

УДК 621.548

**В.М.Головко**, докт.техн.наук, **В.П.Коханевич**, канд.техн.наук, **М.О.Шихайлов**,  
**Т.В.Зінченко** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ), **З.К.Сандовал** (НТУУ "КПІ", Київ)

### **Аналіз компоновки автономних вітроелектричних систем з асинхронним генератором**

*Проаналізовано структурні схеми автономних вітроелектричних систем з асинхронним генератором і встановлено, що при їх розробці необхідно орієнтуватися на схеми, які мають можливість підвищити коефіцієнт заповнення графіка навантаження споживача.*

**Ключові слова:** вітроенергетика, вітроелектрична установка, асинхронний генератор.

*Проанализированы структурные схемы автономных ветроэлектрических систем с асинхронным генератором и установлено, что при их разработке необходимо ориентироваться на схемы, которые имеют возможность повысить коэффициент заполнения графика нагрузки потребителя.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветроэлектрическая установка, асинхронный генератор.

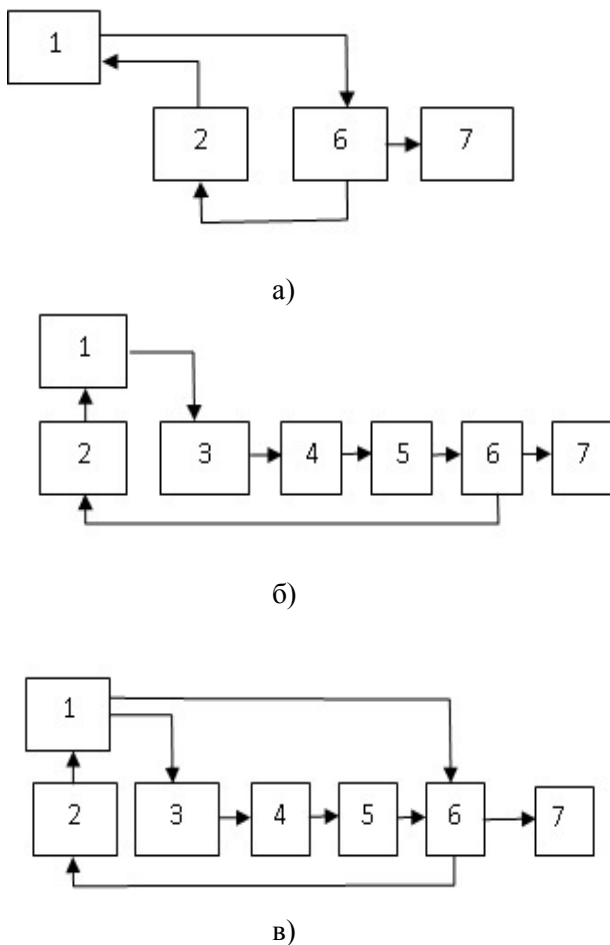
Асинхронний генератор має ряд переваг, що полягають у простоті конструкції, високій надійності в експлуатації, нескладних схемах під'єднання на паралельну роботу з мережею та іншими джерелами електроенергії. Крім того, як генератор може застосовуватись асинхронний двигун. Асинхронний генератор є механічно міцною машиною, за якою потрібен мінімальний догляд. При короткому замиканні ударний струм швидко затухає, що не викликає перегрівання та руйнування обмоток. При перевантаженні генератор швидко втрачає збудження (і навіть розмагнічується), що також запобігає виходу його з ладу. Ще однією перевагою асинхронного генератора є те, що напруга на його виході має сталу частоту при зміні частоти обертів ротора в деяких межах, і це надає йому більшої стійкості при роботі на мережу, ніж при застосуванні синхронних машин.

До недоліків відносять менший рівень вироблення енергії, ніж синхронними машинами. Це пов'язано з меншим коефіцієнтом потужності, що обумовлено більшими струмами намагнічування (вони пропорційні квадрату напруги). Крім того, робота асинхронного генератора як автономного джерела живлення можлива тільки при умові подачі в обмотку статора реактивної потужності, наприклад, від батареї конденсаторів, що

під'єднані до кожної фази. При активному навантаженні реактивна потужність, що надходить від конденсаторів, повинна дорівнювати реактивній потужності генератора (за величиною, що необхідна для створення магнітного потоку). При активно-індуктивному навантаженні реактивна потужність від конденсаторів також повинна покривати реактивну потужність навантаження. Така величина ємності конденсаторів значно здорожує вартість вітроустановки, що є недоліком.

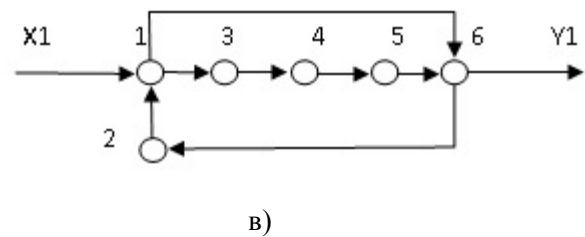
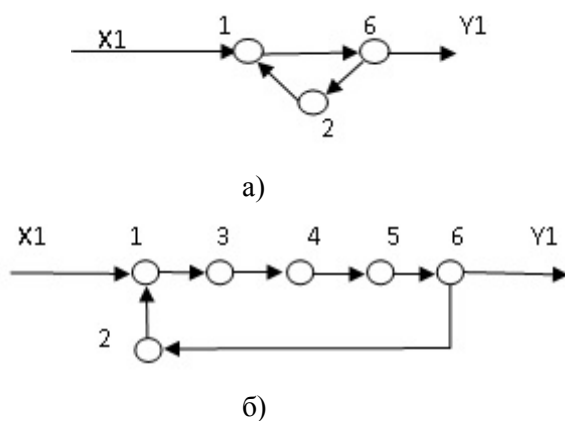
Метою роботи є аналіз структурних схем автономної вітроелектричної системи з асинхронним генератором та визначення залежності інтенсивності навантаження каналу електрозабезпечення споживача від ступеня його пропускної здатності.

Автономна вітроелектрична система в загальному випадку складається з вітроелектричної установки, блоку керування збудженням, блоку акумуляторних батарей із контролером зарядження, інвертуючого обладнання та блоку синхронізації вихідних параметрів системи з потребами споживача. В залежності від їх компоновки можуть створюватися структурні схеми, що працюють окремо або паралельно на споживача. Розглянемо варіанти структурних схем, що утворюються при такому наборі компонентів (рис. 1).



**Рис. 1. Структурні схеми автономної вітроенергетичної системи з асинхронним генератором:** 1 – вітроелектро-установка; 2 – конденсаторна батарея; 3 – контролер; 4 – акумуляторний блок; 5 – інвертор; 6 – синхронізатор; 7 – споживач.

Алгоритм функціонування даної системи як сукупність залежностей, що визначає необхідне виконання заданого процесу забезпечення енергією споживача, розглянемо за допомогою орієнтовних графів даних структур (рис. 2).



**Рис. 2. Графи автономної вітроенергетичної системи з асинхронним генератором.**

Вузлами графа є структурні складові системи. Ребра – потоки енергії між вузлами.  $XI$  – потік надходження енергії вітру;  $YI$  – потік потреб енергії до споживача.

У даних схем головного зворотного зв'язку принципово не може бути, оскільки надходження вітру не може бути керованим. Можливе обмеження виробітку електроенергії у разі відсутності споживача або акумулюючих систем.

Перетворення потоків енергії в системі при забезпеченні потреб споживача проходить:

- за схемою а):  
 $XI \rightarrow k_1 XI$  за  $XI > YI$ ,  
 $YI \rightarrow 0$  за  $XI \rightarrow 0$ .

Здійснюється корекція за величиною реактивної потужності при змінах  $XI$  та  $YI$  як окремо, так і сумісно.

- за схемою б):  
 $XI \rightarrow k_1 k_3 k_4 k_5 XI$  за  $XI > YI$ .

У випадку  $XI \rightarrow 0$  забезпечення споживача проходить за рахунок накопиченої енергії у вузлі 4 за умови, що  $k_4 k_5 XI > YI$ . Здійснення (за необхідністю) корекції величини реактивної потужності в системі проводить вузол 6.

- за схемою в):  
 $XI \rightarrow k_1 XI$  за  $XI > YI$ ,  
 $XI \rightarrow k_4 k_5 XI$  за  $YI > XI$  або  $XI \rightarrow 0$ .

Забезпечення споживача проходить за двома взаємопов'язаними каналами. Перший є варіантом схеми а. Другий – варіантом схеми б. За величини  $XI \gg YI$  йде забезпечення споживача та зарядження акумуляторного блоку. За  $YI > XI$  забезпечення проходить за рахунок енергії, накопиченої акумулятором. Вибір каналів, а також глибини корекції проводиться через вузол синхронізації 6.

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  – коефіцієнти узгодження вузлів графа, відповідно вітроенергоустановки, блоку конденсаторів, контролера, акумулюючого блоку, інвертора, кожен з яких менше 1.

В енергетичному плані найменші втрати має схема *a*, оскільки складається з найменшої кількості вузлів. Вона може бути застосована для споживачів, що не висувають жорстких технологічних вимог за часом енергозабезпечення. Надійність енергозабезпечення в даному випадку залежить від імовірнісних показників надходження енергії вітру за величинами робочої швидкості вітроелектричних установок.

Схема *b* зменшує залежність енергозабезпечення від коливань надходження енергії вітру в часі. У даному випадку необхідне енергоузгодження вузлів, тобто кількість енергії, що надходить, кількість енергії, що акумулюється, і кількість енергії, що споживається. При порушенні такої рівноваги необхідно передбачити баластні пристрої за умови, що надходження енергії вітру більше, ніж споживання, або автоматичні засоби, що обмежують потужність споживача.

Схема *в* є комбінацією попередніх двох з метою підвищення ефективності перетворення енергії вітру. В цьому випадку перетворення енергії вітру спочатку йде через вузли 3-6, а при повному зарядженні акумуляторного блоку і високому надходженні *XI* проводиться пряме енергозабезпечення споживача.

Дві останні схеми мають у декілька разів більше вузлів, ніж схема *a*, що зменшує сумарну величину перетворення енергії вітру, але вони мають можливість підвищити коефіцієнт заповнення графіка навантаження споживача практично до 1.

Технологічні процеси споживача за енерговимогами в системі "джерело-споживач" за часом енергозабезпечення можуть бути:

- із жорстко заданою виробничою програмою, що передбачає рівномірне завантаження протягом доби (без сезонних коливань або з ними);
- із жорстко заданою виробничою програмою, що передбачає нерівномірне завантаження протягом доби (без сезонних коливань або з ними).

Крім того, характер навантаження може бути активним або активно-індуктивним, що вимагає регулювання компенсації реактивної потужності.

Складова "джерело" складається з вітроелектричної установки, готовність якої до виробництва визначається вітрорежимним характером місцевості, що має випадковий характер. Звідси впливає вимога щодо створення буферного блоку у вигляді акумулюючої системи, що заряджається перед тим, як система буде під'єднана до споживача. В такому випадку утворюються два канали енергозабезпечення.

Складова "споживач" висуває вимоги до електрозабезпечення згідно своєї категорії за надійністю енергопостачання. Так, для першої категорії час очікування може дорівнювати тільки часу автоматичного відновлення живлення. Для другої категорії – не більше 0,5; 4 та 10 годин в залежності від впливу електроприймача на технологічний процес. Для третьої категорії – не більше 24 годин.

Таким чином, система енергозабезпечення споживача повинна бути упорядкованою, тобто енергоживлення проводиться спочатку від акумулюючої системи, а вітроелектроустановка проводить постійне її підзарядження. У випадку, коли є надлишок надходження енергії вітру, вітроустановка під'єднується напряму до споживача, а акумулююча система працює у режимі стабілізації параметрів мережі при незначних коливаннях швидкості вітру.

Проаналізуємо задачу енергозабезпечення споживача від даних систем за допомогою положень теорії масового обслуговування. Хай потік вимог споживача є стаціонарним, ординарним і не має наслідків, але сама система не зможе виконати всі потреби споживача, тобто буде системою з відмовами. Граф можливих станів системи матиме вигляд (рис. 3):

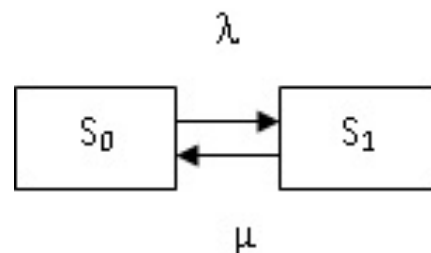


Рис. 3. Граф стану системи.

Тут  $\lambda$  – інтенсивність потоку попиту споживача (заявок);  $\mu$  – інтенсивність потоку надходження енергії вітру (обслуговування);  $S_0$  – стан,

коли система не може обслуговувати споживача;  $S_I$  – стан, коли система обслуговує споживача.

Відносна пропускна здатність  $Q$  для одноканальної системи складає [1]:

$$Q = \frac{\mu}{\lambda + \mu}.$$

Якщо необхідно забезпечити рівень обслуговування потреб споживача не менше, ніж на 80%, то інтенсивність навантаження  $\lambda/\mu$  не повинна перевищувати 0,25, тобто інтенсивність потоку обслуговування повинна бути в чотири рази більшою за інтенсивність потоку заявок. При крутоспадаючій електромеханічній характеристиці асинхронного генератора це вимагає використання завищеної встановленої потужності.

Організація двоканальної системи дозволить дещо підвищити ступінь забезпеченості споживача. Якщо скористатися рівнянням Ерланга стосовно двоканальної системи з відмовами:

$$Q = 1 - \frac{\rho^2}{2!} \cdot \frac{1}{\left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2}\right)},$$

то отримаємо наступний результат: при  $Q=80\%$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 1, \text{ тобто інтенсивність потоку обслуговування і заявок зрівнюється.}$$

На рис. 4 наведено залежність  $\frac{\lambda}{\mu} = f(Q)$  для одно- та двоканальної системи. Останні мають перевагу перед першими, оскільки пристрої виконання заявок працюють з меншою інтенсивністю.

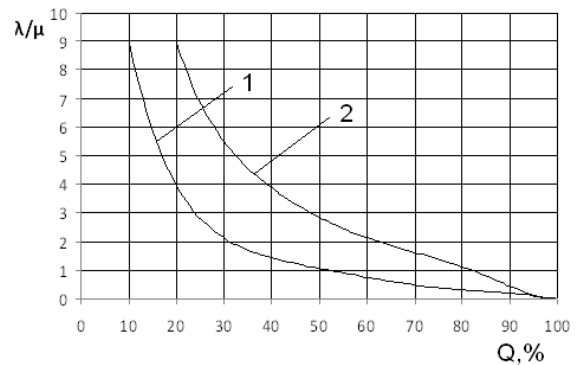


Рис. 4. Залежність інтенсивності навантаження від пропускної здатності одно- (1) та двоканальної (2) системи.

**Висновки.** При розробці автономної вітрової електричної системи на базі асинхронного генератора необхідно орієнтуватися на схеми, що мають можливість підвищити коефіцієнт заповнення графіка навантаження споживача.

1. Павский В.А. Теория массового обслуживания: учебное пособие / В.А. Павский; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2008. – 116 с.

УДК 621.548

Ю.Н.Перминов, канд.техн.наук, В.П.Коханевич, канд.техн.наук, Н.В.Марченко (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

### Сравнение торцевых беспазовых генераторов для ветроустановок с генераторами традиционной конструкции

Проведено сравнение по ряду электрических и электромагнитных параметров двух типов синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, а именно: в виде торцевой конструкции с беспазовым статором и традиционной конструкции с пазовым статором.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, синхронный генератор, возбуждение от постоянных магнитов.

Проведено порівняння за кількома електричними та електромагнітними параметрами двох типів синхронних генераторів зі збудженням від постійних магнітів, а саме: у вигляді торцевої конструкції з беспазовим статором і традиційної конструкції з пазовим статором.

**Ключові слова:** вітроенергетика, синхронний генератор, збудження від постійних магнітів.

© Ю.Н.Перминов, В.П.Коханевич, Н.В.Марченко, 2015