

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

ФІЛЮК ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.314; 621.32

СВІЛОТЕХНІЧНІ УСТАНОВКИ З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ

05.09.07 – Світлотехніка та джерела світла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль 2019

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана на кафедрі електричної інженерії. Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Андрійчук Володимир Андрійович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя,
професор кафедри електричної інженерії

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор.
Кожушко Григорій Мефодійович,
Полтавський університет економіки і торгівлі,
професор кафедри товарознавства, біотехнології,
експертизи та митної справи

доктор технічних наук, доцент
Добровольський Юрій Георгійович,
Чернівецький національний університет
ім. Ю. Федьковича,
доцент кафедри фізики напівпровідників і наноструктур.

Захист відбудеться «23» травня 2019 року о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.04 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корпус №2.

Автореферат розіслано «22» квітня 2019 року.

*Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 58.052.04, к.т.н., доц..*

В.П. Коваль

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вуличне освітлення є невід'ємною частиною інфраструктури будь-якого населеного пункту. Витрати на зовнішнє освітлення в населених пунктах становить близько 30 % від всіх витрат на електроенергію, із врахуванням додаткових витрат на обслуговування, що складає досить значну частку в структурі бюджету населених пунктів.

Однією з основних завдань і цілей в області енергозбереження у системах зовнішнього освітлення, а також підвищення енергетичної ефективності є часткове заміщення традиційних ресурсів на альтернативні джерела енергії. Це дозволить знизити вартість затрат, а також підвищити стабільність їх роботи та комфорт мешканців населених пунктів. В першу чергу, до таких джерел відносяться сонячні енергетичні системи, що працюють за принципом прямого перетворення сонячної енергії в електричну. Використання сонячних батарей в енергетиці має багато переваг над іншими альтернативними джерелами. Це висока надійність, низькі витрати коштів при експлуатації, модульність конструкції батарей, низькі витрати на будівництво електростанцій. Сонячні батареї в даний час є найбільш перспективними серед альтернативних джерел енергії.

На сьогодні цей напрямок альтернативної енергетики розвивається дуже інтенсивно. Враховуючи те, що зовнішнє освітлення включається у темну пору доби для автономної освітлювальної установки потрібно мати системи, які акумулюватимуть енергію, а також раціонально її розподілятимуть. На сьогодні інтенсивно впроваджуються Li-ion акумулятори та суперконденсатори або іоністори. Вони можуть не тільки накопичувати необхідну електроенергію, але й швидко віддавати її в навантаження та витримувати велику кількість зарядних - розрядних циклів без погіршення енергетичних характеристик.

Дослідженнями перетворення сонячної енергії та засобами акумулювання електричної енергії займалися такі вчені як: Козирський В.В., Коваль В.П., Кожем'яко В.П., Желих В.М., Щерба А.А., Супруновська Н.І., Burke A., Miller M., та інші. Незважаючи на отримані результати, залишається ряд питань, які не до кінця не вирішені, а саме: аналізу енергетичної ефективності світлотехнічних установок з автономним живленням, встановлення зв'язку між енергетичним потенціалом сонячного випромінювання та кліматичними умовами даної місцевості, раціональним акумулюванням сонячної енергії та її використання в темний час доби. Потреба в таких установках виникає в місцях де відсутні електричні мережі, а також у різного типу туристичних базах у гірських районах.

Тому **актуальним** є дослідження освітлювальних установок з автономним живленням на основі сучасних сонячних систем генерування електричної енергії та вплив на них кліматичних умов, а також акумулювання і раціональне використання накопиченої електроенергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукової теми «Вплив динаміки експлуатаційних параметрів на енергоефективність джерел світла» (номер державної реєстрації 0113U000248).

Мета й завдання дослідження

Метою роботи є удосконалення системи керування автономним живленням освітлювальних установок, дослідження енергетичних характеристик сонячних батарей та акумулюючих систем і використання їх в системах зовнішнього освітлення, а також дослідження впливу кліматичних умов на енергетичний потенціал сонячного випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити властивості сонячних батарей і акумулюючих елементів із суперконденсаторів для автономного живлення освітлювальної установки;
- розробити методику та виготовити експериментальну установку для вимірювання потоку сонячного випромінювання в режимі реального часу;
- визначити вплив кліматичних умов території на енергетичні характеристики сонячного випромінювання;
- розробити систему керування роботою автономного джерела живлення освітлювальної установки;
- провести техніко-економічний розрахунок освітлювальної установки з автономним живленням на основі сонячних батарей та суперконденсаторів.

Об'єкт дослідження – процеси генерування електричної енергії сонячними фотоелектричними перетворювачами, акумулювання та використання її в освітлювальних установках.

Предмет дослідження – фотоелектричні перетворювачі та акумулюючі системи із суперконденсаторів і Li-ion акумуляторів для автономного живлення світлодіодних систем зовнішнього освітлення.

Методи дослідження. Поставлені завдання вирішувалися на основі використання методів вимірювання фотоелектричних характеристик сонячних батарей; методу циклування; методів теорії електричних кіл та схемотехніки; сучасних програм моделювання світлотехнічних характеристик освітлювальних установок.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Удосконалено математичну модель системи «сонячна енергетична установка – освітлювальна система» в режимі максимальної потужності.
2. Вперше встановлено зв'язок між середньодобовою густиною потоку енергії сонячного випромінювання та середньодобовим ступенем хмарності території.
3. Вперше отримано помісячні аналітичні залежності середньодобової енергії сонячного випромінювання від ступення хмарності.

4. Вперше проведено розрахунок енергетичного потенціалу сонячного випромінювання території західного регіону України з врахуванням кліматичних умов.

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновано методику та розроблено автоматизовану систему вимірювання і запису енергетичного потоку сонячного випромінювання.

2. Розроблено та апробовано програму статистичної обробки часових характеристик густини потоку сонячного випромінювання протягом кожного місяця.

3. Розроблено установку для контролю параметрів суперконденсаторів та пристрій балансування напруги на окремих елементах акумулюючої батареї, який захищений патентом на корисну модель №116216.

4. Запропоновано методику розрахунку сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення населених пунктів. Представлені результати техніко-економічного розрахунку сонячної енергетичної установки для населених пунктів з населенням: 2.8 млн (м. Київ), 218 тисяч (м. Тернопіль) та 8,7 тис (м. Ланівці).

5. Запропоновано шляхи підвищення енергетичної ефективності освітлювальних установок з автономним живленням.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати досліджень за темою дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В [1] описано методику вимірювання та визначено параметри максимальної потужності споживача, коефіцієнт заповнення вольт-амперних характеристик, зворотній струм насичення р-п- переходу сонячної батареї, в [3-5,11-15] представлено експериментальну установку для вимірювання та запису густини потоку сонячного випромінювання та аналіз часового розподілу густини потоку сонячної енергії і розраховано густину енергії сонячного випромінювання для м. Тернополя. Визначено вплив кліматичних умов на величину енергії сонячного випромінювання. Отримано аналітичні залежності на основі співставлення вимірних значень густини потоку сонячного випромінювання та ступення хмарності взятих із даних метеослужб. В [2,10,13] удосконалено методику експериментального визначення ємності та внутрішнього опору суперконденсаторів. Проведено експериментальне дослідження процесів перерозподілу між внутрішніми шарами суперконденсатора попередньо накопиченого заряду та впливу на такий перерозподіл тривалості витримки зарядженого суперконденсатора під напругою. У [2,7] представлено розробку пристрою балансування напруги на окремому елементі суперконденсатора. В [5-6,8-9,12,16] запропоновано методику розрахунку автономної системи живлення зовнішнього освітлення населених пунктів та проведено техніко-економічний розрахунок автономної енергетичної системи зовнішнього освітлення.

Апробація. Основні результати дисертації були оприлюднені та обговорювалися на наукових конференціях: на V міжнародній науково-технічній

конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 23-27 лютого 2015 року м.Тернопіль; на міжнародній науково-практичній конференції „Сучасні особливості формування і управління інноваційним потенціалом регіонального розвитку туризму та рекреації із залученням молодіжного ресурсу“, 15-17 жовтня 2015 року м.Тернопіль; на IV міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій, 25 листопада 2015 року м.Тернопіль; на XIX науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 18 травня 2016 року м.Тернопіль; на X міжнародній конференції ICEROM-10, 23-27 травня 2016 року, м.Тернопіль; на V міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 17 листопада 2016 року м.Тернопіль; на XX науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 17 травня 2017 року м.Тернопіль; на III всеукраїнській науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», 8-9 червня 2017 року, м.Тернопіль; на VI міжнародній науково-технічній конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 30 січня 2018 року м.Тернопіль-Яремче.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 16 робіт, зокрема 6 статей у науково-технічних фахових виданнях, з них 1 в іноземному виданні, та 1 у виданні, що входить в наукометричну базу Scopus, 1 –патент України на корисну модель та 9 тез доповідей на конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 109 найменувань, додатків 4, містить 57 рисунків, 22 таблиці. Повний обсяг роботи складає 136 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено тему досліджень, обрано об'єкт та предмет досліджень, сформульовано наукову новизну і встановлено практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено огляд публікацій про сучасний стан зовнішнього освітлення та освітлювальних установок з автономним живленням. Проведено аналіз систем зовнішнього освітлення населених пунктів по областях України. Наведено порівняння ефективності фотоелектричних перетворювачів різних типів, що необхідні для вироблення 1000 Вт електроенергії. Розглянуто сучасні акумулюючі пристрої для систем автономного живлення та систему керування для різних типів акумуляторів.

У другому розділі описано будову експериментальної установки та методику вимірювання фотоелектричних характеристик сонячної батареї (СБ). Представлено еквівалентну електричну схему СБ, «модель одного діода» (рис. 1).

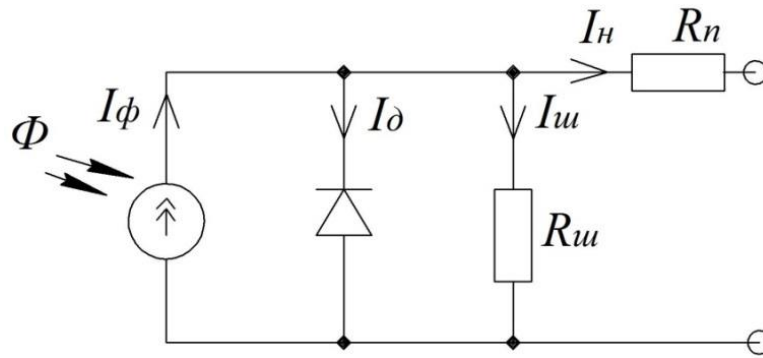


Рис. 1. Еквівалентна схема елемента сонячної батареї

Параметри елементів еквівалентної електричної схеми були отримані на основі вимірювань світлових та темнових ВАХ сонячної батареї. Для вимірювання світлових ВАХ був використаний статичний ізотермічний метод. Установка для вимірювання світлових ВАХ (рис. 2) складається з імітатора сонячного випромінювання, в якості якого використано газорозрядні лампи ДКСШ-150 та ДРИ-1000, вольтметр В7-16, амперметр Э 525 та магазин опорів, який є навантаженням СБ.



Рис. 2. Установка для вимірювання ВАХ СБ

батареї АЛМ-50М.

Світловий потік, який попадав на СБ, вимірювався приладом Solar Power Meter СЕМ DT-1307. Зміну густини світлового потоку здійснювали шляхом зміни відстані між СП і СБ, що забезпечувало його зміну в межах від 200 до 1000 Вт/м². Температура СБ підтримувалася на однаковому рівні, в межах 25 °С.

На рис.3 та рис. 4 приведені світлові ВАХ та графіки зміни потужності сонячної

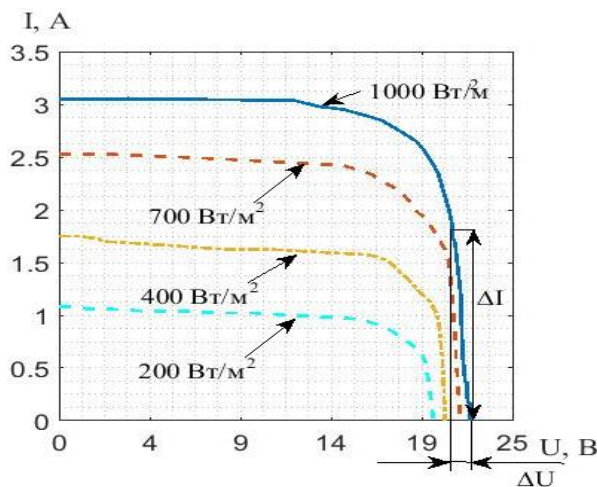


Рис. 3. Світлові ВАХ СБ АЛМ-50М

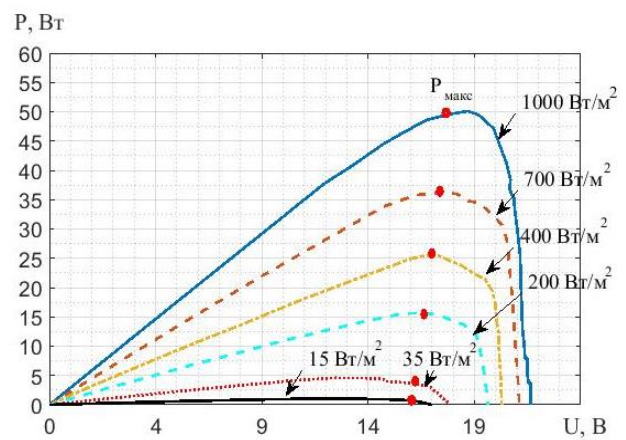


Рис. 4. Графіки зміни потужності СБ АЛМ-50М

За різким спадом струму (рис. 3) було визначено величину послідовного опору R_n , який входить до еквівалентної електричної схеми СБ.

З рис. 3 та рис. 4 були визначені U_m , I_m , при яких відбувається максимальне значення споживаної потужності, а також напругу холостого ходу $U_{x.x}$, струм короткого замикання $I_{к.з}$ та коефіцієнт заповнення $FF = U_m \cdot I_m / U_{x.x} \cdot I_{к.з}$, які були використані при розрахунку ККД генеруючої системи.

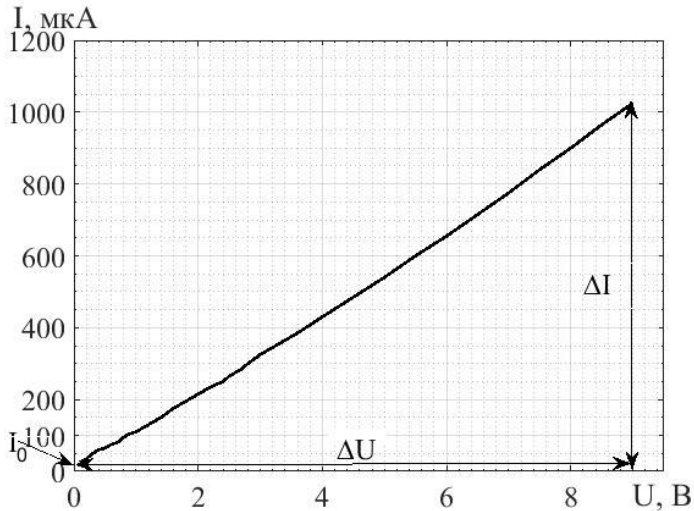


Рис. 5. Зворотня вітка темної ВАХ

насичення $I_0 = 4$ мкА. Дані параметри були використані при моделюванні СБ.

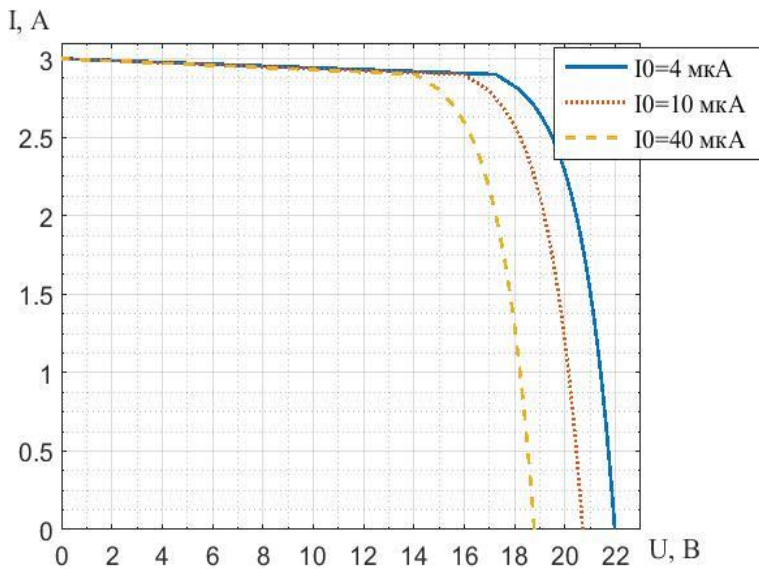


Рис. 6. Вплив струму насичення діода на ВАХ

Зміна зворотнього струму насичення діода значно впливає на U_{xx} . Можливі випадки, коли в одній партії сонячних батарей струми насичення відрізняються. Даний випадок був промодельований і представлений на рис. 6.

При збільшенні струмів насичення діода від $I_0 = 4$ мкА до $I_0 = 40$ мкА відбувається зменшення U_{xx} від 21,6 до 19 В, що в свою чергу знижує вихідну потужність.

Для автономного

живлення ОУ від СБ використовували накопичувачі електричної енергії. В якості яких були Li-ion акумуляторні батареї та суперконденсатори (СК). Для використання СК в блоках автономного живлення ОУ, було проведено дослідження їх електрофізичних характеристик. При експериментальних дослідженнях використано метод циклування (заряд/розряд). Залежність напруги від часу на клеммах суперконденсатора приведена на рис.7, а залежність струму розряду СК від часу приведена на рис. 8.

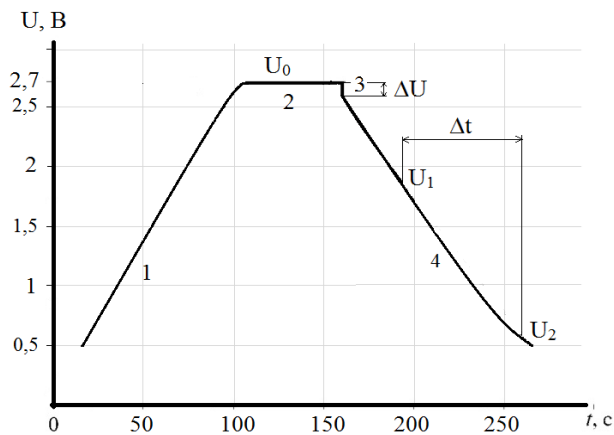


Рис. 7. Залежність напруги від часу на клеммах суперконденсатори

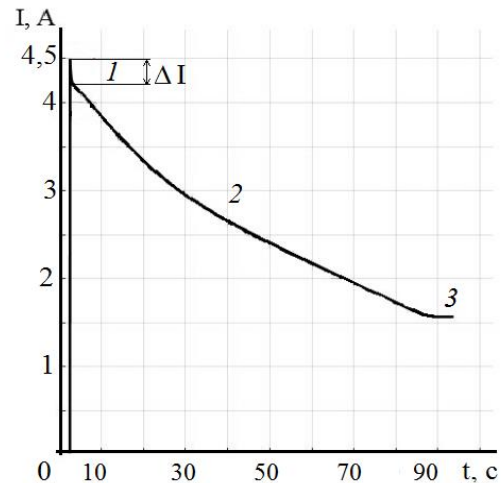


Рис. 8. Залежність розрядного струму суперконденсатори від часу

На часовій залежності напруги на клеммах суперконденсатора можна виділити чотири ділянки: 1 – заряд СК; 2 – режим витримування СК під напругою; 3 – різкий спад напруги на клеммах СК; 4 – плавний розряд СК. За спадом напруги на ділянці 4 визначали ємність СК.

Було виявлено, що ємність СК залежить від напруги зарядження, так при напрузі зарядження $U_0 = 2,7 \text{ В}$ його ємність дорівнювала 152 Ф , а при $2,5 \text{ В}$ – 143 Ф , при $2,3 \text{ В}$ – 134 Ф . Такий процес збільшення ємності при збільшенні напруги зарядження на клеммах суперконденсаторів пояснюється проникненням зарядів у більш глибокі пори його електродного матеріалу, що зумовлює збільшення ємності СК.

Для дослідження процесів саморозряду суперконденсатора їх заряджали до максимальної напруги $U_0 = 2,7 \text{ В}$ і витримували при цій напрузі від 300 с до 21600 с . Після цього відключали СК від зарядного пристрою і залишали без навантаження, вимірюючи кожні 300 с зміну напруги між клеммами суперконденсатора. Залежність падіння напруги на клеммах суперконденсатора від часу його витримки у відключеному стані наведено на рис. 9. Крива 1 на цьому рисунку відповідає витримці суперконденсатора 300 с , крива 2 – 3600 с , 3 – 7200 с , 4 – 14400 с , і 5 – 21600 с . Аналіз даних залежностей, показує, що після витримки СК у відключеному стані напруга на його клеммах спадає тим швидше, чим менше він витримувався під номінальною напругою зарядного пристрою $U_0 = 2,7 \text{ В}$. Ці нелінійні залежності виникають тому, що при більшій витримці СК під напругою у більш глибокі пори його електродного матеріалу проникають додаткові заряди, збільшуючи таким чином загальну ємність СК при тій же напрузі на його клеммах.

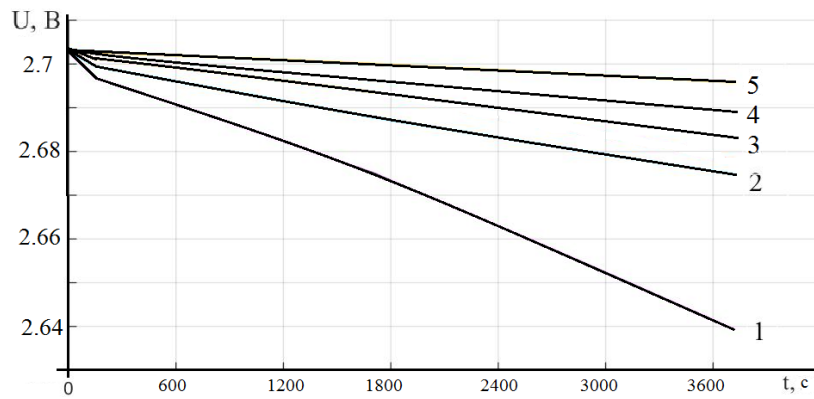


Рис. 9. Залежність падіння напруги на клеммах суперконденсатора від часу витримки при постійній напрузі заряду: 1 – 300 с., 2 – 3600 с., 3 – 7200 с., 4 – 14400 с., 5 – 21600 с

Незважаючи на підбір суперконденсаторів перед з'єднанням їх у батарею, після багатьох циклів заряду/розряду їхні параметри змінюються, що приводить до нерівномірного розподілу падіння напруги на окремих елементах батареї. З метою підтримання рівномірності розподілу використовувалися контролери балансування напруги на окремих елементах батареї суперконденсаторів та Li-ion акумуляторів за схемами, які показані на рис. 10.

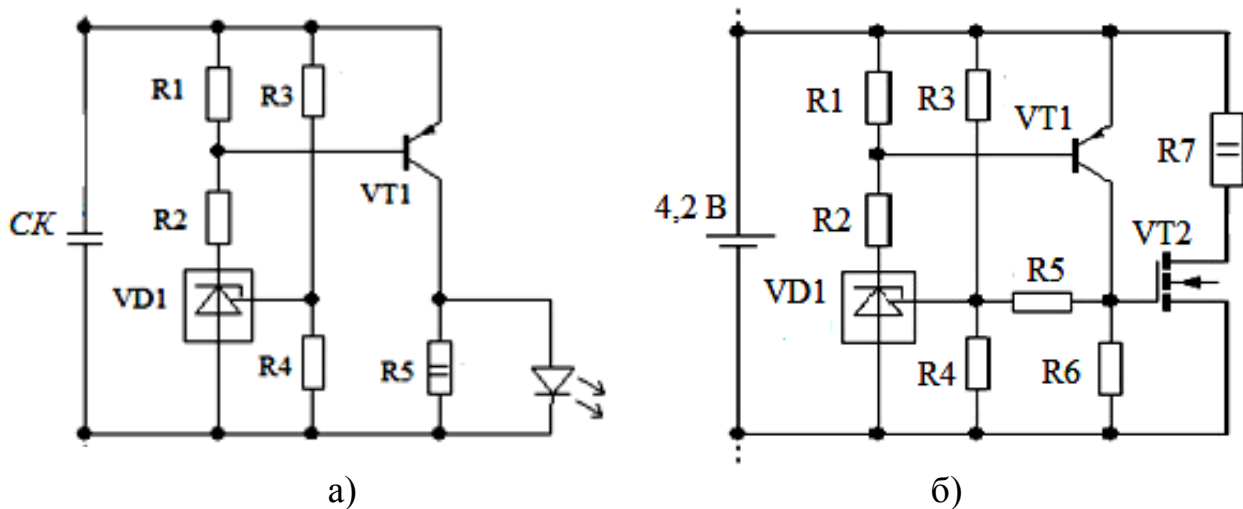


Рис. 10. Контролер балансування напруги на окремому елементі АКБ:
а) схема балансування для суперконденсатора; б) для Li-ion елемента

В даній схемі використано мікросхему TL431 в якій джерело опорної напруги знаходиться в одному корпусі з операційним підсилювачем, що зменшує число елементів при монтажі приладу та його габаритні розміри, а також знижує споживання електричного струму в режимі очікування і дає можливість рівномірно зарядити кожен елемент акумуляуючої батареї, що дозволило підвищити її надійність роботи і збільшити термін експлуатації.

У третьому розділі представлено опис експериментальної установки та методики для вимірювання і запису густини потоку сонячного випромінювання,

блок-схема якої зображена на рис. 11. До складу установки входять: піранометр; сонячна батарея ALM-50M; регульоване навантаження; мікроконтролер Atmega 32, який здійснює обробку і запис отриманих даних з 10-бітного аналогово-цифрового перетворювача; накопичувач даних MicroSD.

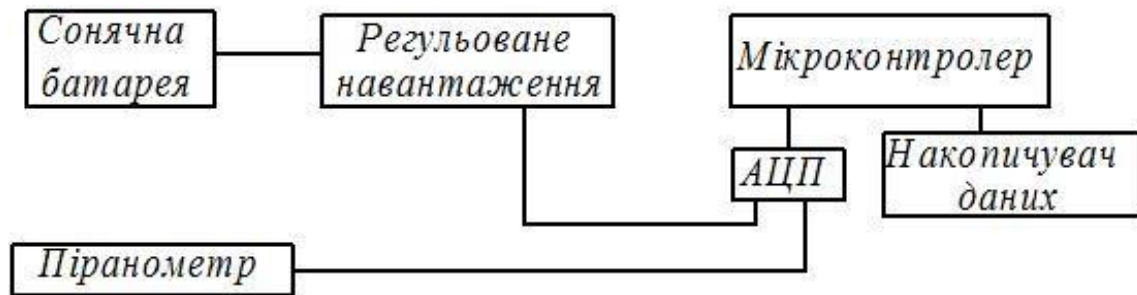


Рис. 11. Блок-схема установки вимірювання і запису густини потоку сонячного випромінювання

Для запису часу реєстрації даних використана мікросхема реального часу DS1307 з інтерфейсом I2C з резервним джерелом живлення, що дозволяє записувати, крім даних з АЦП, час їх отримання.

Дані, з вбудованого в мікроконтролер аналого-цифрового перетворювача, зберігалися на карті пам'яті MicroSD з файловою системою FAT32 в форматі CSV.

Експериментальна установка була розташована на терасі 4-го поверху факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету. Таке розташування фотодатчика не створювало штучного затінення і дозволяло отримати максимально об'єктивні результати вимірювань. Вимірювання виконувалися при куті нахилу поверхні фотоприймача до горизонту $\alpha = 49^{\circ}$, що є оптимальним для широти Тернополя. Дослідження були розпочаті у травні 2016 року і проводилися відповідно до ГОСТ28977-91.

Для знаходження зв'язку між потоком сонячної енергії та кліматичними умовами місцевості, було проведено співставлення результатів вимірюної густини сонячної енергії із середньодобовим значенням ступеня хмарності взятого із даних метеослужби.

На рис. 12. приведена залежність енергії сонячного випромінювання за добу від середнього ступеня хмарності протягом травня 2016 року. Графіки будувалися з використанням усереднених експериментальних даних енергії сонячного випромінювання та усередненого ступеня хмарності за одну добу. Обробку та розрахунок результатів проводили з використанням програмного середовища Microsoft Excel і усереднення методом найменших квадратів.

Враховуючи, що тривалість сонячного випромінювання впродовж доби і кут нахилу сонця до горизонту протягом року змінюються, такі ж співставлення

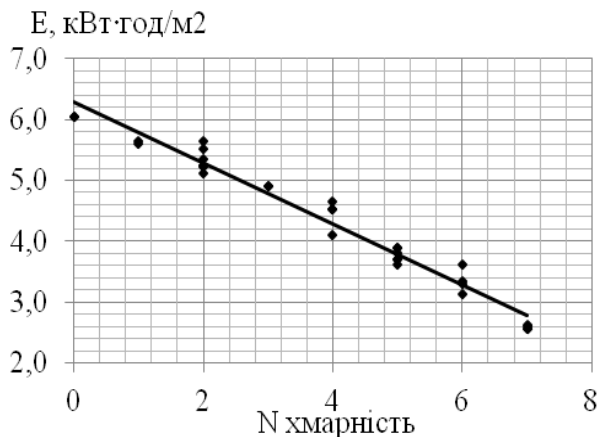


Рис. 12. Залежність енергії сонячного випромінювання за одну добу від ступеня хмарності протягом травня 2016 р

між потоком сонячної енергії та кліматичними умовами місцевості, а саме ступенем хмарності, було проведено для кожного місяця 2016-2017 років. Результати отриманих залежностей середньодобової сонячної енергії від середньої протягом доби ступеня хмарності $E_{сер} = f(N)$ приведені в табл. 1. Де $E_{сер}$ – густина енергії сонячного випромінювання ($кВт \cdot год / м^2$) на поверхні, розташований під кутом 49° до горизонту протягом однієї доби, та N – середня ступінь хмарності, протягом однієї доби.

Таблиця 1

Помісячна залежність середньодобової сонячної енергії від середньодобового ступеня хмарності

Місяць	$E_{сер} = f(N)$
Травень	$E_{сер} = -0,5467 \cdot N + 6,2689$
Червень	$E_{сер} = -0,5575 \cdot N + 7,0102$
Липень	$E_{сер} = -0,7624 \cdot N + 7,8964$
Серпень	$E_{сер} = -0,677 \cdot N + 7,1902$
Вересень	$E_{сер} = -0,6072 \cdot N + 5,9676$
Жовтень	$E_{сер} = -0,4736 \cdot N + 4,567$
Листопад	$E_{сер} = -0,4 \cdot N + 4,195$
Грудень	$E_{сер} = -0,32 \cdot N + 3,263$
Січень	$E_{сер} = -0,386 \cdot N + 4,0385$
Лютий	$E_{сер} = -0,3871 \cdot N + 4,7581$
Березень	$E_{сер} = -0,5095 \cdot N + 5,814$
Квітень	$E_{сер} = -0,5334 \cdot N + 6,455$

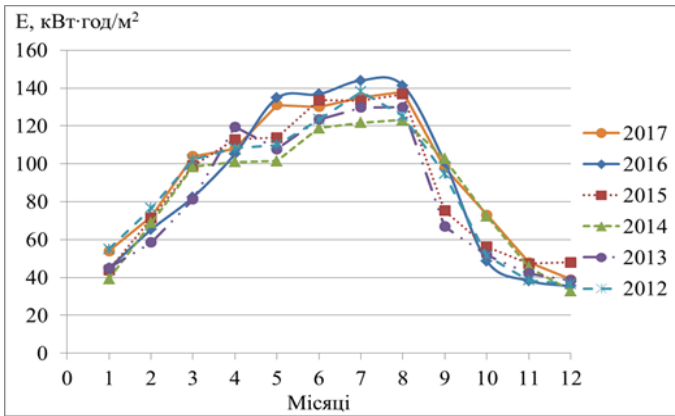


Рис. 13. Графік помісячної зміни густини енергії сонячного випромінювання протягом 2012 - 2017 рік

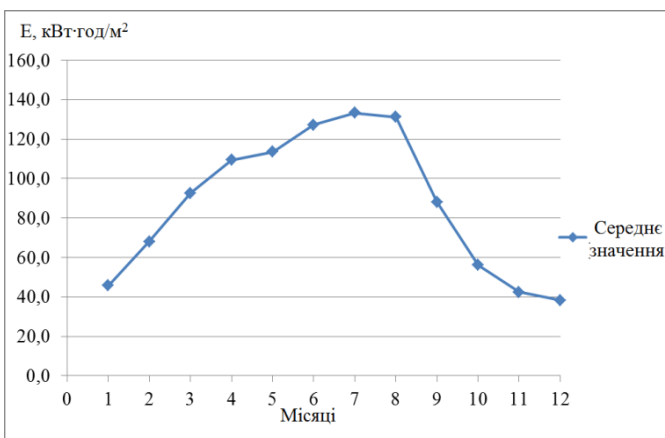


Рис. 14. Графік зміни середньомісячного значення густини енергії сонячного випромінювання протягом року

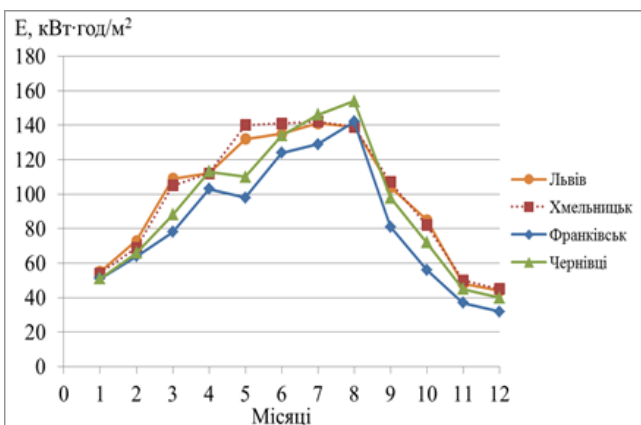


Рис. 15. Графік помісячної зміни густини енергії сонячного випромінювання міст західного регіону протягом 2017 року

На основі отриманих залежностей та даних метеослужб було розраховано середньомісячну енергію сонячного випромінювання за 2012-2017 роки.

Графік помісячної зміни густини потоку сонячної енергії протягом 2012-2017 років приведений на рис. 13. На основі усереднених помісячних даних протягом шести років (2012-2017 рр.), було побудовано графік зміни середньомісячного значення густини потоку сонячної енергії протягом року, який представлений на рис. 14.

З метою поширення отриманих залежностей густини енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності на населені пункти Західного регіону були проведені розрахунки енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для м. Львова, м. Хмельницького, м. Івано-Франківського та м. Чернівці. Для цього були використані дані метеослужб для цих міст протягом 2017 року. Використовуючи значення середньодобового ступеня хмарності та аналітичні залежності (табл. 1), було розраховано помісячну енергію сонячного випромінювання $E_{роз}, кВт \cdot год / м^2$ за 2017 рік для даних міст.

Сумарна річна поверхнева густина сонячної енергії за даний період для м. Львова становить $1094 кВт \cdot год / м^2$, м. Хмельницького – $1116 кВт \cdot год / м^2$, м. Івано-Франківського – $995 кВт \cdot год / м^2$ та м. Чернівців – $1117 кВт \cdot год / м^2$, а відхилення від даних, приведених на сайті NASA не перевищує 7-14 %.

Із розрахованих даних за 2017 рік для м. Львова, м. Хмельницького, м. Івано-Франківського та м. Чернівців, було побудовано графік зміни помісячного значення густини потоку сонячної енергії протягом 2017 року, який представлений на рис. 15.

У четвертому розділі приведена блок-схема освітлювальної установки з автономним живленням (рис. 16). Вона складається з сонячного модуля, з акумулюючого блоку (з Li-іонних акумуляторів або суперконденсаторів), системи керування та світлового приладу. У даній установці система керування забезпечує включення – відключення СП при певному рівні освітлення, який контролюється по значенню напруги на СБ. Крім того щоб уникнути включення під час сильної хмарності у даній системі присутній таймер, яким можна задавати час включення і виключення СП. Також дана система здійснює керування зарядом-розрядом АКБ. Для економного використання енергії від АКБ, використовується датчик руху в поєднанні з пристроєм регулювання світлового потоку СП на основі ШІМ. При настанні сутінків СП включається в черговому режимі (20-50 % освітленості), а при появі людини в зоні виявлення 10-12 м, система переходить в робочий режим.

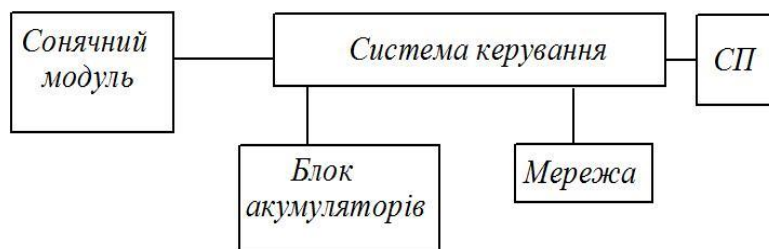


Рис. 16. Блок-схема сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів

Також до складу системи керування входить інвертор для перетворення постійної напруги в змінну, що дозволяє надлишки електроенергії передавати в мережу, та блок балансування напруги на окремому елементі акумуляторної батареї,

Для техніко-економічного розрахунку ОУ зовнішнього освітлення було вибрано три типи населених пунктів: міста з населенням близько 1 млн. і більше, міста з населенням 200-300 тисяч (обласні центри) та населені пункти з населенням до 20 тисяч (районні центри), в більшості яких на даний час відсутнє зовнішнє освітлення. Для прикладу було взято м.Київ з населенням 2.8 млн., м.Тернопіль з населенням 218 тисяч та м. Ланівці з населенням 8,7 тис.

Було проведено два типи техніко-економічного розрахунку освітлювальної установки з автономним живленням. Перший тип забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення в осінньо-зимовий період. Надлишки електроенергії протягом весняно-літніх місяців будуть віддаватися в мережу. Другий тип - забезпечує автономне живлення зовнішнього освітлення протягом весняно-літніх місяців, а при нестачі енергії в зимовий період вона буде братися з мережі.

Результати розрахунку для м. Києва приведені в табл. 2. Для I-го типу енергетичної установки потрібно 448397 сонячних батарей, 4671 інверторів, 45848 акумуляторів і 3737 монтажних комплектуючих. Для реалізації даної системи електропостачання зовнішнього освітлення необхідно 5165 млн. грн. Для

II-го типу необхідно 165105 сонячних батарей, 1720 інверторів, 45848 акумуляторів, 1376 монтажних комплектуючих і загальна вартість становить 2177 млн. грн.

Таблиця 2

Техніко-економічний розрахунок сонячної електростанції для зовнішнього освітлення м. Києва

Назва обладнання	Тип сонячної електростанції	Ціна за шт. тис. грн.	Кількість шт.	Ціна тис.грн.
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	7,9	448397	3542336,30
	II – тип		165105	1304329,50
Інвертор Growatt 10000 HY	I - тип	110	4671	513810,00
	II – тип		1720	189200,00
Li-ion акумулятори LP48100ES	I - тип	9,5	45848	435556,00
	II – тип		45848	435556,00
Монтажні комплектуючі для установки сонячних батарей на землю	I - тип	180	3737	672660,00
	II – тип		1376	247680,00
Всього:	I - тип			5164363
	II – тип			2176766

Такий же техніко-економічний розрахунок було проведено для м.Тернополя, який наведено у табл. 3. Для комплектації першого типу електростанції буде потрібно 390 млн. грн., а для другого типу - 164 млн. грн. В даних розрахунках не враховані затрати на монтаж, релейний захист, трансформаторні підстанції та подальшу експлуатацію кожної із енергетичних систем.

Таблиця 3

Техніко-економічний розрахунок сонячної електростанції для зовнішнього освітлення м. Тернополя

Назва обладнання	Тип сонячної електростанції	Ціна за шт. тис. грн.	Кількість шт.	Ціна тис.грн.
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	7,9	33823	267201,70
	II – тип		12454	98386,60
Інвертор Growatt 10000 HY	I - тип	110	353	38830,00
	II – тип		130	14300,00
Li-ion акумулятори LP48100ES	I - тип	9,5	3459	32860,50
	II – тип		3459	32860,50
Монтажні комплектуючі	I - тип	180	282	50760,00
	II – тип		104	18720,00
Всього:	I - тип			389652
	II – тип			164267

Легко видно, що сонячні енергетичні установки, розраховані на основі енергетичних потреб, як окремих областей, так і великих міст, вимагають великих затрат і можуть бути впровадженні в далекому майбутньому. Тому для розрахунків було взято середньостатистичні дані спожитої електроенергії на зовнішнє освітлення населених пунктів з населенням 5000 - 20000 осіб.

На прикладі районного центра м. Ланівці з населенням 8,7 тис. було проведено техніко-економічний розрахунок, результати якого представлені в табл. 4. Для I-го типу, потрібно 635 сонячних батарей, 7 інверторів, 65 акумуляторів і 6 монтажних комплектуючих. Для реалізації даної системи необхідно 7,5 млн.грн. Для II-го типу необхідно 234 сонячних батарей, 3 інверторів, 654 акумуляторів, 2 монтажних комплектуючих і загальна вартість становить 3,2 млн.грн.

Таблиця 4

Техніко-економічний розрахунок сонячної електростанції для зовнішнього освітлення м. Ланівці з населенням 8,7 тис

Назва обладнання	Тип сонячної електростанції	Ціна за шт. тис. грн.	Кількість шт.	Ціна тис.грн.
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	7,9	635	5016,50
	II – тип		234	1848,60
Інвертор Growatt 10000 HY	I - тип	110	7	770,00
	II – тип		3	330,00
Li-ion акумулятори LP48100ES	I - тип	9,5	65	617,50
	II – тип		65	617,50
Монтажні комплектуючі	I - тип	180	6	1080,00
	II – тип		2	360,00
Всього:	I - тип			7484
	II – тип			3156

Для практичної реалізації ОУ з автономним живленням було вибрано установку зовнішнього освітлення території навчального корпусу №7 ТНТУ ім. І.Пулюя. Територія, яку потрібно було освітити займає площу 800 м² і складається з паркувальної площадки площею 400 м² та пішохідної доріжки довжиною 65 м і площею 400 м².

При розрахунку виходили із умов, що згідно ДБН В.2.5-28-2006 дана установка повинна забезпечувати мінімальний рівень освітлення 4 лк. Розподіл освітлення та розташування світлових приладів приведено на рис. 17, 18. На рис. 19 показано 3Д зображення освітлювальної території з розташуванням СП.

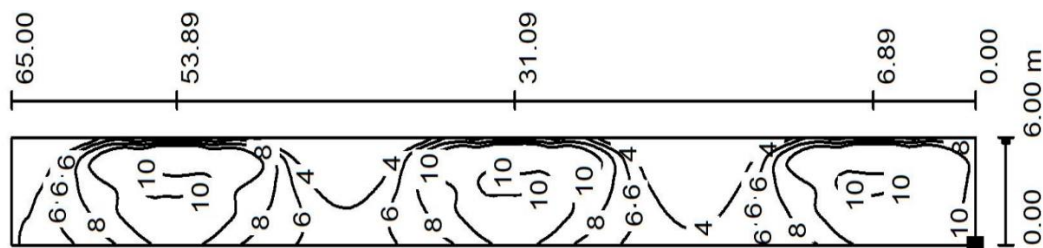


Рис. 17. Розподіл освітленості пішохідної доріжки

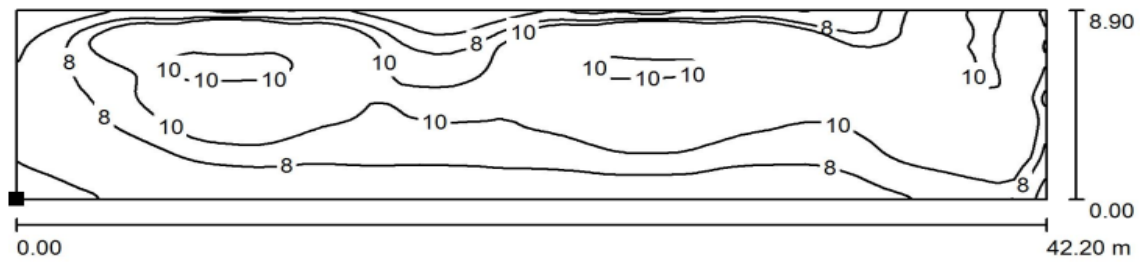


Рис. 18. Розподіл освітленості паркувальної площадки

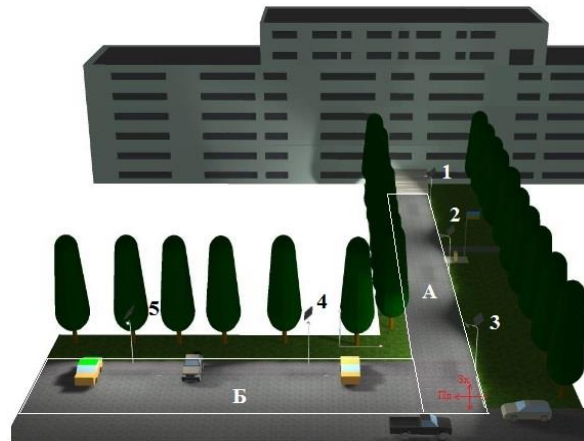


Рис. 19. 3D зображення освітлювальної території навчального корпусу №7, де: 1 – СП №1; 2 – СП №2; 3 – СП №3; 4 – СП №4; 5 – СП №5; А- пішохідна доріжка; Б - паркувальна Площадка

На основі проведених розрахунків освітлювальної установки, а також її розміщення, було отримано, що її світлотехнічні параметри задовільняють вимоги ДБН щодо забезпечення належного рівня освітленості та яскравості. Таким чином для освітлення даної території необхідно п'ять світлових приладів, загальною потужністю 125 Вт.

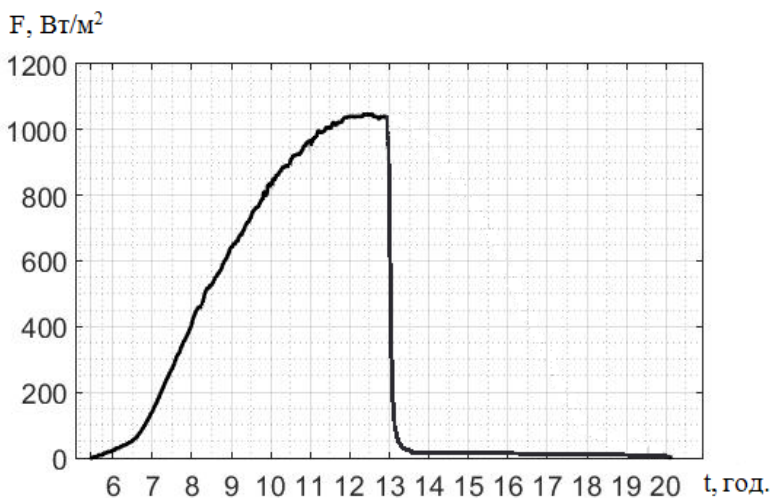


Рис. 20. Графік зміни густини потоку сонячного випромінювання впродовж доби для СП 4,5

Перед тим як перейти до вибору конфігурації світловий прилад – сонячна батарея було проведено аудит потоку сонячної енергії в місцях розташування світлових приладів з блоками автономного живлення (рис. 19). На рис. 20 приведено зміну густини потоку сонячного випромінювання впродовж доби 29 травня 2018 року для СП 4, 5.

Як видно з графіка до 13⁰⁰ год. відбувається поступове зростання густини потоку сонячного випромінювання до

1050 Вт/м². Після 13⁰⁰ год. спостерігається різкий спад до 35 Вт/м². Це зумовлено затіненням фотодатчика і попаданням лише розсіяного сонячного випромінювання. Аналогічні графіки спостерігалися для СП № 1 і 2, але час їх освітлення тривав до 15⁰⁰ год. Було виявлено, що СП № 3 був освітлений на протязі всього світлового дня.

На основі проведеного аудиту було розглянуто два варіанти виконання автономного живлення освітлювальної установки на основі сонячних батарей. Перший тип – розміщення СБ на кожній опорі. Другий тип – розміщення СБ в найбільш сприятливому місці на опорі № 3, а живлення інших СП здійснювати по кабельній лінії.

В табл. 5 представлено техніко-економічний розрахунок двох типів освітлювальної установки з автономним живленням для освітлення прилеглої території навчального корпусу №7, а саме пішохідної алеї та паркувальної площадки.

Таблиця 5

Техніко-економічний розрахунок освітлювальної установки з автономним живленням території навчального корпусу №7

Назва обладнання	Тип автономної установки	Ціна за шт. тис. грн.	Кількість шт.	Ціна тис.грн.
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	8,3	9	74,7
	II – тип		5	41,5
Контролер TA_CM2024Z	I - тип	0,8	5	4
Контролер TA_CM5024Z	II – тип	2	1	2
Li-ion акумулятори 24 В, 10 А·год	I - тип	4,6	5	23
	II – тип		5	23
Суперконденсатори SM-24V-200FUS 15Wh	I - тип	11,2	5	56
	II – тип		5	56
Монтажні комплектуючі	I - тип	1,5	5	7,5
	II – тип		1	1,5
Датчик руху	I - тип	0,3	5	1,5
	II – тип		5	1,5
Всього з Li-ion акумуляторами:	I – тип	110,7		
	II – тип	69,5		
Всього з суперконденсаторами:	I – тип	143,7		
	II – тип	102,5		

Таким чином найбільш економічно доцільним є розташування системи автономного живлення на опорі СП №3, що дозволяє здешевити систему освітлення на 30 %.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику та змонтовано експериментальну установку для вимірювання фотоелектричних характеристик СБ. Запропонована модель сонячного елемента. Експериментально визначено параметри даної моделі для СБ типу ALM-50M. Проведено моделювання впливу коефіцієнта ідеальності діода і зворотнього струму насичення діода на U_{xx} . Показано, що при збільшенні струмів насичення діода від $I_0=4 \text{ мА}$ до $I_0=40 \text{ мА}$ відбувається зменшення U_{xx} від 21,6 до 19 В, що в свою чергу знижує вихідну потужність.

2. В якості акумулюючої системи автономного джерела живлення ОУ запропоновано батарею із суперконденсаторів. Встановлено лінійну залежність ємності СК від напруги зарядки. Проведено вимірювання внутрішнього опору вибірки суперконденсаторів, середнє значення якого $R_{вн} \approx 11 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ і його відхилення для різних напруг зарядки не перевищувало 5 %. Встановлено, що після заряду суперконденсаторів до їх номінальної напруги 2,7 В із збільшенням тривалості їх витримки при цій напрузі від 5 хв. до 360 хв. збільшується час їх саморозряду від $0,3 \cdot 10^4$ до $2,4 \cdot 10^4 \text{ с}$.

3. Запропоновано систему регулювання процесів заряду/розряду суперконденсаторів та Li-ion акумуляторів з використанням пристрою балансування напруги на окремих їх елементах (Патент на корисну модель №116216).

4. Запропоновано методику, змонтовано експериментальну установку та проведено вимірювання і запис густини потоку сонячного випромінювання в режимі реального часу на широті м. Тернополя. Проведено розрахунок часового розподілу густини енергетичного потоку сонячного випромінювання, та визначено кількість енергії сонячного випромінювання протягом кожного місяця 2016-2017 років.

5. Проведено аналіз впливу кліматичних умов протягом кожного місяця 2016-2017 рр. на густину потоку сонячного випромінювання. Встановлено аналітичну залежність середньодобової енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності $E(N)$ протягом кожного місяця.

6. На основі встановлених аналітичних залежностей проведено розрахунок енергетичного потенціалу сонячного випромінювання протягом 2012-2016 років з врахуванням кліматичних умов західного регіону України. Визначено, що середньорічна густина потоку сонячної енергії становить $1045,9 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$, а її відхилення не перевищує 5 %.

7. Наведено методику розрахунку сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення населених пунктів. Запропоновано два типи сонячних енергетичних установок. Перший тип повністю забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення в осінньо-зимовий період. Другий тип – забезпечує автономне живлення зовнішнього освітлення протягом весняно-літніх місяців.

8. Представлені результати техніко-економічного розрахунку сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення м. Києва, з населенням 2.8 млн., м. Тернополя, з населенням 218 тисяч та м. Ланівці, з населенням 8,7 тис.

9. Представлено техніко-економічний розрахунок ОУ з автономним живленням для зовнішнього освітлення території корпусу № 7 ТНТУ ім. І.Пулюя. Показано, що економічно доцільним є розташування системи автономного живлення на опорі світлового приладу № 3, в порівнянні з розташуванням сонячних батарей на опорі кожного світлового приладу на 30 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Філюк Я.О. Система автономного питания внешнего освещения / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Світлотехніка та електроенергетика. – 2017. – №1. – С. 17-22. *(Автором запропонована методика вимірювання та визначення параметрів сонячної батареї).*
2. Філюк Я.О. Акумуляуючі пристрої для систем автономного живлення світлотехнічних установок / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 2. – С. 40-47. *(Автором запропоновано методику визначення електричних параметрів суперконденсаторів).*
3. Filyuk Y.O. Analysis of the energy potential of solar light of the western region of Ukraine with the account of climatic conditions / Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // EUREKA: PHYSICS AND ENGINEERING. – 2017. – No4. – P. 25-32. *(Автором запропоновано установку для вимірювання та запису густини потоку сонячного випромінювання та представлено аналітичні залежності густини потоку сонячного випромінювання від ступення хмарності).*
4. Filyuk Y.O. Research of energy potential of solar radiation in Ternopil / Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // Scientific Journal of TNTU. TNTU, 2017. – Vol 85. – No 1. – P. 95-100. *(Автором розраховано густину енергії сонячного випромінювання для м. Тернополя та визначено вплив кліматичних умов на величину енергії сонячного випромінювання).*
5. Filyuk Y.O., Andriychuk V.A. Use of solar energy for the outdoor lighting of Ternopil // Scientific Journal of TNTU. TNTU, 2017. – Vol 87. – No 3. – P. 126–133. *(Автором проведено аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов території Тернополя протягом п'яти останніх років).*
6. Filyuk Y.O. Autonomous power supply system for outdoor illumination of residential areas in the territory of Ukraine / Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // Scientific Journal of TNTU. TNTU, 2018. – Vol 89. – No 1. – P. 113–121. *(Автором запропоновано методику розрахунку автономної системи живлення зовнішнього освітлення населених пунктів Тернопільської області).*
7. Пат. №116216 Україна : МПК (2017.01) H02J 7/00. Прилад балансування напруги на окремому суперконденсаторі акумуляуючої батареї від перезаряду / Філюк Я.О., Андрійчук В.А., Липовецький М.М.; заявник і патентоотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № 201612215; заявл.01.12.2016 ; опублік. 10.05.2017, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова).*

Опубліковані праці апробаційного характеру

8. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням // V Міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 23-27 лютого 2015 року. – Т.: ТНТУ, 2015. – С. 115-116.

9. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням на основі сонячних батарей з акумулюючими елементами / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук, В.П. Коваль // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні особливості формування і управління інноваційним потенціалом регіонального розвитку туризму та рекреації із залученням молодіжного ресурсу“, 15-17 жовтня 2015 року. – Т. : ТНТУ, 2015. – С. 185-186. *(Автором запропоновано систему керування роботою світлового прилада).*

10. Філюк Я.О. Освітлювальні установки з автономним живленням на основі сонячних батарей та іоністорів/ Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій, 25 листопада 2015 року – Т. : ТНТУ, 2015.– С. 129-130. *(Автором запропоновано експериментальну установку для дослідження параметрів суперконденсаторів).*

11. Філюк Я.О. Вимірювання енергії сонячного випромінювання на широті Тернопільського регіону/ Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // Матеріали XIX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 18 травня 2016 року – Т. : ТНТУ, 2016. – С. 175. *(Автором розроблено установку для дослідження густини потоку сонячного випромінювання).*

12. Filyuk Y.O. Lighting installation autonomous power systems / V.P. Koval, Y.O. Filyuk, V.A. Andriychuk // ICEPOM-10 CONFERENCE ABSTRACTS: зб. тез доповідей X міжнародної конференції ICEPOM-10, Тернопіль, 23-27 травня 2016 року. – С. 54. *(Автором запропоновано акумулюючі системи для світлотехнічних установок з автономним живленням).*

13. Філюк Я.О. Використання суперконденсаторів для автономного живлення установок із світлодіодними джерелами світла / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук, А.Р. Малюга // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 17 листопада 2016 року. – Т. : ТНТУ, 2016. – С. 202-203. *(Автором проведено дослідження саморозряду суперконденсаторів).*

14. Філюк Я.О. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 17 травня 2017 року. – Т. : ТНТУ, 2017. – С. 176-177. *(Автором*

запропоновано методику розрахунку інтенсивності потоку сонячного випромінювання).

15. Філюк Я.О. Використання даних метеослужб для оцінки енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук. // Матеріали III всеукраїнська науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», 8-9 червня 2017 року. – Т. : ТНТУ, 2017. – С. 233. *(Автором проведено дослідження сонячного випромінювання в м. Тернополі)*

16. Філюк Я.О. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // VI Міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 30 січня 2018 року. – Т. : ТНТУ, 2018. – С. 13-14. *(Автором запропоновано освітлювальну установку з автономним живленням).*

АНОТАЦІЯ

Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.07 – «Світлотехніка та джерела світла». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019.

Робота присвячена дослідженню систем зовнішнього освітлення з автономним живленням, в якості якого використані сонячні батареї типу KVazar KV 250M та акумуляторні системи з суперконденсаторів та Li-ion акумуляторів. Проведено дослідження енергетичних характеристик сонячних батарей та акумулюючих систем із суперконденсаторів.

Проведено вимірювання в режимі реального часу густини енергетичного потоку сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов території західного регіону України. Встановлено аналітичну залежність середньодобової енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності $E(N)$ протягом кожного місяця. Проведено розрахунок енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для міст західного регіону: Львова, Хмельницького, Івано-Франківська, Чернівців та Тернополя.

Наведено методику розрахунку сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення населених пунктів. Представлені результати техніко-економічного розрахунку сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення міста з населенням близько 1 млн. і більше, міста з населенням 200-300 тисяч (обласні центри) та населені пункти з населенням до 20 тисяч (районні центри).

Ключові слова: сонячна батарея, освітлювальна установка, суперконденсатор, світловий прилад, акумуляторна батарея, густина потоку сонячного випромінювання.

АННОТАЦИЯ

Филук Я.А. Светотехнические установки с автономным питанием - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.09.07 – «Светотехника и источники света». – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2019.

Работа посвящена исследованию систем наружного освещения с автономным питанием, в качестве которого использованы солнечные батареи типа KVazar KV 250M и аккумуляторные системы с суперконденсаторов и Li-ion аккумуляторов. Проведено исследование энергетических характеристик солнечных батарей и аккумулирующих систем с суперконденсаторов.

Проведены измерения в режиме реального времени плотности энергетического потока солнечного излучения с учетом климатических условий территории западного региона Украины. Получена аналитическая зависимость среднесуточной энергии солнечного излучения от степени облачности $E(N)$ в течение каждого месяца. Проведен расчет энергетического потенциала солнечного излучения для городов западного региона: Львова, Хмельницкого, Ивано-Франковска, Черновцов и Тернополя.

Приведена методика расчета солнечных энергетических установок для внешнего освещения населенных пунктов. Представлены результаты технико-экономического расчета солнечной энергетической установки для наружного освещения города с населением около 1 млн. и более, города с населением 200-300 тысяч (областные центры) и населенные пункты с населением до 20 000 (районные центры).

Ключевые слова: солнечная батарея, осветительная установка, суперконденсатор, световой прибор, аккумуляторная батарея, плотность потока солнечного излучения.

SUMMARY

Filyuk Y.O. Lighting installations with autonomous power supply. The qualification scientific work on the manuscript copyright.

Ph.D. thesis fin Engineering Sciences with major in 05.09.07 «Lighting engineering and light sources». Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2019.

The work deals with the research of outdoor lighting systems with autonomous power supply for which we used solar cells of KVazar KV 250M type and accumulating systems consisting of supercondensers and Li-ion batteries. The analysis of energy performance of solar cells and accumulating systems consisting of supercondensers was carried out.

Real-time measurements of solar radiation flux density considering climatic conditions of western region of Ukraine were taken. Theoretical dependency of daily average of solar energy radiation on monthly cloud amount $E(N)$ was determined. Calculations of solar radiation energy potential for the cities of western regions: Lviv, Khmelnytskyi, Ivano-Frankivsk, Chernivtsi and Ternopil were made.

Calculation methodology for solar energy installations applied in city outdoor lighting was proposed. The research presents findings of cost-benefit analysis for solar energy installation applied in outdoor lighting in cities with population of more than million inhabitants, cities (regional centers) with population of about 200-300 thousand people and towns (district centers) with population less than 20 thousand inhabitants.

Keywords: solar battery, lighting unit, supercapacitor, light instrument, battery, solar radiation flux density.

Підписано до друку 12.04.2019. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно—друк. арк. 0,9. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 120419

Друк ФОП Паляниця В. А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528–777.