

УДК 621.311.24

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

Мокін Б.І., д.т.н., проф., Мокін О.Б., к.т.н., доц., Жуков О.А., асп.

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Україна

E-mail: alex4444_2004@mail.ru

Обговорюється можливість керування струмом збудження вітроенергетичної установки, тим самим забезпечуючи її оптимальну швидкість обертання за рахунок дії на момент навантаження, що забезпечить відбір максимально можливої потужності від вітроенергетичної установки.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроколесо, регулятор збудження.

Вступ. Переважна більшість вітрових енергетичних установок (ВЕУ), які експлуатуються у світовому парку ВЕУ, — горизонтально-осьові. Але вони мають ряд недоліків, наприклад, необхідність орієнтації на вітер та створення складної системи керування для цього, складність конструкції лопаті (необхідне її скручування), складність обслуговування генератора, розміщеного у гондолі, та ін. Цих недоліків позбавлені ВЕУ з вертикальною віссю обертання. Такі ВЕУ можна використовувати без механічного регулювання кутів нахилу лопатей, вони не потребують штормового захисту, мають більш безпечну та надійну конструкцію, не потребують системи орієнтації на вітер, спрощується механічна трансмісія. А такий недолік вертикально-осьових ВЕУ, як значні поперечні навантаження опорно-підшипникового вузла, що веде до значного збільшення його габаритів, легко усувається в конструкції, запропонованій у роботі [1].

Аналіз попередніх досліджень. Робота ВЕУ з вертикальною віссю обертання характеризується залежністю коефіцієнту потужності від швидкості ВЕУ [2]. На рис. 1, а), взятому із [3], приведено графік залежності коефіцієнту потужності вітроколеса C_p від його швидкості I , а на рис. 1, б) — залежність вихідної потужності вітроколеса P_{BK} від кутової швидкості обертання, на якому показано оптимальне значення кутової швидкості обертання вітрового колеса ω_{opt} , при якій від ВЕУ відбирається максимум потужності.

При роботі вертикального вітрового колеса існує поняття роботи в точці відбору максимальної потужності. З графіків видно, що максимальний відбір потужності від вітрового колеса буде при певній оптимальній швидкості обертання вітрового колеса, під час збільшення якої коефіцієнт потужності буде падати.

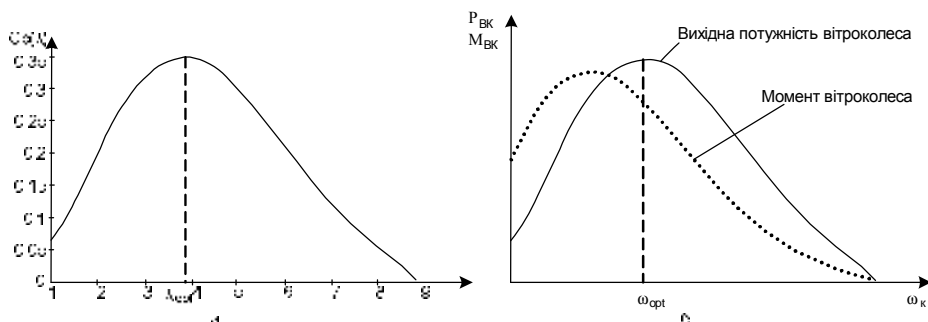


Рисунок 1 – Характеристики вітрового колеса з вертикальною віссю обертання [3]: а) залежність коефіцієнту потужності C_p від швидкості λ ; б) залежності вихідної потужності й моменту вітрового колеса від його кутової швидкості

У роботі [3] для забезпечення оптимальної швидкості обертання вітроколеса пропонується, керуючи випрямлячем, змінювати струм заряду акумулятора, впливаючи тим самим на момент навантаження генератора. Даний підхід не враховує такого негативного явища, як перезаряд акумулятора, коли виникає необхідність у його від'єднанні від кола заряду, при цьому відбір потужності від вітроколеса вже не буде максимальним. Крім того, застосування даної схеми розраховане лише на автономне навантаження.

Мета роботи. Розробка автоматичної системи керування вертикальною ВЕУ, яка працюватиме на електричну мережу із оптимальним відбором потужності від вітроколеса за рахунок оптимального керування струмом збудження.

Матеріал і результати дослідження. Пропонується така система керування вертикально-осьовою ВЕУ, яка працює не на окреме навантаження, а на електричну мережу. В даному випадку запропоновано підтримувати оптимальну швидкість обертання вітрового колеса й максимум потужності, що відбирається від нього, шляхом керування струмом

збудження ВЕУ: якщо змінювати струм збудження ВЕУ, змінюватиметься амплітуда вихідної напруги установки, як і амплітуда напруги на виході інвертора, що призведе до зміни струму навантаження (струму, який віддається у мережу умовно необмеженої ємності), а це призведе до зміни моменту навантаження вітрового колеса і до установки оптимальної швидкості обертання вітрового колеса відповідно до поточної швидкості вітру. Ця система дасть змогу автоматично підтримувати кутову частоту обертання вітроколеса шляхом дії на момент навантаження ВЕУ, при цьому швидкість буде стабілізуватися за рахунок збільшення струму віддачі у мережу.

Важливою складовою розв'язку поставленої задачі є особливість конструктивного виконання ВЕУ. Для даної задачі слід використовувати ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну з вертикальною віссю обертання, на ободі ротора якої розміщена обмотка збудження, а навколо обмотки збудження нерухомо закріплена обмотка статора.

Залежність, приведена вище, робить необхідним підтримувати струм збудження установки і власне магнітний потік, і власне взаємодію між вітровим колесом та навантаженням вітрової енергетичної установки (електричною мережею) для підтримання її оптимальної швидкості обертання й, відповідно, максимального коефіцієнту потужності.

Для цього необхідно сформулювати систему керування таким об'єктом.

Базуючись на відомих співвідношеннях [2] та [4] і математичній моделі кривої намагнічування, представленій у роботі [5] сукупністю прямої та параболі, запишемо математичну модель вітроенергетичної установки:

$$\begin{cases} \omega_e = \frac{\lambda V_a}{R}; \\ \hat{O}(I_{\dot{\varphi}_a}) = \begin{cases} -\dot{a}_2 \cdot \dot{\varphi}_a^2 + b_2 \cdot \dot{\varphi}_a, & \dot{\varphi}_a \in [0, \dot{\varphi}_{a.c\bar{i}}]; \\ \dot{a}_1 + b_1 \cdot \dot{\varphi}_a, & \dot{\varphi}_a \in (\dot{\varphi}_{a.c\bar{i}}, \infty); \end{cases} \\ E = 4,44 \cdot w \frac{\omega_e P}{2\pi} \cdot \hat{O} \cdot \sqrt{2}; \\ U_{c\bar{o}} = E - I_i Z_{\bar{n}\bar{o}}, \end{cases} \quad (1)$$

де w_k – кутова швидкість обертання вітрового колеса, рад/с; I – швидкохідність вітрового колеса, яка залежить від конструкції колеса; V_a – швидкість вітру, м/с; R – радіус вітрового колеса; Φ – магнітний потік, Вб; $I_{\dot{\varphi}_a.c\bar{i}}$ – значення струму збудження у точці спряження параболі і прямої; a_1, b_1, a_2, b_2 – константи, метод визначення яких наведено у роботі [5]; $I_{\dot{\varphi}_a}$ – струм збудження, А; E – ЕРС вітрової енергетичної установки, В; w – число витків обмотки; p – число пар полюсів; U_{cm} – вихідна напруга

вітрової енергетичної установки на статорі, В; I_n – струм навантаження вітрової енергетичної установки, А; Z_{cm} – повний опір обмотки статора, Ом.

Структура системи автоматичного керування наведена на рис. 2, на якому вітроколесо, що обертається під дією вітрового потоку з кутовою швидкістю w_k , генерує на виході статорної обмотки ОС напругу U_{cm} , яка подається через випрямляч на інвертор. На виході випрямляча розміщується акумуляторна батарея АБ, що служить для живлення обмотки збудження ОЗ у момент пуску вітроколеса. Постійна напруга за допомогою інвертора перетворюється у змінну синусоїдальну напругу заданої частоти (в нашому випадку — 50 Гц) і через фільтр подається у мережу. Для синхронізації фазового кута між напругою інвертора та напругою у мережі використано блок синхронізації. Сигнали від датчиків швидкості вітру, кутової швидкості обертання вітрового колеса, похідної від ковзного значення швидкості вітру, струму навантаження й напруги статора подаються на регулятор збудження, який їх аналізує та видає сигнал на блок керування збудженням для підтримки струму збудження, а отже й моменту навантаження на такому рівні, при якому швидкість обертання вітроколеса призводила б до оптимального відбору потужності.

Вхідними величинами для регулятора збудження пропонується встановити наступні: швидкість обертання вітрового колеса w_k , швидкість вітрового потоку V_a , похідна від ковзного за 2Т значення швидкості вітру dV_a^k/dt , струм навантаження вітрової енергетичної установки I_n , вихідна випрямлена напруга вітрової енергетичної установки U .

Запропонована структура регулятора збудження побудована за каскадним принципом, де внутрішнім контуром є контур регулювання напруги, а зовнішнім контуром є контур підтримання швидкості вітрового колеса.

Відомо, що для каскадної системи регулювання сигнал завдання для регулятора внутрішнього контуру формується регулятором зовнішнього контуру, тому розглянемо детально будову й математичну модель регулятора зовнішнього контуру — контуру підтримки заданої швидкості.

Пропонується ввести до закону регулювання також похідну від ковзного за 2Т значення швидкості вітру, оскільки вітрове колесо має значну інерційність, тобто при зміні вітру швидкість його обертання змінюється не одразу, але все рівно ця зміна відбудеться. Вихідним сигналом контуру є сигнал завдання за напругою, який буде вхідним сигналом для наступного контуру.

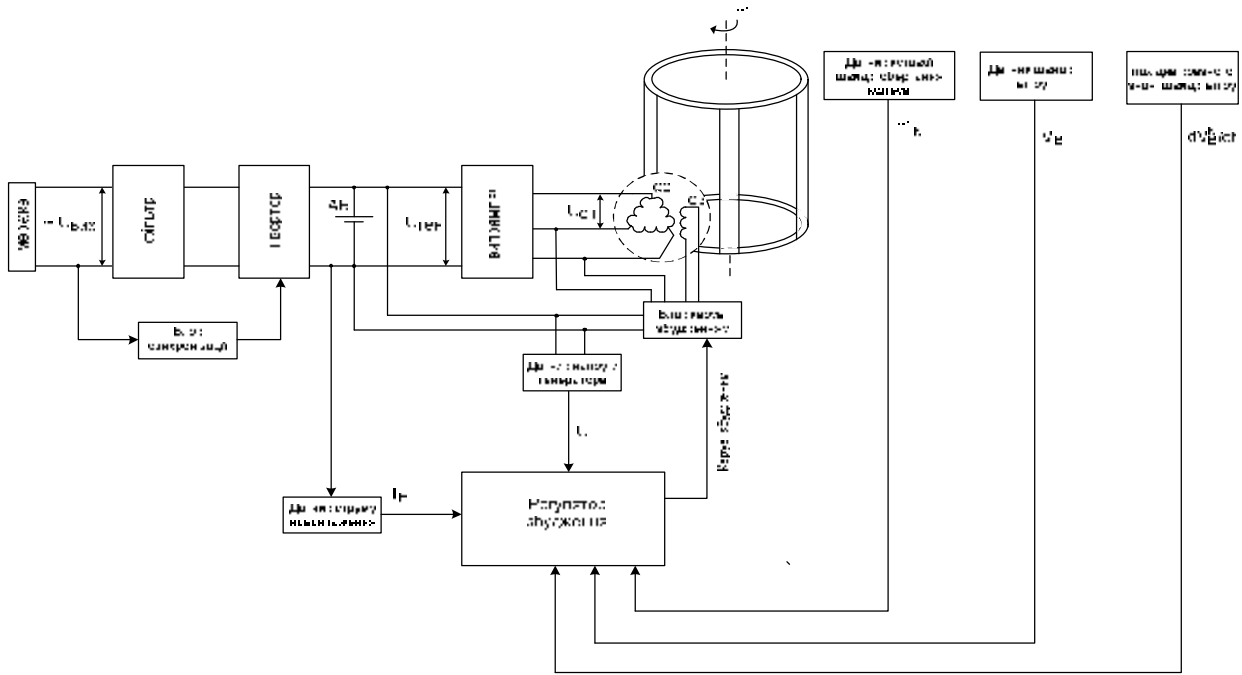


Рисунок 2 – Структура системи автоматичного керування ВЕУ з вертикальною віссю обертання

Використовуючи підхід, запропонований у роботі [6], математичну модель контуру підтримання заданої швидкості можна записати у вигляді:

$$\Delta\omega = \begin{cases} |\omega_{i\dot{\tau}\delta} - \alpha(t)| - k_v \cdot V_a(t), \dot{y}\dot{e}\dot{u}\dot{i} \frac{dV_a^e}{dt} < 0; \\ |\omega_{i\dot{\tau}\delta} - \alpha(t)| + k_v \cdot V_a(t), \dot{y}\dot{e}\dot{u}\dot{i} \frac{dV_a^e}{dt} > 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{\dot{\zeta}\dot{\alpha}\dot{\alpha}}(t) = k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt,$$

де $\Delta\omega$ – різниця між заданим і поточним значеннями кутової швидкості; w_{opt} – значення оптимальної швидкості обертання; $w(t)$ – значення кутової швидкості в поточний момент часу; k_v – коефіцієнт передачі по швидкості вітру; $V_a(t)$ – значення швидкості вітру в поточний момент часу; V_a^k – ковзне за $2T$ значення швидкості вітру (усереднення за $2T$); dV_a^k/dt – похідна від ковзного за $2T$ значення швидкості вітру; $U_{zad}(t)$ – завдання випрямленої напруги вітрової енергетичної установки в поточний момент часу; k_w – коефіцієнт передачі по кутовій швидкості обертання колеса; T – період обертання вітрового колеса.

Зовнішній контур являється контуром регулювання напруги, входним сигналом для якого є $U_{zad}(t)$. Його математичну модель запишемо у вигляді

$$\begin{cases} \Delta U = U_{\dot{\zeta}\dot{\alpha}\dot{\alpha}}(t) - \left(U(t) - k_I I_i(t) \right); \\ I_i(t) = k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt. \end{cases} \quad (3)$$

де ΔU – різниця між заданим і поточним значеннями випрямленої напруги; k_I – коефіцієнт передачі по струму навантаження; I_u – поточне значення струму навантаження вітрової енергетичної установки, А; $I_{z\delta}$ – поточне значення струму збудження вітрової енергетичної установки, А; k_u – коефіцієнт передачі по напрузі.

Для захисту вітроенергетичної установки від роботи на неробочому ході, тобто для зняття струму збудження при швидкості обертання колеса нижче мінімально допустимої, при якій можлива генерація енергії в електричну мережу w_{min} , введемо в закон регулювання дискретну величину k_{pob} . Тоді загальна модель регулятора збудження може бути представлена у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta w = \begin{cases} |w_{opt} - w(t)| - k_v \cdot V_e(t), \text{ якщо } \frac{dV_e^k}{dt} < 0; \\ |w_{opt} - w(t)| + k_v \cdot V_e(t), \text{ якщо } \frac{dV_e^k}{dt} > 0; \end{cases} \\ U_{zad}(t) = k_w \cdot \Delta w + \int_0^{2T} \Delta w dt; \\ \Delta U = U_{zad}(t) - (U(t) - k_I I_u(t)); \\ I_{z\delta}(t) = \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right) \cdot k_{pob}. \end{cases} \quad (4)$$

де $k_{pob}=1$, якщо $w(t) > w_{min}$, та $k_{pob}=0$, якщо $w(t) < w_{min}$.

Структурна схема регулятора збудження, побудована відповідно до системи (4), наведена на рис. 3, де ФП – функціональний перетворювач, який забезпечує поступання на вимірювальний вхід суматора сигналу про швидкість вітру відповідно до закону (4) із вибраним знаком при активному відповідному компараторі.

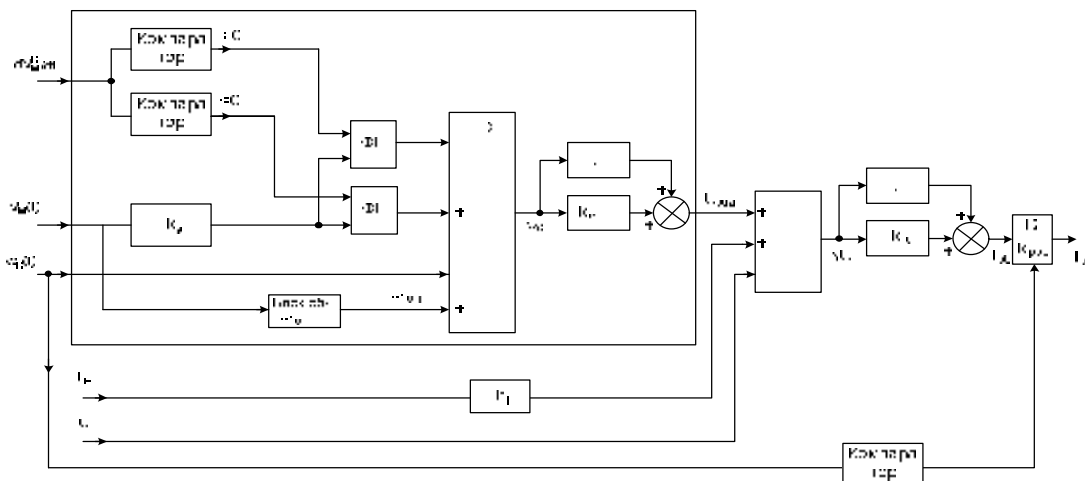


Рисунок 3 – Структура регулятора збудження

Висновки. Розроблено математичну модель та структуру системи автоматичного керування ВЕУ, яка дозволяє працювати останній у точці максимального відбору потужності вітроколеса шляхом регулювання струму збудження вітрової енергоустановки, впливаючи тим самим на її момент навантаження. Також створено закон керування регулятора струму збудження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мокін Б. І. До питання вибору вітрових двигунів і електричних генераторів вітрових електричних станцій / Мокін Б. І., Мокін О. Б., Жуков О. А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №6. – С. 52-62.
 2. Денисенко О. Г. Преобразование и использование ветровой энергии: / Денисенко О. Г, Козловский Г. А., Федосенко Л. П. – Киев: Техника, 1992. – 176 с. – ISBN 5-335-00857-1
 3. Щур І. З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І.

З.Щур, О. Р.Турленко // Вестн. Нац. Ун-та «Харьк. политехн. ин-т»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков, 2008. – Вып. 30. – С. 418-420.

4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Бессонов Л. А. - М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

5. Мокін Б. І. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигунами постійного струму: монографія / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 92 с. – ISBN 978-966-641-241-9

6. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.

Стаття надійшла 23.03.10 р.
 Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
 Чорним О.П.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

*Мокин Б.И., д.т.н., проф., Мокин О.Б., к.т.н., доц., Жуков О.А., асп.
 Винницкий национальный технический университет
 ул. Хмельницкое шоссе, 95, 21021, г. Винница, Украина
 E-mail: alex4444_2004@mail.ru*

Обсуждается возможность управления током возбуждения ветроэнергетической установки, тем самым обеспечивая ее оптимальную скорость вращения за счет действия на момент нагрузки, что обеспечит отбор максимально возможной мощности от ветроэнергетической установки.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроколесо, регулятор возбуждения.

AUTOMATIC CONTROL ELECTRIC WINDING POWER UNIT WITH VERTICAL AXIS OF ROTATION SYSTEM

*Mokin B. I., Doc. of Sci. (Tech.), prof., Mokin O. B., Cand. of Sci. (Tech.), Assoc. Prof, Zhucov O. A., post-grad
 Vinnytsia national technical university
 Khmelnytske shose, 95, 21021, Vinnytsya, Ukraine
 E-mail: alex4444_2004@mail.ru*

Possibility of control of the winding power unit a current comes into question, and the same providing its optimum speed of rotation due to an action in the moment of loading which will provide a maximally possible power takeoff vid the winding power unit.

Key words: winding power, windwheel, regulator of excitation.