

Як показує світовий досвід, основною проблемою в енергосистемі є не стільки рівень впровадження ВЕС, як рівень флуктуацій їх потужності. Саме ця характеристика має бути контрольованою при виборі сценаріїв впровадження вітрової енергетики. Якщо коливання потужності вітрових електростанцій може бути зменшене до величини, яка не потребує значного зростання потреб у резервних потужностях і не створює великих збурень частоти, відповідно до фактичних можливостей енергосистеми, то такий обсяг вітроенергетики може бути цілком допустимим.

1. *Design and operation of power systems with large amounts of wind power.* IEA WIND Task 25 final report, Helsinki, 2009. – 232 p.

2. СОУ-Н МЕВ 40.1.00100227-68:2012 Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки. НТЦЕ НЕК Укрэнерго. Введ. в дію 21.10.2012 – 36 с.

3. *Павловський В.В., Ленга О.В., Вишневський М.В.* Дослідження стійкості режимів енергосистем з потужними сонячними та вітроелектростанціями. Методологічні питання. – 2012. – 22 с. // Електронний ресурс [www.dmcc.com.ua](http://www.dmcc.com.ua).

4. *Кузнецов Н.П.* Особенности моделирования мощности ветроэлектрических станций // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №23. – С. 44–48.

5. *Кузнецов М.П.* Забезпечення електроенергетичного балансу при наявності вітрових електростанцій // Відновлювана енергетика. – 2014. – №2. – С. 60–64.

6. *Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій* потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. НКРЕ України, AF-MERCADOS EMI. – 2011. – 43 с.

7. *Лінник О.М., Кануннікова Р.С.* Проблеми впровадження вітрових та сонячних електростанцій на території Криму та вплив їх роботи на режими Кримської ЕС та ОЕС України // Відновлювана енергетика. – 2012. – №2. – С. 5–10.

8. *Tarnowski G.C.* Coordinated Frequency Control of Wind Turbines in Power Systems with High Wind Power Penetration. Technical University of Denmark. PhD Thesis. – November, 2011. – 284 p.

УДК 621.548

**В.М.Головко**, докт.техн.наук, **В.П.Коханевич**, канд.техн.наук, **М.О.Шихайлов** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

### Аналіз систем орієнтації ротора вітроустановки малої потужності

*Проведено аналіз систем орієнтації ротора вітроустановки малої потужності, визначені характеристики і параметри, що дозволяють оцінити енергетичні втрати в залежності від вибору системи орієнтації.*

**Ключові слова:** вітроенергетика, системи орієнтації ротора, енергетичні втрати.

*Проведен анализ систем ориентации ротора ветроустановки малой мощности, определены характеристики и параметры, которые позволяют оценить энергетические потери в зависимости от системы ориентации.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, системы ориентации ротора, энергетические потери.

На сьогоднішній день одними з найбільш розповсюджених та ефективних систем перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічну є ротори з горизонтальною віссю обертання та лопатями аеродинамічного профілю. Максимальний відбір енергії від повітряного потоку даним типом роторів має місце за умови, коли площа обертання ротора є перпендикулярною до його напрямку. Для виконання цієї умови горизонтально-осьові вітроустановки повинні

мати у своєму складі систему орієнтації ротора за напрямком повітряного потоку.

З початку розвитку вітроенергетики було створено велику кількість варіантів систем орієнтації роторів. Дослідити весь їх загальний практично неможливо, та й недоцільно. Необхідно провести аналіз даних систем з урахуванням їх надійності, частоти використання, ефективності тощо, та визначити системи орієнтації, які пріоритетні для подальшого дослідження. Крім цього необхідно

зауважити, що в даний час у технічній літературі системи орієнтації роторів досліджені в основному в плані їх конструктивних особливостей, надійності, швидкості та точності орієнтації тощо. При цьому відсутні дослідження, котрі б дозволили визначити критерії їх оцінки щодо втрат виробітку електроенергії або інших енергетичних втрат вітроустановки в залежності від вибору тієї чи іншої системи орієнтації.

Загальна класифікація систем орієнтації роторів наведена на рис. 1.

В дану схему не включені системи орієнтації роторів, які хоча й були запропоновані в технічній літературі, але не були реалізовані в дослідних або серійних зразках вітроустановок.

Як показано на рис. 1, всі системи орієнтації роторів поділяються на дві основні групи: пасивні та активні системи орієнтації.

Активні системи – це такі, в яких для орієнтації ротора використовується не безпосередньо енергія повітряного потоку, а сторонні джерела енергії. До складу таких систем, як правило,

входять: незалежне від вітру джерело енергії, чутливий елемент, підсилюючий та виконавчий (електромеханічний, гідравлічний або інший) пристрої, а також система керування. Складність і, відповідно, вартість таких систем дозволяє використати їх в основному у вітроустановках потужністю більше 100 кВт, що працюють паралельно з електричною мережею. Параметри та характеристики таких систем орієнтації визначаються їх складниками та закладеним алгоритмом управління, що на сьогоднішній день має достатньо напрацьованих методів розрахунку.

Пасивні системи – це ті, в яких для орієнтації ротора використовується безпосередньо енергія повітряного потоку. Вони в основному застосовуються у вітроустановках малої потужності завдяки конструктивній простоті виконання та відносно невисокій вартості обладнання. У відповідності до способу орієнтації пасивні системи розділяються на три основні групи:

- орієнтація флюгерною площиною;
- за рахунок парусності ротора;
- відрозним механізмом.



Рис. 1. Загальна схема класифікації систем орієнтації роторів.

Системи орієнтації роторів з використанням парусності ротора відносяться до конструктивно найбільш простих систем та мають відносно невисоку вартість виготовлення. В свою чергу, їх можна розділити на дві групи: з виведенням та без виведення ротора з-під вітру. У першому випадку об'єднуються функції орієнтації ротора та регулювання потужності і кутової швидкості ротора. Дана схема з виведенням ротора у вертикальній площині була реалізована на водопідйомних установках виробництва НВО "Ветроэн" "Ромашка". Досвід експлуатації даних установок виявив ряд недоліків, що не сприяли подальшому їх впровадженню, а саме:

- при поривах вітру виникають як значні ударні навантаження при підніманні та опусканні ротора, так і значні гіроскопічні навантаження, що призводить до руйнування лопатей;
- при різкому зростанні швидкості вітру та одночасній зміні його напрямку гіроскопічний момент не дозволяє ротору вийти з-під вітру, що призводить до значного збільшення кутової швидкості ротора і до руйнування лопатей.

При орієнтації за рахунок парусності ротора без виведення його з-під вітру функції регулювання та захисту виконуються іншими пристроями (розвертання лопатей відцентровими регуляторами тощо) і тому вищевказані недоліки відсутні. Даний спосіб орієнтації був використаний на ряді вітроелектричних установок потужністю від 0,8 до 15 кВт, розроблених в Україні, та в ліцензійних установках USW 56-100 потужністю 107 кВт, які серійно виготовлялись та встановлювались на вітроелектростанціях. При цьому необхідно зауважити, що в окремих роботах [1] зроблені висновки, що в даних системах орієнтації ротора її кутова швидкість значно перевищує аналогічні швидкості при орієнтації роторів флюгерними площинами, і тому необхідно використовувати демпфуючі пристрої. Дослідна експлуатація установки ВЕУ-4 розробки Інституту відновлюваної енергетики та ВЕУ-0,75 ПП "Світ вітру" з подібною системою орієнтації даних положень не підтвердила.

Системи орієнтації роторів за допомогою флюгерної площини є найбільш розповсюдженими системами, що використовуються у вітроустановках

малої потужності. Аналогічно, як і в попередньому випадку, вони розподіляються на дві групи: з виведенням ротора з-під вітру та без виведення.

Як і при орієнтуванні ротора за рахунок власної парусності, так і при орієнтації флюгерною площиною без виведення ротора з-під вітру ці системи виконують тільки функцію орієнтації ротора, а функції регулювання обертів та потужності виконують інші системи. Дані системи орієнтації є найбільш поширеними у вітроелектричних установках потужністю до 10 кВт. Так, в Україні вона реалізована в ряді установок (ВЕУ-0,8 та ВЕУ-1,6), що серійно виробляються в даний час ПП "Світ вітру".

Системи орієнтації ротора флюгерною площиною з виведенням ротора з-під вітру можна розділити на три основні підгрупи:

- хвіст на косому шарнірі;
- хвіст з поворотною флюгерною площиною;
- підпружинений хвіст.

На відміну від систем орієнтації за рахунок парусності ротора, в даних системах виведення ротора з-під вітру здійснюється в основному в горизонтальній площині (виведення ротора з-під вітру у вертикальній площині розглядалось на рівні технічних пропозицій, але практичної реалізації не було і тому їх не включено в класифікацію). Виведення ротора з-під вітру в даному випадку здійснюється за рахунок створення додаткового моменту, що розвертає відносно напрямку повітряного потоку, і конструктивно може бути реалізоване за рахунок власної парусності ротора, тобто зміщенням осі обертання ротора відносно осі повороту гондоли вітроустановки, або за рахунок "штормової лопати" (встановлення додаткової флюгерної площини паралельно ротору). Конструкції зі "штормовою лопатою" значно збільшують металоємність установки і в даний час не використовуються.

Системи орієнтації, що виконані за конструктивною схемою кріплення хвоста на косому шарнірі, набули широкого розповсюдження в законних зразках вітроелектричних установок (фірми Fortis) та в ряді розроблених дослідних зразків в Україні. Система конструктивно проста і базується на тому, що момент врівноваження

створюється за рахунок кріплення хвоста (під "хвостом" у подальшому буде розумітись сукупність флюгерної площини та конструктивного елемента, яким вона кріпиться до гондоли вітроустановки) на осі, яка розміщена під певним кутом до осі обертання гондоли. Головним недоліком даної системи, а також усіх систем орієнтації флюгерною площиною хвоста з виведенням ротора з-під вітру є те, що аеродинамічна сила тиску на ротор не змінюється пропорційно зміні обертів або потужності ротора, що призводить до значного їх збільшення при зменшенні навантаження на роторі.

Система орієнтації роторів з використанням конструктивної схеми з поворотною флюгерною площиною хвоста, як і попередня система, конструктивно проста, але на відміну від неї не набула широкого поширення, за виключенням окремих дослідних зразків. Конструктивне виконання являє собою кріплення на осі конструктивного елемента самої флюгерної площини з додатковим вантажем у нижній її частині. На експериментальному зразку вітроелектричної установки періодично виникало заклинювання при повороті флюгерної площини, що не сприяє надійній роботі установки в цілому.

Система орієнтації роторів з використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста також набула широкого поширення, особливо у водопідйомних установках. Вона конструктивно являє собою закріплення на осі хвіст, що з'єднаний пружиною з гондолою вітроустановки, при цьому вісь повороту хвоста паралельна осі обертання гондоли. Як і системи орієнтації з використанням хвоста на косому шарнірі, дані системи доволі надійні в роботі та мають такі ж недоліки. Крім цього, виготовлення пружин великої довжини не завжди технологічно можливе. Також необхідно враховувати втрату пружності пружин через певний час.

Підсумовуючи вищенаведені викладки, можна констатувати, що для подальшого аналізу слід визначити наступні системи орієнтації роторів:

- за рахунок парусності ротора без виведення ротора з-під вітру;
- орієнтація флюгерною площиною хвоста без виведення ротора з-під вітру;

- з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі";

- з використанням конструктивної схеми "підпружинений хвіст".

Розглянемо параметри та характеристики систем орієнтації роторів, що впливають на енергетичні втрати у вітроустановці.

Всі енергетичні характеристики вітроустановки розраховуються за умови, що площина ротора перпендикулярна вітровому потоку. Відхилення ротора від напрямку вітрового потоку на кут  $\gamma$  приводить до зменшення потужності, що визначається за виразом [1]:

$$N = N_0 \cos^3 \gamma, \quad (1)$$

де  $N_0$  – потужність вітроустановки при певній фіксованій швидкості вітру.

В залежності від системи орієнтації ротора, в сумарному виробітку вітроустановки необхідно розглядати два види втрат:

- втрати при відхиленні ротора від напрямку вітру;
- втрати при періодичній зміні напрямку повітряного потоку.

Втрати при відхиленні ротора від напрямку повітряного потоку притаманні системам орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" та "підпружинений хвіст", у яких зі збільшенням швидкості вітру вище номінальної ротор починає відхилятися від напрямку вітру. Величина кута відхилення ротора відносно повітряного потоку в залежності від швидкості вітру (рис. 2) є статичною характеристикою як системи орієнтації ротора, так і системи регулювання обертів та потужності.

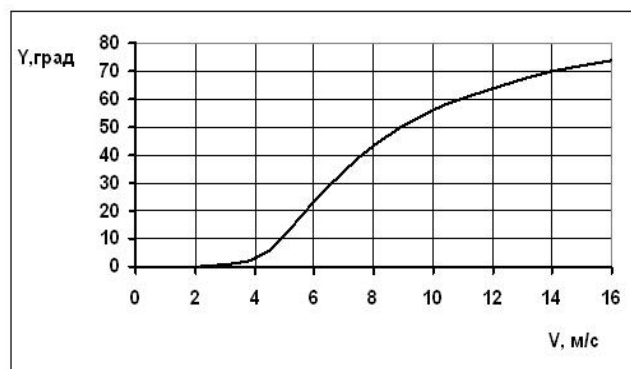


Рис. 2. Статична характеристика системи орієнтації вітроустановки.

З урахуванням виразу (1) та статичної характеристики системи орієнтації вітроустановки отримуємо криву потужності (рис. 3) із виразу:

$$N = \frac{C_p D^2 V^3 \cos^3 \gamma}{2080},$$

де  $C_p$  – коефіцієнт використання енергії вітру;  
 $D$  – діаметр ротора.

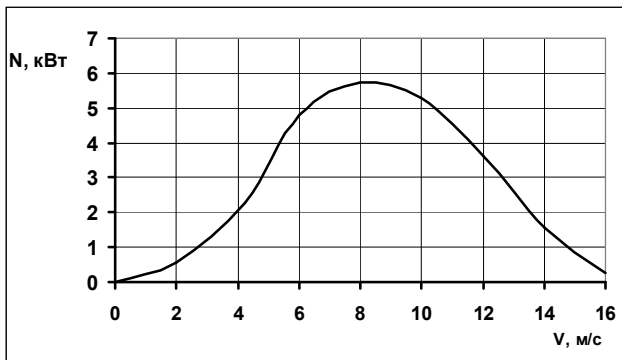


Рис. 3. Крива потужності вітроустановки.

При наявності кривої потужності та параметрів вітрового кадастру можна оцінити реальні втрати виробітку конкретною вітроустановкою [2].

Підсумовуючи вищенаведене, можна констатувати, що для систем орієнтації з відхиленням ротора від напрямку повітряного потоку основною є її статична характеристика, яка в кінцевому результаті визначає енергетичні втрати у процесі роботи вітроустановки.

Втрати при періодичній зміні напрямку вітрового потоку характерні для систем орієнтації без виведення ротора з-під вітру. При зміні напрямку вітру системі орієнтації ротора необхідний певний проміжок часу, за який вона зорієнтує ротор у напрямку вітру. Втрати за проміжок часу  $\Delta t$  складуть:

$$\Delta A = N_0 \Delta t - N_0 \cos^3 \gamma \Delta t = N_0 (1 - \cos^3 \gamma) \Delta t.$$

Запишемо вираз для  $\Delta t$  через кутову швидкість повороту ротора в напрямку вітру  $\omega$ , а саме:

$$\Delta t = \frac{\Delta \gamma}{\omega},$$

де  $\Delta \gamma$  – кут повороту ротора за проміжок часу  $\Delta t$ .

Тоді сумарні втрати для одного відхилення ротора від напрямку повітряного потоку на кут  $\gamma_0$  складуть:

$$A = N_0 \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \cos^3 \gamma_i)}{\omega_i} \Delta \gamma, \quad (2)$$

$$\text{де } n = \frac{\gamma_0}{\Delta \gamma}.$$

Або відповідно в інтегральному вигляді вираз (2) можна записати так:

$$A = N_0 \int_0^{\gamma_0} \frac{(1 - \cos^3 \gamma)}{\omega(\gamma)} d\gamma. \quad (3)$$

Сумарні втрати при певній швидкості вітру  $V_i$  за заданий проміжок часу складуть:

$$A_{V_i} = \sum_{k=1} f_{\gamma_k} \cdot A_{\gamma_k},$$

де  $A_{\gamma_k}$  – втрати при одному відхиленні ротора від напрямку повітряного потоку на кут  $\gamma_{0_k}$ ;  $f_{\gamma_k}$  – кількість відхилень ротора від напрямку повітряного потоку на кут  $\gamma_{0_k}$ .

Аналогічні розрахунки необхідно провести для всього діапазону робочих швидкостей вітроустановки та просумувати, що дозволить визначити сумарні втрати виробітку за заданий проміжок часу.

Таким чином, для систем орієнтації без відхилення ротора від напрямку повітряного потоку при визначенні енергетичних втрат у процесі роботи необхідно мати параметри вітрового потоку та кутові швидкості орієнтації ротора в напрямку вітрового потоку в залежності від кута відхилення ротора та швидкості вітру.

**Висновки.** 1. Проведений аналіз систем орієнтації роторів показав, що найбільш застосовуваними є системи, в яких орієнтація здійснюється без виведення ротора з-під вітру за рахунок парусності ротора або флюгерною площиною хвоста і з виведенням ротора з-під вітру з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" та схеми "підпружиненого хвоста".

2. Встановлено, що для системи орієнтації без відхилення ротора від напрямку повітряного потоку для визначення енергетичних втрат у процесі її роботи необхідно мати параметри вітрового потоку та кутові швидкості орієнтації ротора в напрямку вітрового потоку в залежності від кута відхилення ротора та швидкості вітру.

Для системи орієнтації з відхиленням ротора від напрямку повітряного потоку енергетичні втрати визначаються її статичною характеристикою.

1. Фатеев Е.М. Ветродвиатели. – Л.: ВИМЭ, 1946. – 244 с.
2. Коханевич В.П., Душина Г.П., Романченко Д.С., Терентьев О.М. Влияние номинальной скорости ветра на экономические и технические характеристики ветровых электрических установок при эксплуатации в ветровых условиях Украины // *Відновлювана енергетика*. – 2010. – №4. – С. 48–53.

УДК 621.548

Ю.Н.Перминов, канд.техн.наук, В.П.Коханевич, канд.техн.наук, И.В.Буденный, А.М.Донец (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

### Алгоритм расчета синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроэнергетических установок

*Разработан алгоритм расчета синхронного генератора цилиндрической конструкции с радиальной магнитной системой на базе постоянных магнитов и проведена его апробация на генераторе мощностью 200 Вт.*

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

*Розроблено алгоритм розрахунку синхронного генератора циліндричної конструкції з радіальною магнітною системою на основі постійних магнітів та проведено його апробацію на генераторі потужністю 200 Вт.*

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

В современных ветроэлектрических установках малой мощности в системах генерации электрической энергии (СГЭЭ) преимущественно используются синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Различные конструкции данного типа генераторов обуславливают специфику расчета их элементов. На сегодняшний день с учетом накопленного опыта в проектировании генераторов необходимо обобщение полученных результатов и создание алгоритмов по расчету основных конструкций синхронных генераторов, которые используются в ветроустановках.

В данной статье предлагается алгоритм расчета генератора цилиндрической конструкции с радиальной магнитной системой и обмотками, расположенными в пазах статора (рис. 1), который выполнен из листовой электротехнической стали, и проведена его апробация на генераторе мощностью 200 Вт.

Алгоритм расчета состоит из следующих этапов:

- этап 1 – выбор (расчет) номинальных параметров генератора;

- этап 2 – расчет параметров генератора;
- этап 3 – расчет характеристики намагничивания;
- этап 4 – уточнение электрических параметров генератора;
- этап 5 – расчет генератора мощностью 200 Вт и его экспериментальная проверка.

#### Этап 1. Выбор (расчет) номинальных параметров генератора.

Исходными номинальными параметрами, как правило, являются:

- номинальная мощность генератора –  $P$ ;
- фазное напряжение –  $U_{\phi}$ ;
- частота выходного напряжения –  $f$ ;
- число фаз –  $m$  (обычно  $m=3$ );
- номинальная частота вращения –  $\omega$ .

Номинальная мощность генератора и номинальная частота вращения определяются при расчете параметров ротора ветроустановки, или при их отсутствии со следующих выражений [1].

Мощность на валу ротора ветроустановки:

$$P_p = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3, \quad (1)$$