УДК 620.92

В.В. КУРАК, О.В. АНДРОНОВА, А.М. ЯЦЕНКО, Н.В. ЯЦЕНКО
Херсонський національний технічний університет

АВТОНОМНА ВІТРО-СОНЯЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО ОБ'ЄКТУ

Розглянуто доцільність організації автономного електрозабезпечення підприємства з розробки Західно-Тягинського родовища вапняків, розташованого на території Херсонської області, за рахунок використання вітро-сонячного потенціалу місцевості. Проведено енергетичний аудит електричної частини об'єкту, результати якого дозволили встановити розподіл потреби в електричній енергії в розрізі року. Розраховано енергетичні параметри, яким має задовольняти автономна вітро-сонячна система для цілорічного покриття потреби підприємства в електричній енергії. Представлено принципи оптимізації енергетичних показників автономної вітро-сонячної електростанції.

На основі аналізу українського ринку індивідуальних вітроелектричних та фотоелектричних установок запропоновано низку можливих варіантів автономних систем, здатних забезпечити енергопотребу даного об'єкту, та визначено їх техніко-економічні показники. Встановлено, що з технічної та економічної точок зору безперебійне електропостачання доцільно здійснювати системою на основі вітроелектричної установки потужністю 400 Вт та 29 фотоелектричних модулів з номінальною потужністю 330 Вт кожен, гібридного інвертора потужністю 2,4 кВт, а також 18 спеціалізованих акумуляторних батарей сумарною ємністю 1800 А·год. При капітальних витратах 541,5 тис. грн така система забезпечує річне виробництво електричної енергії на рівні 13 500 кВт·год та дозволяє економити на експлуатаційних витратах, пов'язаних з обслуговуванням і забезпеченням паливом базової бензинової електростанції, до 160 тис. грн на рік.

Ключові слова: вітровий режим, сонячна радіація, електрична енергія, автономна система.

В.В. КУРАК, Е.В. АНДРОНОВА, А.М. ЯЦЕНКО, Н.В. ЯЦЕНКО
Херсонский национальный технический университет

АВТОНОМНАЯ ВЕТРО-СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЭЛЕКТРООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Рассмотрена целесообразность организации автономного электрообеспечения предприятия по разработке Западно-Тягинского месторождения известняков, расположенного на территории Херсонской области, за счет использования ветро-солнечного потенциала местности. Проведен энергетический аудит электрической части объекта, результаты которого позволили установить распределение потребности в электрической энергии в разрезе года. Определены энергетические параметры, которым должна удовлетворять автономная ветро-солнечная система для круглогодичного покрытия потребности предприятия в электрической энергии. Описаны принципы оптимизации энергетических показателей автономной ветро-солнечной электростанции.

На основе анализа украинского рынка индивидуальных ветроэлектрических и фотоэлектрических установок предложен ряд возможных вариантов автономных систем, способных обеспечить энергопотребности данного объекта, и определены их технико-экономические показатели. Установлено, что с технической и экономической точек зрения бесперебойное электроснабжение объекта целесообразно осуществлять автономной системой на основе ветроэлектрической установки мощностью 400 Вт и 29 фотоэлектрических модулей с номинальной мощностью 330 Вт каждый, гибридного инвертора мощностью 2,4 кВт, а также 18 специализированных аккумуляторных батарей суммарной емкостью 1800 А·ч. При капитальных затратах 541,5 тыс. грн такая система обеспечивает годовую выработку электрической энергии на уровне 13 500 кВт·ч и позволяет экономить до 160 тыс. грн в год на эксплуатационных расходах, связанных с обслуживанием и снабжением топливом базовой бензиновой электростанции.

Ключевые слова: ветровой режим, солнечная радиация, электрическая энергия, автономная система.

V.V. KURAK, E.V. ANDRONOVA, A.M. YATSENKO, N.V. YATSENKO
Kherson National Technical University

OFF-GRID WIND-SOLAR SYSTEM FOR ELECTRIC SUPPLY OF INDUSTRIAL OBJECT

The advisability of autonomous wind-solar power supply system for the West-Tyaginsky limestone plant, located in the Kherson region, is considered. Based on results of electrical part energy audit the year distribution of object's electrical needs is determined. The energy parameters that must be satisfied by autonomous wind-solar system for all-the-year coverage of the plant's electrical needs are determined. The principles of energy parameters optimization for autonomous wind-solar power plants are given.

Basing on the analysis of the Ukrainian market of individual wind power and photovoltaic devices a number of possible autonomous systems is proposed. Technical and economic parameters have been determined for proposed systems. It has been find out, that an off-grid system composed of a 400 W wind turbine, twenty-nine 330 W photovoltaic modules, 2.4 kW hybrid invertor and 18 specialized batteries with a total capacity of 1800 Ah is expedient from technical and economical points of view for uninterrupted power supply of the object. With a capital investments of 541.5 thousands UAH, such system provides an annual generation of electricity at a level of 13 500 kWh and saves up to 160 thousands UAH per year in operating costs related with base-case gasoline power station servicing and fuel supplying.

Keywords: wind conditions, solar radiation, electrical energy, off-grid system.

Постановка проблеми

Особливості кліматичного режиму південних регіонів України сприяють розвитку генеруючих потужностей, що використовують сонячний та вітроенергетичний ресурс. Так в умовах Херсонської області річне надходження сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню становить понад 1300 кВт·год / м^2, а річний потенціал вітру в південних районах сягає 3000 кВт·год / м^2 [1]. Це разом зі стимулюючою дією «зеленого» тарифу приваблює інвестиції в побудову як потужних централізованих фото- та вітроелектричних станцій, так і індивідуальних мережевих електрогенеруючих систем порівняно невеликої потужності, що працюють в єдиній енергосистемі України [2].

Іншим прикладом застосування систем альтернативної енергетики є автономні електричні станції, призначені для забезпечення енергією об'єктів, віддалених від ліній електропередач. Зважаючи на незначний відсоток таких об'єктів на території України, що переважно розташовуються в гірській місцевості, на малозаселених островах, тощо, широкого поширення автономні системи (АС) не набули.

Періодичний та випадковий характер сонячного та вітрового ресурсу потребує включення до складу автономної електростанції системи акумулювання, що забезпечує безперебійність електропостачання в нічний період, похмурі або безвітряні дні. Це призводить до суттєвого збільшення вартості одиниці встановленої потужності АС в порівнянні з мережевими електростанціями і, як наслідок, електрозабезпечення віддаленого від електричних мереж об'єкта здійснюється, зазвичай, не за рахунок сонячної або вітрової енергії, а бензиновим або дизельним генератором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Головними складовими типової АС є генератор електричної енергії, в якості якого можуть використовуватись фотоелектричні модулі (ФЕМ) або вітроелектрична установка (ВЕУ), акумуляторна батарея (АКБ), контролер заряду та автономний інвертор, що перетворює постійну напругу у змінну [3]. При достатньому надходженні енергетичного ресурсу до генератора відбувається живлення навантаження та заряджання АКБ. В іншому випадку живлення навантаження відбувається за рахунок енергії, накопиченої в АКБ. Зважаючи на випадковий характер вітрової енергії і періодичність сонячної інсоляції, АС потребує значної встановленої потужності генеруючого пристрою, щоб забезпечити заряджання АКБ в період достатнього надходження енергетичного ресурсу. При зменшеній потужності споживання це може призвести до вироблення надлишку енергії, який має бути розсіяним на баластному навантаженні або ж ліквідований шляхом часткового відключення генеруючих потужностей. Крім того, тривалість періоду живлення навантаження від АКБ залежить від її ємності [2]. Отже, для безперебійного забезпечення споживача електричною енергією під час тривалої нестачі енергоресурсу потрібно використовувати АКБ великої ємності, що погіршує економічні показники автономних вітроелектричних та фотоелектричних станцій.

Одним із можливих шляхів мінімізації гостроти вказаних проблем є перехід до вітро-сонячних АС, що використовують в якості генератора одночасно як ФЕМ, так і ВЕУ. Паралельне перетворення сонячних та вітрових енергетичних потоків генератором дозволяє не тільки зменшити добові та сезонні коливання в надходженні енергії до АС [4], але й забезпечує додаткові можливості оптимізації техніко-економічних показників системи шляхом мінімізації надлишку вироблення енергії при роздільному регулюванні потужності фото- та вітроелектричної підсистем у відповідності до кліматичного режиму місцевості. Це в свою чергу має сприяти покращенню інвестиційної привабливості вітро-сонячних АС в

порівнянні з фотоелектричними та вітроелектричними АС, а також автономними електростанціями, що працюють на традиційному паливі.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є дослідження доцільності організації автономного електрозабезпечення промислового об'єкту, розташованого на території Херсонської області, за рахунок використання вітро-сонячного потенціалу місцевості.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості об'єкта дослідження обрано Західно-Тягинське родовище вапняків, розташоване поблизу с. Іванівка Білозерського району Херсонської області. Енергозабезпечення об'єкту здійснюється за рахунок бензинового електрогенератора потужністю 3 кВт. Лінія централізованого електропостачання демонтована, її відновлення не планується.

Місце розташування об'єкту характеризується значним річним надходженням сонячної радіації на горизонтальну поверхню – близько 1430 кВт·год/м^2 [5] та середньорічним значенням швидкості вітру для умов відкритої місцевості – понад 5,7 м/с. Отже, доцільним є розгляд можливості безперебійного електропостачання від АС, що використовує сонячну та вітрову енергію.

З метою визначення енергоспоживання проведено аудит електричної частини об'єкту. Встановлено, що електронавантаження об'єкту формується побутовими приладами адміністративного приміщення та системою освітлення території, які є споживачами змінної напруги. Навантаження постійної напруги відсутнє. Аналіз тривалості та періодичності використання споживачів електричної енергії дозволив скласти типові графіки електроспоживання об'єкту для літніх та зимових місяців (рис. 1). Особливістю об'єкту є чітко виражена сезонність електроспоживання, що пов'язано з необхідністю опалення адміністративного приміщення електрообігрівачем та збільшенням часу освітлення території в зимовий період. Розрахункове добове споживання електричної енергії влітку становить 11,840 кВт·год, а взимку – 24,608 кВт·год при піковому навантаженні 2,4 кВт. Річне споживання енергії складає 6560,64 кВт·год.

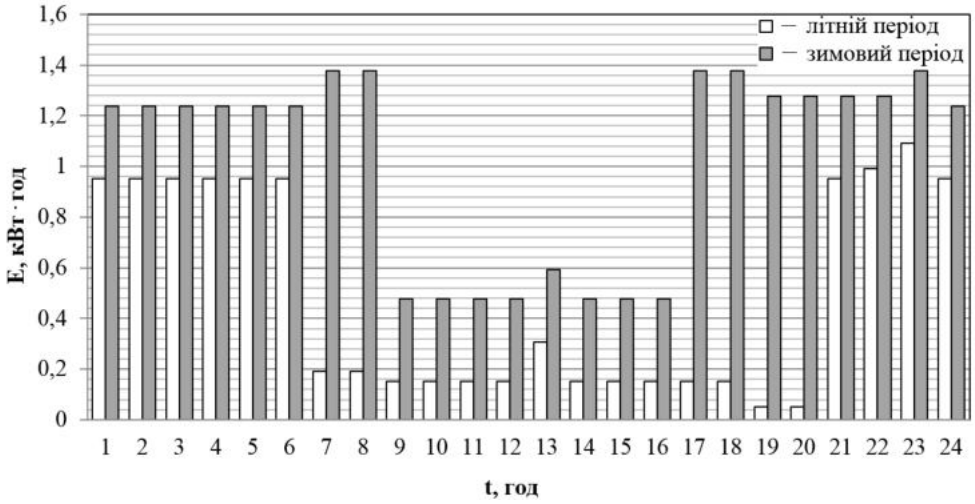

Рис. 1. Типовий добовий графік електроспоживання об'єкту

Сумарна ємність АКБ, що потрібна для забезпечення безперебійного живлення об'єкту за умови відсутності надходження енергії від нетрадиційних джерел протягом однієї доби зимового періоду, розраховувалась за методикою [6] з врахуванням втрат в інверторі при перетворенні постійної напруги в змінну, температурного коефіцієнту ємності та допустимої глибини розряду АКБ. Розрахункове значення сумарної ємності АКБ становить 1757,92 А·год при напрузі 24 В. Зазначену сумарну ємність можуть забезпечити 9 спеціалізованих акумуляторів номінальною ємністю 200 А·год та напругою 24 В, що з'єднані між собою паралельно, або 18 акумуляторів такої ж ємності, але напругою 12 В, що формують батарею з дев'яти паралельних гілок по два послідовно з'єднаних акумулятори в кожній. Аналіз технічних та цінових показників спеціалізованих акумуляторів для вітро-сонячних систем електропостачання, представлених на українському ринку, показав доцільність формування АКБ на базі 18 батарей ALVA AD 12-200. Особливістю цих акумуляторів є підвищена стійкість до глибокого розряду та тривалий термін служби (до 15 років).

Розрахунок вироблення енергії вітроелектричною підсистемою АС здійснювався за методикою [7], що базується на використанні даних метеорологічних спостережень за вітровим режимом місцевості,

в яких надано повторюваність швидкостей вітру за градаціями. В розрахунку використовується експериментальна робоча характеристика ВЕУ, як залежність потужності установки від швидкості вітру $N_i = N_i(u_i)$, а вироблення енергії за період часу Δt знаходиться, як сума вироблення енергії за кожною градацією швидкості вітру з урахуванням повторюваності $\Delta\Phi_i$ даного значення швидкості вітрового потоку u_i:

$$E_{ВЕУ} = \sum_{i=1}^{n} E_i(u_i) = \sum_{i=1}^{n} N_i(u_i) \cdot \Delta\Phi_i \cdot \Delta t. \quad (1)$$

При визначенні швидкості вітру для місця розташування ВЕУ використовували дані з вітрового режиму найближчої метеостанції „Берислав", враховуючи клас відкритості місцевості та висоту осі вітротурбіни.

Вироблення енергії підсистемою ФЕМ $E_{ФЕМ}$ за аналогічний період часу Δt визначалось за методикою [6] на основі аналізу метеорологічних даних [5] з надходження сонячної радіації на поверхню сонячних модулів, орієнтованих на південь. З метою збільшення надходження сонячної енергії до ФЕМ у зимовий період, коли спостерігається максимальне споживання енергії об'єктом, кут нахилу ФЕМ відносно горизонтальної поверхні приймався таким, що дорівнює 60°. Такий кут нахилу не лише забезпечує максимальний потік сонячної радіації на поверхню ФЕМ у зимові місяці, але й дозволяє зменшити надлишок виробленої енергії у літній період, коли енергоспоживання об'єкту стає нижчим (рис. 2). Отже, з'являється можливість задовільнити потребу у виробленні енергії за рахунок меншої кількості ФЕМ і таким чином мінімізувати капітальні витрати.

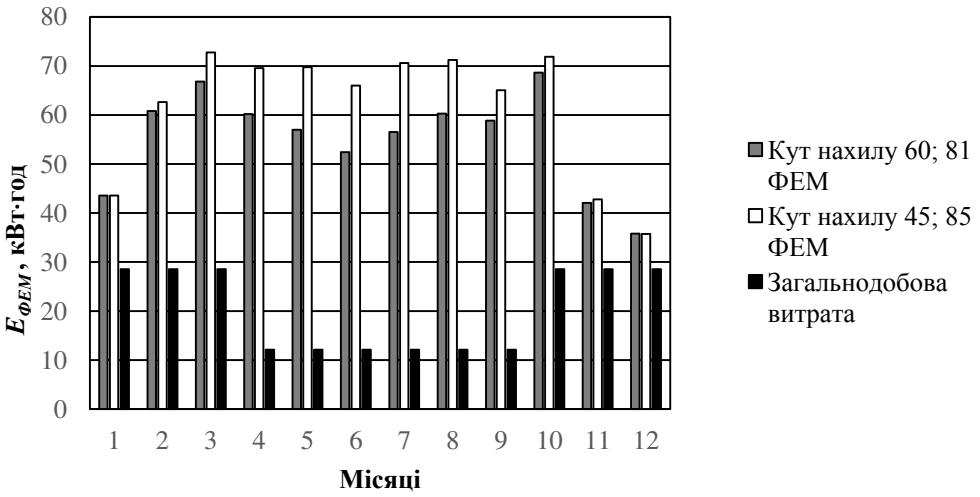

Рис. 2. Розподіл середньодобового вироблення енергії АС на основі ФЕМ AMERISOLARAS-6P30-330 / 4BB за місяцями

Загальна енергія, що виробляється вітро-сонячною АС, є сумою енергій, отриманих за один і той самий період часу від її підсистем:

$$E_{AC} = \sum_{i=1}^{n} E_i = E_{ВЕУ} + E_{ФЕМ}, \quad (2)$$

причому для забезпечення безперебійності енергопостачання об'єкту добове значення $E_{АС}$ має бути не меншим за загальнодобову потребу в електричній енергії $E_{ЗД}$, тобто енергію, що витрачається АС як на безпосереднє живлення електричних споживачів, так і на поновлення запасу АКБ з урахуванням втрат в перетворюючих та зарядних пристроях. Якщо $E_{ВЕУ} = 0$ – маємо окремий випадок фотоелектричної АС,

при $E_{ФЕМ} = 0$ – вітроелектричну систему. Оптимізація ж АС за енергетичними показниками зводиться до мінімізації надлишку вироблення енергії $\Delta E = E_{АС} - E_{ЗД}$:

$$\Delta E \to \min\ ;\ \Delta E > 0. \tag{3}$$

Варіанти АС, що розглядались, представлені у табл. 1. АС комплектується високоефективними ФЕМ на основі полікристалічних сонячних елементів AMERISOLARAS-6P30-330/4BB номінальною потужністю 330 Вт, однією ВЕУ з широким діапазоном робочих швидкостей вітру, АКБ на базі 18 акумуляторів ALVA AD 12-200, а також гібридним інвертором NK 1K-3K 2,4 кВт з піковою потужністю 4,8 кВт. Мінімально необхідна кількість модулів у підсистемі ФЕМ АС визначалась, виходячи з загальнодобової потреби в електричній енергії $E_{ЗД}$, середньодобового вироблення енергії підсистемою ВЕУ $E_{ВЕУ}$ та одним модулем сонячних елементів $E_{ФЕМ1}$ з округленням результату до найближчого більшого цілого:

$$N_{ФЕМ} = \left(E_{ЗД} - E_{ВЕУ}\right) / E_{ФЕМ1}. \tag{4}$$

Таблиця 1

Варіанти АС на основі ФЕМ та ВЕУ

Позначення АС	Генеруючі потужності	
	ВЕУ	ФЕМ
I	EuroWind 500	-
II	WS-WT400W	29 модулів
III	СВ-1.2/30 «Бджола»	32 модулі
IV	EuroWind 300M	47 модулів
V	-	81 модуль

На рис. 3 представлено розподіл середньодобового вироблення електричної енергії запропонованими АС по місяцях у порівнянні з відповідною витратою енергії, а в табл. 2 – дані з річного вироблення та надлишку енергії.

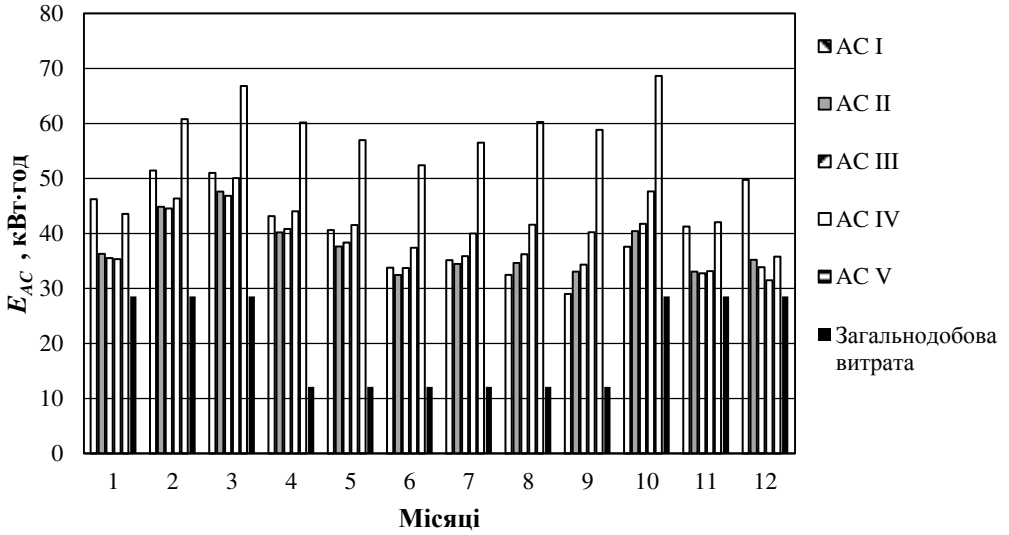

Рис. 3. Середньодобове вироблення енергії АС на основі ФЕМ та ВЕУ

Таблиця 2

Річне вироблення та надлишок енергії

АС	I	II	III	IV	V
$E_{АС\ рік}$, кВт·год	14 750	13 500	13 645	14 666	19 888
$\Delta E_{рік}$, кВт·год	7 431	6 182	6 327	7 348	12 570

Як показує аналіз рис. 3, вироблення енергії кожним із запропонованих варіантів АС перекриває загальнодобову потребу в електричній енергії в будь-якому місяці, а отже, забезпечує безперебійне електропостачання об'єкту протягом року. АС I, яка використовує у якості генератора лише ВЕУ, виробляє найбільше енергії у місяці зимового періоду, а влітку вироблення зменшується, що обумовлено особливостями вітрового режиму території і добре узгоджується з сезонністю графіка енергоспоживання. Втім, варіант АС I характеризується значним річним надлишком виробленої енергії, тому не може вважатися оптимальним (табл. 2). Інший варіант системи – АС V – використовує лише ФЕМ і демонструє максимальний надлишок вироблення енергії із всіх запропонованих систем, що пояснюється зростанням рівня сонячної інсоляції у літній період на фоні зменшення енергопотреби об'єкту.

Кращі енергетичні показники демонструють АС, що використовують одночасно як вітровий, так і сонячний енергетичні потоки (АС II – АС IV). Причому мінімальний річний надлишок виробленої енергії спостерігається для варіанту АС II, генеруючі потужності якого складаються з вертикальноосьової ВЕУ WS-WT400W номінальною потужністю 400 Вт та 29 ФЕМ AMERISOLARAS-6P30-330 / 4BB, розташованих під кутом нахилу 60°. Отже, з енергетичної точки зору даний варіант АС є найоптимальнішим із всіх запропонованих.

Доцільність реалізації запропонованих варіантів АС визначали на основі розрахунку періоду окупності T (табл. 3), для чого для кожної системи розраховувались капітальні витрати K, річні доходи від експлуатації $Д$, в якості яких приймалися експлуатаційні витрати базової АС на основі бензинового генератора, що заміщується, а також річні експлуатаційні витрати EB нової системи (в цінах станом на січень 2019 р.).

Таблиця 3

Економічні показники запропонованих варіантів АС

Позначення АС	K, тис. грн	$Д$, тис. грн. / рік	EB, тис. грн. / рік	T, роки
I	552,212	188,598	30,063	3,48
II	541,516	– ″ –	29,726	3,41
III	576,056	– ″ –	30,814	3,65
IV	674,401	– ″ –	33,912	4,36
V	849,232	– ″ –	39,419	5,69

Дані табл. 3 вказують на економічну доцільність впровадження будь-якого із запропонованих варіантів АС, оскільки періоди їх окупності значно менші строку експлуатації основних складових системи: ВЕУ малої потужності – не менше 15 років, ФЕМ на основі полікристалічних кремнієвих сонячних елементів – 25 років, інвертор – не менше 25 років, АКБ на основі спеціалізованих акумуляторів ALVA AD 12-200 – 15 років. Близькі періоди окупності мають системи АС I та АС II – приблизно 3,5 роки. Однак, варіант АС II є більш ефективним з енергетичної точки зору, оскільки забезпечує мінімум надлишку вироблення енергії. Тому саме ця система рекомендується для автономного електрозабезпечення об'єкту.

Висновки

Аналіз техніко-економічних показників різних варіантів автономних систем електропостачання показав, що для безперебійного електрозабезпечення промислового об'єкту – Західно-Тягинського родовища вапняків (с. Іванівка Білозерського району Херсонської області) – доцільним є перехід від базової АС на основі бензинового генератора до вітро-сонячних АС. Встановлено, що з енергетичної та економічної точок зору для даного об'єкту оптимальною є система, що складається з ВЕУ WS-WT400W номінальною потужністю 400 Вт, ФЕМ AMERISOLARAS-6P30-330/4BB в кількості 29 штук, гібридного інвертора NK 1K-3K 2,4 кВт з піковою потужністю 4,8 кВт та 18 акумуляторних батарей ALVA AD 12-200 сумарною ємністю 1800 А·год. При капітальних витратах 541,516 тис. грн така система забезпечує річне виробництво електричної енергії на рівні 13 500 кВт·год та дозволяє економити на експлуатаційних витратах, пов'язаних з обслуговуванням і забезпеченням паливом базової бензинової АС, до 160 тис. грн на рік.

Список використаної літератури

1. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / С.О. Кудря. – К.: НТУУ „КПІ", 2012. – 492 с.
2. Андронова О.В. Порівняння техніко-економічних показників децентралізованої вітроелектричної та фотоелектричної станцій / О.В. Андронова, В.В. Курак // Вісник ХНТУ. – 2017. – №4(63). – с. 19-26.
3. Григораш О.В. Классификация и основные способы построения солнечных электростанций / О.В. Григораш, И.В. Евтушенко, М.А. Попучиева // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – №124(10). – с. 1-14.
4. Ветро-солнечная станция 0,8/2 кВт [Електронний ресурс] // Alteco. Альтернативная энергетика и экотехнологии [сайт]. – Режим доступу: https://alteco.in.ua/solution/avtonomnoe-jelektrosnabzhenie/vetro-solnechnaja-stancija-0-8-2-kvt-variant-1 (28.03.2019). – Назва з екрану.
5. NASA surface meteorology and solar energy - location [Електронний ресурс] // Atmospheric science data center [сайт]. – Режим доступу: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov . — Назва з екрану.
6. Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций / Г.П. Охоткин // Вестник Чувашского университета. – 2013. – №3. – с. 222-230.
7. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.