

ОБГРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПІВ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ АВТОНОМНИХ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

В. В. Козирський, доктор технічних наук
М. І. Трегуб, А. В. Петренко, кандидати технічних наук

Розглянуто загальні принципи адаптивного регулювання навантаження автономних вітроелектричних установок в режимі змінної швидкохідності вітродвигуна.

Вітроелектрична установка, структурна схема, алгоритм адаптивного регулювання навантаження.

Найвищої енергетичної ефективності (ЕЕф) аеромеханічної системи вітроелектричної установки (ВЕУ) принципово можна досягти [3] за умови підтримання оптимальних кутів атаки передньої площини лопатей відносно напрямку змінного за швидкістю вітру, що забезпечує близькі до оптимальних значення швидкохідності та крутного моменту. Однак за таких умов частота обертання лопатевого ротора змінюється за спонтанно змінною швидкістю вітру, від якої потужність залежить у кубі. Тобто потужність вітрового потоку змінюється в часі за ймовірнісним законом, який описують, наприклад, розподілом Вейбула [8]. Таким чином, прийнята лопатевим ротором змінна потужність вітрового потоку за відсутності акумуляторів повинна одночасно виділятися на змінному за величиною електричному навантаженні. Тому розробка для ВЕУ системи керування, що враховує змінну миттєву потужність вітродвигуна, адаптивну навантаження, є актуальним завданням.

Мета досліджень – розгляд загальних принципів адаптивного регулювання навантаження автономних вітроелектричних установок в режимі змінної швидкохідності вітродвигуна.

Практичний досвід роботи сучасних ВЕУ мегаватного класу показав, що забезпечення жорстко регламентованих енергосистемою сталих енергетичних параметрів завжди викликає зменшення ЕЕф перетворення енергії, прийнятої від змінного за швидкістю вітрового потоку. Ще складніші проблеми вискоєфективного використання вітрової енергії виникають перед автономними вітроенергетичними установками (АВЕУ), які не приєднані до потужної загальної електроенергетичної системи, а працюють на різномірне автономне електронавантаження. Тому для АВЕУ запропоновані відомі [6] різнотипові схеми адаптивного керування генератором і навантаженням, яке розподіляється на групи споживачів високої якості енергії з жорстко регламентованими параметрами та баластних технологічних енергоспоживачів. Окремою ланкою виділяються також блоки

тимчасового накопичення енергії, наприклад, електрохімічні акумулятори, термоси, маховики тощо[9]. Однак загальну ЕЕф всього аеромеханіко-електричного комплексу АВЕУ слід розглядати, як безперервний процес одночасного перетворення прийнятої вітрової енергії в корисну роботу. Загальні принципи розрахунків процесу перетворення енергії, прийнятої лопатями вітродвигуна від безперервного вітрового потоку зі змінною потужністю, залежною від кубу швидкості, можуть базуватися на відомій теорії випадкових функцій, наприклад [1] і [4], та на певних варіантах теорії масового обслуговування [2] і теорії імпульсних потоків [5]. Проте серед відомих систем адаптивного керування АВЕУ недостатньо враховується вплив інерційності системи та оптимальних способів регулювання напруги генератора за змінної генерованої потужності.

Результати досліджень. Для системи електромеханічного перетворення енергії змінного за швидкістю вітрового потоку входним параметром потужності слід вважати не безпосередньо швидкість вітру, а крутний момент і кутову швидкість обертОВОї маси лопатевого ротора, яка має [7] певні інерційні показники, що особливо актуально для безредукторних АВЕУ. В такому разі структурна схема автоматичного регулювання аеромеханічної системи на стадії приймання енергії вітрового потоку лопатевим ротором зображується передавальними функціями з однією інерційною ланкою (рис.1).

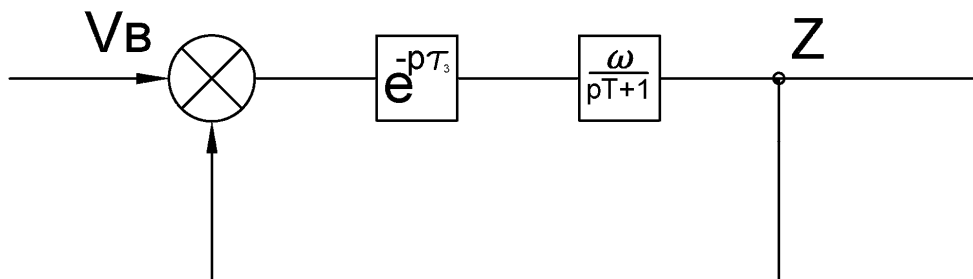


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного регулювання на стадії приймання енергії вітрового потоку з врахуванням інерції лопатевого ротора

Інтегральним показником аеродинамічної якості роботи вітродвигуна вважається [3] коефіцієнт швидкохідності, який чисельно дорівнює відношенню колової швидкості руху кінців лопатей до швидкості діючого на вітродвигун вітрового потоку за відомим виразом:

$$Z = \omega R/V = 2 \pi R n/V, \quad (1)$$

де Z – коефіцієнт швидкохідності вітродвигуна, в.о.; ω – кутова швидкість обертання лопатей навколо осі, рад./с; R – радіус кола обертання периферійних кінців лопатей, м; n – частота обертів вітродвигуна, с^{-1} ; V – модуль нормального вектора швидкості вітру перед вітродвигуном, м/с.

Оскільки лопатевий ротор вітродвигуна завжди має певний момент інерції J_B , то миттєве збільшення швидкості вітру викликає збільшення швидкості руху лопатей з деяким запізненням. Аналогічно зменшення миттєвої швидкості вітру не відразу викликає зменшення швидкості руху

лопатеї, а згідно з роботою [7] завдяки інерційності певний період зберігаються сталі оберти. Таким чином, коефіцієнт швидкохідності є не лише згідно з традиційними визначеннями функцією миттєвої швидкості вітру $Z(V)$, але також і функцією часу $Z(V, t)$. Врахування впливу інерційних показників роботи особливо актуально для безредукторних АВЕУ з кільцеподібним ротором дугостаторного електрогенератора, схематично зображеного на рис.2.

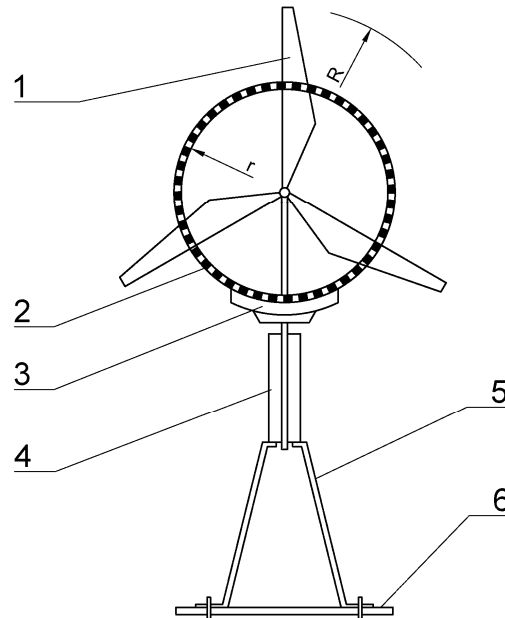


Рис. 2. Схема кільцеподібного ротора безредукторного дугостаторного електрогенератора на лопатях вітрогенератора:

- 1 – лопаті вітрогенератора; 2 – кільцеподібний діамантний ротор;
3 – дугостаторний індукторний аксіальний генератор; 4 – опорний стояк;
5 – основа опорного стояка; 6 – фундамент

У наведеній конструктивній схемі безредукторної ВЕУ незаперечною перевагою є відсутність механічного мультиплікатора і механічного контакту між ротором і статором. Однак розташування функціональних деталей ротора електрогенератора на кільцеподібному обертovому корпусі суттєво збільшує момент інерції системи. Для такої системи миттєві значення швидкохідності Z є стохастичною функцією $Z(t)$, яка є похідною від первинної стохастичної функції миттєвої швидкості вітру $V(t)$.

$$Z(t) = V'(t). \quad (2)$$

Ймовірнісні характеристики похідної $Z(t)$ стохастичної функції $V(t)$ отримуємо безпосередньо із характеристик вихідної функції. Значення математичного очікування стохастичної функції $Z(t)$ описуватиметься виразом:

$$m_{Z(t)} = dm_{V(t)} / dt, \quad (3)$$

де $m_{Z(t)}$ – математичне очікування стохастичної функції швидкохідності; $m_{V(t)}$ – математичне очікування функції швидкості вітру перед площиною обертання лопатей.

$$K_{Z(t)} = \partial^2 K_{V(t)} / \partial t_1 \partial t_2, \quad (4)$$

де $K_{Z(t)}$ – кореляційна функція швидкохідності; $K_{V(t)}$ – кореляційна функція швидкості вітру; t_1, t_2 – сусідні значення часового аргументу функції.

$$m_{Z(T)} = T^{-1} \int_0^T Z(t) dt, \quad (5)$$

Дисперсія такої оцінки математичного очікування визначається залежністю:

де $D(m_{z(t)})$ – дисперсія оцінки математичного очікування; τ – часовий інтервал між значеннями часового аргументу t_1 і t_2 , $\tau = t_2 - t_1$; $K_z(\tau)$ – кореляційна функція оцінки математичного очікування.

The diagram illustrates a control system for a radio telescope antenna. On the left, a parabolic antenna is shown with horizontal arrows representing incoming radio waves. A small horn antenna labeled ΔV is positioned below the main antenna. The main antenna is connected to a motor MT . A feedback loop from the motor passes through a block $\Delta \omega$ and a block PL back to the motor. The motor's output is connected to a block ω , which then feeds into a block Γ . The signal from Γ is split: one path goes to a block Π , and another path goes to a block AKB . The output of AKB is connected to a block I . The output of I is connected to a block S_{BP} . The output of S_{BP} is connected to a block S_{τ} . The output of S_{τ} is connected to a block S_{ET} . The output of S_{ET} is connected to a block KB . The output of KB is connected to a block PK . The output of PK is connected to the motor MT . A large bracket on the right side of the diagram groups the blocks S_{BP} , S_{τ} , and S_{ET} under the label **НАВАНТАЖЕННЯ**.

13

Важливим завданням при розробці алгоритму є визначення основних функцій мети і пріоритетності певних груп енергоспоживачів. Так, загальна мета максимальної ЕЕф системи АВЕУ принципово може досягатися за умов підтримання максимальних значень ККД кожної зі стадій перетворення прийнятої енергії вітрового потоку в корисну роботу, що можна виразити формально функцією мети:

$$\Phi_1 = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n \rightarrow \text{MAX},$$

де $\eta_1 \eta_2 \dots \eta_n$ – добуток ККД необхідних n-стадій параметричного перетворення енергії для забезпечення більш якісною енергією побутових і технологічних енергоспоживачів. За умови застосування генераторів змінного струму для забезпечення регламентованих вихідних параметрів $U = \text{const}$, $f = \text{const}$, необхідно застосування акумуляторного та інверторного блоків.

Для енергоутилізаційного технологічного навантаження функція мети має інше формулювання:

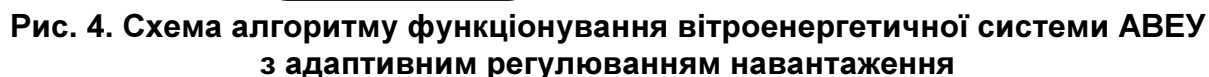
$$\Phi_2 = \sum_0^i n_i \rightarrow \text{MIN},$$

де n_i – кількість стадій перетворення енергії.

Тут можуть допускатися менш жорсткі регламентування вихідних параметрів утилізації електроенергії у певних межах $U = \text{var}$, $f = \text{var}$.

Структурно система АВЕУ з адаптивним регулюванням навантаження складається з окремих блоків (див. рис.3): блока вітродвигуна ВД, генераторного блока Г, перетворювального блока ПБ, акумуляторного блока АКБ, інверторного блока ІБ, комутаторного блока КБ, датчика швидкості вітру DV , датчика обертів вітродвигуна $D\omega$ та програмованого контролера ПК. Енергоспоживачі розподілені на окремі групи: побутові, для яких необхідне електроживлення напругою змінного струму $U = 127/220 \text{ В}$, частотою $f = 50 \text{ Гц}$ із регламентованими параметрами $\Delta U = \pm 10 \text{ В}$, $\Delta f = \pm 1 \text{ Гц}$. Виробничі та технологічні енергоспоживачі можуть задовольнятися такими ж параметрами електроживлення, як і побутові, однак можуть також потребувати інших регламентованих параметрів. Названі дві групи споживачів підключаються за потребами, які мають стохастичний характер, або певний змінний добовий графік. Групи технологічних енергоутилізаційних споживачів призначені для регульованого підключення в разі перевищення потужності генерування над потужністю споживання акумуляторним блоком та споживачами першої групи. За характером енергоспоживання енергоутилізаційні споживачі найраціональніше можна поділити на теплові та електротехнологічні, для яких вимоги до параметрів електроживлення можуть відрізнятися. Наприклад, для теплових потреб можна використовувати різні види струму, тоді, як для певних електротехнологічних процесів може бути потреба постійного струму, або змінного струму різної частоти.

Раціональна послідовність функціонування описаної системи АВЕУ з адаптивним регулюванням навантаження може реалізуватися таким алгоритмом (рис.4).



15

ряджання АКБ, то по чергово підключається енергоутилізаційне навантаження (ЕУАН) в першу чергу із найменш регламентованими параметрами енергоживлення. В разі зменшення потужності енергоспоживання стохастично змінним навантаженням, за незмінної потужності генерування, підключається наступна група ЕУАН. Оскільки ЕУАН забезпечується технологічними енергоспоживачами, які не мають жорстко регламентованих вимог до параметрів електроенергії, то електромеханічна система при цьому має мінімальну кількість стадій перетворення прийнятої енергії вітру і відповідно найвищий загальний ККД АВЕУ, тобто має найвищу ЕЕф.

Висновки

1. У системі керування вітроустановки інформативним параметром прийнятої вітроподвигом потужності вітрового потоку можна вважати стохастичну функцію швидкохідності, яка є похідною стохастичної функції миттєвої швидкості вітру та враховує інерційність лопатевого ротора.

2. Стохастичну функцію швидкохідності лопатевого ротора можна вважати ергодичним процесом, для якого можна визначити оцінку математичного очікування та дисперсію оцінки математичного очікування за аналогією із відомими ймовірнісними залежностями.

3. У системі з адаптивним регулюванням навантаження споживачів поділяють на дві окремі групи: стохастичного режиму енергоживлення для побутових і виробничих потреб та енергоутилізаційного адаптивного навантаження, яке у свою чергу поділяється на теплоенергетичну та електротехнологічну підгрупи. Це забезпечує технічну можливість підтримання потужності енергоспоживання, враховуючи зміну потужності генерування в режимі максимальних значень ККД електромеханічного перетворення вітрової енергії.

Список літератури

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. / Е.С. Вентцель. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Физматгиз, 1962. – 564 с.
2. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1966. – 432 с.
3. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика: учеб. / Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
4. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций / А.А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
5. Седякин Н.М. Элементы теории случайных импульсных потоков / Н.М. Седякин. – М.: Советское радио, 1965. – 261 с.
6. Толмачев В.Н. Эффективное использование энергии ветра в системах автономного энергообеспечения / Толмачев В.Н., Орлов А.В., Булат В.А.; под общ. ред. А.В. Орлова. – СПб.: ВИТУ, 2002. – 203 с.
7. Трегуб М.І. Зменшення впливу нерівномірності вітру на стабільність роботи автономного вітроагрегата / М.І. Трегуб // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2003. – № 2. – С. 82-89.
8. Фаворський Ю.П. Створення моделі оптимального співвідношення компонентів гібридних вітросонячних систем електропостачання [Електронний

ресурс] / Ю.П. Фаворский. – Режим доступа: http://www.avante.com.ua/rus/library/lib_stvormodeli.html.

9. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

Рассмотрены общие принципы адаптивного регулирования загрузки автономных ветроэлектрических установок в режиме переменной скорости вращения ветродвигателя.

Ветроэлектрическая установка, структурная схема, алгоритм адаптивного регулирования нагрузки.

The article discusses the general principles of adaptive load control of autonomous wind power plants in the variable specific speed wind turbine.

Wind power plant, the block diagram, the algorithm is adaptive load control.

УДК 621.311:533.6

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ЗА СЧЕТ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

Б.Х. Драганов, В.В. Козырский, доктора технических наук

Изложены основные положения гидродинамики ветра – процессы молекулярной и кинетической диффузии, турбулентная особенность потока. Отмечены зоны технической эффективности ветроэнергетической установки в зависимости от нагрузки. Приведена принципиальная схема ветроводородной установки.

Стохастичность, математическое ожидание, молекулярная и кинетическая диффузия, турбулентность, зоны эффективности, водород.

Эффективное средство экономии энергетических ресурсов заключается в использовании возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. Важным является использование энергии ветра, которую применяют во многих отраслях производства.

Заслуживает внимание проблема использования энергии ветра для получения водорода. При этом эффективно решается комплекс взаимосвязанных задач энергетики, экологии, экономики.

Цель исследований – анализ гидродинамики ветра и, как следствие, указание наиболее эффективных средств использования энергии ветра для получения водорода.

Материалы и методика исследований. Движение воздуха в земной атмосфере, начиная от слабого ветра у поверхности земли и заканчивая общей его циркуляцией, является турбулентным. Атмосферная