

І. З. Щур

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

І. Є. 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>

© Щур І. З., Біляковський І. Є., Кузик Р.-І. В., Щербина А. В., 2025

У статті наведено результати прикладного дослідження, спрямованого на створення достатньо простої, недорогої та водночас ефективної побутової сонячної водо-нагрівальної установки (СВНУ) із концентрацією сонячної енергії. Особливістю такої СВНУ є її порівняно невеликі габарити та можливість встановлення у доступних умовах: на стінах, дахах чи балконах як індивідуальних будинків, так і багато-квартирних будівель. Поставлено такі завдання: розроблення основних елементів конструкції СВНУ, їх виготовлення та здійснення експериментальних досліджень щодо ефективності роботи всієї системи в натурних умовах. Важливим вузлом у такій установці є концентратор сонячної енергії (КСЕ), який завдяки використанню дзеркала або лінзи збирає сонячне випромінювання з порівняно великої площі й 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 доволі високі температури протягом цілого сонячного дня, що дає змогу підвищити ефективність використання сонячної енергії.

Створено побутову СВНУ з КСЕ на основі параболічної тарілки супутникової антени із двовісною системою електроприводу наведення на сонце, гідравлічною

системою перенесення 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, що доволі невисока її енергетична ефективність спричинена, насамперед, низькою недоліків у конструкції теплового колектора, які заплановано врахувати під час проєктування другого його варіанта. Метою подальших досліджень є досягнення значно вищої енергетичної ефективності.

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

Ключові слова: *сонячна система підігрівання 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 відновлювані 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 сьогоденні потреби світової енергетики. Сонячну енергію можна використовувати у двох напрямках: пряме використання теплоти сонячного випромінювання для опалення, гарячого водопостачання; перетворення її на електричну енергію [2]. Останнє здійснюється за допомогою фотоелектричних сонячних батарей. Основні складнощі їх застосування пов'язані із високою металомісткістю конструкцій, вартістю, а також необхідністю відведення великих територій.

Підігрівання води для побутових потреб є однією із найенергозатратніших технологій, що зумовлено великою питомою теплоємністю води. Через необхідність декарбонізації енергетики останнім часом для підігрівання води почали застосовувати сонячну енергію, зокрема 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, розміщених у водяних баках-акумуляторах (бойлерах), на теплоту; 2) сонячні теплові установки, в яких сонячна енергія перетворюється безпосередньо на теплоту зазвичай рідкого теплоносія, що циркулює у сонячному колекторі й переносить теплоту до бака-акумулятора. Вказані типи сонячних водонагрівальних систем є достатньо складними і дорогими та потребують спеціальних умов для їх встановлення, зазвичай на дахах будівель.

Оскільки тепла вода є необхідним атрибутом у сучасному побуті, створення простої, недорогої та доступної щодо встановлення сонячної водонагрівальної установки (СВНУ) є актуальним науково-технічним завданням. Для її ефективного вирішення доцільним видається підхід щодо концентрації сонячного випромінювання, що, як відомо, характеризується низькою інтенсивністю – максимум 1000 Вт/м^2 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 із 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.

Сьогодні є такі оптичні типи концентраторів: 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 – менші розміри порівняно зі звичайними фотоелектричними системами.
- Недоліками КСЕ є:

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

У статті [7] охарактеризовано наявні нині два типи систем КСЕ: систему слабкої концентрації та систему високої концентрації, наведено їх конструктивні особливості та недоліки. Зазначено, що одними із найчастіше застосовуваних концентраторів є лінзи Френеля, але оптична їх ефективність обмежена низькими або високими температурами. Складна геометрична форма параболічних концентраторів здорожчує технологію їх виготовлення, що, своєю чергою, істотно збільшує собівартість виробленої ними електричної енергії. Люмінесцентні сонячні концентратори мають низький коефіцієнт концентрації сонячної енергії. Аналіз показав, що наявні КСЕ не дають змоги створювати конкурентоздатні порівняно із традиційними джерелами електричної енергії фотоенергетичні установки, які працюють за високих ступенів концентрації сонячного опромінення та утилізують надлишкову теплову енергію. Щоб вирішити зазначені проблеми, розроблено фасетний концентратор сонячного випромінювання, наведено його характеристики та виготовлено лабораторний зразок (рис. 1). Досліджено питання оптимізації налаштування концентратора. Оприлюднено результати натурних випробувань макета.

У статті [3] розглянуто види КСЕ. Розраховано параметри параболічного концентратора та розроблено конструкцію параболічного сонячного концентратора із ресивером у протитоті та штативом. Запропоновано модифікації для автоматизації роботи.

У роботах [6, 8] здійснено комплексні дослідження з оптимізації КСЕ для використання у складі висококонцентраційних фотоенергетичних систем – дослідження оптичних властивостей та особливостей деградації фасетного, вакуумного та сегментного концентраторів. За результатами натурної апробації експериментального зразка фасетного концентратора виявлено, що процедура налаштування концентратора пов'язана із індивідуальним коригуванням положення кожного із багатьох дзеркал, що вкрай складно. За результатами апробації концентратора вакуумного типу встановлено, що такі концентратори дуже чутливі до якості виготовлення основи, оскільки внаслідок особливостей конструкції їх практично неможливо налаштувати після виготовлення. У них також занадто велика фокальна пляма, яка перевищує розмір теплоприймача. За результатами натурної апробації встановлено, що перспективною для використання у складі фотоенергетичних систем є конструкція концентратора сегментного типу, що являє собою круговий масив сегментів, виготовлених із дзеркального матеріалу, інтегральний коефіцієнт відбиття якого сягає 95 % та

виготовлено експериментальний зразок площею $3,6 \text{ м}^2$, що дає змогу отримати фокусну пляму діаметром 120 мм із трапецієподібним розподілом освітленості із коефіцієнтом концентрації випромінювання на рівні 360 од.

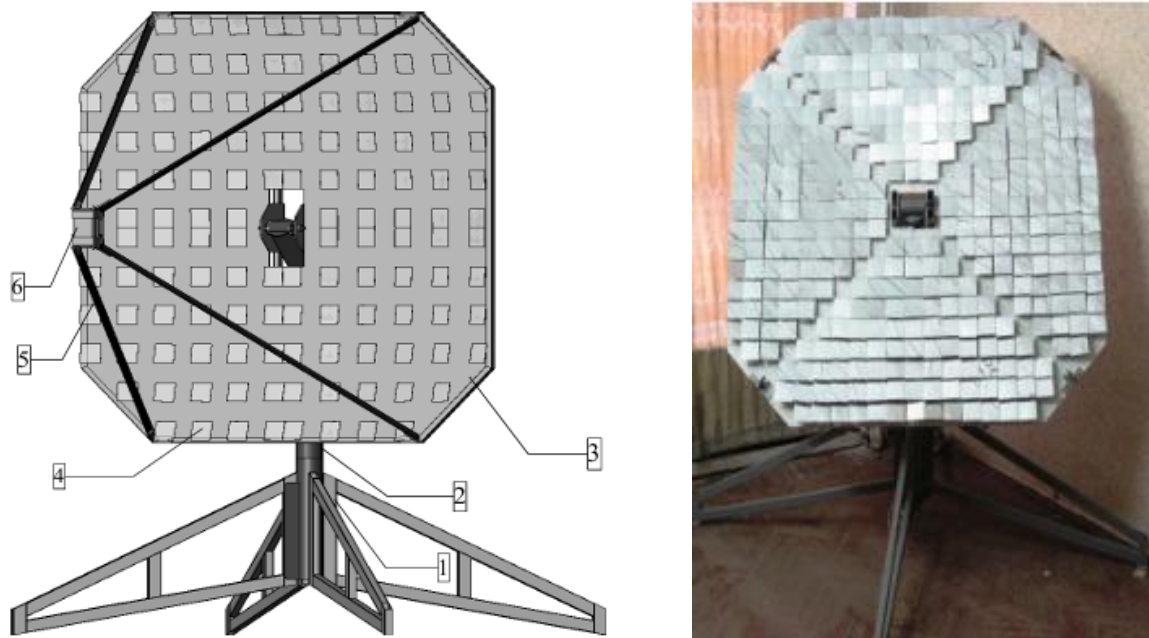


Рис. 1. Загальний вигляд експериментального зразка фотоенергетичної установки [7]: 1 – основа з чотирма опорами, підшипниковими вузлами для вертикальної осі обертання, редуктором та азимутальним приводом; 2 – поворотна частина з механізмом нахилу, підшипниковими вузлами для горизонтальної осі обертання; 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] досліджено конструкцію та модель концентрувальної фотоелектричної теплової (CPV/T) системи, яка використовуватиметься для задоволення електричних, теплових та холодильних навантажень побутового споживача, з метою визначення її розміру та оптимізації електричних і теплових характеристик. Для отримання висококонцентрованої системи використано відбивну оптику з параболічними дзеркальними концентраторами точкового типу та три перехідні комірки (InGaP/InGaAs/Ge), зібрані з двовісним трекером. Розглянуто також активну систему охолодження фотоелектричних елементів. Система CPV/T дає змогу отримувати теплову енергію за високої температури для роботи абсорбційного теплового насоса та для забезпечення холодильного навантаження. Модель аналізує роботу системи CPV/T з погляду: 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 визначають 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]. Пропоновані КСЕ мають різну геометричну форму: множини плоских дзеркал (а), параболо-циліндричного типу із лінійним поздовжнім фокусуванням (б), параболоїдного типу (в), параболо-циліндричного типу із лінійним поперечним фокусуванням (г).

У роботі [11] наведено опис і характеристики параболічного сонячного безнапірного колектора-концентратора (рис. 3) для забезпечення гарячою водою об'єктів сезонної дії в період з квітня до жовтня, наприклад, для гарячого водопостачання в літній сезон дач, пансіонатів, турбаз, басейнів, літніх душових. Принцип дії оснований на фокусуванні сонячного випромінювання параболічними дзеркалами на циліндричний 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 D58×1800 із селективним покриттям.

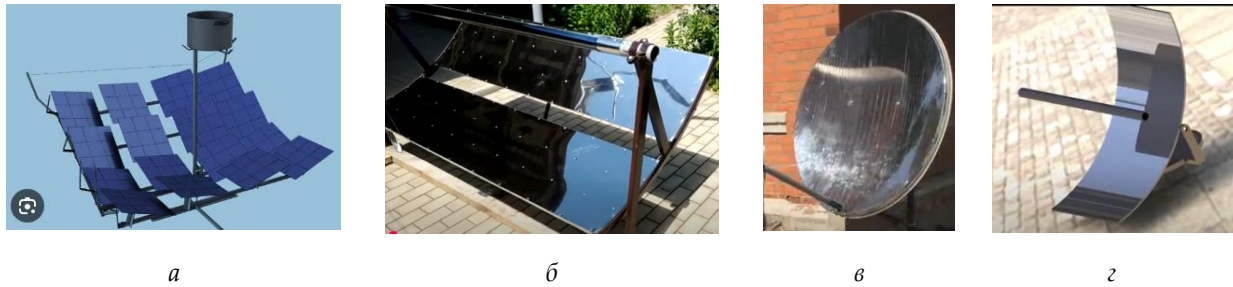


Рис. 2. Концентратори сонячної енергії [10]



Рис. 3. Безнапірний колектор-концентратор [11]



Рис. 4. Сегментований концентратор [12]

Як зазначено в [12], винахідник з Харкова запатентував розроблені КСЕ, які можуть використовуватись у повсякденному житті в звичайному домогосподарстві. Конструкція складається із сегментованих концентраторів, які об'єднують велику кількість вузьких смужок. Між ними залишаються значні 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). У винаході харків'янина вона не залежить від положення сонця на небі. У багатьох сучасних КСЕ фокальна область рухається услід за сонцем, але сегментовані концентратори створюють абсолютно нерухому фокальну область.



Рис. 5. Малопотужні мобільні сонячні підігрівачі-концентратори

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

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

Завдання, на вирішення яких спрямована робота, такі:

- пошук та придбання відповідної супутникової антени як основи для виготовлення дешевого КСЕ;
- підбір матеріалу для покриття, що відбиває сонячні промені, за його характеристиками відбивання та довговічності роботи у відкритих атмосферних умовах;
- розроблення та виготовлення системи двовісного електроприводу з метою наведення КСЕ на сонце;
- розрахунок динаміки річних координат напрямку на сонце для програмного керування положенням КСЕ;
- розроблення першого варіанта конструкції сонячного колектора та його виготовлення;
- проектування та виготовлення гідравлічної системи перенесення теплоти від сонячного колектора до бака-акумулятора;
- проектування та виготовлення термостата для дослідження енергетичної ефективності роботи сонячної водонагрівальної установки запропонованої конструкції;
- здійснення експериментальних досліджень щодо оцінювання енергетичної ефективності роботи СВНУ в літній період року;
- коригування конструкції СВНУ за результатами виконаних експериментальних досліджень.

Опис системи

Для конструювання КСЕ побутової СВНУ вирішено взяти за основу тарілку супутникової антени. Таке рішення зумовлене, передусім, високою точністю виготовлення супутникових тарілок з метою концентрації електромагнітного випромінювання, яке поширює супутник, на прийомній головці антени. Вартість таких тарілок низька завдяки масовості виробництва. Крім того, через стрімке зниження потреби в супутниковому телебаченні, яке практично замінив Internet, на вторинному ринку з'являється багато тарілок різних розмірів. І, нарешті, на підприємствах, які випускали супутникові антени, ще наявне обладнання для виготовлення таких тарілок, які можна доопрацювати для застосування у побутових СВНУ з КСЕ.

На рис. 6 подано загальну структуру запропонованої побутової СВНУ. КСЕ – тарілка супутникової антени, на робочу поверхню якої нанесено світловідбивне покриття. Тарілка КСЕ за допомогою двовісної поворотної системи приєднана до нерухомої основи, на якій закріплюється до стіни чи даху будинку. Наведення тарілки на сонце здійснюється двокоординатним електроприводом із використанням двигунів постійного струму, що 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 із теплоізолюваним баком-акумулятором. Холодна вода з нижньої частини акумулятора подається до колектора за допомогою помпи із електроприводом. Гаряча вода, що відводиться від колектора, надходить у верхню частину бака-акумулятора. Помпа працює періодично (on-off режим роботи) відповідно до заданих значень температури на колекторі, яка вимірюється відповідним термометром. Керує роботою всієї СВНУ спеціальний блок керування,

реалізований на дешевому мікроконтролері, наприклад, Arduino. Він виконує дві функції: 1) керування лінійними електроприводами з метою постійного стеження КСЕ за сонцем упродовж усього 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 із функцією пошуку точки максимальної потужності (MPPT-функція).

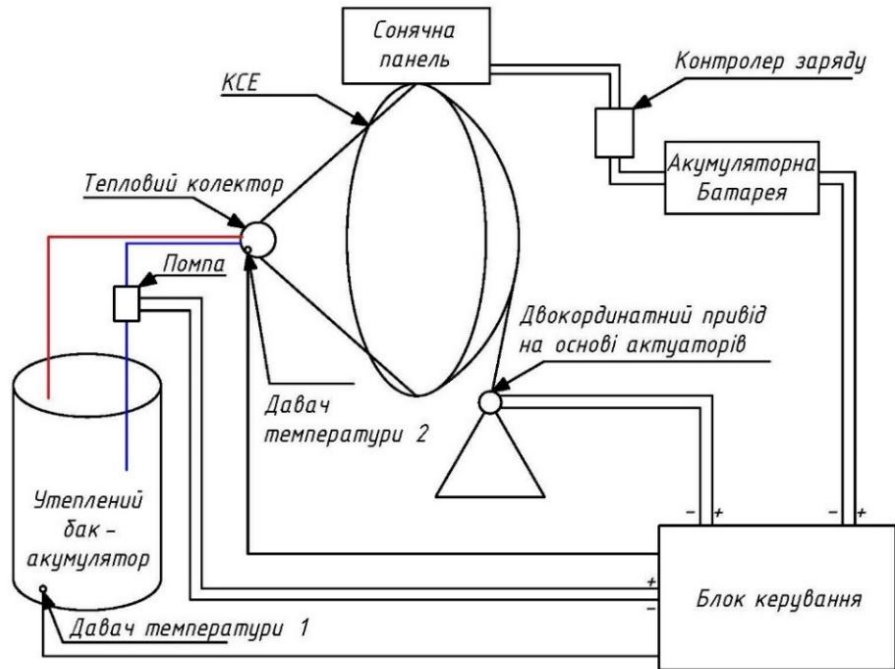


Рис. 6. Загальна структура побутової СВНУ з КСЕ



Рис. 7. Розроблена СВНУ під час 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 наведено фото загальної структури СВНУ з КСЕ, розробленої на основі показаної на рис. 6. Параметри та особливості конструкції основних елементів розробленої СВНУ подано нижче.

Вибрано тарілку супутникової антени несиметричної, видовженої форми з фокусною точкою, розміщеною внизу. Порівняно з круглими тарілками, така форма забезпечує певні переваги: КСЕ не затінюється тепловим колектором та елементами його кріплення, відбивна поверхня КСЕ менше забруднюється, менше виступає від стіни за настінного кріплення завдяки вертикальному робочому положенню тарілки. Габаритні розміри робочої поверхні тарілки 1400×1200 мм. Її внутрішню поверхню обклеєно полірованою алюмінієвою самоклеюною стрічкою завтовшки 50 мкм.

Для кріплення та двокоординатного обертання тарілки використано механічну систему тієї самої супутникової антени (рис. 8). Проте довелося її дещо переробити, щоб забезпечити 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 застосовано тепловий колектор спіральної форми (рис. 9), скручений з мідної трубки внутрішнім діаметром 10 мм завдовжки 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 ємкість бака-акумулятора 1 (рис. 10) об'ємом 80 л було взято із звичайного побутового бойлера, проте добре утеплено мінеральною ватою 2 й обгорнено в армовану скловолокном алюмінієву фольгу. Для забезпечення вертикального положення бака його помістили в спеціально зварений зі сталевого 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 із

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 наверху бака.



*Рис. 9. Конструкція
спірального теплового
колектора*



*Рис. 10. Конструкція
бака-акумулятора*

Для перекачування води в системі вибрано дешеву відцентрову занурювану помпу 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 у подавальний трубопровід увімкнено електромагнітний клапан, який відкривається тим самим 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.

Підсистему автономного живлення напругою 12 В реалізовано на основі малогабаритної фотоелектричної панелі AX-10P торгової марки AXIOMA ENERGI з номінальною потужністю 10 Вт. Панель закріплена посередині КСЕ у його верхній частині (позиція 2 на рис. 7), тому

повертається разом із 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.

Розроблення системи керування

Система керування для дослідної СВНУ складена з двох підсистем: підсистеми керування двома лінійними електроприводами з метою спрямування 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 за допомогою електроприводів орієнтує тарілку КСЕ так, щоб у фокусі концентратора завжди перебував 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 надходять сигнали про необхідні кути повороту КСЕ. Зважаючи на особливості механіки приводу 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 за допомогою нерухомо встановлених давачів Холла та мініатюрних неодимових постійних магнітів, вклеєних у пластмасові шестерні, розміщені на валах різьбових штоків, як видно з рис. 11. Таке розміщення кожного із давачів зумовлене єдиним наявним місцем у корпусі редуктора, де шестерня, що обертає різьбовий шток, є найбільшою. Однак таке рішення знижує точність вимірювання, що відповідає одному обертю штока і, відповідно, кроку його різьби.



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

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. Наведемо методику визначення цих кутів [13].

Кут висоти сонця β_1 можна обчислити за виразом

$$b_1 = \arcsin(\sin j \sin d + \cos j \cos d \cos H), \quad (1)$$

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

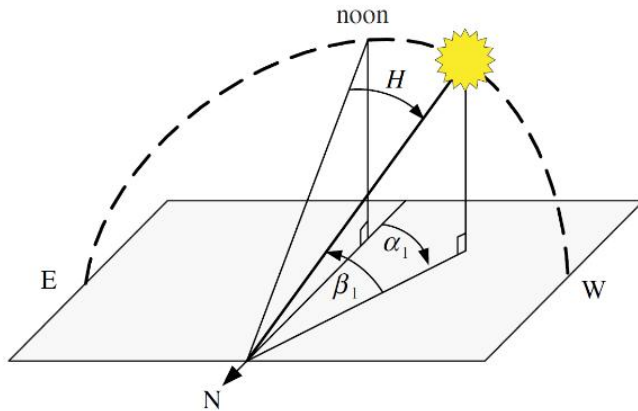


Рис. 12. Кути орієнтації положення сонця на його траєкторії, видимій з конкретної точки на поверхні землі [13]

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

$$a_1 = \arccos \frac{\sin b_1 \sin j - \sin d}{\cos b_1 \cos j}. \quad (2)$$

Кут схилення сонця δ , який входить у вирази (1) і (2), обчислюємо в градусах так:

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

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

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

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

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

Тоді значення AST становить

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

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

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

Хвилини корекції розраховують за виразом

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

де l – місцева географічна довгота, град.; $LSTM$ – локальна довгота відносно стандартного меридіана, яка становить $LSTM = 15^\circ - STM = 15^\circ - \text{географічна довгота, град.}$; дорівнює 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 із річним циклом.

Значення ЕТ у хвилинах визначають із такого емпіричного рівняння

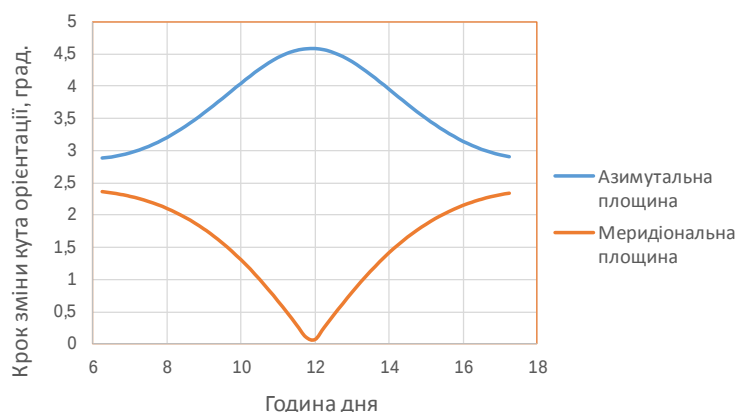
$$ET = 9,87\sin(2D) - 7,53\cos(D) - 1.5\sin(D), \quad (7)$$

де

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

За математичною моделлю (1)–(8) у 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. Наприклад, для м. Львова ($\varphi = 49,82^\circ$, $l = 24,03^\circ$) на 1 жовтня 2025 р. для інтервалів часу 15 хв упродовж 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 (із коригуванням упродовж року) часовий крок зміни положення КСЕ, причому для повертання в азимутальній площині цей крок повинен бути найменшим, а для повертання в меридіональній площині – найбільшим у середині дня. Крім цього часові кроки зміни положення КСЕ треба прив'язати до реальних кроків положення актуаторів, які можна оцінити лише за імпульсами давачів положення осей їх різьбових штоків. Також необхідно визначити зв'язок між кутом β_1 та кутом положення КСЕ у 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 із часовим кроком 15 хв



Підсистема контролю за нагріванням та pompуванням води

Щоб забезпечити автоматичне керування процесом перекачування нагрітої води з теплового колектора до бака-акумулятора, на першому етапі досліджень використано дешевий цифровий терморегулятор із напругою живлення 12 В та одним давачем температури китайського виробництва (рис. 14). Його резистивний давач температури закріплено із 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.

Результати експериментальних досліджень

Перші експерименти зі створеною СВНУ з КСЕ (рис. 7) були виконані для дослідження енергетичної ефективності її роботи. Під час досліджень для спрямування КСЕ на сонце застосовували ручне керування лінійними електроприводами за допомогою допоміжної панелі з відповідними перемикачами. Критерій правильного наведення був візуальним – концентроване

сонячне випромінювання потрапляло чітко на тепловий колектор. Після декількох спроб у тепловому реле задали такі 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°. Щоб вода в баку-акумуляторі швидше нагрівалась, в нього залили лише 42 л води, що давало змогу оцінювати середню температуру води за двома цифровими термометрами – вгорі та внизу рівня води.

Рис. 14. Цифровий терморегулятор



Дослідження відбувалися у вересні 2025 р. у сонячний день з 12 до 15 години. Помпа автоматично вмикалась через 3–4 хвилини на 5–7 секунд. За цей час порцію нагрітої води забирали від теплового колектора. За три години роботи СВНУ вода в баку-акумуляторі нагрілася від 18,1 °C до 26,8 °C. Енергетичну ефективність нагрівання можна оцінити так:

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

де Q – кількість теплоти, яку отримала вода в результаті нагрівання; E – кількість сонячної енергії, що потрапила 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 сонячної радіації, яка падала, 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 доволі невисоке, проте, на відміну від стаціонарних сонячних фотоелектричних панелей, воно практично не зменшується упродовж сонячного дня. Аналіз низького отриманого значення η розробленої СВНУ дав змогу визначити низку факторів, які проявилися під час експериментальних досліджень:

1. Супутникову антену із несиметричного профілю спроектовано для можливої роботи трьох розміщених у ряд головок телевізійних тюнерів, тому вона концентрує сонячне випромінювання в межах плями, ширина якої приблизно 25 см та висота близько 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 та втрачається.

2. У застосованому спіральному тепловому колекторі поміщається лише 0,157 л води. Під час її перекачування до бака-акумулятора нагромаджена у цій порції води теплота частково втрачається на нагрівання трубопроводу. Крім того, за кілька секунд перекачування услід за теплою вже й холодна вода охолоджує трубопровід.

3. Розроблений тепловий колектор не ізолюваний термічно і втрачає багато теплоти унаслідок природної конвекції й теплового випромінювання у 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

Створено побутову СВНУ з КСЕ на основі параболічної тарілки супутникової антени з двоосьовою системою електроприводу наведення на сонце та гідравлічною системою перенесення теплоти від сонячного колектора до бака-акумулятора, яка відзначається компактністю, можливістю закріплення на стіні будинку, низькою вартістю застосованих компонентів.

Перші експериментальні дослідження роботи створеної СВНУ запропонованої конструкції показали доволі низьку її енергетичну ефективність. У результаті аналізу було виявлено низку недоліків у конструкції теплового колектора, які будуть враховані під час проектування другого його варіанта. Метою подальших досліджень є досягнення як мінімум у два – три рази вищої енергетичної ефективності. Результати експериментальних досліджень СВНУ із концентрацією сонячної енергії, спрямованих на оцінювання енергетичної ефективності такого маловідомого пристрою, становлять наукову новизну цієї роботи.

Розроблено теоретичну базу для створення системи програмного керування лінійними електроприводами з метою забезпечення оптимального положення КСЕ й 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), 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-konzentrator/>
4. Сонячні концентратори. URL: <https://interneti.net/qntm/2022/02/17/sonyachni-konzentratory/> (дата звернення: 12.10.2025).
5. Теслюк 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 Всеукр. наук.-практ. 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/?srsId=AfmBOoqodWFefciM98oFQ6Orvzhc_0rjri7G11rfk1aFRTNyWjTzyUYC
11. Сонячний колектор-концентратор СК-4С. URL: <https://www.truba.ua/ua/otoplenie/99349-solnechnyy-kollektor-konzentrator-sk-4s>
12. Концентратор теплової енергії сонця. URL: <https://www.imena.ua/blog/kharkiv-inventor-solar-concentrat/>
13. Zoba 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. Biliakovskyy

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
e-mail: ihor.y.biliakovskyy@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

© Schur I. Z., Biliakovskyy I. Y., Kuzyk R.-I. V., Shcherbyna A. V., 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.*