

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 620.92

О.В. АНДРОНОВА, В.В. КУРАК
Херсонський національний технічний університет**ПОРІВНЯННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ
СТАНЦІЙ**

Представлено результати порівняння техніко-економічних показників децентралізованої вітроелектричної та фотоелектричної станцій з накопиченням, що призначені для безперебійного електрозабезпечення приватного житлового будинку, розташованого в селищі Дніпряни Херсонської області. Показано, що з економічної точки зору безперебійне електрозабезпечення об'єкту доцільно здійснювати за рахунок децентралізованої фотоелектричної станції.

Ключові слова: вітроелектрична станція, фотоелектрична станція, вітровий режим, сонячна радіація, електрична енергія, „зелений” тариф, період окупності.

Е.В. АНДРОНОВА, В.В. КУРАК
Херсонский национальный технический университет**СРАВНЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЙ**

Представлены результаты сравнения технико-экономических показателей децентрализованной ветроэлектрической и фотоэлектрической станций с накоплением, предназначенных для бесперебойного электрообеспечения частного жилого дома, расположенного в поселке Днепряны Херсонской области. Показано, что с экономической точки зрения бесперебойное электроснабжение объекта целесообразно осуществлять за счет использования фотоэлектрической станции.

Ключевые слова: ветроэлектрическая станция, фотоэлектрическая станция, ветровой режим, солнечная радиация, электрическая энергия, «зеленый» тариф, период окупаемости.

E. V. ANDRONOVA, V. V. KURAK
Kherson National Technical University**COMPARISON OF TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS OF DECENTRALIZED
WIND POWER AND PHOTOVOLTAIC STATIONS**

The results of the comparison of technical and economic parameters of decentralized wind power and photovoltaic stations with accumulation for uninterrupted electrical supply of a private house located in the village of Dnipryany, Kherson region, are presented. It is shown that uninterrupted electrical supply of the object by means of decentralized photovoltaic station is expedient from economic point of view.

Keywords: wind power station, photovoltaic stations, wind conditions, solar radiation, electrical energy, green energy rate, pay-off period.

Постановка проблеми

Останніми роками в енергетичному секторі України спостерігається стійка тенденція до збільшення частки електричної енергії, що виробляється за рахунок використання нетрадиційних джерел. У відповідності до [1], пріоритетними напрямками розвитку нетрадиційної електроенергетики є використання енергії сонця і вітру.

Кліматичний режим Херсонської області є сприятливим для розвитку електрогенерації як з використанням сонячного, так і вітроенергетичного ресурсу: надходження сумарної сонячної радіації за рік на горизонтальну поверхню становить майже 1300 кВт·год / м², а річний потенціал вітру в південних районах області сягає 3000 кВт·год / м² [2]. Це приваблює інвестиції в побудову потужних централізованих фото- та вітроелектричних станцій, що працюють в єдиній енергосистемі України. В той же час, у зв'язку з періодичним та випадковим характером сонячного та вітрового ресурсу, має місце проблема узгодження виробництва та споживання електричної енергії. Ця проблема частково знімається при переході від централізованих до децентралізованих індивідуальних фото- та вітроелектричних

систем порівняно невеликої потужності, в яких реалізовано накопичення надлишку виробленої енергії в електрохімічних акумуляторах.

Завдяки стимулюючій дії „зеленого” тарифу на електричну енергію, вироблену з нетрадиційних джерел, децентралізовані фотоелектричні системи (ФЕС) демонструють високі темпи збільшення встановленої потужності, в той час як індивідуальні вітроелектричні установки (ВЕУ) все ще є одиничними прикладами використання вітрової енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В залежності від способу організації електрозабезпечення споживача децентралізовані електричні станції, що використовують нетрадиційні джерела енергії, можна поділити на автономні, мережеві та мережеві з накопиченням [2,3].

Автономні електричні станції переважно використовуються в районах, де відсутній доступ до ліній загального електропостачання або електрозабезпечення від централізованої лінії є економічно недоцільним [3]. Головними складовими систем такого типу (рис. 1) є генератор електричної енергії 1, в якості якого можуть використовуватись фотоелектричні модулі або вітроелектрична установка, акумуляторна батарея 2 (АКБ), контролер заряду 3 та автономний інвертор 4, що перетворює постійну напругу у змінну. При достатньому надходженні енергетичного ресурсу (сонячна радіація, вітер) до генератора відбувається живлення навантаження 5 та заряджання АКБ. В іншому випадку живлення навантаження відбувається за рахунок енергії, накопиченої в АКБ.

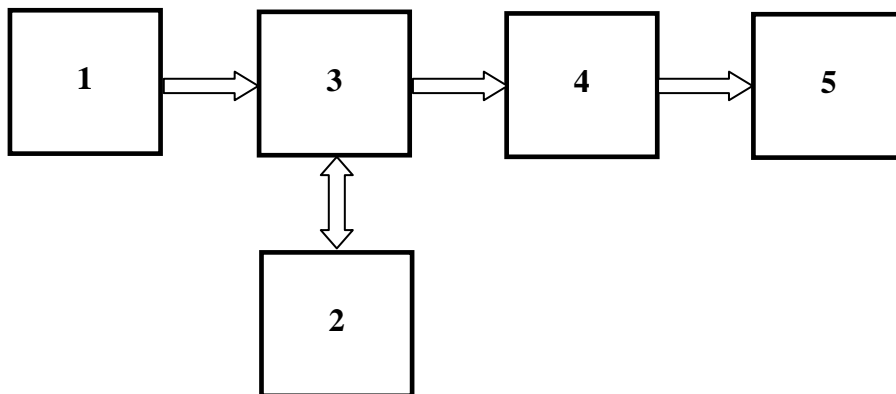


Рис. 1. Блок-схема автономної електричної станції на нетрадиційних джерелах енергії (стрілками показано енергетичні потоки):

1 – генератор; 2 – акумуляторна батарея; 3 – контролер заряду; 4 – автономний інвертор; 5 – навантаження

Незважаючи на порівняну простоту організації електропостачання об'єктів від автономних електростанцій, випадковий характер надходження вітрової енергії і періодичність сонячної інсоляції призводять до необхідності значного збільшення 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. 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.

Зазначені недоліки автономних систем відсутні у мережевих станціях, головними складовими яких є генератор 1, мережевий інвертор 2, що безпосередньо пов'язаний через двонаправлений лічильник 3 із загальною електричною мережею 4 (рис. 2), яка й виконує функцію акумулятора з практично необмеженою ємністю. Такі станції, що не мають АКБ, потребують менших фінансових інвестицій, мінімального обслуговування в процесі експлуатації та характеризуються вищою в порівнянні з автономними системами енергетичною ефективністю [3]. В той же час, головним недоліком мережених станцій є припинення живлення навантаження 5 у випадку відключення загальної електромережі, яка синхронізує мережевий інвертор [4].

За умов нестабільного електропостачання від загальної електромережі доцільною є організація децентралізованої електричної станції за схемою з накопиченням (рис.3). Такі системи поєднують в собі переваги мережевої та автономної станцій, тобто, як і у випадку мережених станцій, надлишок

виробленої електричної енергії постачається в загальну електромережу за „зеленим” тарифом, а нестача компенсується з централізованої лінії електропостачання. В той же час, при відключенні централізованого електропостачання станція з накопиченням здатна забезпечувати автономне живлення навантаження від АКБ [4].

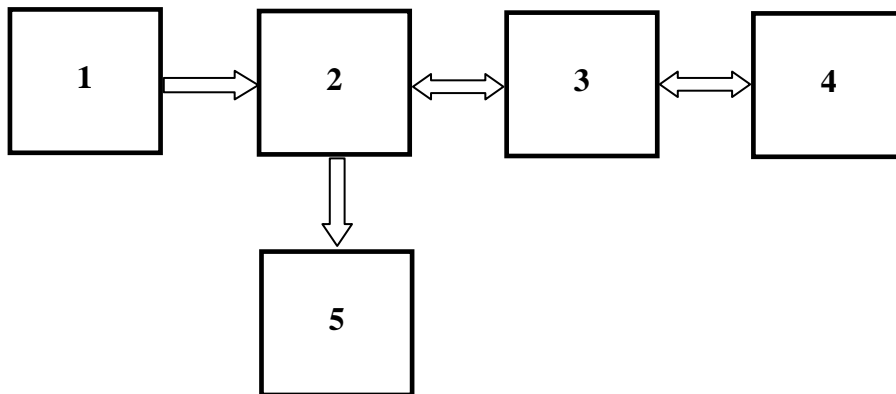


Рис. 2. Блок-схема мережевої електричної станції на нетрадиційних джерелах енергії (стрілками показано енергетичні потоки):
 1 – генератор; 2 – мережений інвертор; 3 – двонаправлений лічильник; 4 – електрична мережа;
 5 – навантаження.

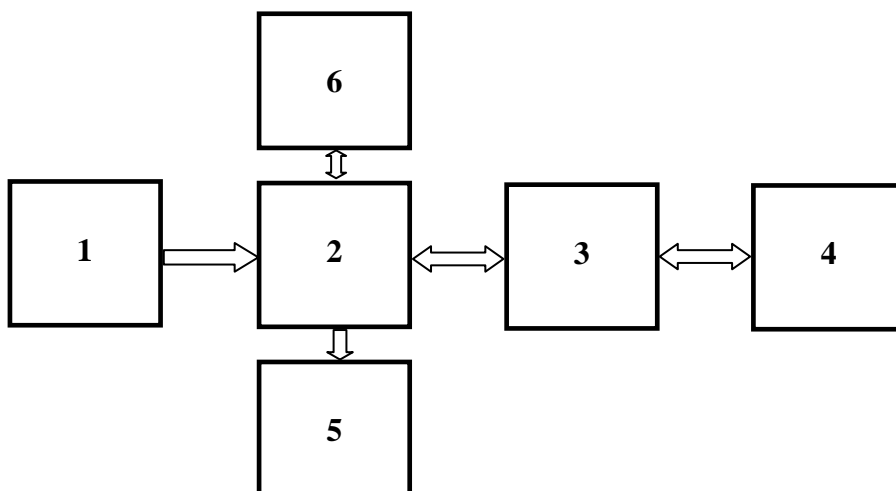


Рис. 3. Блок-схема децентралізованої електричної станції з накопиченням (стрілками показано енергетичні потоки):
 1 – генератор; 2 – мережений інвертор з накопиченням; 3 – двонаправлений лічильник;
 4 – електрична мережа; 5 – навантаження; 6 – акумуляторна батарея

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є порівняння техніко-економічних показників вітроелектричної та фотоелектричної станцій, призначених для безперебійного електрозабезпечення приватного житлового будинку при експлуатації в кліматичних умовах Херсонської області.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості об'єкта дослідження обрано приватний житловий будинок, розташований в селищі Дніпріани Новокаховської міської ради Херсонської області. Особливістю енергозабезпечення обраного об'єкту є періодичне відключення постачання електричної енергії від загальної мережі тривалістю до однієї доби. Отже, доцільним є розгляд можливості безперебійного електропостачання від децентралізованої станції за схемою з накопиченням.

З метою визначення енергоспоживання проведено аудит електричної частини об'єкту. Встановлено, що згідно з договором про надання послуг з електропостачання дозволена споживана

потужність становить 5 кВт. Електронавантаження об'єкту формується побутовими пристроями, що є споживачами змінної напруги, як-то: пральна машина (2200 Вт), праска (2200 Вт), обігрівач (1500 Вт), насос системи водопостачання (1200 Вт), холодильник (250 Вт), телевизор (240 Вт), тощо. Навантаження постійної напруги відсутнє.

На основі аналізу тривалості та періодичності використання побутових пристроїв складено типові графіки навантаження робочого (рис. 4) та вихідного (рис. 5) дня для зимових місяців, на основі яких розраховано споживання електричної енергії об'єктом, що становить 73,7 кВт·год на тиждень при піковому навантаженні 4,5 кВт.

Сумарна ємність АКБ, що потрібна для забезпечення живлення об'єкту в умовах відсутності електропостачання від централізованої мережі та нестачі надходження енергії від нетрадиційного джерела протягом однієї доби, розраховувалась за методикою [5], виходячи з середньодобового споживання електричної енергії, вхідної напруги інвертора, втрат в інверторі при перетворенні постійної напруги в змінну, температурного коефіцієнту ємності та допустимої глибини розряду АКБ. Розрахункове значення сумарної ємності АКБ становить 1253 А·год.

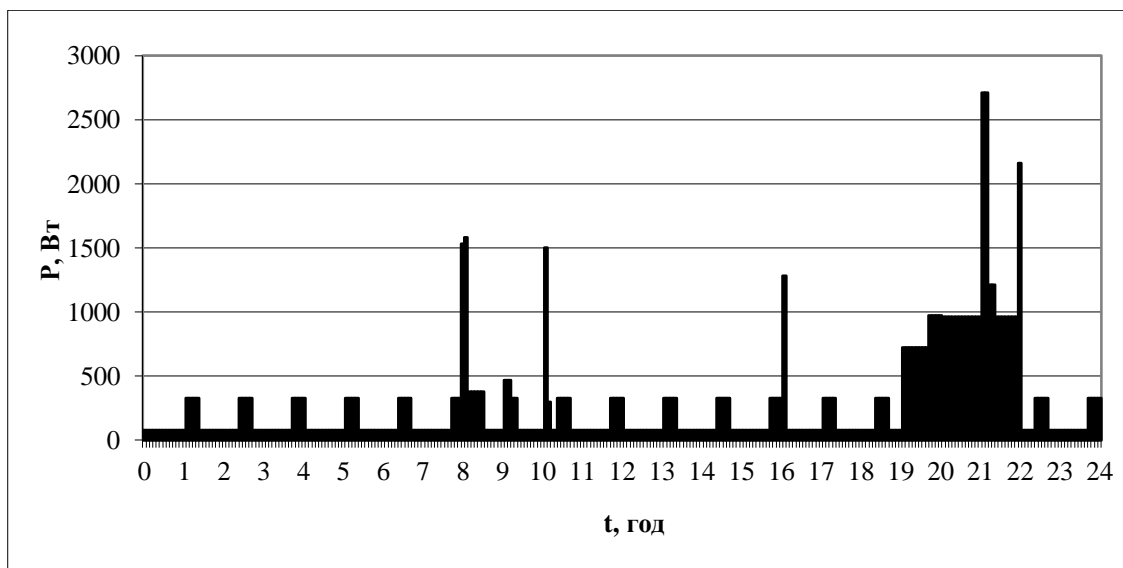


Рис. 4. Типовий графік навантаження робочого дня

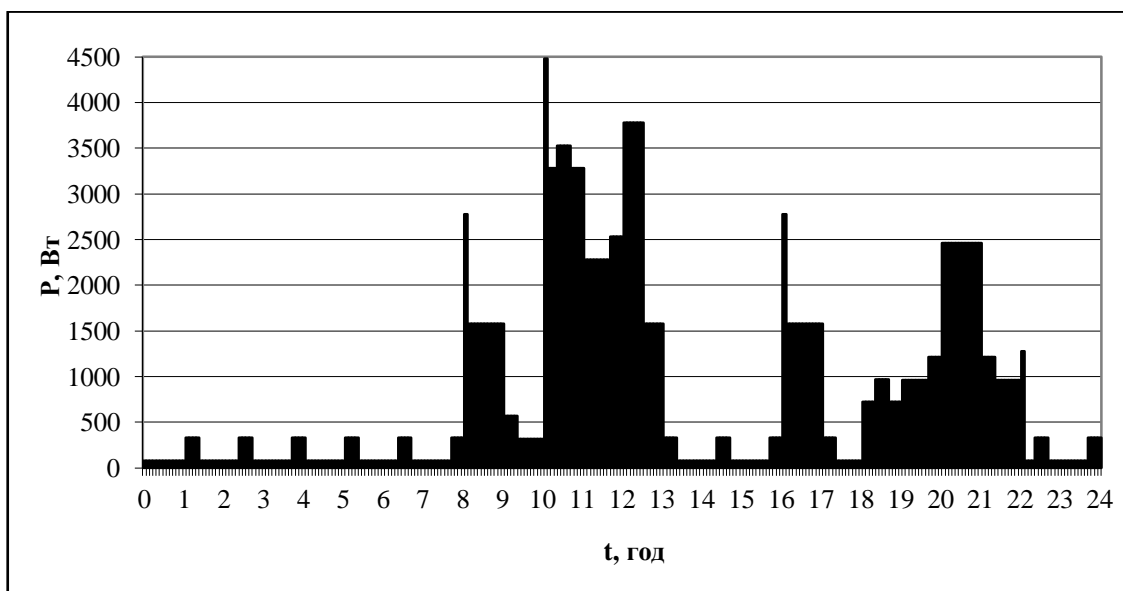


Рис. 5. Типовий графік навантаження вихідного дня

Оскільки в децентралізованих електростанціях з накопиченням АКБ використовується тільки під час режиму автоматичного введення резерву, то доцільно розглянути можливість використання більш дешевих стартерних акумуляторів замість стійких по кількості циклів „заряд – розряд” спеціалізованих АКБ. Отримане значення сумарної ємності АКБ при напрузі інвертора 24 В здатні забезпечити 12

стартерних акумуляторів MUTLU 240 з номінальною ємністю 240 А·год та номінальною напругою 12 В, що з'єднані в батарею з шести паралельних груп по два послідовно з'єднаних акумулятори в кожній групі. Завдяки кальцієвій технології виробництва, дані акумулятори характеризуються меншою схильністю до втрати води, мають тривалий термін експлуатації і збільшену пускову потужність у порівнянні з іншими типами стартерних батарей. Пластини, виготовлені з малосурмянисто-свинцевого і кальцієво-свинцевого сплаву, та сепаратор конвертової модифікації з пористого поліетилену виключають можливість короткого замикання і забезпечують стабільну експлуатацію батареї протягом періоду не менше 5-ти років.

Розрахунок параметрів децентралізованої вітроелектричної станції з накопиченням здійснювався за методикою [6], що базується на використанні даних метеорологічних спостережень за вітровим режимом місцевості, в яких надано повторюваність швидкостей вітру за градаціями. В розрахунок використовується експериментальна робоча характеристика ВЕУ, як залежність потужності установки від швидкості вітру $N_i = N_i(u_i)$, а річне вироблення енергії знаходиться, як сума вироблення енергії за кожною градацією швидкості вітру з урахуванням повторюваності $\Delta\Phi_i$ даного значення швидкості вітрового потоку u_i :

$$E = \sum_{i=1}^n E_i(u_i) = \sum_{i=1}^n N_i(u_i) \cdot \Delta\Phi_i \cdot 8760. \quad (1)$$

При визначенні швидкості вітру для місяця розташування ВЕУ використовували дані з вітрового режиму найближчої метеостанції „Берислав”. Враховувався клас відкритості місцевості та висота осі вітротурбіни.

На основі аналізу пропозиції ринку ВЕУ малої потужності було прийнято до розгляду два варіанти системи електропостачання об'єкту. Перша система базується на горизонтальноосьовій ВЕУ STORM USE номінальною потужністю 3 кВт та максимальною потужністю 4 кВт, робоча характеристика якої наведена на рис. 6 а. Друга система – на основі горизонтально осьової ВЕУ LOW WIND з номінальною потужністю 5 кВт та максимальною потужністю 7 кВт (рис. 6 б). Щогла вітроагрегатів забезпечує розташування осі вітротурбіни на висоті 12 м. Стартова швидкість вітру становить 3 м/с.

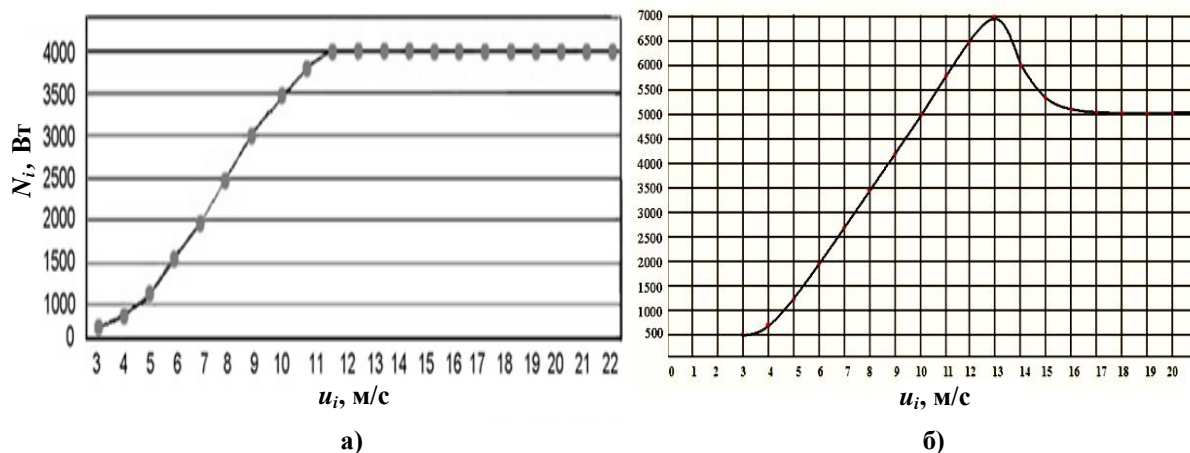


Рис. 6. Робочі характеристики ВЕУ STORM USE 3 кВт (а) та LOW WIND 5кВт (б)

В якості інвертору обрано мережевий інвертор з накопиченням МАП-SIN 48 12 кВт Pго HYBRID, рекомендований виробником ВЕУ. Автономне живлення забезпечують 12 акумуляторних батарей MUTLU 240.

В табл. 1 представлено результати розрахунку вироблення енергії системою безперебійного електрозабезпечення об'єкту на основі ВЕУ потужністю 3 кВт та 5 кВт для швидкостей вітрового потоку, більших за стартову швидкість ВЕУ.

Аналіз даних табл. 1 показує, що вироблення електричної енергії системами на основі ВЕУ з номінальними потужностями 3 кВт та 5 кВт в кожному місяці перевищує середньомісячне електроспоживання об'єкту, що становить 315 кВт·год. Надлишок виробленої енергії продається в загальну електричну мережу за „зеленим” тарифом, який для приватних домогосподарств, що виробляють електричну енергію з енергії вітру при встановленій потужності не більше 30 кВт, становить з 1 липня 2015 року 2,9475 грн /кВт·год (без ПДВ) [7]. В той же час, за обсяг електроенергії до 100

кВт·год включно, спожитий із загальної електромережі, домогосподарство розраховується за тарифом 0,75 грн /кВт·год (без ПДВ), а при обсязі понад 100 кВт·год за місяць – 1,40 грн /кВт·год (без ПДВ).

Таблиця 1

Вироблення електричної енергії системою на основі ВЕУ											
u_i , м/с	4,06	5,86	7,66	9,47	11,27	13,06	14,86	17,11	19,81	23,41	Σ
$\Delta\Phi_i$, %	23,7	14,0	6,1	2,5	2,6	1,3	0,3	0,1	0,1	0	
N_i , Вт	850	1500	2500	3250	4000	4000	4000	4000	4000	4000	
місяць	Вироблення енергії ВЕУ 3 кВт, кВт·год										
1	147,98	175,21	122,76	60,45	116,06	47,62	17,86	0,00	2,98	0,00	690,92
2	127,38	160,27	151,20	76,44	91,39	59,14	18,82	1,34	0,00	0,00	685,98
3	129,01	168,52	146,94	91,88	136,90	68,45	23,81	0,89	0,00	0,00	766,39
4	135,86	165,24	118,80	56,16	97,92	37,44	8,64	0,00	0,00	0,00	620,06
5	160,63	152,89	124,62	53,20	71,42	26,78	8,93	0,00	0,00	0,00	598,47
6	147,49	140,40	86,40	46,80	43,20	5,76	5,76	0,00	0,00	0,00	475,81
7	158,73	148,43	96,72	50,78	35,71	20,83	2,98	0,00	0,00	0,00	514,18
8	160,00	129,46	91,14	48,36	32,74	11,90	2,98	0,00	0,00	0,00	476,57
9	137,70	115,56	70,20	42,12	31,68	14,40	2,88	0,00	0,00	0,00	414,54
10	153,04	148,43	107,88	45,94	68,45	26,78	5,95	0,00	0,00	0,00	556,47
11	149,94	154,44	100,80	60,84	80,64	54,72	1,44	2,88	0,00	0,00	605,70
12	156,84	179,68	128,34	87,05	107,14	89,28	8,93	0,00	0,00	0,00	757,24
За рік, кВт·год											7193,71
місяць	Вироблення енергії ВЕУ 5 кВт, кВт·год										
1	139,28	210,25	157,13	83,70	179,90	82,73	24,33	0,00	3,72	0,00	882,04
2	119,88	192,33	193,54	105,84	141,66	102,75	25,64	1,68	0,00	0,00	883,31
3	121,42	202,22	188,08	127,22	212,19	118,93	32,44	1,12	0,00	0,00	1003,62
4	127,87	198,29	152,06	77,76	151,78	65,05	11,77	0,00	0,00	0,00	784,58
5	151,18	183,47	159,51	73,66	110,71	46,54	12,16	0,00	0,00	0,00	737,23
6	138,82	168,48	110,59	64,80	66,96	10,01	7,85	0,00	0,00	0,00	567,50
7	149,40	178,11	123,80	70,31	55,35	36,20	4,05	0,00	0,00	0,00	617,22
8	150,59	155,35	116,66	66,96	50,74	20,68	4,05	0,00	0,00	0,00	565,03
9	129,60	138,67	89,86	58,32	49,10	25,02	3,92	0,00	0,00	0,00	494,50
10	144,04	178,11	138,09	63,61	106,09	46,54	8,11	0,00	0,00	0,00	684,59
11	141,12	185,33	129,02	84,24	124,99	95,08	1,96	3,60	0,00	0,00	765,34
12	147,61	215,61	164,28	120,53	166,06	155,12	12,16	0,00	0,00	0,00	981,37
За рік, кВт·год											8998,29

Оцінку економічної доцільності організації безперебійного електрозабезпечення об'єкту від децентралізованої станції з накопиченням здійснювали на основі розрахунку періоду окупності:

$$T = \frac{K + P_{fc} \cdot N_{fc}}{D - E}, \quad (2)$$

де K - капітальні витрати в перший рік роботи системи; D - доходи від продажу електричної енергії в мережу та заміщення споживання енергії з мережі за один рік роботи системи; E - експлуатаційні витрати на обслуговування і ремонтні роботи протягом року; P_{fc} - витрати на капітальні ремонти з заміною АКБ; N_{fc} - кількість капітальних ремонтів протягом періоду експлуатації системи.

Техніко-економічні показники систем на основі ВЕУ 3 кВт та 5 кВт станом на липень 2017 р. наведено в табл. 2.

Аналіз даних табл. 2 показує, що період окупності децентралізованих систем на основі ВЕУ як з номінальною потужністю 3 кВт, так і 5 кВт, є більшим за термін експлуатації ВЕУ, який для установок малої потужності не перевищує 20 років. Це вказує на економічну недоцільність організації децентралізованої системи безперебійного електропостачання даного об'єкту на основі генераторних потужностей, що використовують енергію вітрового потоку. У зв'язку з цим розглянуто можливість

використання енергії сонячного випромінювання для безперебійного електрозабезпечення об'єкту.

Таблиця 2

Техніко-економічні показники децентралізованої електричної станції з накопиченням на основі ВЕУ

Потужність ВЕУ	Вироблення електроенергії, кВт·год / рік	Продаж енергії в мережу, кВт·год / рік	К, тис. грн	Д, тис. грн. / рік	Т, роки
3 кВт	7193,7	3380,3	408,696	17,374	27,2
5 кВт	8998,3	5184,3	527,906	23,754	26,4

Розрахунок децентралізованої ФЕС з накопиченням виконувався за методикою [5] за місяцем з найменшою забезпеченістю сонячним енергетичним ресурсом. На основі аналізу метеорологічних даних [8] визначено надходження сонячної радіації на поверхню сонячних модулів, що розташовуються на південному скаті покрівлі об'єкту під кутом 45°.

Встановлено, що безперебійне електропостачання об'єкту здатна забезпечити децентралізована ФЕС, до складу якої входять 34 фотоелектричні панелі на основі полікристалічного кремнію АВі-Solar CL-P60260-D номінальною потужністю 260 Вт кожна, мережений інвертор з накопиченням НТ 5К АВІ-SOLAR номінальною потужністю 5 кВт та 12 акумуляторних батарей MUTLU 240. Розподіл вироблення електричної енергії за місяцями для даної системи наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вироблення електричної енергії децентралізованою ФЕС з накопиченням

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	За рік
Енергія, кВт·год	466,3	621,6	828,5	985,8	1186,2	1099,7	1215,6	1190,7	1009,9	787,8	462,2	378,1	10232,5

Оскільки вироблення електричної енергії ФЕС перевищує середньомісячне споживання об'єкту, то надлишок енергії доцільно продавати в загальну електричну мережу за „зеленим” тарифом, який для приватних домогосподарств, що виробляють електричну енергію з енергії сонячного випромінювання при встановленій потужності не більше 30 кВт, становить з 1 січня 2017 року 4,585 грн /кВт·год (без ПДВ) [7]. Техніко-економічні показники ФЕС станом на липень 2017 р. наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Техніко-економічні показники децентралізованої ФЕС з накопиченням

Встановлена потужність	Вироблення електроенергії, кВт·год / рік	Продаж енергії в мережу, кВт·год / рік	К, тис. грн	Д, тис. грн. / рік	Т, роки
5 кВт	10232,5	6450,5	442,797	40,908	14,8

Як показують дані табл. 4, період окупності ФЕС становить 14,5 років, що значно менше терміну експлуатації основного обладнання станції, як-то фотоелектричних панелей (30 років) та інвертора (25 років). Таким чином, забезпечення безперебійного електропостачання даного об'єкту від децентралізованої ФЕС з накопиченням є економічно доцільним.

Висновки

Порівняння техніко-економічних показників децентралізованих електричних станцій з накопиченням на основі ВЕУ та фотоелектричних систем показало, що з економічної точки зору безперебійне електрозабезпечення приватного житлового будинку, розташованого в селищі Дніпriansької області, доцільно здійснювати за рахунок децентралізованої ФЕС, яка при співвимірних капітальних вкладеннях забезпечує вдвічі більший дохід від продажу виробленої енергії в загальну електромережу, аніж аналогічна система на основі ВЕУ. Це обумовлено як більшим річним виробленням електричної енергії децентралізованою ФЕС за рахунок надходження сонячної радіації, так і вищим у 1,5 рази „зеленим” тарифом на електричну енергію, отриману від фотоелектричних систем, в порівнянні зі станціями на основі ВЕУ. При діючому „зеленому” тарифі на електроенергію, що виробляється ВЕУ, вітровий потенціал місця розташування об'єкту не здатен забезпечити економічну ефективність децентралізованої електричної станції.

Список використаної літератури

1. Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2017 роки [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. Законодавство України [сайт]. – Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-п> (01.12.2017)
2. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / С.О. Кудря. – К.: НТУУ „КПІ”, 2012. – 492 с.
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. Инверторы для фотоэлектрических систем и их типы [Електронний ресурс] // AV PRO [сайт]. – Режим доступу: <http://av-pro.com.ua/node/2963>
5. Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций / Г.П. Охоткин // Вестник Чувашского университета. – 2013. – №3. – с. 222-230.
6. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
7. Порядок продажу, обліку та розрахунків за вироблену електричну енергію з альтернативних джерел енергії об'єктами електроенергетики (генеруючи ми установками) приватних домогосподарств [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. Законодавство України [сайт]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0539-14/paran12#n12> (01.12.2017).
8. 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>