni.com/ru-ru/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html>
Додаток для редагування схем.
14. <http://www.texnic.ru/program/007/progr016.htm> Посібник користувача
Multisim.