

УДК 621.311.243:696.4

І.З. Щур, І.Є.

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем
e-mail: ihor.z.shchur@lpnu.ua

Біляковський,

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем
e-mail: ihor.y.biliakovskiy@lpnu.ua

Р.-І.В. Кузик,

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем
e-mail: rostyslav.v.kuzyk@lpnu.ua

А.В. Щербина,

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем
e-mail: andrii.shcherbyna.mneem.2024@lpnu.ua

СИСТЕМА НАГРІВАННЯ ВОДИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕНТРОВАНОГО СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

<https://doi.org/10.23939/sepes2025.01.060>

© Ігор Щур, Ігор Біляковський, Ростислав-Іван Кузик, Андрій Щербина, 2025

У статті представлено результати прикладного дослідження, спрямованого на створення достатньо простої і недорогої та водночас ефективної побутової сонячної водонагрівальної установки (СВНУ) з концентрацією сонячної енергії. Особливістю такої СВНУ є її порівняно невеликі габарити та можливість встановлення в доступних умовах: на стінах, дахах чи балконах як індивідуальних будинків, так і багатоквартирних будівель. Завдання роботи було розроблення основних елементів конструкції СВНУ, їх виготовлення та проведення експериментальних досліджень щодо ефективності роботи всієї системи в натурних умовах. Важливим вузлом в такій установці є концентратор сонячної енергії (КСЕ), який завдяки використанню дзеркала або лінзи збирає сонячне випромінювання з порівняно великої площі і фокусує його на невеликій поверхні, де розміщено тепловий колектор спеціальної конструкції. Завдяки постійному слідуванню КСЕ за сонцем та багатократно більшій інтенсивності сонячної радіації в колекторі досягаються досить високі температури протягом цілого сонячного дня, що дає змогу підвищити ефективність використання сонячної енергії.

Створена побутова СВНУ з КСЕ на основі параболічної тарілки супутникової антени з двоосовою системою електропривода наведення на сонце, гідравлічною

системою переносу теплоти від теплового колектора до бака-акумулятора та малопотужною системою автономного електричного живлення на основі фотоелектричної сонячної панелі, яка відзначається компактністю, можливістю закріплення на стіні будинку, низькою вартістю застосованих компонентів.

Попередні експериментальні дослідження стосовно ефективності роботи установки запропонованої конструкції показали досить невисоку її енергетичну ефективність, зумовлену, в першу чергу, низькою недоліків у конструкції теплового колектора, які заплановано врахувати під час проектування другого його варіанту. Метою подальших досліджень є отримання значно вищої енергетичної ефективності.

Розроблено теоретичну базу для створення системи програмного керування двома лінійними електроприводами з метою забезпечення оптимального керування положенням КСЕ протягом кожного дня року.

Ключові слова: *сонячна система підігріву води, концентратор сонячної енергії, тепловий колектор, бак-акумулятор теплоти, гідравлічна система, система відстеження положення сонця.*

Вступ

Вичерпання корисних копалин та негативний вплив на навколишнє середовище традиційної енергетики став стимулом для пошуку і використання нетрадиційних, альтернативних, джерел енергії, до яких належать відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) – енергія сонця, вітру, геотермальна, океанічна, енергія біомаси тощо [1]. На відміну від атомної енергетики та викопного палива, ВДЕ не руйнують довкілля та є невичерпними.

Енергія сонця – практично невичерпне джерело енергії. Відомо, що використання лише 1 % сонячної енергії могло б забезпечити всі сьогодині потреби світової енергетики. Сонячну енергію можна використовувати у двох напрямках: пряме використання теплоти сонячного випромінювання для опалення, гарячого водопостачання; перетворення її в електричну енергію [2]. Останнє здійснюється за допомогою фотоелектричних сонячних батарей. Основні складнощі їх застосування пов'язані з високою металомісткістю конструкцій, вартістю, а також необхідністю відведення великих територій.

Підігрів води для побутових потреб є однією з найбільш енергозатратних технологій, що зумовлено великою питомою теплоємністю води. У зв'язку із необхідністю декарбонізації енергетики останнім часом для підігрівання води почали застосовувати сонячну енергію, в тому числі й у побуті. Зазвичай це забезпечується двома типами сонячних систем: 1) сонячні фотоелектричні установки, в яких генерована від сонця електрична енергія перетворюється в термоелектричних нагрівачах, що розміщені у водяних баках-акумуляторах (бойлерах), в теплоту; 2) сонячні теплові установки, в яких сонячна енергія перетворюється безпосередньо в теплоту зазвичай рідкого теплоносія, що циркулює в сонячному колекторі і переносить теплоту до бака-акумулятора. Вказані типи сонячних водонагрівальних систем є достатньо складними і дорогим та потребують спеціальних умов щодо їх встановлення, зазвичай на дахах будівель.

Оскільки тепла вода є необхідним атрибутом у сучасному побуті, створення простої і недорогої та доступної щодо встановлення сонячної водонагрівальної установки (СВНУ) є актуальною науково-технічною задачею. Для її ефективного вирішення доцільним виглядає підхід щодо концентрації сонячного випромінювання, яке, як відомо, характеризується низькою інтенсивністю – максимум 1000 Вт/м² на рівні поверхні Землі.

Огляд літературних джерел

Основною перевагою концентратора сонячної енергії (КСЕ) для підігрівання води є підвищена продуктивність через застосування енергії сонця високої густини, а також висока рентабельність

системи через меншу кількість матеріалів та дешевої оптики. Однак, КСЕ працюють лише з прямими променями, тому їх використовують переважно у сонячних місцевостях. Найчастіше їх встановлюють у пустелях, південних регіонах США (штати Каліфорнія та Невада), Марокко, ПАР, Іспанії.

За відсутності КСЕ для СВНУ нижче проаналізовано відомі конструкції КСЕ для фотоелектричних установок.

У даний час концентратори існують у наступних оптичних типах: параболічний жолоб, геліостати для станції баштового типу, лінійний відбивач Френеля, тарілка Стірлінга. Вони відрізняються способами відстеження сонця, фокусування світла, піковими температурами та ефективністю [3-6].

КСЕ можуть мати такі переваги:

- висока енергетична ефективність - дають змогу досягати високих температур, що підвищує ефективність перетворення енергії;
- менші габарити - мають менші розміри порівняно зі звичайними фотоелектричними системами.

Недоліками КСЕ є:

- низька ефективність у хмарну погоду - лінзи та дзеркала стають неефективними при поганій погоді, оскільки не можуть концентрувати випромінювання;
- складність орієнтації - потрібні механічні модулі для точного відстеження сонця, це також потребує додаткової енергії;
- високі витрати - виробництво може бути дорогим, що впливає на економічну вигідність, особливо порівняно з простими системами.

У статті [7] надана характеристика нині існуючих двох типів систем КСЕ: система слабкої концентрації та система високої концентрації. Наведено їх конструктивні особливості та недоліки. Зазначено, що одними з найбільш застосовуваних концентраторів є лінзи Френеля, але оптична їх ефективність обмежена низькими або високими температурами. Складна геометрична форма параболічних концентраторів зумовлює дорогу технологію їх виготовлення, що, в свою чергу, суттєво збільшує собівартість виробленої ними електричної енергії. Люмінесцентні сонячні концентратори мають низький коефіцієнт концентрації сонячної енергії. Проведений аналіз показав, що існуючі КСЕ не дають змоги створювати конкурентоздатні у порівнянні з традиційними джерелами електричної енергії фотоенергетичні установки, які працюють при високих ступенях концентрації сонячного опромінення та утилізують надлишкову теплову енергію. З метою вирішення зазначених проблем, авторами розроблено фасетний концентратор сонячного випромінювання, наведено його характеристики та представлено лабораторний зразок (рис. 1). Досліджено питання оптимізації налаштування концентратора. Оприлюднено результати проведених натурних випробувань макету.

У статті [3] розглядаються види КСЕ. Розраховано параметри параболічного концентратора та розроблено конструкцію параболічного сонячного концентратора із ресивером у протитіці та штативом. Були запропоновані модифікації для автоматизації роботи.

У роботах [6, 8] проведені комплексні дослідження з оптимізації КСЕ для використання у складі висококонцентраційних фотоенергетичних систем шляхом дослідження оптичних властивостей та особливостей деградації фасетного, вакуумного та сегментного концентраторів. За результатами натурної апробації експериментального зразка фасетного концентратора було виявлено, що процедура налаштування концентратора пов'язана із індивідуальним коректуванням положення кожного із багатьох дзеркал, що є вкрай складно. За результатами апробації концентратора вакуумного типу було встановлено, що такі концентратори є дуже чутливими до якості виготовлення основи оскільки внаслідок особливостей конструкції практично не піддаються налаштуванню після виготовлення. Також вони мали занадто великий розмір фокальної плями яка перевищує розмір теплоприймача. За результатами натурної апробації встановлено, що перспективним для використання у складі фотоенергетичних систем є конструкція концентратора сегментного типу, що являє собою круговий масив сегментів виготовлених з дзеркального матеріалу,

інтегральний коефіцієнт відбиття якого сягає 95% та виготовлено експериментальний зразок площею 3,6 м², що дозволяє отримати фокусну пляму діаметром 120 мм з трапецієвидним розподілом освітленості із коефіцієнтом концентрації випромінювання на рівні 360 од.

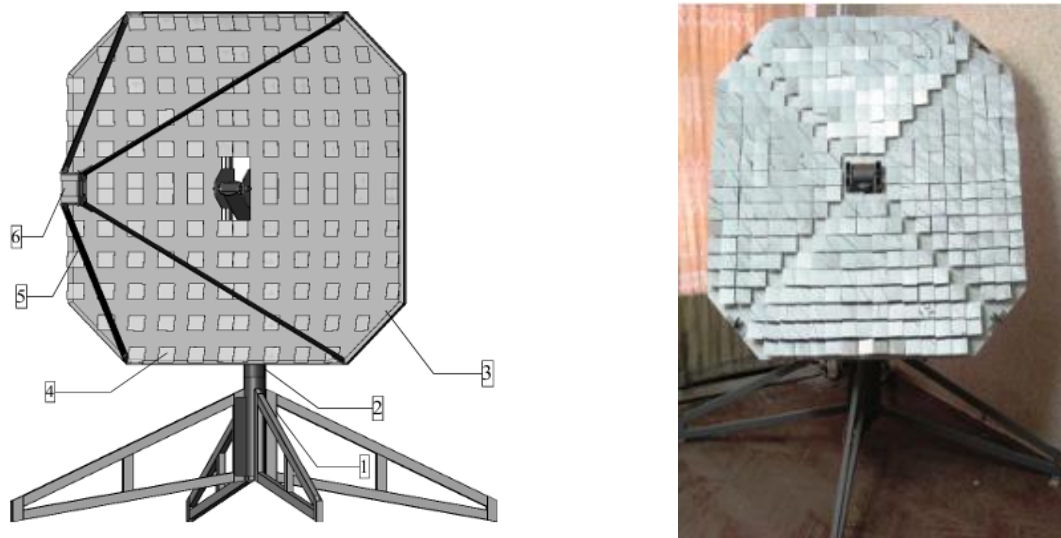


Рис. 1. Загальний вигляд експериментального зразка фотоенергетичної установки [7]: 1 - основа з 4 опорами, підшипниковими вузлами для вертикальної осі обертання, редуктором та азимутальним приводом; 2 - поворотна частина з механізмом нахилу, підшипниковими вузлами для горизонтальної осі обертання; 3 - несуча конструкція концентратора; 4 - елемент концентратора - орієнтоване дзеркало (показано приблизно 30% усіх дзеркал); 5 – стрижні підвісу фотоенергетичного блока; 6 - фотоенергетичний блок

У статті [9] досліджується конструкція та модель концентруючої фотоелектричної теплової (CPV/T) системи з метою визначення її розміру та оптимізації електричних та теплових характеристик при використанні для задоволення електричних, теплових та холодильних навантажень побутового споживача. Для отримання висококонцентрованої системи використовується відбивна оптика з параболічними дзеркальними концентраторами точкового типу та триперехідні комірки (InGaP/InGaAs/Ge), зібрані з двовісним трекером. Також розглядається активна система охолодження фотоелектричних елементів. Система CPV/T дозволяє отримувати теплову енергію при високій температурі для роботи абсорбційного теплового насоса та для задоволення холодильного навантаження. Модель аналізує роботу системи CPV/T з точки зору: прямого нормального опромінення, ефективності комірки, електричної та теплової ефективності модуля, теплової та електричної енергії, що забезпечується коміркою та модулем, температури комірки та охолоджувальної рідини. Крім того, у кожному робочому режимі визначається оптимізоване значення коефіцієнта концентрації, здатне зменшити розмір системи CPV/T та забезпечити температуру рідини на виході, яка задовольняє теплові та охолоджувальні потреби.

Окрім наукових статей, поодинокі описи КСЕ, зокрема, з колекторами для нагрівання води можна знайти в мережі Internet (рис. 2) [10]. Представлені КСЕ можуть мати різну геометричну форму: множини плоских дзеркал (а), параболо-циліндричного типу з лінійним поздовжнім фокусуванням (б), параболоїдного типу (в), параболо-циліндричного типу з лінійним поперечним фокусуванням (г).

У роботі [11] наведено опис і характеристики параболічного сонячного безнапірного колектор-концентратора (рис. 3) для забезпечення гарячою водою об'єктів сезонної дії в період з квітня по жовтень, наприклад, для гарячого водопостачання в літній сезон дач, пансіонатів, турбаз, басейнів,

літніх душових. Принцип дії заснований на фокусуванні сонячного випромінювання параболічними дзеркалами на циліндричній абсорбер. Можливе паралельне або послідовне з'єднання декількох колекторів. Матеріал дзеркал – полірована нержавіюча сталь. Площа дзеркал - 4 кв. м. Абсорбер - високоефективна скляна вакуумна трубка розміром D58x1800 з селективним покриттям.

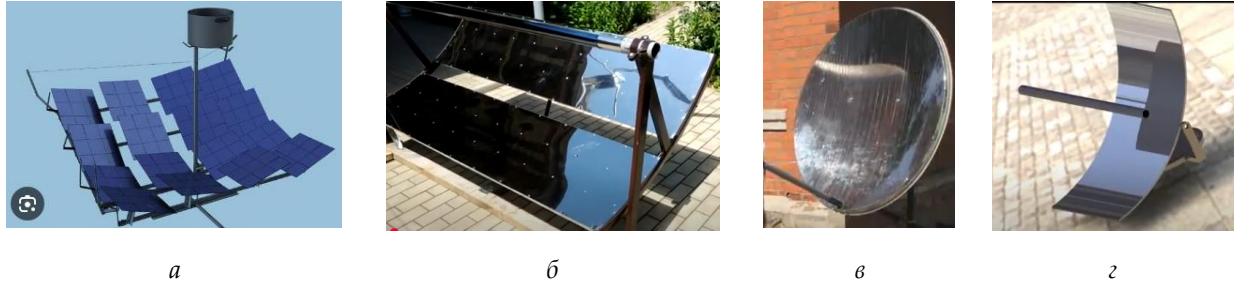


Рис. 2. Концентратори сонячної енергії [10]

Також в [12] стверджується, що винахідник з Харкова запатентував розроблені ним КСЕ, які можуть використовуватись в повсякденному житті на звичайному домогосподарстві. Конструкція складається з сегментованих концентраторів, які об'єднують велику кількість вузьких смужок. Між ними залишаються великі проміжки вільного простору, де може вільно рухатись потік повітря (рис. 4). Розробка відрізняється від аналогів особливістю розташування так званої фокальної області (область максимальної концентрації енергії). Харків'янин домігся того, що у його винаході вона не залежить від положення сонця на небі. У багатьох сучасних КСЕ фокальна область рухається слідом за сонцем, але сегментовані концентратори створюють абсолютно нерухому фокальну область.



Рис.3. Безнапірний колектор-концентратор [11]



Рис.4. Сегментований концентратор [12]

Малопотужні мобільні сонячні підігрівачі-концентратори (рис. 5) представлено також на сторінках китайського інтернет-магазину Aliexpress (<https://www.aliexpress.com/>).



Рис.5. Малопотужні мобільні сонячні підігрівачі-концентратори

Проведений аналіз доступних літературних джерел показує, що найскладнішою та найвідповідальнішою частиною СВНУ є КСЕ та тепловий колектор. Від досконалості їх спільного проектування залежатиме енергетична ефективність роботи всієї СВНУ.

Мета та завдання роботи

Метою роботи є розроблення основних елементів конструкції СВНУ з КСЕ, їх виготовлення та експериментальне дослідження енергетичної ефективності роботи всієї системи.

Завданнями, на вирішення яких спрямовано роботу, є:

- пошук та придбання відповідної супутникової антени як основи для виготовлення дешевого КСЕ;
- підбір матеріалу для відбиваючого сонячні промені покриття за його характеристиками відбивання та довговічності роботи у відкритих атмосферних умовах;
- розроблення та виготовлення системи двоосьового електропривода з метою наведення КСЕ на сонце;
- розрахунок динаміки річних координат напрямку на сонце для програмного керування положенням КСЕ;
- розроблення першого варіанту конструкції сонячного колектора та його виготовлення;
- проектування та виготовлення гідравлічної системи переносу теплоти від сонячного колектора до бака-акумулятора;
- проектування та виготовлення термостата для проведення досліджень щодо енергетичної ефективності роботи сонячної водонагрівальної установки запропонованої конструкції;
- проведення експериментальних досліджень щодо оцінки енергетичної ефективності роботи СВНУ в літній період року;
- коректування конструкції СВНУ за результатами проведених експериментальних досліджень.

Опис системи

Для конструювання КСЕ побутової СВНУ було вирішено взяти за основу тарілку супутникової антени. Таке рішення зумовлене, перш за все високою точністю виготовлення супутникових тарілок з метою концентрації електромагнітного випромінювання, що поширюється супутником, на прийомній головці антени. Такі тарілки мають низьку вартість завдяки масовості виробництва. Крім того, через стрімке зниження потреби в супутниковому телебаченні, яке практично замінив Internet, на вторинному ринку появляється багато тарілок різного розміру. І, на кінець, на підприємствах, які випускали супутникові антени, ще наявне обладнання для виготовлення таких тарілок, які можуть бути допрацьовані для застосування в побутових СВНУ з КСЕ.

На рис. 6 показано загальну структуру запропонованої побутової СВНУ. КСЕ є тарілка супутникової антени, на робочу поверхню якої нанесено світловідбиваюче покриття. Тарілка КСЕ за допомогою двоосьової поворотної системи приєднана до нерухомої основи, на якій закріплюється до стіни чи даху будинку. Наведення тарілки на сонце здійснюється двокоординатним електроприводом з використанням двигунів постійного струму, які забезпечують лінійне переміщення штоків за принципом «гвинт – гайка» (комерційна назва – лінійний актуатор). У фокальній точці антени, куди спрямовується відбите та сконцентроване сонячне випромінювання, закріплено малогабаритний тепловий колектор спеціальної форми, заповнений водою. Колектор з'єднано двома гнучкими трубками з теплоізованим баком-акумулятором. Подача до колектора холодної води з нижньої частини акумулятора здійснюється за допомогою помпи з електроприводом. Гаряча вода, що відводиться від колектора, поступає у верхню частину бака-акумулятора. Помпа працює періодично (on-off режим роботи) відповідно до заданих значень температури на колекторі, яка вимірюється відповідним термометром. Керування роботою всієї СВНУ здійснює спеціальний блок керування, реалізований на дешевому мікроконтролері, наприклад, Arduino. Він виконує дві функції: 1) керування лінійними електроприводами з метою постійного слідування КСЕ за сонцем протягом

цілого року, 2) керування вмиканням та вимиканням помпи відповідно до температур теплового колектора. СВНУ обладнана ще однією підсистемою – автономного електричного живлення, що забезпечується малопотужною сонячною фотоелектричною панеллю, акумуляторною батареєю та контролером її заряду з функцією пошуку точки максимальної потужності (MPPT-функція).

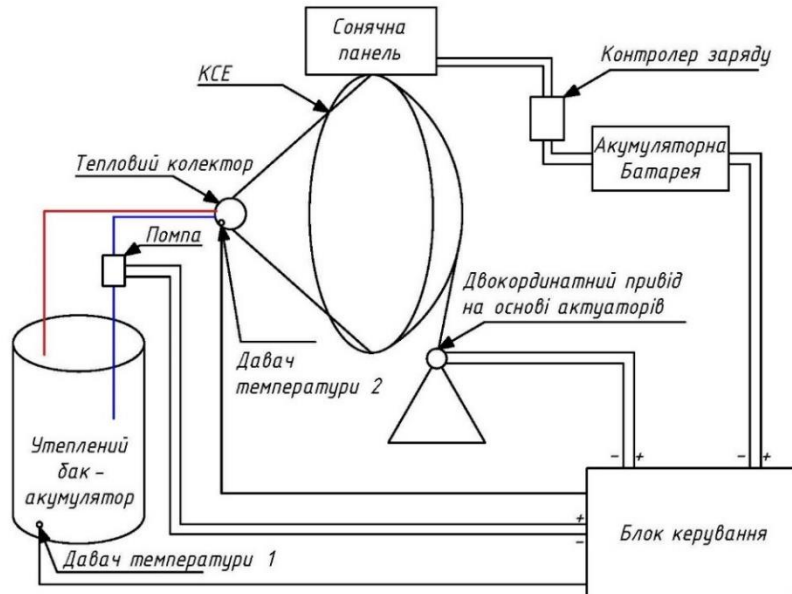


Рис. 6. Загальна структура побутової СВНУ з КСЕ



Рис. 7. Фото розробленої СВНУ під час проведення експериментів: 1 – концентратор сонячної енергії, 2 – сонячна фотоелектрична панель, 3 – тепловий колектор, 4 – трубопроводи, 5 – бак-акумулятор, 6 – візок для перевезення бака-акумулятора

На рис. 7 показано фото розробленої на основі показаної на рис. 6 загальної структури СВНУ з КСЕ. Параметри та особливості конструкції основних елементів розробленої СВНУ наведено нижче.

Тарілку супутникової антени було вибрано несиметричної, видовженої форми з фокусною точкою, розміщеною внизу. У порівнянні з круглими тарілками, така форма дає перевагу щодо

відсутності затінення КСЕ тепловим колектором та елементами його кріплення, а також меншого забруднення відбиваючої поверхні КСЕ та меншому виступу його від стіни у випадку настінного кріплення завдяки більш вертикальному робочому положенню тарілки. Габаритні розміри робочої поверхні тарілки 1400 x 1200 мм. Її внутрішню поверхню обклеєно полірованою алюмінієвою самоклеючою стрічкою товщиною 50 мкм.

Для кріплення та двокоординатного обертання тарілки було використано механічну систему тієї ж супутникової антени (рис. 8). Проте довелося її дещо переробити з метою забезпечення обертання відносно вертикальної осі (азимутальне обертання) та горизонтальної осі (меридіональне обертання), що необхідно для чіткого наведення такого КСЕ несиметричної форми на сонце. Для забезпечення обертання КСЕ відносно цих осей механічну систему дообладнано спеціальними важелями, на які тиснуть штоки лінійних електроприводів з різною довжиною ходу: 200 мм для азимутальної осі та 150 мм для меридіональної осі.

Рис. 8. Електромеханічна система керування положенням КСЕ: 1 – концентратор сонячної енергії, 2 – вертикальна обертова несуча труба, 3 – вертикальна нерухома опорна труба, 4 – лінійний електропривод для обертання КСЕ в азимутальній площині, 5 – опора КСЕ для повороту в меридіональній площині, 6 – лінійний електропривод для обертання КСЕ в меридіональній площині



На першому етапі було вирішено застосувати тепловий колектор спіральної форми (рис. 9). Його скручено з мідної трубки внутрішнім діаметром 10 мм довжиною 2 м. На кінцях колектора змонтовано фітинги для приєднання до кесанових трубок діаметром 16 мм. Тепловий колектор пофарбовано в чорний колір для кращого поглинання сонячних променів.

Внутрішню ємність бака-акумулятора 1, показаного на рис. 10, об'ємом 80 л було взято від звичайного побутового бойлера, проте добре утеплено мінеральною ватою 2 і обгорнено в армовану скловолокном алюмінієву фольгу. Для забезпечення вертикального положення бака, його поміщено в спеціально зварений зі сталюого кутника кронштейн 3, який забезпечує стійке положення бака з водою під час його перевезення до місця дослідження за допомогою візка (позиція 6 на рис. 7). До бака-акумулятора підведено два теплоізовані поліетиленові трубопроводи 4, що з'єднують бак з тепловим колектором. Для контролю температури води в баку на різній його висоті рівномірно розташовано три датчі температури, приєднані до термометрів з цифровими індикаторами 5, розміщеними на вершину бака.



Рис. 9. Конструкція спірального теплового колектора

Для перекачування води в системі вибрана дешева відцентрова занурювана помпа з інтегрованим електроприводом на базі безщіткового двигуна постійного струму. Основні номінальні параметри помпи: висота підйому води 12 м, продуктивність 700 л/год. Основні номінальні параметри електродвигуна: потужність 30 Вт, постійна напруга живлення 12 В. послідовно з помпою в подаючий трубопровід включено електромагнітний клапан, який відкривається одним і тим же сигналом, що й помпа. Це не дає змоги воді стекти з теплового колектора під час його нагрівання. В холодну пору року, вночі та у хмарні дні система керування відкриває клапан, щоб вода стекла в бак-акумулятор і не замерзла в тепловому колекторі, що може призвести до його пошкодження.

Підсистема автономного живлення напругою 12 В реалізована на основі малогабаритної фотоелектричної панелі АХ-10Р торгової марки АХІОМА ЕNERGІ з номінальною потужністю 10 Вт. Панель закріплена посередині КСЕ у його верхній частині (позиція 2 на рис. 7) і тому повертається разом з концентратором, що забезпечує її максимальну опроміненість сонцем. Акумуляторна батарея складена з трьох послідовно з'єднаних Li-Ion елементів 26650 фірми Westinghouse ємністю 4500 мА·год з відповідною системою BMS. Контролер заряду батареї на 12 В – китайського виробництва.

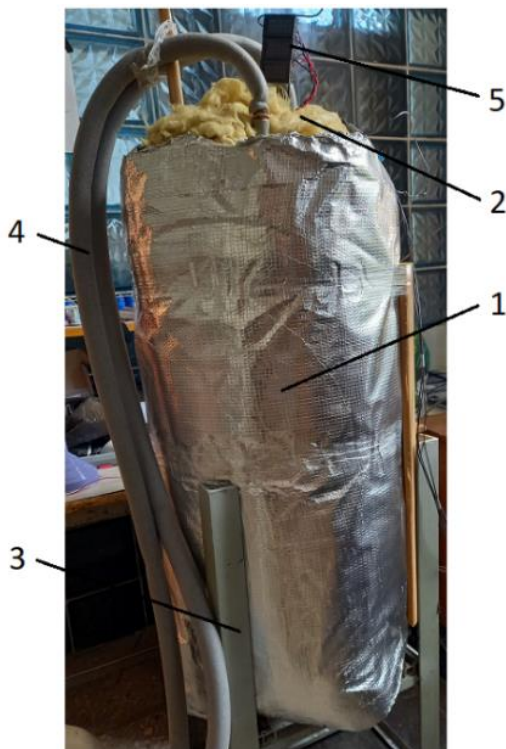


Рис. 10. Конструкція бака-акумулятора

Розроблення системи керування

Система керування для дослідної СВНУ складена з двох підсистем: підсистеми керування двома лінійними електроприводами з метою направлення КСЕ на сонце та підсистеми керування роботою помпи для перекачування гарячої води від теплового колектора до бака-акумулятора.

Підсистема слідування за сонцем

Підсистема слідування за сонцем з допомогою електроприводів орієнтує тарілку КСЕ таким чином, щоб у фокусі концентратора завжди знаходився тепловий колектор. На першому етапі було вирішено розробити систему програмного керування, яка через певні обґрунтовані проміжки часу приводить в рух по черзі кожен електропривод, повертаючи КСЕ на заданий кут. Величина цих кутів буде змінюватися протягом дня та протягом року. Для такого програмного керування контролер повинен мати годинник реального часу, за сигналами якого про день року та час доби з пам'яті контролера поступатимуть сигнали про необхідні кути повороту КСЕ. Зважаючи на особливості механіки привода КСЕ, зрозуміло, що ці кути нелінійно залежать від кількості обертів різьбових штоків лінійних електроприводів. Для отримання зворотної інформації про кількість обертів різьбових штоків, останні додатково обладнано імпульсними давачами, які реалізовано з допомогою нерухомо встановлених давачів Холла та мініатюрних неодимових постійних магнітів, вкесних в пластмасові шестерні, які розміщені на валах різьбових штоків як видно з рис. 11. Таке розміщення кожного з давачів зумовлене єдиним наявним місцем в корпусі редуктора, де шестерня, що обертає різьбовий шток є найбільшою. Однак, таке рішення знижує точність вимірювання, що відповідатиме одному обертуну штока і, відповідно, кроку його різьби.



Рис. 11. Монтаж давачів Холла в механічній частині лінійного електропривода

Першим етапом для отримання інформації про необхідні кількості обертів двигунів актуаторів на кожному кроці повороту КСЕ є визначення основних кутів, за якими з конкретної точки поверхні Землі, де встановлена СЕНВ, видно Сонце в конкретний момент часу протягом року. Такими кутами є азимут сонця α_1 та кут висоти сонця β_1 , які вимірюють так, як показано на рис. 12. Методика визначення цих кутів є наступною [13].

Кут висоти сонця β_1 можна обчислити за виразом

$$\beta_1 = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H), \quad (1)$$

де φ – географічна широта місцевості; δ – кут схилення сонця, який визначається порою року; H – годинний кут, який визначається часом доби.

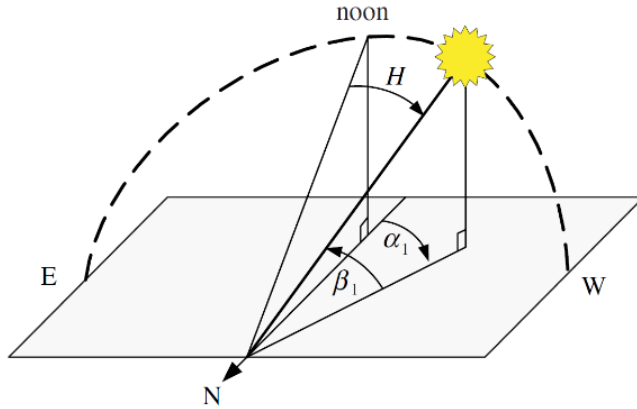


Рис. 12. Кути орієнтації положення Сонця на його траєкторії, видимій з конкретної точки на поверхні Землі [13]

З використанням отриманого значення β_1 азимутальний кут положення сонця розраховується за співвідношенням

$$\alpha_1 = \arccos \left[\frac{\sin \beta_1 \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \beta_1 \cos \varphi} \right]. \quad (2)$$

Кут схилення сонця δ , який входить у вирази (1) і (2), обчислюється в градусах таким чином:

$$\delta = 23,45 \sin \left[(284 + N) \frac{2\pi}{365} \right], \quad (3)$$

де N – порядковий номер дня року (починаючи з 1, що відповідає 1 січня).

Годинний кут H , який теж входить у вираз (1), визначається дещо складніше. Його значення в градусах рівне

$$H = 15(\text{AST} - 12), \quad (4)$$

де AST – видимий сонячний час (apparent solar time), год.

У свою чергу, значення AST рівне

$$\text{AST} = \text{LST} + \text{TC}/60, \quad (5)$$

де LST - місцевий стандартний час (local standard time) або час за годинником для цього часового поясу (можливо, знадобиться скоригувати перехід на літній час); TC – хвилини корекції.

Час LST виражається в десятковій формі за принципом $\text{LST} = \text{години} + \text{хвилини}/60 + \text{секунди}/3600$.

Хвилини корекції розраховуються за виразом

$$\text{TC} = 4(l - \text{LSTM}) + \text{ET}, \quad (6)$$

де l – місцева географічна довгота, град.; LSTM – локальна довгота відносно стандартного меридіана, яка рівна $\text{LSTM} = 15^\circ \times \text{(часовий пояс)}$, останній для Києва рівний 2 взимку і 3 влітку; ET – так зване рівняння часу (equation of time), яке виражає різницю між справжнім сонячним часом та середнім сонячним часом і безперервно змінюється щодня з річним циклом.

Значення ET в хвилинах визначається з наступного емпіричного рівняння

$$\text{ET} = 9,87 \sin(2D) - 7,53 \cos(D) - 1,5 \sin(D), \quad (7)$$

де

$$D = 360^\circ \frac{N - 81}{365}. \quad (8)$$

За математичною моделлю (1) – (8) в середовищі Matlab складено програму, яка дає змогу обчислювати кути азимуту сонця α_1 та висоти сонця β_1 для конкретної точки встановлення СВНУ (географічні широта φ і довгота l) та дня року і часу доби. Так, наприклад, для м. Львова ($\varphi = 49,82^\circ$, $l = 24,03^\circ$) на 1 жовтня 2025 р. для інтервалів часу 15 хв. протягом світлового дня крок зміни α_1 починався з $2,89^\circ$ зранку, досягав максимального значення $4,58^\circ$ в полудень та знижувався до $2,91^\circ$ перед заходом сонця, крок зміни β_1 починався з $2,37^\circ$ зранку, зменшувався до $0,07^\circ$ в полудень та знову зростав до $2,35^\circ$ ввечері. Отримана інформація показує, що для програмного керування доцільно застосувати змінний протягом дня (з корекцією протягом року) часовий крок зміни положення КСЕ, причому для повертання в азимутальній площині цей крок повинен бути найменшим, а для повертання в меридіональній площині найбільшим в середині дня. Крім цього часові кроки зміни положення КСЕ треба прив'язати до реальних кроків положення актуаторів, які можуть бути оцінені лише за імпульсами давачів положення осей їх різьбових штоків. Також необхідно знайти зв'язок між кутом β_1 та кутом положення КСЕ в меридіональній площині, наприклад, кутом відхилення лінії, що з'єднує крайні верхню та нижню точки КСЕ, від вертикальної осі – це буде одне постійне значення. Усі ці завдання потребують подальшого дослідження.

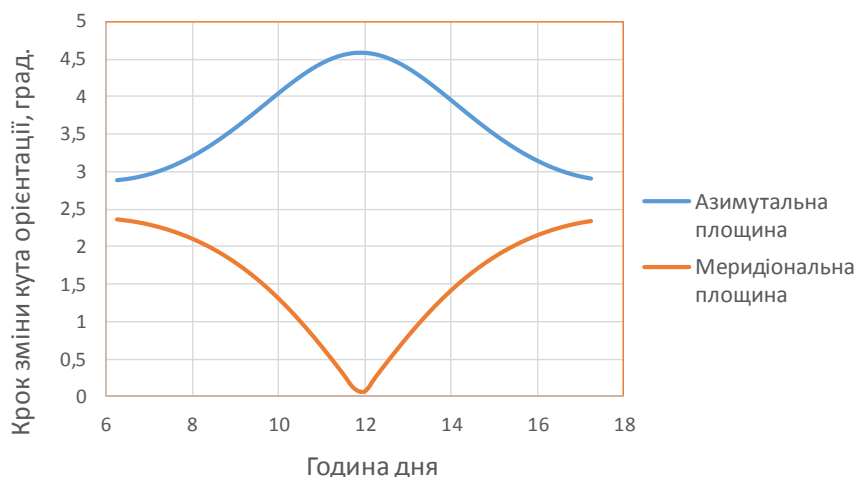


Рис. 13. Зміни оптимальних кутів у двох площинах орієнтації КСЕ з часовим кроком 15 хв.

Підсистема контролю за нагріванням та pompуванням води

З метою автоматичного керування процесом перекачування нагрітої води з теплового колектора до бака-акумулятора, на першому етапі досліджень використано дешевий цифровий терморегулятор з напругою живлення 12 В та одним давачем температури китайського виробництва (рис. 14). Його резистивний давач температури закріплено з добрим тепловим контактом між витками спірального теплового колектора. В терморегуляторі можна задати температури, за яких відбувається вмикання та вимикання наявного в ньому електромагнітного реле. Контакти реле безпосередньо керують вмиканням та вимиканням електродвигуна відцентрової помпи.

Рис. 14. Цифровий терморегулятор



Результати експериментальних досліджень

Перші експерименти зі створеною СВНУ з КСЕ (рис. 7) було присвячено дослідженню енергетичної ефективності її роботи. Під час досліджень для спрямування КСЕ на сонце застосовувалось ручне керування лінійними електроприводами з допомогою допоміжної панелі з відповідними перемикачами. Критерій вірного наведення був візуальний – концентроване сонячне випромінювання знаходилося чітко на тепловому колекторі. Після декількох спроб у тепловому реле було задано наступні налаштування температури теплового колектора: вмикання помпи за 70° та вимикання за 60°. Такий невеликий гістерезис зумовлений тепловою інерцією колектора – його температура після вимкнення знижувалася до 45°. З метою швидшого нагрівання води в баку-акумуляторі, в нього було залито лише 42 л води, що давало змогу оцінювати середню температуру води за двома цифровими термометрами – вгорі і внизу води.

Дослідження проводилися у вересні 2025 р. в сонячний день з 12 до 15 години. Автоматичне вмикання помпи відбувалося через 3-4 хвилини на 5-7 секунд. За цей час порція нагрітої води забиралася від теплового колектора. За тригодинну роботу СВНУ вода в баку-акумуляторі нагрілася від 18,1° до 26,8°. Енергетичну ефективність такого нагрівання можна оцінити наступним чином:

$$\eta = \frac{Q}{E} = \frac{c_v m_v \Delta\theta_v}{S A_{КСЕ} \Delta t} . \quad (9)$$

де Q – кількість теплоти, отриманої водою в результаті нагрівання; E – кількість сонячної енергії, що впала на КСЕ протягом експерименту; c_v – питома теплоємність води, 4180 Дж/(кг·°C); m_v – маса води в баку, 42 кг; $\Delta\theta_v$ – приріст температури води в баку, 8,7°; S – інтенсивність падаючої сонячної радіації, 1000 Вт/м²; A – площа КСЕ, 1,327 м²; Δt – час експерименту, 3×3600 с.

Розрахунок за (9) дає результат $\eta = 0,1066$. Отримане значення енергетичної ефективності є досить невисоким, проте, на відміну від стаціонарних сонячних фотоелектричних панелей, це значення практично не зменшується протягом сонячного дня. Аналіз низького отриманого значення η розробленої СВНУ дав змогу виявити низку факторів, які проявилися в процесі експериментальних досліджень:

1. Супутникова антена з несиметричного профілю спроектована для можливої роботи трьох розміщених в ряд головок телевізійних тюнерів, тому концентрує сонячне випромінювання в межах плями шириною приблизно 25 см та висотою біля 10 см. У випадку застосування розробленого спірального теплового колектора, ще й розміщеного паралельно до осі КСЕ, багато концентрованого сонячного випромінювання проходить повз колектор, розсіюється в просторі і втрачається.

2. У застосованому спіральному тепловому колекторі поміщається всього 0,157 л води. В процесі її перекачування до баку-акумулятора нагромаджена у цій порції води теплота частково втрачається на нагрівання трубопровода. Крім того за кілька секунд перекачування за теплою слідує вже й холодна вода, яка охолоджує трубопровід.

3. Розроблений тепловий колектор не ізолюваний термічно і втрачає багато теплоти шляхом природної конвекції і теплового випромінювання в навколишнє середовище.

Вказані три недоліки зумовлюють необхідність розроблення нової конструкції теплового колектора: іншої форми, більшого об'єму і теплоізолюваного, що буде предметом подальших досліджень.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Створена побутова СВНУ з КСЕ на основі параболічної тарілки супутникової антени з двоосьовою системою електропривода наведення на сонце та гідравлічною системою переносу теплоти від сонячного колектора до баку-акумулятора, яка відзначається компактністю, можливістю закріплення на стіні будинку, низькою вартістю застосованих компонентів.

Проведені перші експериментальні дослідження щодо енергетичної ефективності роботи створеної СВНУ запропонованої конструкції показали досить низьку її енергетичну ефективність. У

результаті аналізу цього встановлено низку недоліків у конструкції теплового колектора, які будуть враховані під час проектування другого його варіанту. Метою подальших досліджень є отримання як мінімум у 2-3 рази вищої енергетичної ефективності. Результати проведених експериментальних досліджень СНВУ з концентрацією сонячної енергії, спрямованих на оцінку енергетичної ефективності такого маловідомого пристрою, складають наукову новизну даної роботи.

Розроблено теоретичну базу для створення системи програмного керування лінійними електроприводами з метою забезпечення оптимального положенням КСЕ і отримання найбільшої енергії від сонця.

Список літератури

1. Sridhar S., Salkuti S.R. Development and future scope of renewable energy and energy storage systems. Smart Cities. 2022. Vol. 5. Pp. 668–699. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5020035>.
2. Victoria M. et al. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. Joule. 2021. Vol. 5(5). Pp. 1041–1056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005>.
3. Чи ефективний сонячний концентратор? URL: <https://www.solargarden.com.ua/chy-efektyvnyj-sonyachnyj-kontsentrator/>
4. Сонячні концентратори. URL: <https://internetri.net/qntm/2022/02/17/sonyachni-konzentratory/> (дата звернення: 12.10.2025).
5. Теслиук В.В., Кулик В.П., Охота Б.В. Дослідженням сонячного концентратора // Шляхи вирішення проблем механізації, енергоефективності та логістики в аграрному секторі в період воєнного часу: збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції № 20 (17 листопада 2023) / наук. ред. В.С. Лукач. – Ніжин, 2023. – С. 151–153. URI: <http://ela.nati.org.ua:8080/xmlui/handle/123456789/1052>
6. Кіріченко М.В., Нікітін В.О., Зайцев Р.В., Хрипунов Г.С., Меріуц А.В., Шкода Д.С. Дослідження конструкції концентратора сонячного випромінювання для автономних фотоенергетичних установок. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2022. Вип. 1(4). С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.01.02>
7. Нікітін В.О., Зайцев Р.В., Храмова Т.І., Хрипунова А.Л. Розробка фасетного концентратора для комбінованої фотоенергетичної установки. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит = Energy saving. Power engineering. Energy audit. 2022. № 5–6 (171–172). С. 47–58. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.05.04>
8. Zaitsev R.V., Kyrychenko M.V., Sokol E.I., Khrypunov G.S., Prokopenko D.S. Improving efficiency photovoltaic station based on hybrid photoenergy modules. Electrical Engineering & Electromechanics. Special Issue “Power Electronics and Energy Efficiency”. 2016. No. 4(1). Pp. 25–30.
9. Renno C. Optimization of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system used for a domestic application. Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 67, No. 1–2. Pp. 396–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.026>.
10. Сонячний колектор для нагрівання води. URL: https://karno.ua/ua/sistemy-solnechnogo-nagreva-vody/?srsltid=AfmBOoqodWFefciM98oFQ6Orvzhc_0rjri7G11rfk1aFRTNyWjTzyUYC
11. Сонячний колектор-концентратор СК-4С. URL: <https://www.truba.ua/ua/otoplenie/99349-solnechnyy-kollektor-kontsentrator-sk-4s>
12. Концентратор теплової енергії сонця. URL: <https://www.imena.ua/blog/kharkiv-inventor-solar-concentrat/>
13. Zobaa A.F., Bansal R. Handbook of Renewable Energy Technology. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011. 851 p.

I.Z. Shchur,

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems
e-mail: ihor.z.shchur@lpnu.ua

I.Y. Bilyakovskyy,

Lviv Polytechnic National University,

Ігор Шур, Ігор Біляковський, Ростислав-Іван Кузик, Андрій Щербина

Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems
e-mail: ihor.y.biliakovskiy@lpnu.ua

R.-I.V. Kuzyk,
Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems
e-mail: rostyslav.v.kuzyk@lpnu.ua

A.V. Shcherbyna
Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems
e-mail: andrii.shcherbyna.mneem.2024@lpnu.ua

WATER HEATING SYSTEM USING CONCENTRATED SOLAR RADIATION

©Ihor SCHUR, Ihor BILIAKOVSKYY, Rostyslav-Ivan KUZYK, Andriy SHCHERBYNA, 2025

The article presents the results of an applied study aimed at creating a fairly simple, inexpensive and at the same time effective domestic solar water heating unit (SWHU) with the concentration of solar energy. A feature of such a SWHU is its relatively small dimensions and the possibility of installation in accessible conditions: on the walls, roofs or balconies of both individual houses and apartment buildings. The task of the work was to develop the main elements of the SWHS design, their manufacture and conduct experimental studies on the efficiency of the entire system in field conditions. An important unit in such a system is a solar energy concentrator (SEC), which, thanks to the use of a mirror or lens, collects solar radiation from a relatively large area and focuses it on a small surface, where a thermal collector of a special design is placed. Due to the constant tracking of the SEC by the sun and the many times greater intensity of solar radiation, fairly high temperatures are achieved in the collector throughout the entire sunny day, which makes it possible to increase the efficiency of solar energy use.

A household SWHU with SEC was created based on a parabolic dish of a satellite antenna with a two-axis electric drive system for pointing at the sun, a hydraulic heat transfer system from the thermal collector to the storage tank and a low-power autonomous electrical power supply system based on a photovoltaic solar panel, which is characterized by compactness, the ability to be fixed on a wall of a house, and the low cost of the components used.

Preliminary experimental studies on the efficiency of the installation of the proposed design showed its rather low efficiency, due, first of all, to a number of shortcomings in the design of the thermal collector, which are planned to be taken into account when designing its second variant. The goal of further research is to obtain significantly higher efficiency.

A theoretical basis has been developed for creating a software control system for two electromechanical actuators in order to ensure optimal control of the position of the SEC during every day of the year.

Keywords: *solar water heating system, solar energy concentrator, thermal collector, heat storage tank, hydraulic system, sun-tracking system.*