

## БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ АКТИВНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ В ЛОКАЛЬНІЙ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

**Постановка проблеми.** Енергетична та екологічна кризи зумовлюють розвиток енергетики на поновлювальних джерелах, наприклад, вітрової. Зараз використовуються в основному вітроенергетичні установки (ВЕУ) з горизонтальною віссю обертання, що мають низку недоліків: відчуження значних земельних ділянок, поширення потужних звукових коливань інфрачистої частоти, які завдають шкідливого впливу людям і тваринам, створення завад прийому телепередач, загибель птахів тощо. Ці фактори зумовлені високою потужністю ВЕУ та їх швидкохідністю. Останнім часом у світі спостерігається тенденція освоєння низькопотенціальних вітроресурсів, в основному завдяки ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВО), які працюють на локального споживача, що знаходиться недалеко від місця генерування [1]. У них відпадає необхідність у пристроях для орієнтації на вітер, спрощується механічна трансмісія (відсутній мультиплікатор), зменшуються гіроскопічні навантаження, що підвищує енергетичну ефективність та надійність генерування електроенергії. Враховуючи невисокі значення середніх швидкостей вітру, у ВЕУ з ВВО особливий акцент ставиться на максимальну ефективність відбору та перетворення енергії вітру.

**Метою** роботи є розроблення ефективного способу керування електромеханічною системою локальної ВЕУ з ВВО та комп'ютерна симуляція її моделі в середовищі MatLab/Simulink.

Максимальну енергетичну ефективність за малих частот обертання вітроагрегату може забезпечити багатополосний синхронний генератор (СГ) з постійними магнітами, розміри якого для ВЕУ з ВВО не обмежуються, оскільки генератор розміщується на нижньому кінці осі обертання, що також спрощує його обслуговування. Оскільки ВЕУ з ВВО проєктується для індивідуальних споживачів та непостійних швидкостей вітру, то найбільш доцільною є її робота на акумуляторну батарею (АБ), від якої живляться споживачі постійного та змінного струму через відповідні силові перетворювачі напруги. Ефективна робота всієї САК енергетичною системою можлива за умови узгодженої роботи цілої низки локальних підсистем автоматичного регулювання параметрів, до яких ставляться наступні вимоги: 1) вибір максимально можливої потужності для конкретної швидкості вітру, так звана робота в точці максимальної потужності (maximum power point tracking – MPPT в англійськомовній літературі); 2) забезпечення роботи синхронного генератора з максимальною енергетичною ефективністю з врахуванням різних типів втрат в генераторі та якості відбору електроенергії; 3) контроль заряду – розряду АБ; 4) забезпечення моніторингу швидкості вітру і ступеня зарядженості АБ та прийняття рішень про запуск ВЕУ, її зупинку, відключення споживачів. Вказані вимоги можна забезпечити багатьма способами, проте, з метою зменшення вартості і підвищення енергоефективності, доцільно використати мінімальну кількість силових перетворювачів. Нами пропонується покласти виконання перших трьох вищевказаних пунктів вимог на багатофункціональний активний випрямляч (АВ). Функціональна схема ВЕУ з АВ підвищувального (boost) типу як силовим керуючим елементом, приведена на рис. 1.

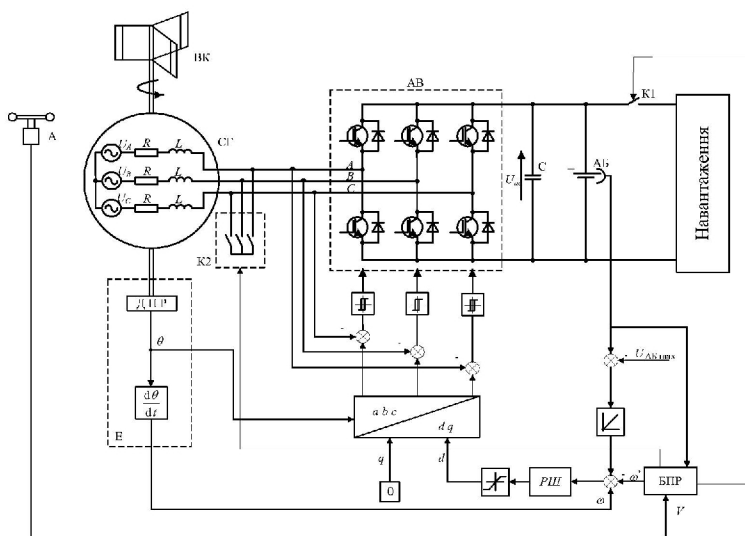


Рис. 1. Функціональна схема ВЕУ з ВВО

Вітросприймаючим пристроєм ВЕУ служить вітрове колесо (ВК), наприклад, модифікований ротор Дар'є, коефіцієнт корисного використання вітрової енергії (ККВВ) кращих зразків якого на даний час вже досягає 0,4...0,45 [1]. На першому етапі досліджень для моделювання характеристик ВК використаємо теорію горизонтально-осьових ВЕУ.

Вихідна потужність ВК за різних швидкостей вітру описується відомим виразом [2]

$$P_{ВК} = 0,5 \rho A C_P(\lambda) V^3, \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $A = \pi r^2$  – площа омивання ВК;  $r$  – радіус лопаті;  $C_P(\lambda)$  – коефіцієнт потужності ВК, який залежить від його коефіцієнта швидкохідності  $\lambda = r\omega/V$ ;  $\omega$  – кутова швидкість ВК;  $V$  – швидкість вітру.

Залежність  $C_p(\lambda)$  для ВК з ВВО апроксимуємо поліномом 5 порядку (рис. 2,а):

$$C_p(\lambda) = 0,046977 - 0,128468\lambda + 0,19596\lambda^2 - 0,05705\lambda^3 + 0,00621\lambda^4 - 0,000236\lambda^5, \quad (2)$$

причому  $\lambda_{opt} = 3,8$ , а  $C_p(\lambda_{opt}) = 0,368$ .

Моделювання проводимо для ВЕУ з максимальною потужністю ВК 5 кВт ( $r = 3,62$  м,  $A = 41,25$  м<sup>2</sup>) та робочими швидкостями вітру 3-8 м/с. За виразами (1) і (2) побудовані залежності, показані на рис. 2,б. Для такого ВК вибираємо наступні параметри СГ:  $R = 0,3$  Ом;  $L_d = L_q = 3$  мГн;  $\Phi = 0,4$  Вб;  $p = 20$ ;  $J = 10$  кг·м<sup>2</sup>.

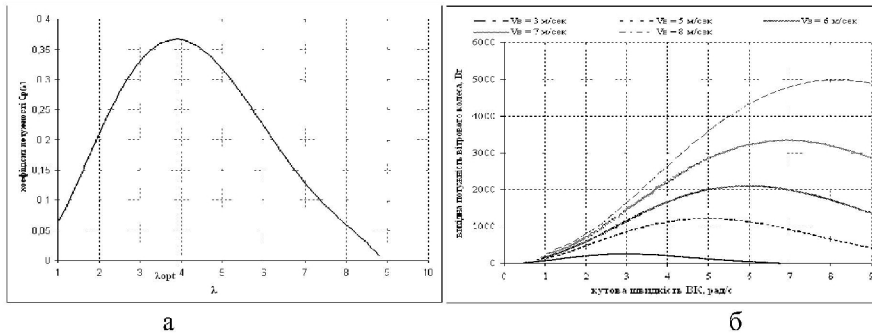


Рис. 2. Енергетичні характеристики ВК з ВВО:

а) залежність коефіцієнта потужності від  $\lambda$ ;

б) вихідна потужність ВК в залежності від  $\omega$  за різних швидкостей вітру

ВК, появляється лише після певного значення частоти обертання ВК. Тому ВК запускається в роботу шляхом попереднього розкручування, у якому генератор працює в режимі електродвигуна, а інформація про доцільність запуску отримується на підставі відповідного оброблення даних про поточну швидкість вітру, які повинен забезпечити анемометр з електричним виходом. Аналіз відомих способів оперативного пошуку МРРТ [4], показав, що використання систем екстремального за потужністю автоматичного регулювання супроводжуються колливністю системи, оскільки наближення кутової швидкості ВК  $\omega$  до оптимального для конкретної швидкості вітру значення  $\omega_{opt}(V)$  за подальшого перевантаження генератора приводить до переходу на нестійку ділянку характеристики  $P(\omega)$ , де  $dP/d\omega > 0$ . Тому нами пропонується забезпечувати роботу в МРРТ шляхом автоматичного регулювання кутової швидкості ВК на рівні  $\omega_{opt}(V)$  за посередництвом дії на момент навантаження ВК, що реалізується електричним навантаженням генератора. При цьому в околі  $\omega_{opt}(V)$  характеристика  $M_{BK}(\omega)$  має протяжну ділянку стійкої роботи (рис. 3). Поточне значення  $\omega_{opt}(V)$  визначається блоком прийняття рішення БПР (рис. 1) за виразом  $\omega_{opt}(V) = \lambda_{opt}V/r$ , а на виході регулятора швидкості РШ формується завдання на вектор струму АВ.

На першій стадії досліджень АВ виконуватиме лише функцію електромагнітної сумісності навантаження з СГ – синусоїдальність струмів споживання та забезпечення  $\cos\phi = 1$ . Для цього використана стратегія орієнтації вектора лінійного струму за вектором напруги (voltage oriented control, VOC) в системі обертових координат  $d-q$  з гістерезисними регуляторами струмів [5].

Для визначення кутової швидкості ВК та кутового положення ротора використовується інкрементальний оптичний енкодер Е (у випадку використання DSP-мікроконтролера можливе бездавачеве керування) [6].

Для запуску ВЕУ СГ отримує живлення від АВ через АВ, що працює в режимі інвертора, керованого положенням ротора СГ, котрий виступає в ролі вентильного двигуна. Для надійної роботи АВ в системі керування передбачено захист від перезаряду та повної розрядки АВ. За повного заряду АВ її напруга досягає фіксованого значення  $U_{ABmax}$ , після чого вступає в дію затриманий додатний зворотний зв'язок за перевищенням максимальної напруги АВ, який збільшує завдання кутової швидкості ВК та розвантажує СГ. У такому режимі СГ з АВ працюють безпосередньо на споживачів електроенергії. Якщо ж поточна потужність останніх не перевищує задане мінімальне значення, ВЕУ не доцільно експлуатувати, тому БПР видає сигнал на зупинку ВК шляхом закорочення обмоток СГ за допомогою ключа К2. У разі розрядки АВ до заданого значення мінімальної напруги, коли заряду АВ ще достатньо для наступного запуску ВК, БПР відмикає ключем К1 споживання електроенергії. Подальше ввімкнення споживачів можливе лише після деякого визначеного зростання заряду АВ.

Описана система керування була змодельована в середовищі MatLab/Simulink. Оскільки метою цієї роботи

Розроблено різні способи автоматичного пошуку оптимального режиму роботи ВК – кутової швидкості, що відповідає МРРТ за різних швидкостей вітру (рис. 2,б), які можна поділити на дві групи: бездавачеві (за допомогою естиматорів); з використанням дачача швидкості вітру (анемометра) А [2-4]. Для ВЕУ з ВВО необхідно застосувати лише останні, оскільки підйомна сила, яка є основною руйнівною складовою для вертикально-осьового

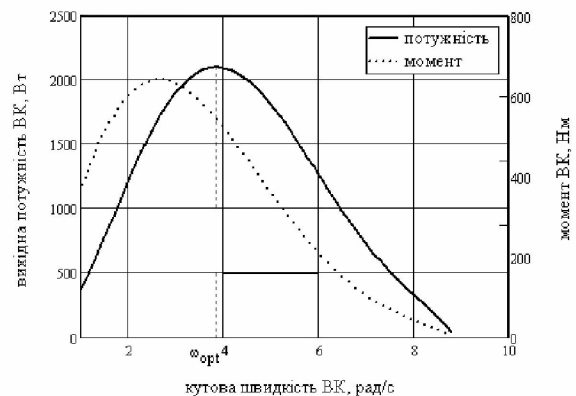


Рис. 3. Залежності вихідної потужності і моменту ВК від його кутової швидкості для швидкості вітру  $V = 6$  м/с

не було створення динамічної моделі АБ, для її моделювання було використано джерело постійної напруги з послідовно ввімкненим активно-індуктивним опором, котрі відповідають параметрам реальної АБ [7].

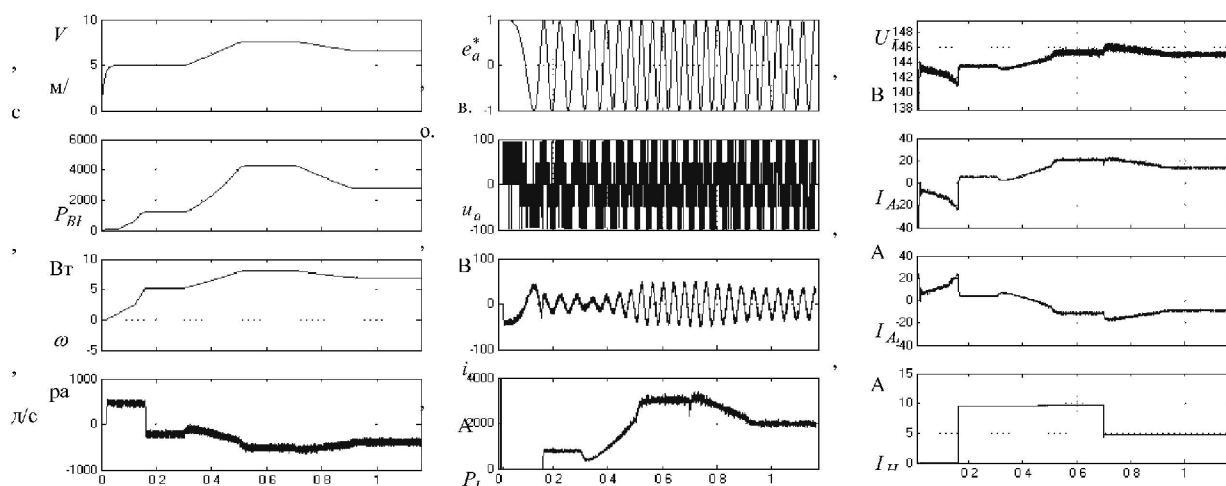


Рис. 4. Осцилограми швидкості вітру  $V$ , вихідної потужності ВК  $P_{BK}$ , кутової швидкості ВК  $\omega$ , моменту ВК  $M_{BK}$ , відносної фазної ЕРС СГ  $e_a^*$ , фазної напруги СГ  $u_a$ , струму СГ  $i_a$ , потужності на виході АБ  $P_{DC}$ , напруги на виході АБ  $U_{DC}$ , струму на виході АБ  $I_{AB}$ , струму АБ  $I_{AB}$  та струму навантаження  $I_{NAB}$

На початку роботи ВЕУ (рис. 4) відбувається розкручування ВК за допомогою СГ, що отримує живлення від АБ через АВ, котрий працює в режимі інвертора. В момент підхоплення вітром ВК ( $t = 0,15$  с) відбувається зростання кутової швидкості  $\omega$ . При досягненні визначеного для  $V = 5$  м/с значення кутової швидкості  $\omega_{opt}$  ( $t = 0,17$  с) автоматично відбувається перехід синхронної машини з режиму двигуна в режим генератора, одночасно підключаються споживачі електроенергії. Оскільки швидкість вітру  $V$ , і відповідно момент на осі ВК  $M_{BK}$  є невеликими, то струм навантаження сумується зі струму на виході АБ  $I_{AB}$  та струму АБ  $I_{AB}$ . АВ формує вектор синусоїдального лінійного струму СГ  $i_a$  за вектором фазної ЕРС  $e_a^*$ , що забезпечує електромагнітну сумісність між СГ і навантаженням та його високий ККД. При зростанні швидкості вітру  $V$  ( $t = 0,3$  с) з темпом наростання  $13$  м/с<sup>2</sup>, система керування дещо зменшує момент навантаження ВК, що допомагає йому розігнатися і швидше працювати в оптимальному режимі для використання максимальної потужності вітру, після чого спостерігається наростання амплітуди та частоти лінійного струму  $i_a$ . Внаслідок цього відбувається зростання струму на виході  $I_{AB}$ , котрий вже може повністю забезпечити струм навантаження і почати заряджати АБ ( $t = 0,45$  с). При зменшенні швидкості вітру  $V$  ( $t = 0,75$  с) САК збільшує навантаження СГ і відповідно  $M_{BK}$ , тим самим допомагаючи ВЕУ за максимально короткий час перейти в оптимальний режим роботи.

**Висновок.** Таким чином, комп'ютерне симулювання показало основні переваги розробленої САК ВЕУ: незалежна від електричного навантаження робота в точці максимального відбору потужності ВК, практична відсутність впливу змін електричного навантаження на роботу САК швидкості ВК, органічна форсована реакція АВ на зміну швидкості вітру, споживання електричної енергії від СГ з високою енергетичною ефективністю, автоматичний перехід електричної машини з режиму двигуна в режим генератора при запуску ВЕУ в роботу.

#### Література.

1. <http://www.windturbine-analysis.netfirms.com/>
2. Marimoto S., Nakayama H., Sanada M. Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2005, vol. 41, no. 1. – P. 60-67.
3. Datta R., Ranganathan V.T. A method of tracking the peak power points for variable speed wind energy conversion system // IEEE Trans. on Energy Convers. – 2003, vol. 18, no. 1. – P. 163-168.
4. Tan K., Islam S. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors // IEEE Trans. on Energy Convers. – 2004, vol. 19, no. 2. – P. 392-399.
5. Rodriguez J.R., Dixon J.W., Espinoza J.R., Pontt J., Lezana P. PWM regenerative rectifiers: State of the art // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2005, vol. 52, no. 1. – P. 5-22.
6. Karrari M., Rosehart W., Malic O.P. Comprehensive control strategy for a variable speed cage machine wind generation unit // IEEE Trans. on Energy Convers. – 2005, vol. 20, no. 2. – P. 415-423.
7. Гарганеев А.Г., Томина Ю.А. Автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией при питании от химического источника тока // Технічна електродинаміка. Спец.вип. Силова електроніка та електроефективність. – 2007, Ч. 3. – С. 3-7.