

УДК.621.311.245

В.В. Шевченко, С.Ю. Книш, Є.О. Занихайло

Українська інженерно-педагогічна академія

ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З РІЗНИМИ ТИПАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Розглянуто вітроенергетичні установки з різними типами електричних генераторів, проведено економічне порівняння ВЕУ за економічними та технічними показниками за допомогою математичного апарату прийняття рішень – теорії ігор.

Ключові слова: вітроенергетичні установки, тип генератора, теорія ігор, економічний ефект.

Вступ

Постановка проблеми. Проблеми електроенергетичного комплексу вимагають, як збільшення встановлених потужностей, так і зниження втрат у вже працюючих установках і системах. Одним з найпотужніших нетрадиційних джерел енергії є енергія вітру.

Тому на даний момент актуальним є аналіз вітроенергетичних установок (ВЕУ) і розробка технічних рішень, направлених на підвищення ККД ВЕУ і зниження порогу мінімальної швидкості вітру для номінального режиму роботи ВЕУ і, тим самим, розширення території для можливого їх використання.

Застосування систематизованих даних по використанню різного типу електричних генераторів змінного струму у ВЕУ різної потужності залежно від умов експлуатації і роду навантаження дозволить максимальним чином використовувати потенціал вітрового потоку та ВЕУ і, тим самим, підвищити економічний ефект від використання нетрадиційної енергетики.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Аналіз літературних джерел різного типу, технічні дані, опубліковані в прайсах технічних компаній, дозволяють зробити висновок, що перспективне впровадження поновлюваних, екологічно чистих джерел енергії [1-3]. Економічне порівняння буде проводитися по різних параметрах у ряді інтервалів ВЕУ по активній потужності. Матеріали, представлені в статті, базуються на відкритих публікаціях по нетрадиційній енергетиці, на даних досліджень, представлених в матеріалах конференцій і в наукових журналах. Дане порівняння є актуальним в даний час, оскільки до теперішнього часу не було робіт по вибору типу генератора для ВЕУ з точки зору технічних і економічних параметрів одночасно.

Мета статті. Систематизувати дані про існуючі ВЕУ, запропонувати використовувати різні типи електричних генераторів для нетрадиційної електроенергетики, розглянути перспективу засто-

сування в якості генеруючих елементів ВЕУ нових типів машин для підвищення їх енергетичних параметрів. Визначити оптимальне комплектування ВЕУ з урахуванням економічних витрат на виготовлення ВЕУ з різними типами електричних генераторів. Проаналізувати можливості підвищення рентабельності ВЕУ при їх конструюванні і реконструкції, встановити можливість впровадження нових рішень по виготовленню, установці і експлуатації ВЕУ, що вплине на їх надійність, економічність, техніко-енергетичні параметри в цілому.

Основні матеріали досліджень

Розглянемо параметри економічного порівняння ВЕУ з різними типами електричних генераторів по інтервалах номінальної потужності ВЕУ. В залежності від типу генератора розглянемо ККД, (%), надійність (в.о.), витрати на обслуговування, (тис. грн.), витрати на монтаж, (тис. грн.), вартість генератора і змісту гондоли, (тис. грн.), вартість ВЕУ, (тис. грн.)

Нетрадиційна енергетика, зокрема, вітроенергетика, не може замінити класичні теплові електростанції, тобто вирішити проблеми енергопостачання країни. Для України ВЕУ мають невелику вагу (біля 5 %), в Європі – від 20 % до 80 % з постійною тенденцією наростання встановлених потужностей, [1, 2].

Найбільш перспективне використання в нашій країні ВЕУ мають для автономного встановлення (фермерські господарства, кордони лісників, пасіки, дачі, невеликі гірські та степові селища).

Для ухвалення рішення по вибору оптимального типу електричного генератора для ВЕУ з урахуванням межової потужності генераторів змінного струму на різних інтервалах потужності ВЕУ і для вживання в різних автономних і глобальних електричних мережах використовуватиметься такий математичний апарат для ухвалення оптимального рішення, як теорія ігор.

Тобто проведемо розрахунки вказаних вище параметрів з використанням математичного апарату теорії ігор.

Для розрахунку використовувалися такі критерії: Вальда, Лапласа, Гурвіца, Севіджа, критерій додатків, критерій нестримного оптимізму.

Критерій Вальда:

$$r_{ij} = \max_i \min_j e_{ij}.$$

Правило вибору рішення відповідно до критерію Вальда (мінімаксного критерію (ММ - критерію)) можна інтерпретувати таким чином: матриця рішень доповнюється ще одним стовпцем з найменших результатів e_{ir} кожного рядка. Необхідно вибрати ті варіанти в рядках яких мають найбільше значення e_{ir} цього стовпця.

Вибрані т.ч. варіанти повністю виключають ризик. Це означає, що сприймане рішення не може мати гірший результат, ніж той, на який він орієнтується. Ця властивість дозволяє вважати ММ - критерій одним з фундаментальних.

Дані, необхідні для ухвалення рішення в умові невизначеності, зазвичай задаються у формі матриці, рядки якої відповідають можливим діям, а стовпці можливим недостаткам системи.

Під результатом вирішення $e_{ij} = e(E_i; F_j)$ тут можна розуміти оцінку, відповідну варіанту E_i і умовам F_j і що характеризують прибуток, корисність або надійність. Зазвичай ми називатимемо такий результат корисністю рішення.

Тоді сімейство (матриця) рішень має :

	F1	F2	...	Fn
E1	e11	e12	...	e1n
E2	e21	e22	...	e2n
...
Em	em1	em2	...	emn

Щоб прийти до однозначного і, по можливості, найвигіднішого варіанту рішення необхідно ввести оцінку (цільову) функцію. При цьому матриця рішень $\| e_{ij} \|$ зводиться до одного стовпця. Кожному варіанту E_i приписується деякий результат e_{ir} , що характеризує в цілому всі наслідки цього рішення. Такий результат ми надалі будемо позначати тим же символом e_{ir} .

Розглянемо другий критерій - критерій Лапласа:

$$r_{ij} = \max_i \frac{1}{n} \sum_j e_{ij}.$$

Критерій Гурвіца:

Прагнучи зайняти найбільш урівноважену позицію, Гурвіц передбачив оцінку функцію, яка знаходиться десь між точкою зору крайнього оптимізму і крайнього песимізму:

$$r_{ij} = \max_i \left[(1-C) \max_i e_{ij} + C \min_j e_{ij} \right].$$

де C - ваговий множник, $C = 1/2$

Правило вибору згідно критерієм Гурвіца, формується таким чином:

1) матриця рішень $\| e_{ij} \|$ доповнюється стовпцем, що містить середнє зважене найменшого і найбільшого результатів для кожного рядка. Вибираються лише ті варіанти, в рядках яких коштують найбільші елементи e_{ir} цього стовпця;

2) при $C = 1$ критерій Гурвіца перетворюється на ММ-критерій. При $C = 0$ він перетворюється на критерій «азартного гравця». Тобто ми стаємо на точку зору «азартного гравця», що робить ставку на те, що «випаде» найвигідніший випадок.

У технічних застосуваннях складно вибрати ваговий множник, оскільки важко знайти кількісну характеристику для тих доль оптимізму і песимізму, які присутні при ухваленні рішення. Тому найчастіше $C = 1/2$.

Критерій Севіджа (для матриці ризику):

$$r_{ij} = \min_i \max_j (1 - e_{ij}):$$

$$a_{ij} = \max_j (1 - e_{ij}).$$

Величину a_{ij} можна трактувати як максимальний додатковий виграш, який досягається, якщо в стані F_j замість варіанту E_i вибрати інший, оптимальний варіант для цього зовнішнього достатку. Величину a_{ij} можна інтерпретувати і як втрати, які виникають в стані F_j при заміні оптимального для нього варіанту на варіант E_i . У останньому випадку e_{ir} є максимально можливими (по всіх зовнішніх достатках $F_{j, j = \overline{1, n}}$) втрати в разі вибору варіанту E_i .

Відповідне критерію Севіджа, правило вибору тепер трактується так:

1) кожен елемент матриці рішень $\| e_{ij} \|$ віднімається з найбільшого результату « $\max e_{ij}$ » відповідного стовпця.

2) різниці a_{ij} утворюють матрицю залишків $\| e_{ij} \|$. Ця матриця поповнюється стовпцем найбільших різниць e_{ir} . Вибирають ті варіанти, в рядках яких є найменше для цього стовпця значення.

Вимоги, що пред'являються до ситуації, в якій приймається рішення, збігаються з вимогою до ММ - критерію.

Критерій додатків:

$$r_{ij} = \max_i \prod_j e_{ij}$$

Правило вибору в цьому випадку формулюється так :

Матриця рішень доповнюється новим стовпцем, що містить всіх результатів кожного рядка.

Вибираються ті варіанти, в рядках яких зна-

ходяться найбільші значення цього стовпця.

Критерій нестримного оптимізму («азартного гравця»):

$$r_{ij} = \max_i \max_j e_{ij}$$

e_{ij} – елемент розрахункової матриці (табл. 2);

i – строки розрахункової матриці;

j – стовбці розрахункової матриці

Дані для подальшого економічного порівняння приведені в табл. 1.

Початковими даними для розрахунку прийнята табл. 2.

Результати розрахунків для різних типів генераторів приведені в табл. 3.

Розглянуте АГ з к.з.ротором, синхронний генератор з постійними магнітами, синхронний генератор електромагнітним збудженням, асинхронізований синхронний генератор (АСГ).

Таблиця 1

Параметри економічного порівняння ВЕУ з різними типами електричних генераторів по інтервалах номінальної потужності ВЕУ.

Тип генератора	ККД, %	Надійність, в.о.	Витрати на обслуговування, тис. грн.	Витрати на монтаж, тис. грн.	Вартість генератора і вмісту гондоли, тис. грн.	Вартість ВЕУ тис. грн.
До 10 кВт						
АГ с к.з. ротором	70	0,82	37,8	50,4	84,0	251,9
СГПМ	93	0,93	24,2	48,4	84,8	242,2
СГ с е.м. збудженням	82	0,88	45,5	50,6	95,6	253,0
АСГ	83	0,88	45,9	51,0	97,6	255,0
До 100 кВт						
АГ с к.з. ротором	75	0,82	387,3	516,4	900,0	2582,1
СГПМ	90	0,93	247,2	494,4	952,0	2472,1
СГ с е.м. збудженням	86	0,88	468,0	520,0	1072,0	2600,0
АСГ	87	0,88	469,8	522,0	1082,0	2610,0
До 1 МВт						
АГ с к.з. ротором	80	0,82	842,4	1684,8	2901,0	8424,0
СГПМ	-	-	-	-	-	-
СГ с е.м. збудженням	85	0,88	1588,3	1764,8	3676,1	8824,0
АСГ	86	0,88	1606,3	1784,8	3776,1	8924,0
Понад 1 МВт						
АГ с к.з. ротором	96	0,82	1579,5	3159,0	5641,0	15795,0
СГПМ	-	-	-	-	-	-
СГ с е.м. збудженням	0,97	0,88	2916,0	3240,0	6750,0	16200,0
АСГ	0,98	0,88	2934,0	3260,0	6850,0	16300,0

Таблиця 2

Вартісні і енергетичні показники ВЕУ у відносних одиницях

Тип генератора	ККД, в.о.	Надійність, в.о.	Витрати на обслуговування, в.о.	Витрати на монтаж, в.о.	Вартість генератора і вмісту гондоли, в.о.	Вартість ВЕУ в.о.
До 10 кВт						
АГ с к.з. ротором	0,70	0,82	0,644	0,481	0,288	0,096
СГПМ	0,93	0,93	1,0	0,5	0,286	0,1
СГ с е.м. збудженням	0,82	0,88	0,532	0,479	0,256	0,096
АСГ	0,83	0,88	0,528	0,475	0,248	0,095

Тип генератора	ККД, в.о.	Надійність, в.о.	Витрати на обслуговування, в.о.	Витрати на монтаж, в.о.	Вартість генератора і вмісту гондоли, в.о.	Вартість ВЕУ в.о.
До 100 кВт						
АГ с к.з. ротором	0,75	0,82	0,638	0,479	0,275	0,096
СГПМ	0,9	0,93	1	0,5	0,26	0,1
СГ с е.м. збудженням	0,86	0,88	0,528	0,475	0,23	0,095
АСГ	0,87	0,88	0,526	0,473	0,228	0,095
До 1 МВт						
АГ с к.з. ротором	0,8	0,82	1	0,5	0,29	0,099
СГПМ	-	-	-	-	-	-
СГ с е.м. збудженням	0,85	0,88	0,53	0,477	0,229	0,095
АСГ	0,86	0,88	0,524	0,472	0,222	0,094
Понад 1 МВт						
АГ с к.з. ротором	0,96	0,82	1	0,5	0,28	0,1
СГПМ	-	-	-	-	-	-
СГ с е.м. збудженням	0,97	0,88	0,54	0,487	0,234	0,0975
АСГ	0,98	0,88	0,537	0,488	0,229	0,0968

Таблиця 3

Результати економічного розрахунку по вибору типу електричного генератора для ВЕУ

Тип генератора	Критерій Вальда	Критерій Лапаса	Критерій Гурвіца	Критерій Севіджа	Критерій додатків	Критерій нестримного оптимізму
До 10 кВт						
АГ с к.з. ротором	0,096	0,505	0,458	0,904	0,0049	0,82
СГПМ	0,100	0,624	0,550	0,900	0,0124	1,00
СГ с е.м. збудженням	0,096	0,511	0,488	0,904	0,0045	0,88
АСГ	0,095	0,509	0,488	0,905	0,0043	0,88
До 100 кВт						
АГ с к.з. ротором	0,096	0,510	0,458	0,904	0,0050	0,82
СГПМ	0,100	0,615	0,550	0,900	0,0109	1,00
СГ с е.м. збудженням	0,095	0,511	0,488	0,905	0,0042	0,88
АСГ	0,095	0,512	0,488	0,905	0,0041	0,88
До 1 МВт						
АГ с к.з. ротором	0,099	0,585	0,550	0,901	0,0094	1,00
СГПМ	-	-	-	-	-	-
СГ с е.м. збудженням	0,095	0,510	0,488	0,905	0,0041	0,88
АСГ	0,094	0,509	0,487	0,906	0,0039	0,88
Понад 1 МВт						
АГ с к.з. ротором	0,100	0,610	0,550	0,900	0,0110	1,00
СГПМ	-	-	-	-	-	-
СГ с е.м. збудженням	0,098	0,535	0,534	0,902	0,0051	0,97
АСГ	0,097	0,535	0,538	0,903	0,0050	0,98

Висновки

Після проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

1. На інтервалі потужності $0 \leq P_{em} \leq 100$ кВт, для виробництва електроенергії, тобто як генеруючий елемент, який з точки зору технічних, так з урахуванням економічних показників доцільніше встановлювати синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ), тобто генератори з мають магнітоелектричним збудженням.

2. При потужності понад 100 кВт для ВЕУ краще вибирати асинхронні генератори (АГ) з к.з. ротором.

3. Одним із способів підвищення ефективності використання АГ з к.з. ротором може послужити вживання спецмашин, які доповнюються збудженням від постійних магнітів, які додатково вносяться в конструкцію.

Це дозволить збільшити ККД самого генератора, зменшити ємність необхідних для АГ з к.з. ротором конденсаторних батарей – джерел реактивної енергії.

4. Ефективність використання класичних АГ з к.з. ротором зростає при роботі на енергосистему. У цих умовах АГ не потребують додаткових пристроїв забезпечення постійності енергетичних параметрів. Також із зростанням потужності АГ істотно зростає його ККД.

Тому при його простоті і надійності він стає перспективним для установки на ВЕУ для роботи в єдиній енергосистемі, починаючи з потужності 200 кВт і більше.

5. При потужності ВЕУ більш ніж 1 МВт рентабельно використовувати асинхронізовані синхронні генератори.

Хоча в настоящее время в Украине нет налаженного производства асинхронизированных синхронных генераторов, мировой опыт показывает, что это направление перспективно и заслуживает дальнейших исследований.

Список літератури

1. Шевченко В.В. Исходные положения для построения модели ветроэнергетической установки при решении проблем промышленной энергетики / В.В. Шевченко, Л.Н. Омельченко, И.Я. Лизан // Наукові праці ДонНТУ, серія «Обчислювальна техніка та автоматизація», вип. 19 (171). – Донецьк, 2010. – С. 65 – 69

2. Шевченко В.В. Проблемы и основные направления развития электроэнергетики в Украине / В.В. Шевченко // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 7(287). – С. 11 – 16

3. Алексеев Б.А. Международная конференция по ветроэнергетике (Фессалоники, Македония, Греция, 10-14 октября 1994 г.) / Б.А. Алексеев // Электрические станции. – 1996. – № 2. – С. 62 – 71.

4. Алиев И.И. Асинхронный генератор с гарантированным самовозбуждением / И.И. Алиев // Электричество. – 1997. – № 7. – С. 54-59.

5. Балагуров В.А., Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 290 с.

6. Афанасьев М.Ю. Исследование операций в экономике: модели, задачи, решения: учеб. пособие/ М.Ю. Афанасьев, Б.П. Суворов. — М.: ИНФРА-М, 2003. — 444 с.

Надійшла до редколегії 25.03.2011

Рецензент: д-р техн. наук, доц. Г.І. Канюк, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С РАЗНЫМИ ТИПАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В.В. Шевченко, С.Ю. Кныш, Е.А. Заныхайло

Рассмотрены ветроэнергетические установки с разными типами электрических генераторов, проведены экономическое сравнение ВЭУ по экономическим и техническим показателям с помощью математического аппарата принятия решений - теории игр.

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, тип генератора, теория игр, экономический эффект.

**ECONOMIC COMPARISON OF WINDS POWER PLANTS
WITH DIFFERENT TYPES
OF ELECTRIC ALTERNATORS**

V.V. Shevchenko, S.U. Knush, E.A. Zanuhyaylo

Winds power plants are considered with the different types of electric generators, conducted economic comparison of winds power plants on economic and technical indicators by the mathematical vehicle of decision-making are game theories.

Keywords: winds power plants, type of generator, game theory, economic effect.