

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет “Львівська політехніка”

**Климко Володимир Іванович**

**УДК 621.311.24:621.548.5**

**ВІТРОСОНЯЧНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ  
МАЛОПОТУЖНИХ СПОЖИВАЧІВ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка”  
Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Щур** Ігор Зенонович,  
професор кафедри електроприводу та  
комп’ютеризованих електромеханічних систем  
Національного університету “Львівська політехніка”

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Козирський** Володимир Вікторович,  
директор Навчально-наукового інституту  
енергетики, автоматики і енергозбереження  
Національного університету біоресурсів і  
природокористування України

кандидат технічних наук, доцент  
**Алексієвський** Дмитро Геннадійович,  
докторант кафедри електричних та електронних  
апаратів Запорізького національного технічного  
університету

Захист відбудеться «13» травня 2016 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 114 гол. корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «6» квітня 2016 року.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, к.т.н., доцент



Коруд В. І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На переважній території України, зокрема в околиці м. Львова, енергетичні потенціали вітру та сонячного випромінювання є низькими, відповідно, середньорічна швидкість вітру є рівною 3,8 м/с, а середньорічна потужність падаючої сонячної радіації (СР) – 102,8 Вт/м<sup>2</sup>. Для роботи в таких умовах необхідно шукати нові підходи до побудови вітросонячних установок, які би поєднували високу енергетичну ефективність з низькою питомою (на одиницю потужності) вартістю, що сприятиме швидшій окупності систем електроживлення.

Для отримання електричної енергії (ЕЕ) з низькопотенціального вітру найкраще використовувати прямопривідні вітроелектричні установки (ВЕУ) з вертикальною віссю обертання (ВВО) на базі синхронних генераторів з постійними магнітами (СГПМ). Проте для цих ВЕУ існує проблема поєднання високої швидкохідності і, відповідно, ефективності і компактності вітроротора (ВР) та генератора зі стартовими можливостями ВР на невеликих швидкостях вітру. Одним із шляхів до вирішення цієї проблеми є застосування стаціонарного концентратора вітрового потоку (КВП), на якому можна теж змонтувати фотоелектричні панелі (ФЕП). Для збільшення ефективності роботи фотоелектричної установки (ФЕУ) доцільно застосувати засоби слідкування ФЕП за сонцем. Розроблення нових конструктивних рішень та обґрунтування раціональних параметрів вітросонячних установок малої потужності зумовлюють актуальність проведення відповідних досліджень.

На базі малопотужних ВЕУ та ФЕУ в Україні, як правило, будуються повністю автономні вітросонячні системи електроживлення (ВССЕ), розраховані на використання віддаленими від централізованої мережі живлення (ЦМЖ) споживачами. В 2015 р. в Україні було прийнято відповідний закон, який дозволяє окремим споживачам віддавати надлишок ЕЕ, що генерується від поновлюваних джерел енергії (ПДЕ) вітру та сонця установками з потужністю до 30 кВт, в ЦМЖ за «зеленим» тарифом та отримувати від цього прибуток. Поряд з цими вже традиційними структурами ВССЕ – автономною і мережевою, як показав попередній аналіз, останнім часом в Україні перспективною виглядає також автономно-мережева структура, коли споживач може отримувати ЕЕ і від вітросонячної установки, і від ЦМЖ, проте не віддає надлишок генерованої ЕЕ в ЦМЖ.

Відповіді на запитання щодо ефективності застосування конкретної структури ВССЕ в конкретних метеорологічних умовах Львова для конкретного споживача, а також обґрунтувати оптимальні параметри ВССЕ можна лише на основі детального техніко-економічного аналізу. Він повинен включати в себе такі складові як обґрунтовані для кожної структури ВССЕ критерії ефективності, розроблені алгоритми керування енергопотоками в системі, вартості усіх складових елементів, затрати на їх заміну та експлуатацію протягом терміну служби установки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводилися у Національному університеті «Львівська політехніка» відповідно до наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування «Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності». Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи бу-

ли використані в процесі виконання держбюджетних науково-дослідних робіт: «Комбінована система автономного електрозабезпечення на базі вітро- і фотоелектричних перетворювачів енергії» (держреєстрація № 0111U001212, 2011-2012 рр.) та «Гібридні автономні вітроенергоустановки, що виробляють теплову та електричну енергію» (держреєстрація № 0113U001358, 2013-2014 рр.).

**Мета роботи і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення алгоритмів керування енергопотоками, обґрунтування критеріїв ефективності роботи перспективних структур ВССЕ та створення методики для проведення їх параметричної оптимізації, а також обґрунтування ефективної для роботи в умовах низькопотенціальних ресурсів ПДЕ конструкції вітросонячної установки для реалізації цих систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- сформулювати на основі статистичної інформації погодинну електронну базу метеорологічних даних (ЕБМД) та проаналізувати регіональний вітровий та сонячний ресурси ПДЕ;
- розробити на основі ЕБМД методику і відповідне програмне забезпечення для розрахунку поточних питомих значень ЕЕ, що отримується від вітру і сонця за допомогою ВЕУ та ФЕУ з конкретними параметрами;
- обґрунтувати для кожної з перспективних структур ВССЕ цільові функції оптимізації та розробити алгоритми керування енергопотоками на вищому рівні;
- створити методичне та програмне забезпечення для здійснення багатопараметричної оптимізації елементів ВССЕ на основі методу генетичних алгоритмів (ГА);
- обґрунтувати ефективну конструкцію малопотужної вітросонячної установки для електрозабезпечення в умовах низькопотенціальних ресурсів вітру і сонця;
- здійснити математичне моделювання та провести дослідження аеродинамічних процесів з метою обґрунтування раціональних параметрів ВР з КВП для ВЕУ з ВВО;
- дослідити енергетичну ефективність різних способів відбору потужності від СГПМ у ВЕУ з ВВО, а також запропонувати способи її підвищення;
- дослідити енергетичну ефективність різних способів наведення ФЕП на сонце і обґрунтувати раціональний для використання у м. Львові та його околиці;
- виготовити макетний взірець запропонованої ВЕУ з ВВО в поєднанні з КВП та провести його натурні експериментальні дослідження.

**Об'єктом дослідження** є процеси перетворення енергії вітру та сонячного випромінювання в електричну енергію та керування потужностями у ВССЕ.

**Предмет дослідження** – алгоритми роботи ВССЕ, критерії їх енергоефективності та параметрична оптимізація, а також обґрунтування ефективної для роботи в умовах низькопотенціальних ресурсів ПДЕ конструкції керованої вітросонячної установки.

**Методи дослідження.** Методи розв'язання алгебраїчних рівнянь, математичного аналізу і лінійної алгебри; метод імітаційного моделювання; метод генетичних алгоритмів; метод скінченних елементів; методи комп'ютерного симулювання у програмному середовищі MATLAB/Simulink; систематизація та обробка даних у Microsoft Excel; методи експериментальних досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі:

1. Запропоновано нову структуру комбінованої системи електроживлення окремого об'єкта з використанням електроенергії, що отримується від поновлюваних джерел енергії вітру і сонця та від централізованої електричної мережі, а також розроблено для неї систему керування енергопотоками на вищому рівні, що забезпечує безперервне та економічно вигідне електричне живлення споживача за мінімальної ємності чи повного виключення з системи акумуляторних батарей.

2. Обґрунтовано цільові функції енергоефективності для трьох принципово різних структур вітросонячних систем електроживлення окремих об'єктів з відповідними алгоритмами керування енергопотоками та розроблено метод параметричної оптимізації цих систем з використанням генетичних алгоритмів, що дає змогу створювати ефективні системи електрозабезпечення для конкретних споживачів з різними рівнями електроспоживання.

3. Розроблено новий активно-пасивний метод керування електричним навантаженням СГПМ у ВЕУ, який полягає в регульованому відборі потужності від генератора через діодний міст та підвищувальний DC-DC-перетворювач на малих швидкостях вітру, а на середніх та великих регулювання відбувається пасивним способом, коли генератор безпосередньо навантажується через діодний міст на проміжну ланку постійної напруги оптимальної величини, що дає змогу відбирати практично максимальну потужність від вітру в усьому робочому діапазоні зміни його швидкості, використовуючи електронний перетворювач лише на третину потужності ВЕУ.

4. Вперше для м. Львова визначено уточнені річні та сезонні оптимальні кути нахилу фотоелектричних панелей до горизонту при двокоординатному і азимутальному способах їх стеження за сонцем та при орієнтації стаціонарно розміщених панелей строго на південь на основі погодинної інформації про відносні тривалості сонячного саява в інтервалах істинного часу, що дає змогу підвищити енергетичну ефективність роботи сонячних фотоелектричних установок.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в такому:

Сформована погодинна ЕБМД може бути використана в подальших наукових дослідженнях, спрямованих на ефективне використання ПДЕ у м. Львові.

Розроблені методика та відповідне програмне забезпечення дають змогу оперативно визначати оптимальні параметри ВССЕ для споживачів з різними рівнями електроживлення та конкретними графіками енергоспоживання.

Запропонована нова енергоефективна для умов з низькопотенціальними ПДЕ конструкція вітросонячної установки, що складається з ВЕУ з ВВО та симетричного нерухомого КВП, а також з ФЕП із поворотним механізмом для азимутального їх стеження за сонцем, може бути використана як складова частина ВССЕ для забезпечення енергетичних потреб споживача.

Новий розроблений пристрій – електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплову (ЕПМЕТ), дає змогу підвищити кількість отримуваної від вітру енергії в малопотужних автономних ВЕУ з ВВО та використати її у вигляді теплоти, необхідної для побутових потреб.

Результати проведених в роботі досліджень використовуються в науководослідних роботах, що виконуються в СКБ електромеханічних систем Національно-

го університету «Львівська політехніка», ПП «ЕКО-СТ» для створення систем електроживлення на базі вітрових і сонячних установок, а також у навчальному процесі кафедри «Електропривод та комп'ютеризовані електромеханічні системи» Львівської політехніки.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно.

У друкованих працях, які опубліковані у співавторстві, автору належать: [1] – формування ЕБМД та для отримання максимуму ЕЕ на виході ФЕП, знаходження оптимального річного кута нахилу панелі до горизонту; [2] – розроблення на основі системного моделювання елементів ВССЕ алгоритмів розрахунку цільових функцій та показників енергоефективності; [3] – порівняння між собою різних способів орієнтації ФЕП на сонце та знаходження оптимальних річних та сезонних кутів нахилу ФЕП до горизонту; [4] – проведення досліджень енергетичної ефективності низки систем керування навантаженням СГПМ у ВЕУ і обґрунтування комбінованого способу керування; [5] – проведення експериментальних досліджень макетного взірця ЕПМЕТ та обробка експериментальних даних; [6] – обґрунтування використання теплового генератора для перетворення механічної енергії ВР в теплоту; [7] – проведення математичного моделювання аеродинамічних процесів, що відбуваються під час обертання ВЕУ з ВВО, та обґрунтування ефективної конструкції стаціонарного КВП у складі ВЕУ; [9] – розроблення методики розрахунку показників електропостачання окремого об'єкта від гібридної ВССЕ; [10] – розроблення інтелектуальної системи керування електроживленням окремого об'єкта від ЦМЖ та ПДЕ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи, результати досліджень та висновки доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Альтернативна енергетика, новітні електротехнології та інтелектуальні управляючі системи в АПК» (м. Київ, 2012); IV Міжнародна конференція молодих вчених «Енергетика та системи керування (ЕРЕС-2013)» (м. Львів, 2013); XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергосбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика (ICPEES-2014)» (м. Кременчук, 2014); Міжнародна наукова конференція «International Journal of Arts and Sciences conference. Multidisciplinary conferences in a "study abroad" format (IJAS-2015)» (м. Бостон, США, 2015); XXIV Seminarium Naukowo-Techniczne «Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych» (Rytro, Польща, 2015); VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність, ресурсоощадність і використання відновлюваних джерел енергії» (м. Дубляни, 2015).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць (з них 1 одноосібно), серед яких 2 статті у фахових виданнях України з технічних наук (з них 1 індексується в міжнародних наукових базах даних), 3 статті у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 2 індексується в міжнародних наукових базах даних, в тому числі 1 в базі Scopus), 1 патент України на винахід, 1 патент України на корисну модель та три тези доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки, викладена на 209 сторінках друкованого тексту, в тому числі основний текст на 149 сторінках, має 117 рисунків, 4 таблиці, з яких рисунки і таблиці займають повних 24 сторінки, 4 додатки на 14 сторінках та 190 назв використаної літератури на 22 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дано загальну характеристику роботи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих способів і технічних засобів для використання обмеженого вітрового та сонячного енергоресурсів з метою отримання ЕЕ, а також аналіз структур ВССЕ та способів їх параметричної оптимізації. Особливу увагу зосереджено на підвищенні енергетичної ефективності ВЕУ з ВВО та ФЕУ завдяки використанню, відповідно, КВП та засобів стеження ФЕП за сонцем. Здійснено аналіз методів розрахунку потужності на виході ФЕУ.

Потужність  $P_{\text{ВЕУ}}$  та механічний момент  $M_{\text{ВЕУ}}$  на виході ВЕУ з ВВО розраховуються за такими співвідношеннями:

$$P_{\text{ВЕУ}} = 0,5 \rho_{\text{п}} A C_{\text{р}}(\lambda) V_{\text{В}}^3; \quad M_{\text{ВЕУ}} = 0,5 \rho_{\text{п}} A R \frac{C_{\text{р}}(\lambda)}{\lambda} V_{\text{В}}^2, \quad (1)$$

де  $\rho_{\text{п}}$  – густина повітря;  $A$  – площа омивання ВР;  $C_{\text{р}}(\lambda)$  – залежність коефіцієнта використання ВР потужності вітру від швидкохідності ВР  $\lambda = \omega R / V_{\text{В}}$ ;  $\omega$  і  $R$  – відповідно кутова швидкість і радіус ВР;  $V_{\text{В}}$  – швидкість вітру.

Потужність на виході ФЕУ, яка складається з конкретних ФЕП, розташованих під певним кутом нахилу до горизонту, розраховується за виразом:

$$P_{\text{ФЕУ}} = N_{\text{пос}} N_{\text{пар}} U_{\text{н.х}}(t) I_{\text{к.з}}(t) F_{\text{Ф}}, \quad (2)$$

де  $N_{\text{пос}}$  і  $N_{\text{пар}}$  – кількості ФЕП в установці, які з'єднані, відповідно, послідовно і паралельно;  $U_{\text{н.х}}(t)$  і  $I_{\text{к.з}}(t)$  – реальне за конкретної температури і в певний момент часу значення, відповідно, напруги неробочого ходу та струму короткого замикання ФЕП;  $F_{\text{Ф}}$  – коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики ФЕП, в.о.

У результаті аналізу літературних джерел встановлено, що комбіноване використання вітру і сонця для отримання ЕЕ має переваги в стабільності її генерування порівняно з установками, розрахованими на один вид ПДЕ. Для забезпечення безперебійного електроживлення споживачів від ВССЕ останні найчастіше доповнюються електрохімічними акумуляторними батареями (АБ).

Розглянуто основні структури ВССЕ – автономну (рис. 1,а) та мережеву (рис. 1,б), які є вживаними сьогодні, а також запропоновано автономно-мережеву (рис. 2).

В усіх структурах засоби генерування, споживання та нагромадження ЕЕ підключаються до мережі постійної напруги через свої відповідні силові електронні перетворювачі, які узгоджують значення напруг та здійснюють автоматичне регулювання на нижньому рівні, забезпечуючи максимальний відбір енергії від ПДЕ. Стрілками на рис. 1 і 2 показано можливі напрямки перетоків ЕЕ.

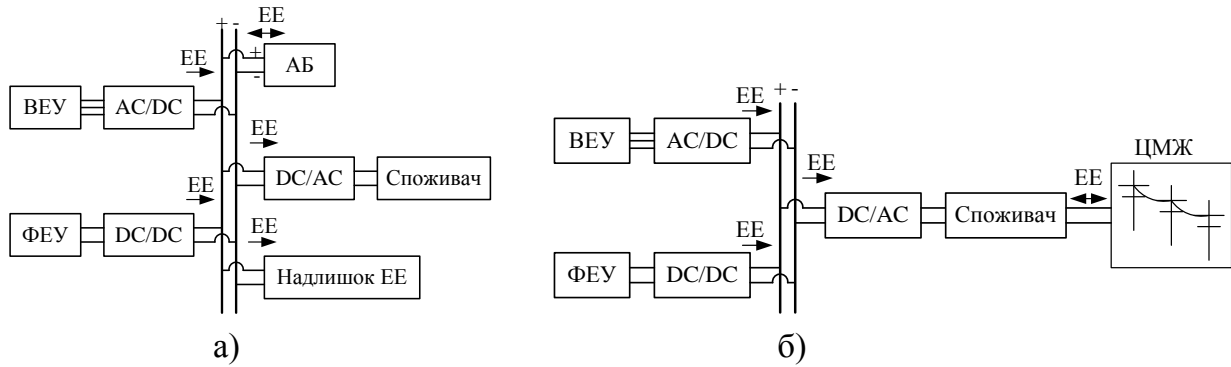


Рис. 1. Поширені структури ВССЕ: а) автономна; б) мережева

Останнім часом в Україні з'являється щораз більше окремих споживачів, які, будучи підключеними до ЦМЖ, бажають також отримувати ЕЕ й від ПДЕ (рис. 2). Насамперед, це зумовлено їх бажанням збільшити потужність споживаної ЕЕ понад норми, що лімітується технічними умовами енергопостачальних компаній. Мотивом також є бажанням отримувати безперебійне живлення з одночасним збереженням стандартів якості ЕЕ, які дуже часто не дотримуються, зважаючи на зношеність електрообладнання та обмежену пропускну здатність застарілих електромереж. В літературі немає досліджень, пов'язаних з ефективністю роботи автономно-мережевих

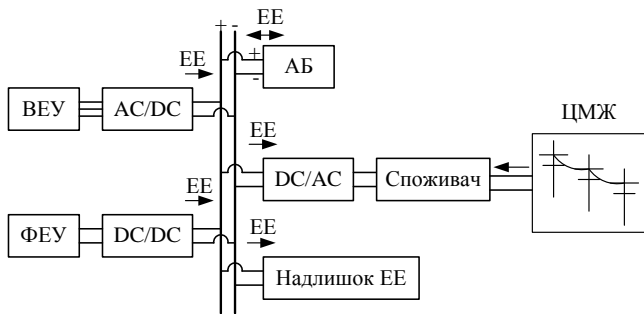


Рис. 2. Автономно-мережева ВССЕ

ВССЕ, які практично використовують ЦМЖ як резервне джерело живлення. Складність таких систем полягає у оптимальному поєднанні різних за природою джерел ЕЕ: ВЕУ, ФЕУ, АБ, ЦМЖ. Тому актуальним є розроблення чітких алгоритмів роботи автономно-мережевих ВССЕ та обґрунтування умов їх ефективного застосування.

Одним із основних питань щодо забезпечення швидшої окупності ВССЕ

є правильно підібрана конфігурація параметрів елементів системи, враховуючи місце розташування об'єкта, а також графік електричного навантаження (ГЕН) споживача. У випадку двох варіативних параметрів елементів ВССЕ для їх оптимального вибору можна скористатися методом перебору. За більшої їх кількості доцільно використати оптимізаційний метод ГА, який на основі розрахунку цільових функцій для кожної з систем дасть змогу підібрати оптимальну для кожного конкретного випадку електроживлення конфігурацію параметрів установки.

У другому розділі сформовано ЕБМД в середовищах Microsoft Excel та Matlab, на основі якої проведена оцінка ресурсів ПДЕ, а саме притоку енергії СР та вітрового потенціалу у м. Львові. Створено програмний продукт та реалізовано алгоритм для розрахунку кількості ЕЕ на виході вітросонячної установки з конкретними параметрами та при довільному її розміщенні. За результатами проведених досліджень запропоновано ефективний варіант конструкції вітросонячної установки.



За отриманими статистичними даними за 2013 р. для м. Львова в середовищі Microsoft Excel та Matlab сформовано ЕБМД, в яку входять погодинні значення швидкості вітру, напрямку вітру, відносної тривалості ясності та хмарності в інтервалах реального часу, температури навколишнього середовища.

На основі отриманого розподілу повторюваності швидкостей вітру  $V_B$  для досліджуваної ВЕУ з ВВО розраховано кількості ЕЕ, яку можна отримати з  $1\text{ м}^2$  площі омивання цієї ВЕУ за відповідної  $V_B$  протягом року (рис. 3). З результатів видно, що м. Львів характеризується слабкими вітрами з переважаючими швидкостями 2-5 м/с, і майже десяту частину годин в році займає штиль, тобто відсутність вітру. Вітер зі швидкістю 3 м/с найчастіше спостерігається в році – протягом 1984 год. Вітер великих швидкостей (10-12 м/с), що має високий енергетичний потенціал, буває у Львові вкрай рідко. Протягом року основну ЕЕ забезпечує вітер зі швидкостями 3-10 м/с. Це зумовлено тим, що хоча високі  $V_B$  (6-10 м/с) бувають рідко, проте їх потужність зростає пропорційно до кубу  $V_B$ , що вносить відчутний вклад у річний баланс генерованої ВЕУ ЕЕ. Такий аналіз показує, що для умов м. Львова доцільно створювати

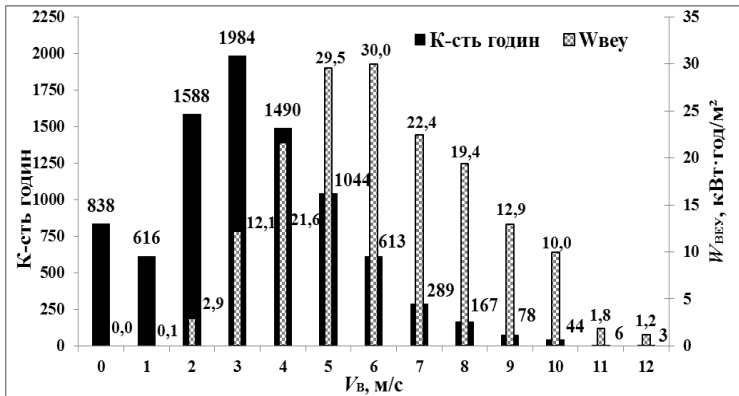


Рис. 3. Гістограма розподілу повторюваності  $V_B$  та розподілу кількості ЕЕ, яку можна отримати з  $1\text{ м}^2$  площі омивання ВЕУ протягом одного року

ВЕУ, розраховану на невисоку номінальну  $V_B = 10$  м/с та ефективне генерування ЕЕ на малих  $V_B$  – 3-6 м/с. Саме такими є прямопривідні ВЕУ з ВВО, що починають працювати з 3 м/с і здатні відбирати потужність від поривчастого вітру невеликих швидкостей з частими змінами напрямку. Для ефективного старту та роботи в таких умовах компактних та швидкохідних прямолопатевих ВР Дар'є (Н-ротор) доцільно застосувати концентрацію вітропотoku на ВР

менших розмірів за допомогою відносно великого стаціонарного КВП.

На основі погодинної інформації про відносні тривалості ясності  $T_{я,i}^*$  та хмарності  $T_{х,i}^*$  в інтервалах реального часу, за розрахованими на  $i$ -у годину значеннями середніх питомих потужностей притоків прямої та розсіяної СР, відповідно  $S_{п,i}$  та  $S_{р,i}$ , обчислювалися погодинні кількості поступлення на  $1\text{ м}^2$  горизонтальної площини енергії сумарної (прямої та розсіяної) СР (рис. 4):

$$W_{C,i} = W_{п,i} + W_{р,i}, \quad (3)$$

де  $W_{п,i} = S_{п,i} T_{я,i}^*$  – енергія падаючої прямої СР протягом  $i$ -ї години;  $W_{р,i} = S_{р,i} T_{х,i}^*$  – енергія падаючої розсіяної СР протягом  $i$ -ї години.

З рис. 4 видно, що найбільше сонячної енергії падає на землю в квітні – вересні, в той час як у зимовий період низької сонячної активності доцільно застосувати інше ПДЕ, наприклад, вітер, що дасть можливість суттєво вирівняти графік генерування ЕЕ від ПДЕ.

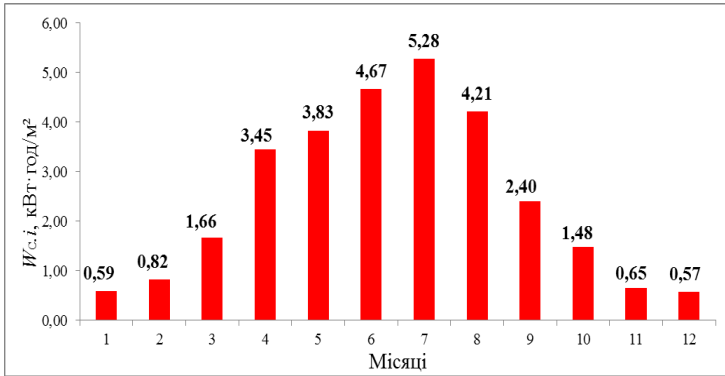


Рис. 4. Гістограма розподілу середньомісячного добового значення енергії сумарної СР, що надходить на 1 м<sup>2</sup> горизонтальної площини

Для реалізації ВССЕ, зорієнтованої на низькопотенціальні регіональні ресурси вітру і сонця, запропоновано нову конструкцію вітросонячної установки (рис. 6, а). Вона складається з ВЕУ з ВВО, основними елементами якої є трилопатевий Н-ротор 1, СГПМ 2 та стаціонарний КВП 3. На останньому розміщено ФЕУ, що складається з ФЕП 4 та механізмів слідкування за сонцем в азимутальній площині 5 та зміни ку-

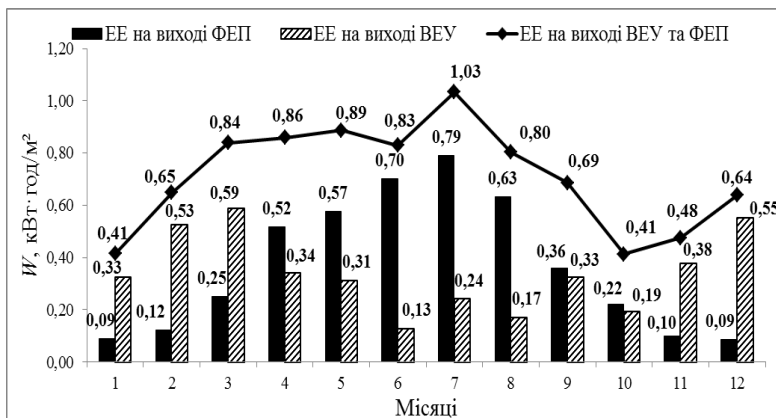


Рис. 5. Стовпчаста діаграма середньомісячних добових питомих (з 1 м<sup>2</sup> площі) кількостей ЕЕ, отриманої від ВЕУ та ФЕУ протягом року при конкретному їх розташуванні (ВР ВЕУ – на висоті 10 м, ФЕП розміщена горизонтально)

графіку генерування ЕЕ; використання стаціонарного КВП, який збільшує вихідну потужність ВЕУ з порівняно малим ВР та забезпечує його старт на малих швидкостях вітру, що сприяє збільшенню енергетичної ефективності ВЕУ та її швидшій окупності; багатофункціональне використання несучої конструкції стаціонарного КВП – для кріплення вузлів обертання ВР, розташування ФЕП та пристроїв, що забезпечують їх слідкування за сонцем, захисту ВР від шквальних вітрів.

Маючи інформацію з ЕБМД про  $V_B$ ,  $S_{п.i}$  та  $S_{р.i}$  були розраховані середньомісячні питомі значення ЕЕ на виході з ВЕУ та ФЕУ протягом року (рис. 5). З останнього видно, що в 1-3 та 11 і 12 місяці року ВЕУ з 1 м<sup>2</sup> площі омивання може генерувати більшу кількість ЕЕ, ніж ФЕП тієї ж площі. Зате для решти місяців року картина змінюється на протилежну. Поєднавши ВЕУ та ФЕУ в одній установці, можна отримати набагато рівніший характер генерування ЕЕ від ПДЕ.

та встановлення в кутомісній площині 6. Автоматичне керування роботою вітросонячної установки здійснює блок керування 7. В установці передбачено також механізм захисту ВР від шквальних вітрів (рис. 6, б), який полягає у зміні положення направляючих КВП: непарні числа відповідають за їх розташування в робочому стані ВР, парні – в стані його захисту.

Можна виділити такі переваги запропонованої вітросонячної установки: поєднання двох ПДЕ для вирівнювання

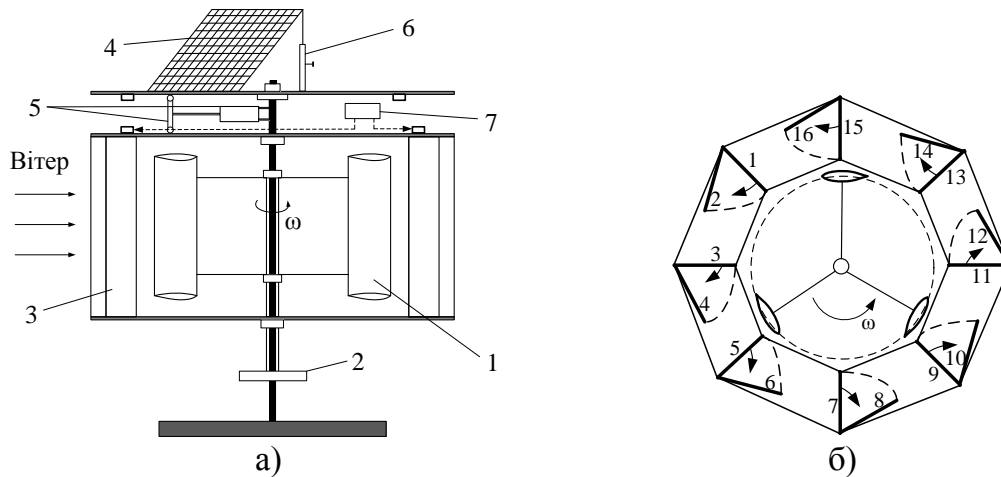


Рис. 6. Вітросонячна електроустановка: а) ескіз конструкції; б) схематичне зображення системи захисту ВЕУ з ВВО від шквальних вітрів (вигляд зверху)

Електрохімічні АБ, які застосовуються для нагромадження надлишкової ЕЕ у автономній ВССЕ, є однією з найдорожчих частин системи, яка ще й має порівняно малий термін служби. Іншим популярним вирішенням є перетворення надлишкової ЕЕ в теплову, яка корисно використовується для побутових цілей. У роботі запропоновано нове рішення – доповнення ВЕУ, окрім електричного, ще й окремим тепловим генератором, який перетворюватиме механічну енергію ВР безпосередньо в теплоту. Такий тепловий генератор пропонується побудувати за електромагнітним принципом, коли знакомінний стаціонарний в просторі магнітний потік, що пронизує електропровідний ротор, в результаті обертання останнього стає змінним і генерує в роторі вихрові струми, що зумовлюють його нагрівання. Такий тепловий генератор названо електромагнітним перетворювачем механічної енергії в теплову (ЕПМЕТ). Порівняно з традиційними електричними ВЕУ, когенераційна ВЕУ з двома генераторами – електричним і тепловим, має такі нові позитивні властивості: розширює функціональні можливості ВЕУ, яка генерує, крім ЕЕ, також і теплову енергію; завдяки практично необмеженій ємності теплового акумулятора уся доступна ВЕУ механічна енергія вітру корисно використовується; максимально використовується також енергія вітру при його швидкостях, що перевищують номінальне значення, яке в традиційних ВЕУ обмежується потужністю електричного генератора, тобто суттєво зростає максимальна потужність ВЕУ при тому ж ВР; можна значно зменшити (аж до повного виключення) встановлену ємність АБ, що знизить вартість ВЕУ.

У **третьому розділі** розглянуто три перспективні структури ВССЕ – автономну, мережеву та автономно-мережеву, для яких розроблено алгоритми керування енергопотоками на вищому рівні. Створено методику із застосуванням ГА та відповідне програмне забезпечення для проведення техніко-економічної параметричної оптимізації цих структур ВССЕ на основі обґрунтованих для них цільових функцій.

Для пошуку оптимальних з точки зору енергоефективності параметрів елементів ВССЕ в дослідженні пропонується методика розрахунків, блок-схема якої зображена на рис. 7. Вихідною інформацією для розрахунків є: тип досліджуваної структури ВССЕ (блок 1); техніко-економічна інформація про вітросонячну устано-

вку (блок 3), яка розраховується та вибирається із сформованої бази даних виходячи з поточних значень варіативних змінних оптимізації (блок 2); заданий середній добовий ГЕН споживача (блок 4), який має ще й різний сезонний характер; погодинні значення метеорологічних даних (блок 5), розміщені в ЕБМД. Перелік варіативних змінних залежить від структури ВССЕ. Так, для автономної ВССЕ – це встановлені потужності ВЕУ з ВВО –  $P_{ВЕУ}$  та ФЕУ –  $P_{ФЕУ}$ , ємність АБ –  $C_B$ , кут нахилу ФЕП –  $\alpha$ , висота встановлення ВЕУ –  $h$ ; для мережевої –  $P_{ВЕУ}$ ,  $P_{ФЕУ}$ ,  $\alpha$ ,  $h$ ; для автономно-мережевої додаються ще коефіцієнти ступеня заряду АБ від ЦМЖ вночі та вдень, відповідно  $L_n$  та  $L_d$ , у випадку застосування двотарифного лічильника електроенергії. У блоці 6 застосовується розроблений для конкретної структури ВССЕ алгоритм

керування погодинними енергоперетоками між вузлами системи. Алгоритми для кожної із структур розроблені таким чином, щоб споживач постійно отримував необхідну кількість ЕЕ з пріоритетом живлення безпосередньо від ПДЕ, а у випадку використання ЦМЖ як резервного джерела живлення заряджання АБ від ЦМЖ відбувалось вночі за пільговим тарифом на ЕЕ. Завдяки блоку 8 здійснюється імітаційне моделювання річної погодинної роботи досліджуваної ВССЕ із поточним набором значень варіативних змінних, у результаті чого у блоці 7 обчислюються необхідні складові для визначення значення цільової функції. У блоці 9 розраховуються економічні показники роботи ВССЕ протягом терміну її служби (20 років) з врахуванням вартості елементів системи, та середньорічна ціна ЕЕ на її виході, а далі знаходиться значення цільової функції оптимізації. Блок 10, відповідно до процедури ГА, здійснює генну мутацію, в результаті чого формується новий склад параметрів варіативних змінних ВССЕ, який поступає до блоку 4. Після дослідження достатньої кількості комбінацій блоком 11 фіксується досягнутий мінімум чи максимум цільової функції та подається на вихідний блок 12 оптимальна комбінація параметрів варіативних змінних досліджуваної ВССЕ.

Для техніко-економічної оцінки автономної ВССЕ використано відому в літературі цільову функцію оптимізації COE (Cost of Energy) – ціна ЕЕ на виході з установки. Для мережевої та автономно-мережевої ВССЕ запропоновано для проведення оптимізації дві нові цільові функції:

- для мережевої ВССЕ – загальний прибуток від продажу електроенергії TIOES (Total Income of Energy Sold)



Рис. 7. Блок-схема методики техніко-економічної оптимізації параметрів складових елементів ВССЕ

$$TIOES = P_{\text{НАД}} - B_{\text{МЕР}} - \text{TAC}, \quad (4)$$

де  $P_{\text{НАД}}$  – річна вартість проданої в ЦМЖ за «зеленим» тарифом надлишкової ЕЕ;  $B_{\text{МЕР}}$  – ціна річної спожитої з ЦМЖ електроенергії; ТАС (Total Annualized Cost) – загальна річна вартість ВССЕ з врахування інфляції та ставки дисконтування;

- для автономно-мережевої ВССЕ – середньорічна ціна системи COS (Cost of the System) з врахуванням вартості ЕЕ, що споживається з ЦМЖ

$$\text{COS} = \text{TAC} + B_{\text{МЕР}}. \quad (5)$$

Відповідно до представленої на рис. 7 методики, в середовищах Matlab та Microsoft Excel розроблено програмні продукти для здійснення параметричної оптимізації кожної із трьох перспективних структур ВССЕ та проведено відповідні дослідження, спрямовані на оцінку ефективності їх застосування.

Так, наприклад, на рис. 8 показана поверхня розподілу значень COS від встановлених потужностей ВЕУ з ВВО та ФЕУ для дослідного споживача з автономно-мережевою ВССЕ та наперед заданим значенням ємності АБ (100 А·год). Результат двопараметричної оптимізації, яку легко відобразити графічно, отримано методом перебору значень потужностей вказаних елементів. Як видно з отриманої залежності, мінімальне значення  $\text{COS} = 478$  \$ знаходиться на заданій границі потужності ВЕУ 15 кВт за встановленої потужності ФЕУ 6,2 кВт. Проте при наявності більшої кількості варіативних змінних з параметрами елементів ВССЕ вибір оптимальної конфігурації елементів системи за методом перебору стає неможливим. Тому доцільно застосувати оптимізаційну процедуру за методом ГА, яка дає змогу знайти мінімальні значення цільової функції (фітнес-функцій)  $F(x)$  при множині варіативних змінних  $x$ , наприклад, для автономно-мережевої ВССЕ:

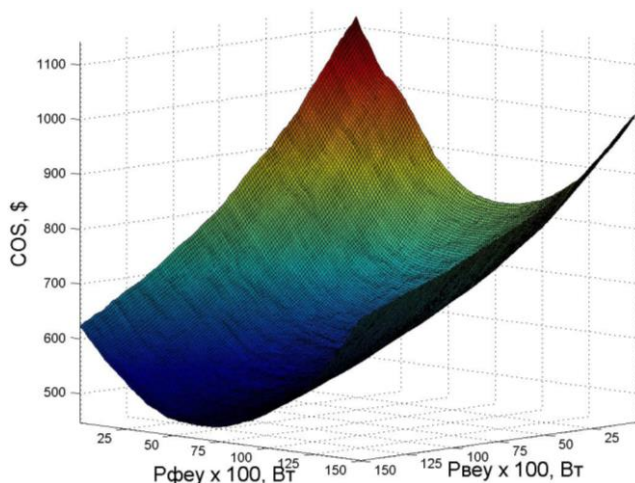


Рис. 8. Залежність COS від встановленої потужності ВЕУ та ФЕУ

де  $B_C$  – вартість ВССЕ в цілому;  $B_O$  – вартість обслуговування обладнання, що використовується;  $B_{\text{МЕР}}$  – вартість ЕЕ, що споживається з ЦМЖ.

$$\begin{cases} \min_x F(x) = \min_x \{B_C(x) + B_O(x) + B_{\text{МЕР}}(x)\} \\ x = (P_{\text{ФЕП}}, P_{\text{ВЕУ}}, C_B, \alpha, h, L_d, L_n) \end{cases}, \quad (6)$$

де  $B_C$  – вартість ВССЕ в цілому;  $B_O$  – вартість обслуговування обладнання, що використовується;  $B_{\text{МЕР}}$  – вартість ЕЕ, що споживається з ЦМЖ.

Наприклад, для змодельованого в роботі ГЕН відносно потужного окремого електричного споживача, який використовує автономно-мережеву ВССЕ в тому числі й для опалення та кондиціонування повітря, методом ГА було визначено таку оптимальну конфігурацію параметрів елементів системи:  $P_{\text{ФЕУ}} = 6357$  Вт,  $P_{\text{ВЕУ}} = 14814$  Вт,  $C_B = 95,4$  А·год,  $\alpha = 55,47^\circ$ ;  $L_d = 0,353$ ;  $L_n = 0,903$ . Такі параметри елементів сис-

теми забезпечують найменше річне значення цільової функції  $COS = 470,17$  \$. Для підтвердження того, що такі системи є доцільними для впровадження в Україні навіть при високому курсі валюти, було розраховано сумарну річну ціну ЕЕ, що споживається цим же споживачем лише від ЦМЖ – 1184,8 \$. Як видно, використовуючи автономно-мережеву ВССЕ, цей споживач буде витратити майже втричі меншу кількість грошей на електрозабезпечення.

У четвертому розділі представлено результати імітаційного математичного моделювання аеродинамічних процесів роботи ВР з ВВО без та в поєднанні з КВП, за якими обґрунтовано раціональні параметри макетного взірця ВЕУ для роботи на малих вітрах. Проведено дослідження відомих способів електричного навантаження СГПМ у ВЕУ та на основі результатів математичного моделювання запропоновано ефективний комбінований активно-пасивний спосіб. Обґрунтовано раціональний для м. Львова спосіб слідкування ФЕП за сонцем. Створено та експериментально досліджено макетний взірець ВР з ВВО в поєднанні з КВП, а також макет когенераційної ВЕУ з двома генераторами – електричним і тепловим.

Для перевірки ефективності дії КВП та обґрунтування його раціональних параметрів, були проведені серії комп'ютерних моделювань за методом обчислювальної гідро-газодинаміки CFD (Computational Fluid Dynamics), в основі якого лежить метод скінченних елементів, статичних та динамічних режимів роботи самого макетного взірця ВР та в комплексі з КВП різної конструкції (наприклад, рис. 9). Досліджуваний Н-ротор радіусом 0,45 м складався з трьох лопатей з профілем НАСА 0018 висотою 1 м та довжиною хорди 141 мм. Як кінцеві результати математичного моделювання отримано залежності  $C_p(\lambda)$  за різних швидкостей вітру (4, 7 та 10 м/с) (рис. 10) та залежності статичного (рушійного) моменту  $M_C$  ВР від кута його азимутального розташування  $\psi$  при  $V_B = 4$  м/с (рис. 11).

Аналіз отриманих залежностей  $C_p(\lambda)$  показав, що використання КВП з раціональними параметрами має позитивний ефект для роботи ВР за всіх вибраних для моделювання швидкостей вітру – максимальне значення коефіцієнта відбору потужності від вітру  $C_{pmax}$  за оптимальної швидкохідності ВР  $\lambda_{opt} = 1,9-2,1$  при застосуванні КВП зростає на 70,2% при  $V_B = 4$  м/с, на 52,6 % при  $V_B = 7$  м/с та на 59,7 % при  $V_B = 10$  м/с. Застосування КВП має також позитивний ефект і на залежність  $M_C(\psi)$  (рис. 11). Найважливішим є те, що збільшуються значення  $M_C$  в критичних точках його локальних мінімумів, особливо на малих швидкостях вітру. Так, за найнижчої із досліджуваних швидкості вітру 4 м/с найменший критичний момент при  $\psi = 45^\circ$  зріс з 0,04 до 0,07 Н·м, тобто на 70%. На стільки ж приблизно зріс цей момент і при  $\psi = 120^\circ$ . Отож, КВП покращує стартові можливості Н-ротора.

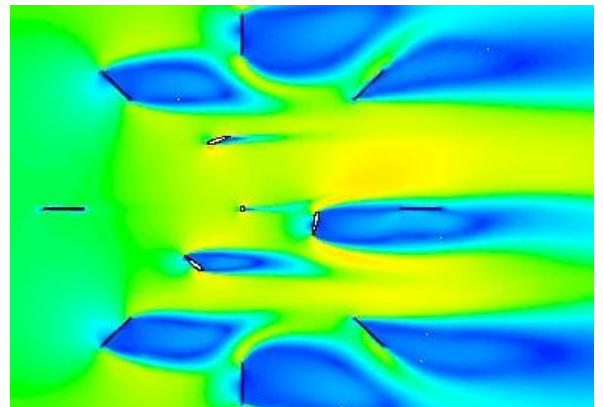


Рис. 9. Змодельоване за методом скінченних елементів поле швидкості вітрового потоку для досліджуваного Н-ротора з КВП

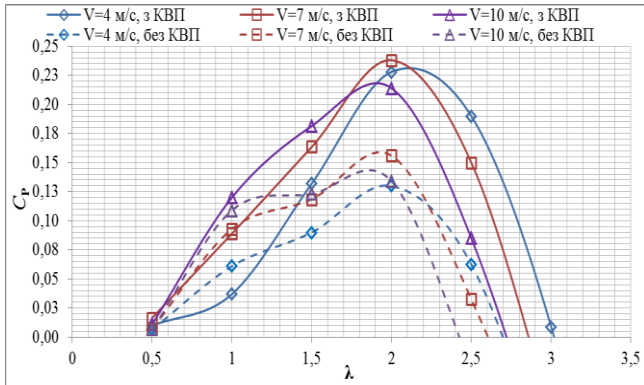


Рис. 10. Залежності  $C_p(\lambda)$  для ВР без та з КВП при різних швидкостях вітру

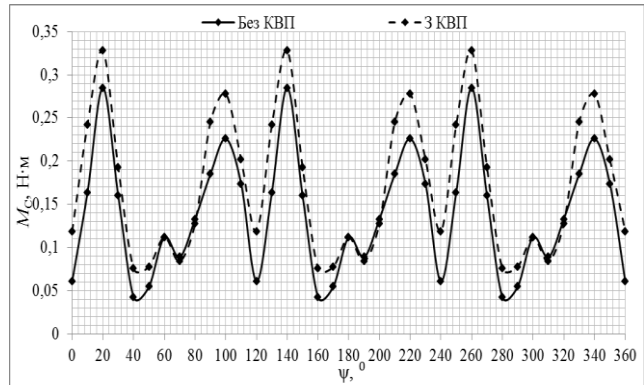


Рис. 11. Залежності  $M_c(\psi)$  для ВР без та з КВП при  $V_B = 4$  м/с

Використовуючи отримані шляхом комп'ютерного моделювання параметри, створено макетний взірець ВЕУ з ВВО в поєднанні з КВП (рис. 12), з яким проводилися натурні експерименти за розробленою методикою. Експерименти підтвердили працездатність та ефективність запропонованої конструкції ВЕУ. Так, завдяки КВП ВР надійно стартував за швидкості вітру 3 м/с та створював механічний момент, який досить добре узгоджувався з результатами комп'ютерного моделювання, що підтверджує достовірність застосованого методу дослідження.

З метою обґрунтування ефективного способу електричного навантаження СГПМ у ВЕУ, було проведено шляхом комп'ютерного симулювання в середовищі

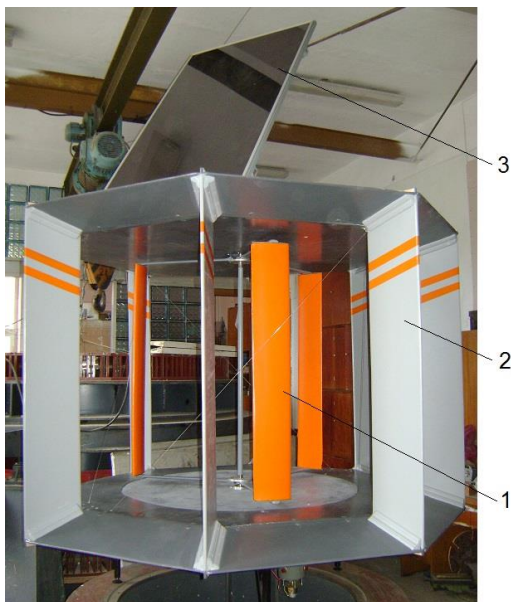


Рис. 12. Макетний взірець вітросонячної установки:  
1 – ВР, 2 – КВП, 3 – ФЕП

Matlab/Simulink порівняльні дослідження для низки пасивних і активних систем регулювання навантаження СГПМ. Було вибрано три альтернативні електромеханічні системи ВЕУ: пасивна з різною кількістю АБ, активна з активним випрямлячем напруги (АВН) і активна – з DC-DC-перетворювачем та коректором струмів якоря СГПМ шляхом формування перервного характеру струмів в дроселях на вході діодного моста напівпровідникового перетворювача. Кожна з трьох вказаних систем досліджувалася в усталених режимах роботи ВЕУ номінальною вихідною потужністю 1 кВт на постійних швидкостях вітру від 3 до 10 м/с. Для кожної з систем було отримано залежності сумарного ККД (рис. 13) як відношення вихідної електричної потужності ВЕУ до потужності потоку вітру, що омиває ВР:

$$\eta_{\Sigma} = C_p(\lambda) \eta_m \eta_{\Gamma} \eta_{\text{ПЕР}}, \quad (7)$$

де  $\eta_m$ ,  $\eta_{\Gamma}$ ,  $\eta_{\text{ПЕР}}$  – відповідно ККД механічної системи, СГПМ та силового перетворювача.

Аналіз отриманих залежностей дав змогу обґрунтувати раціональний спосіб комбінованого керування навантаженням ВЕУ, коли на низьких і середніх швидкостях вітру регулювання відбувається за допомогою DC-DC-перетворювача, а на високих – пасивним способом. Для досліджуваної ВЕУ для цього найкраще вибрати 6 АБ напругою 12 В, а перехід з активного на пасивне керування здійснювати за швидкості вітру 7 м/с. При вищих за цю межу швидкостях вітру ЕРС генератора стає достатньою, щоб заряджати АБ напругу через діодний міст та діод DC-DC-перетворювача. На малих вітрах електрична потужність на виході ВЕУ більша, ніж при використанні АВН через втрати потужності в останньому, а на великих – на 9% більша, ніж з використанням DC-DC-перетворювача, і всього на 7% менша, ніж з АВН. При цьому встановлена потужність DC-DC-перетворювача буде невисокою (35% від номінальної потужності генератора), що позитивно відіб'ється на ціні ВЕУ.

Використовуючи створену ЕБМД, було проведено низку досліджень, спрямованих на визначення оптимальних значень кута нахилу ФЕП до горизонту при різних способах їх орієнтації на сонце. З отриманих залежностей (рис. 14) випливає, що для м. Львова оптимальними сезонними значеннями кута нахилу ФЕП при орієнтації панелі строго на південь є такі: зима – 65°, осінь – 53°, весна – 32°, літо – 21°. При азимутальному стеженні панелі за сонцем оптимальні сезонні значення кута нахилу дещо змінюються: зима – 67°, осінь – 60°, весна – 51°, літо – 46°. Також з рисунку видно, що застосування азимутального стеження ФЕП за сонцем краще проявить себе влітку і весною, ніж осінню та взимку.

З метою дослідження ЕПМЕТ для когенераційної ВЕУ, було виготовлено макетний взірець блока генераторів – електричного 1 і теплового 2 (рис. 15).

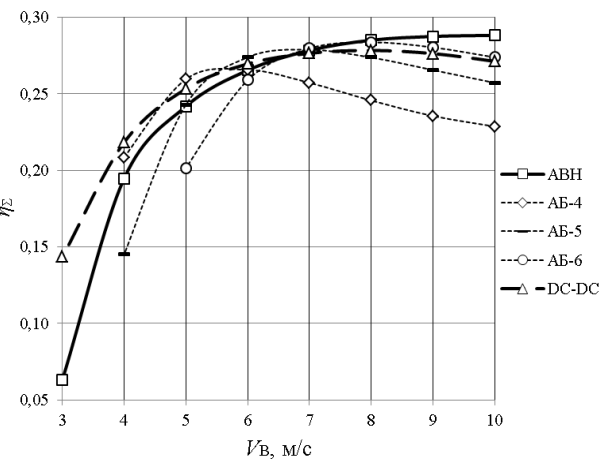


Рис. 13. Залежності ККД ВЕУ від  $V_B$  для порівнюваних способів регулювання електричного навантаження СГПМ

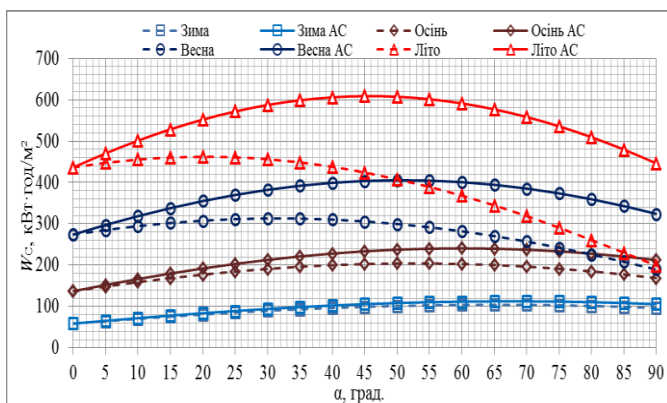


Рис. 14. Залежності питомих значень притоку енергії посезонної сумарної СР від кутів нахилу ФЕП при її орієнтації на південь та азимутальному стеженні (АС) за сонцем

Блок закріплений на зварній рамі 3 і приводився в рух двигуном постійного струму 4 через черв'ячний редуктор 5. На рис. 16 наведено принципову схему дослідної установки. Якірне коло двигуна М живиться через дросель L від мостового діодного випрямляча VD, який підключено до вихідної обмотки автотрансформатора Т. Напруга і струм якірного кола вимірюються відповідно вольтметром V1 і амперметром А1. Обмотка збудження



теплового генератора ТГ (ЕПМЕТ) живиться від блока регульованої постійної напруги БЖ, а струм збудження вимірюється амперметром А2.



Рис. 15. Лабораторна установки для дослідження макетного взірця ЕПМЕТ

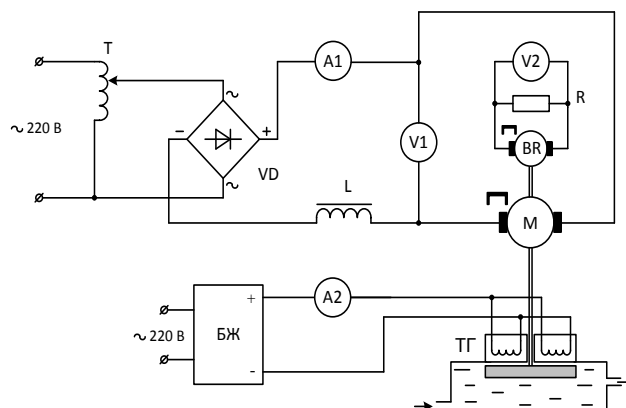


Рис. 16. Принципова схема лабораторної установки для проведення досліджень ЕПМЕТ

Було проведено кілька серій експериментів, у яких регулювалася частота обертання привідного двигуна М і, відповідно, ротора ЕПМЕТ при різних значеннях струму його збудження. В кожній точці усталеного режиму вимірювалися напруга і струм якоря двигуна М та його частота обертання. За отриманими значеннями визначалися втрати неробочого ходу, а далі розраховувалась залежність механічної потужності на валу ЕПМЕТ, яка створюється вихровими струмами, що генеруються в масиві ротора ЕПМЕТ при зміні магнітного поля внаслідок обертання ротора. Результати розрахунків представлено на рис. 17 разом із аналогічними залежностями, отриманими теоретично шляхом комп'ютерного моделювання магнітних і теплових полів у ЕПМЕТ за методом скінченних елементів. Розбіжність між експериментальними і теоретичними результатами, яка не перевищує 17%, є цілком задовільною для даного роду досліджень.

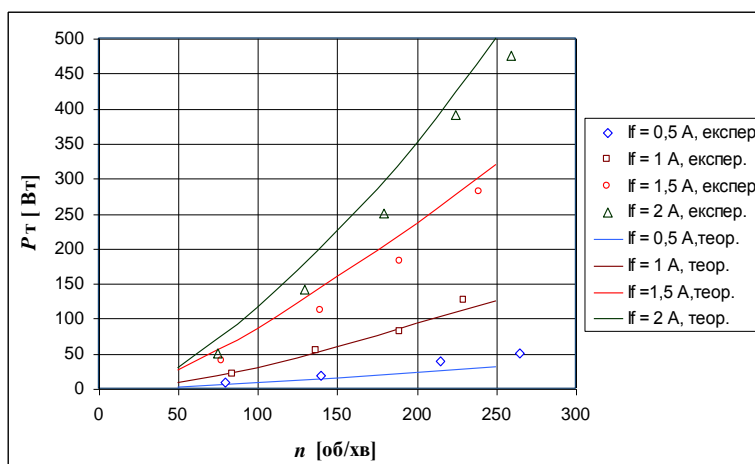


Рис. 17. Експериментальні і теоретичні залежності потужності, що виділяється у вигляді теплоти в роторі ЕПМЕТ, від його частоти обертання за різних значень струму збудження

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання створення перспективних структур ВССЕ малопотужних об'єктів з оптимальними параметрами основних складових елементів, а також розроблення ефективної для роботи

в умовах низькопотенціальних ресурсів ПДЕ конструкції вітросонячної установки для реалізації цих систем.

Щодо отриманих результатів можна зробити наступні висновки.

1. Сформована ЕБМД, в яку входить інформація про погодинні значення швидкості і напрямку вітру, тривалості сонячного сьйва в інтервалах реального часу, температури навколишнього середовища у м. Львові протягом 2013 р., може служити вихідною інформацією для проведення імітаційного математичного моделювання роботи ВССЕ з метою їх параметричної оптимізації.

2. Аналіз річного вітрового та сонячного потенціалів для м. Львова показав їх низький рівень, за якого перспективу має комбіноване отримання ЕЕ від ПДЕ вітру і сонця. З цією метою запропоновано нову конструкцію вітросонячної установки, яка має підвищені енергетичні показники в умовах низькопотенціального поновлюваного ресурсу. Зокрема, енергетична ефективність роботи ВЕУ покращується завдяки застосуванню стаціонарного КВП, який в конструкції вітросонячної установки має ще низку додаткових функцій, а ефективність ФЕУ зростає завдяки застосуванню системи азимутального стеження її на сонцем.

3. На основі ЕБМД в середовищах Microsoft Excel та Matlab створено програмний продукт для розрахунку питомої (на одиницю площі омивання ВЕУ та одиницю площі ФЕП) кількості погодинної та сумарної за рік електроенергії на виході з вітросонячної установки з конкретними параметрами і способом керування при довільному її розміщенні.

4. Як перспективну для застосування в Україні з метою енергозабезпечення окремих об'єктів, крім автономної та мережевої, запропоновано також автономно-мережеву ВССЕ, яка рекомендується для відносно потужних не газифікованих індивідуальних споживачів з метою отримання бажаних обсягів ЕЕ та з одночасним збереженням її стандартів якості. Для всіх вказаних структур ВССЕ обґрунтовано критерії енергоефективності, розроблено алгоритми керування енергопотоками та створено методичку для проведення оперативної техніко-економічної параметричної оптимізації складових елементів з використання методу ГА.

5. Використання стаціонарного симетричного КВП обґрунтованої оптимальної конструкції у складі ВЕУ з Н-ротором номінальною потужністю 5 кВт дає змогу підвищити значення коефіцієнта відбору потужності від вітру на 26-37% порівняно з самим ВР, причому більші значення мають місце при малих швидкостях вітру, що є переважаючими на території України.

6. Для оптимального регулювання електричного навантаження малопотужної ВЕУ, доцільно застосувати запропоновану комбіновану активно-пасивну систему, яка складається з малопотужного (0,35 номінальної потужності ВЕУ) DC-DC-перетворювача, який працює на малих та середніх швидкостях вітру. На великих вітрах ВЕУ ефективно автоматично регулюється пасивним способом, коли СГПМ безпосередньо навантажується через діодний міст на ланку постійної напруги оптимальної величини.

7. Встановлено, що у випадку азимутального слідування ФЕП за сонцем можна отримати на її виході у м. Львові на 30% більше ЕЕ, ніж при нерухомій панелі, зорієнтованій строго на південь. Рекомендованим оптимальним для азимутального

стеження ФЕП за сонцем є кут нахилу до горизонту –  $51^\circ$ , а для нерухомої ФЕП, орієнтованої строго на південь –  $33^\circ$ .

8. Отримані теоретичні результати впроваджено в навчальний процес кафедри «Електропривод та комп'ютеризовані електромеханічні системи» Національного університету «Львівська політехніка», а практичні результати використовуються в роботах на основі госпдоговорів у Спеціальному конструкторському бюро електромеханічних систем Львівської політехніки та в практиці спеціалізованого науково-виробничого підприємства ПП «ЕКО-СТ».

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Щур І.З. Прогнозування ефективності роботи фотоелектричних панелей у місті Львові / І.З.Щур, В.І.Климко // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісн. Націон. ун-ту «Львівська політехніка». – 2014. – № 785. – С. 88–94.

2. Щур І.З. Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітросонячної системи для електропостачання окремого об'єкта / І.З. Щур, В.І. Климко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – Вип. 2. – С. 92–100.

3. Климко В.И. Условия эффективной работы фотоэлектрических панелей. Опыт г. Львова / В.И. Климко, И. З. Щур // Энергетика и ТЭК. – 2014. – № 11. – С. 42–45.

4. Shchur I. Analysis of methods of electrical load of permanent magnet synchronous generator for small wind turbines / I. Shchur, A. Rusek, V. Klymko, A. Gastolek, J. Sosnowski // Maszyny elektryczne: Zeszyty Problemowe. – 2015. – № 1 (105).– P.75–81.

5. Makarchuk O. Optimization of the design of electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for VAWT / O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Klymko // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2015. – N 12. – P. 151-155.

6. Патент на винахід UA 105743 C2, МПК F03D 9/02, H05B 6/10. Вітрова теплоелектростанція / І.З. Щур, О.В. Макарчук, В.І. Щур, В.І. Климко; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № а201308843, заявл. 15.07.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.

7. Патент на корисну модель МПК F03D 3/00, F03D 11/00, H01L 31/042. Вітросонячна електростанція / І.З. Щур, В.І. Климко; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № u201413997, заявл. 26.12.2014; отримано рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель 06.08.2015.

8. Климко В. Алгоритм роботи комбінованої автономно-мережевої системи електроживлення окремого об'єкта / В. Климко // Енергетика та системи керування. Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ЕРЕС-2013, 21-23 листопада, 2013 р., м. Львів. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 84–86.

9. Щур І.З. Методика розрахунку показників електропостачання окремого об'єкта від гібридної вітро-сонячної системи / І.З. Щур, В.І. Климко // Матеріали доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика (ICPEES-2014)», 13-15 травня, 2014 р., м. Кременчук: Видавництво КрНУ, 2014. –

Вип. 1 (2). – С. 83–85.

10. Климко В.І. Інтелектуальна система керування електропостачанням окремого об'єкта від мережі та поновлюваних джерел енергії / В.І. Климко, І.З. Щур // Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, 25-26 жовтня, 2012 р., м. Київ, 2012. – С. 34-36.

### АНОТАЦІЯ

**Климко В. І.** Вітросонячні системи електроживлення малопотужних споживачів. – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – “Електротехнічні комплекси та системи”. – Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертація присвячена розробленню методу та відповідного математичного і програмного забезпечення, що дають змогу проводити імітаційне погодинне моделювання річної роботи досліджуваних вітросонячних систем електроживлення (ВССЕ) різних структур на основі створеної електронної бази метеорологічних даних. Для генерування електроенергії у ВССЕ використовуються вітроелектрична установка (ВЕУ) з вертикальною віссю обертання (ВВО) та фотоелектрична установка. Ціллю розробленого методу є здійснення параметричної оптимізації елементів ВССЕ з використанням генетичних алгоритмів за обґрунтованими критеріями ефективності їх роботи. Практичну цінність має нова конструкція ВЕУ з ВВО та концентратором вітропотуку, оптимальні параметри якої знайдено в результаті комп'ютерного моделювання аеродинамічних процесів. Визначено оптимальні для м. Львова значення кутів нахилу фотоелектричних панелей (ФЕП) при стаціонарному їх встановленні та за азимутального стеження ФЕП за сонцем. Розроблено та досліджено шляхом комп'ютерного симулювання нову систему активно-пасивного керування навантаженням синхронного генератора з постійними магнітами у ВЕУ з ВВО, яка дає змогу застосувати недорогий електронний перетворювач постійної напруги зі встановленою потужністю втричі меншою за номінальну потужність ВЕУ. Створено також електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплову як додатковий теплогенератор на валу вітроротора ВЕУ для безпосереднього перетворення надлишкової енергії вітру в теплоту, необхідну для побуту.

**Ключові слова:** вітросонячні системи електроживлення, вітроелектрична установка з вертикальною віссю обертання, фотоелектрична панель, синхронний генератор з постійними магнітами, техніко-економічна оптимізація, генетичні алгоритми.

### АННОТАЦИЯ

**Клымко В. И.** Ветросолнечные системы электропитания маломощных потребителей. – *На правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”. –

Национальный университет “Львівська політехніка” Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена разработке метода и соответствующего математического и программного обеспечения, которые позволяют проводить имитационное почасовое моделирование годовой работы исследуемых ветросолнечных систем электропитания (ВССЭ) различных структур на основании созданной электронной базы метеорологических данных. Для генерирования в ВССЭ используются ветроэлектрическая установка (ВЭУ) с вертикальной осью вращения (ВОВ) и фотоэлектрическая установка. Целью разработанного метода является осуществление параметрической оптимизации элементов ВССЭ с использованием генетических алгоритмов по обоснованным критериям эффективности. Практическую ценность имеет новая конструкция ВЭУ с ВОВ и концентратором ветрового потока, оптимальные параметры которой найдены в результате компьютерного моделирования аэродинамических процессов. Определены оптимальные для г. Львова значения углов наклона фотоэлектрических панелей (ФЭП) при стационарной их установке, а также в системе с азимутальным слежением ФЭП за солнцем. Разработанная и исследованная путем компьютерного моделирования новая система активно-пассивного управления нагрузкой синхронного генератора с постоянными магнитами в ВЭУ с ВОВ позволяет применить недорогой электронный преобразователь постоянного напряжения с установленной мощностью втрое меньшей за номинальную мощность ВЭУ. Создано также электромагнитный преобразователь механической энергии в тепловую в качестве дополнительного теплогенератора на валу ветроротора ВЭУ для преобразования избыточной энергии ветра в теплоту, необходимую для бытовых целей.

**Ключевые слова:** ветросолнечные системы электропитания, ветроэлектрическая установка с вертикальной осью вращения, фотоэлектрическая панель, синхронный генератор с постоянными магнитами, технико-экономическая оптимизация, генетические алгоритмы.

## ABSTRACT

**Klymko V. I.** Combined wind and solar power systems of small-scale power consumers. – *On manuscript*.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 – “*Electrotechnical complexes and systems*”. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The dissertation is devoted to development of methods and appropriate mathematical modeling and software providing that gives an opportunity to conduct the hourly simulation modeling of yearly work of wind and solar power supply systems (WSPSS) of different configurations based on the created database of meteorological data and energy requirements of the consumer. As channels of generating electricity from renewable energy sources in WSPSS used, respectively, wind turbine with a vertical axis of rotation (VAWT) and photovoltaic installation with the possibility of azimuth orientation of pho-

photovoltaic panels (PV) to the sun. The aim of the developed method also is the implementing of parametric optimization procedure – genetic algorithms for the parametric optimization of different configurations of WSPSS on the performance criteria in a really quick space frame.

The algorithms of work developed for three variants of the WSPSS: autonomous, grid-connected and combined autonomous – grid-connected. For two last of them a new criterions for estimation of energy efficiency have been introduced, respectively, total income of energy sold (TIOES) and cost of the system (COS). Calculation of each of the criterions is based on detailed value analysis of the WSPSS components with taking into account the discount and inflation rates. The detailed algorithms for the calculation of the energy efficiency criterions were also developed for each of the WSPSS and the examples of multiple parametric optimizations were showed. Combined autonomous – grid-connected WSPSS is promising for use in Ukrainian domestic houses that are not using gas for heating in the conditions of quick raise of gas price, where centralized electricity grid can be used as the reserve energy source. With the using of proposed combined WSPSS the consumer will get the desired amount of electric energy with best quality and without power interrupting, will save money for small electricity consumption from the grid (because of using renewable energy sources) and at the same time will invest in ecology on Earth. The functional electrical scheme of this system was also developed, which can be used for the implementation in the alternative energy sector of Ukraine by technical firms.

The practical importance has a new design of VAWT with stationary concentrator of wind flow (CWF), optimal parameters of which have been found through the computer modeling of aerodynamic processes by using a finite element method. The optimal seasonal and annual, for the city of Lviv, values of angles inclination of PV for it's stationary installing and with azimuth tracking of the panels to the sun also were found. A new system of combined active–passive load control of synchronous generator with permanent magnets in VAWT was designed, in which was used inexpensive electronic DC-DC converter with a corrector of armature currents and with installed capacity of less than three times of wind turbine power. Also in work is proposed the usage of the created electromagnetic transformer of mechanical energy into heat (ETMEH) as an additional heat generator that is mounted on the rotor shaft of the VAWT for converting excess mechanical power from wind into heat.

Conducted, in highly adequate Computational Fluid Dynamics software, computer modeling of aerodynamic processes during rotation of VAWT rotor combined with KWF showed the positive effects of using the latter which consisted in improving both starting and working characteristics of VAWT. That was confirmed also by experimental researches conducted with the created sample of VAWT.

The results of experimental studies on created sample of the blocks of electric and heat generators for VAWTs confirmed the adequacy of the respective results of mathematical models of ETMEH design.

**Keywords:** wind and sun power systems, wind power turbine with vertical axis of rotation, photovoltaic panel, synchronous generator with permanent magnets, technical and economic optimization, genetic algorithms.