

УДК 621.548:681.5

А.М. СУББОТА¹, И.Ю. ДЫБСКАЯ¹, А.В. ЗАБОЛОТНЫЙ²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *НПП Хартрон-Аркос, Харьков, Украина*

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

Проведен анализ качества функционирования ветроэнергетической установки (ВЭУ) в условиях изменяющихся ветрового потока, нагрузки и углов установки лопастей. Приведена функциональная схема системы управления ВЭУ. Получена математическая модель системы управления угловой скоростью ротора ВЭУ горизонтально-пропеллерного типа и определены коэффициенты для трехлопастной ветроустановки с горизонтальной осью вращения и мощностью 600 кВт. Представлены схема и результаты машинного моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK, и определены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, лопасть, угол атаки, управление путем поворота лопасти, ротор, электрогенератор.

Введение

Кризисные явления в экономике особенно остро ставят перед потребителями электрической и других видов энергии задачи постоянного снижения энергозатрат, а также поиск дешевых и быстрокупаемых источников энергии. При этом характерной чертой развития современной энергетики является широкое вовлечение в энергобаланс передовых стран мира возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Так согласно Белой книге [1] Европейским сообществом ставится задача к 2010 году удвоить долю ВИЭ в общем энергопотреблении. В частности ведущие страны мира планируют к 2030 году довести долю ветровой энергетики в национальных энергобалансах до 15...20% (Дания до – 50%, Германия – до 30%, США – до 25%, Китай – до 15%, Австралия – до 15%) [2]. Отсутствие парниковых газов CO и CO₂ при выработке электрической энергии снижает губительные влияния на экологию, что делает развитие ВИЭ еще более привлекательным [3]. В нашей стране энергия ветра издавна широко используется, главным образом, в сельском хозяйстве. Прежде всего, это мукомольное производство, водоснабжение, подготовка кормов в животноводческих хозяйствах, орошение садов и огородных культур, освещение селений, в качестве приводов станков небольших ремонтных мастерских и т.д.

В настоящее время в Украине развитие ВЭУ ведется в соответствии с Комплексной программой, разработанной согласно Указа Президента Украины №159 от 2.03.1996 «О строительстве ветроэлектростанций» и постановления Кабинета Министров Украины №137 2.02.1997.

Существует критерий определения рентабельности и окупаемости ВЭУ [4]. Согласно данному критерию среднегодовая скорость ветра должна находиться в пределах 5,1...5,9 м/с. Такому критерию особенно удовлетворяет большая часть восточных и южных районов Украины.

Анализ различных литературных источников показывает, что развитие ВЭУ достаточно многогранно и отражает современные достижения науки и инженерного творчества в техническом их совершенствовании. При этом следует отметить, что некоторые идеи поражают своей неординарностью, например, использование ветряных турбин, приводимых в движение воздушным потоком от движения транспортных средств, проектирование роторов с внешним и промежуточными кольцами, что позволяет увеличить диаметр ротора до 250...300 м и ряд других.

Существует два основных класса ВЭУ – горизонтально-пропеллерные и вертикально-осевые. Последние стали интенсивно развиваться в основном с начала 80-х годов 20 столетия. Сегодня многие страны эксплуатируют вертикально-осевые ветроустановки либо с криволинейными лопастями ротора Дарье (США, Канада, Нидерланды) или с Н-ротором (Великобритания, Украина, Румыния). Эффективность работы вертикально-осевых ветроустановок принципиально не зависит от направления ветра. Поэтому для них отпадает необходимость в системах и механизмах ориентации на ветер. Наибольшая эффективность горизонтально-пропеллерных ВЭУ достигается только при условии обеспечения постоянства коллинеарности оси ветроколеса и направления ветра. При этом необходимость ориентации на ветер

требует наличия в конструкциях ВЭУ специальных механизмов и систем управления для непрерывного слежения за ветровой обстановкой.

При этом, на наш взгляд, наиболее перспективными являются горизонтально-пропеллерные ВЭУ с регулируемым углом поворота лопастей вокруг оси маха для обеспечения поддержания постоянства угловой скорости ротора в условиях изменения скорости и направления ветра, а также нагрузки.

В качестве объекта исследований выбрана горизонтально-пропеллерная ВЭУ с регулируемым углом поворота лопастей ротора.

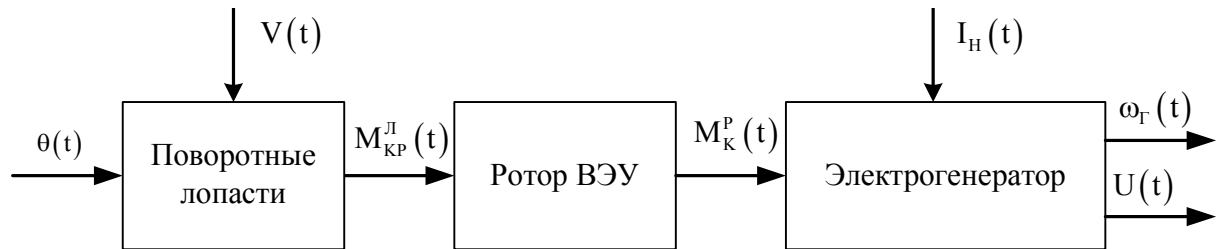


Рис. 1. Функциональная схема объекта регулирования

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $V(t)$ – скорость ветра; $\theta(t)$ – угол поворота лопасти относительно оси маха; $M_{кр}^l(t)$ – крутящий момент, создаваемый лопастью; $M_{кр}^p(t)$ – суммарный крутящий момент, создаваемый ротором ВЭУ; $\omega_Г(t)$ – угловая скорость вращения ротора электрогенератора; $I_H(t)$ – ток нагрузки электрогенератора; $U(t)$ – напряжение на выходе генератора.

Как известно [4], момент, создаваемый ветровым потоком на роторе

$$M_{кр}^p(t) = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{\pi \rho}{2} \cdot R^3 \cdot V^3, \quad (1)$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра (коэффициент мощности); λ – быстроходность ротора; R – радиус ротора ВЭУ; V – скорость ветра; ρ – плотность воздуха.

Быстроходность зависит от типа ротора и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора ВЭУ.

Коэффициент использования энергии ветра находится в существенной нелинейной зависимости от быстроходности и установки угла лопасти

$$C_p = f(\lambda, \theta). \quad (3)$$

Для того, чтобы коэффициент использования ветра C_p выразить в явном виде, рассмотрим его

1. Анализ динамики ВЭУ

Функциональная схема объекта регулирования приведена на рис. 1.

С точки зрения вход-выход исследуемый объект регулирования горизонтально-пропеллерная ВЭУ с поворотными лопастями представим в виде последовательного соединения соответствующих блоков: регулирующей ступени – блока поворотных лопастей, блока выработки суммарного крутящего момента – ротора ВЭУ и блока электрического генератора (рис. 1).

изменение при различных углах отклонений оси вращения ветроколеса ВЭУ от направления ветра. Согласно [5,6] с достаточной для практики точностью можно считать, что мощность ветроколеса при выводе его из под ветра изменяется пропорционально кубу косинуса угла отклонения оси ветроколеса от направления потока.

Таким образом, можно принять, что данный эффект аналогичен действию ветра на ветроколесо при уводе лопастей из под ветра, т.е. их повороту на тот же угол. Учитывая это допущение, выражение для коэффициента использования ветра принимает вид:

$$C_p = C_{p0} \cos^3 \theta, \quad (4)$$

где C_{p0} – коэффициент использования ветра при $\theta=0$, θ – угол поворота лопастей относительно оси маха.

Тогда выражение (1) с учетом (2) и (4) запишется как

$$M_{кр}^p = \frac{\pi \rho}{2} \cdot R^2 \cdot \frac{V^4}{\omega} C_{p0} \cos^3 \theta,$$

или

$$M_{кр}^p = K_p \frac{V^4}{\omega} C_{p0} \cos^3 \theta, \quad (5)$$

где K_p – постоянный коэффициент для данной конструкции ВЭУ.

Исходя из классических законов механики, уравнение динамики ротора ВЭУ описывается выражением

$$I_{Гр} \frac{d\omega}{dt} = M_{кр}^p - M_C - M_a - M_{Тр}, \quad (6)$$

где M_C – момент сопротивления электрогенератора, M_a – аэродинамический момент сопротивления, $M_{Тр}$ – момент трения, $I_{Пр}$ – приведенный к оси ротора ВЭУ момент инерции всех подвижных частей.

Поскольку суммарный момент M_a и $M_{Тр}$ намного меньше момента M_C , обусловленного электрогенератором, то выражение (6) запишем в виде

$$I_{Пр} \frac{d\omega}{dt} = M_K^P - M_C. \quad (7)$$

В качестве электрического генератора в зависимости от его мощности, рода тока, условий эксплуатации и режимов работы (на собственную нагрузку или на сеть) могут быть использованы генераторы постоянного тока, генераторы переменного тока (синхронные, асинхронизированные) или другого типа, например, вентильные. Несмотря на их существенные конструктивные отличия, общим для них является то, что при заданной нагрузке, определенной, например, электрической мощностью (P) или током (I_H) они требуют соответствующей стабилизации, прежде всего, угловой скорости вращения якоря или ротора. Таким образом можно записать, что момент сопротивления электрогенератора в общем случае является функцией двух основных переменных

$$M_C = M_C(P, \omega) \quad (8)$$

или
$$M_C = M_C(I_H, \omega). \quad (9)$$

Предположим, что мы имеем дело с малыми возмущениями скорости ветра и нагрузки электрического генератора, а следовательно с малыми колебаниями ВЭУ около положения равновесия:

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + \Delta\omega; \\ V = V_0 + \Delta V \quad \theta = \theta_0 + \Delta\theta; \\ I_H = I_{H0} + \Delta I; \\ \Delta M_K^P = M_K^P(V, \omega, \theta) - M_{K0}^P(V_0, \omega_0, \theta_0); \\ \Delta M_C = M_C(I_H, \omega) - M_{C0}(I_{H0}, \omega_0). \end{cases} \quad (10)$$

Далее учитывая, что для равновесного состояния $M_{K0}^P = M_{C0}$ и раскладывая функции в ряд Тейлора по соответствующим переменным, а также, ограничиваясь лишь первыми степенями, получим:

$$\Delta M_K^P = \frac{dM_K^P}{dV} \Delta V + \frac{dM_K^P}{d\omega} \Delta\omega + \frac{dM_K^P}{d\theta} \Delta\theta; \quad (11)$$

$$\Delta M_C = \frac{dM_C}{dI_H} \Delta I_H + \frac{dM_C}{d\omega} \Delta\omega. \quad (12)$$

Тогда на основании выражений (5), (7), (11) и (12) имеем

$$T \Delta \ddot{\omega} + \Delta \ddot{\omega} = R_1 \Delta \ddot{V} + R_2 \Delta \ddot{\theta} + R_3 \Delta \ddot{I}_H, \quad (13)$$

где
$$T = \frac{I_{Пр} \omega_0^2}{K_P V_0^4 C_{P_0} \cos^3 \theta_0 + \frac{dM_C}{d\omega} \omega_0^2};$$

$$R_1 = \frac{4K_P C_{P_0} \cos^3 \theta_0}{K_P C_{P_0} \cos^3 \theta_0 + \frac{dM_C}{d\omega} \frac{\omega_0^2}{V_0^4}};$$

$$R_2 = -\frac{3\theta_0 C_{P_0} \cos^2 \theta_0 \sin \theta_0}{K_P C_{P_0} \cos^3 \theta_0 + \frac{\omega_0^2}{V_0^4} \frac{dM_C}{d\omega}};$$

$$R_3 = -\frac{\frac{I_H}{V_0^4} \frac{dM_C}{dI_H}}{K_P C_{P_0} \cos^3 \theta_0 + \frac{\omega_0^2}{V_0^4} \frac{dM_C}{d\omega}};$$

$$\overline{\Delta \omega} = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}; \quad \overline{\Delta V} = \frac{\Delta V}{V_0}; \quad \overline{\Delta \theta} = \frac{\Delta \theta}{\theta_0}.$$

Применяя к выражению (13) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получим соответствующее уравнение динамики и структуру объекта регулирования (рис. 2):

$$(Ts + 1) \overline{\Delta \omega}(s) = R_1 \overline{\Delta V}(s) + R_2 \overline{\Delta \theta}(s) + R_3 \overline{\Delta I}_H(s) \quad (14)$$

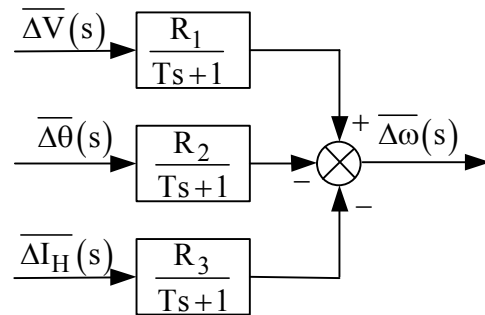


Рис. 2. Структурная схема объекта регулирования

Особенностью объекта регулирования является наличие трех входных переменных.

2. Функциональная схема системы управления ВЭУ

Существует много способов управления выходными параметрами ВЭУ [6]. Все они делятся на активные и пассивные. Достоинством пассивного способа управления ВЭУ является относительная простота в проектировании таких систем и их эксплуатации, активного – высокая точность выходных управляемых параметров.

В данной статье рассмотрено активное управление путем изменения угла атаки лопастей. Угловая скорость вращения ротора ВЭУ зависит от скорости ветра, угла поворота лопасти относительно набегающего потока и нагрузки на генераторе. Следовательно, при изменении ветра и нагрузки, варьируя углом атаки можно обеспечить постоянство угловой скорости.

На рис. 3 приведена функциональная схема системы управления, в которой использован данный принцип.

Эта система имеет следующие датчики: датчик угловой скорости электрогенератора, 4 датчика скорости ветра и датчики угла поворота лопастей и ее угловой скорости. На основании информации с них о величине текущих параметров формируется управляющий сигнал для исполнительного механизма, в роли которого выступает электропривод, который поворачивает лопасть на требуемый угол

для обеспечения заданной угловой скорости вращения электрогенератора.

На рис. 3 введены следующие обозначения:

ЗД – задатчик выходной угловой скорости электрогенератора;

ДУС – датчик угловой скорости;

ДУ – датчик угла;

ДСВ – датчик скорости ветра;

УМ – усилитель мощности;

Р – редуктор;

ДСГ – датчик угловой скорости генератора.

Четыре ДСВ расположены таким образом, что фиксируют значение скорости ветра в 4 разных точках и направлениях относительно оси вращения ротора. Блок обработки воздушной скорости формирует среднее значение скорости. Таким образом, решается проблема учета возникновения резких порывов ветра и вихревых потоков, которые возникают в результате вращения ротора ВЭУ.

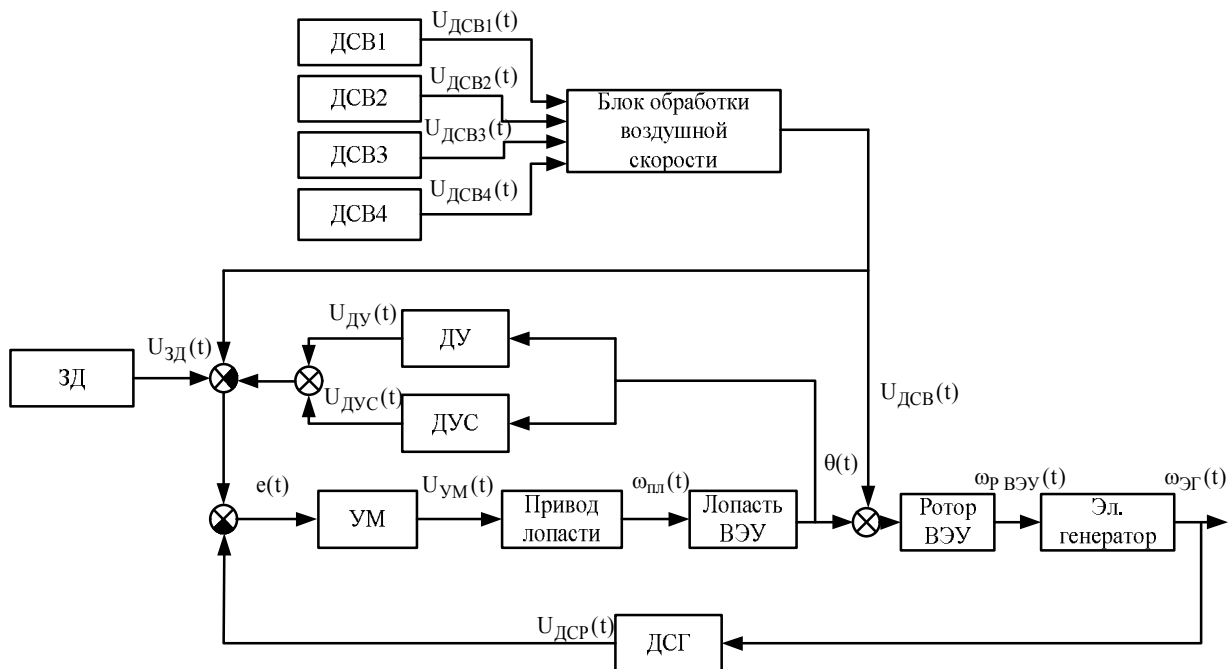


Рис. 3. Функциональная схема системы управления ВЭУ

В данную систему, в отличие от классической, которая имеет одну обратную связь по угловой скорости вращения электрогенератора, введены еще две дополнительные обратные связи по углу отклонения и угловой скорости лопасти, что значительно повышает быстродействие и точность системы.

3. Моделирование системы управления ВЭУ в среде MATLAB/SIMULINK

Рассмотрим систему управления трехлопастной ВЭУ с горизонтальной осью вращения мощностью 600 кВт [2].

Согласно [2] радиус ометаемой поверхности ротора ВЭУ, которая обеспечит требуемую мощность при рабочей скорости ветра $V_0 = 8$ м/с, должен быть равным $R = 24$ м. Начальный угол атаки лопастей данной установки $\theta_0 = 10^\circ$.

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента мощности от быстроходности для разных типов ветроустановок. Рабочую точку целесообразно выбирать на кривой за пиковым ее значением коэффициента мощности [6].

Для ВЭУ данного типа таковой является точка с быстроходностью 5 и $C_{P_0} = 0,45$.

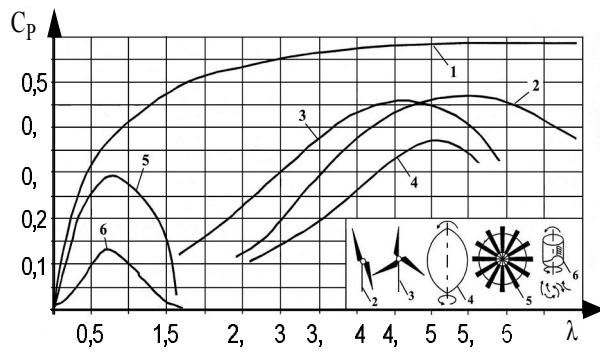


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности C_p от быстроходности

Следовательно, ветроколесо должно вращаться с угловой скоростью $\omega_0 = 2,7$ рад/с.

Из всего вышеперечисленного определены коэффициенты ветроколеса $R_1 = 1,41$, $R_2 = 0,016$, $R_3 = 0,24$ и постоянная времени $T = 0,3$ с.

На рис. 5 приведена схема моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK. Группа блоков Step1- Step5 формирует диаграмму скачкообразного изменения ветрового возмущения. Блоки Sine Wave, Gain3 предназначены для формирования изменяющейся составляющей, а блок Constant1 – постоянной составляющей ветрового потока.

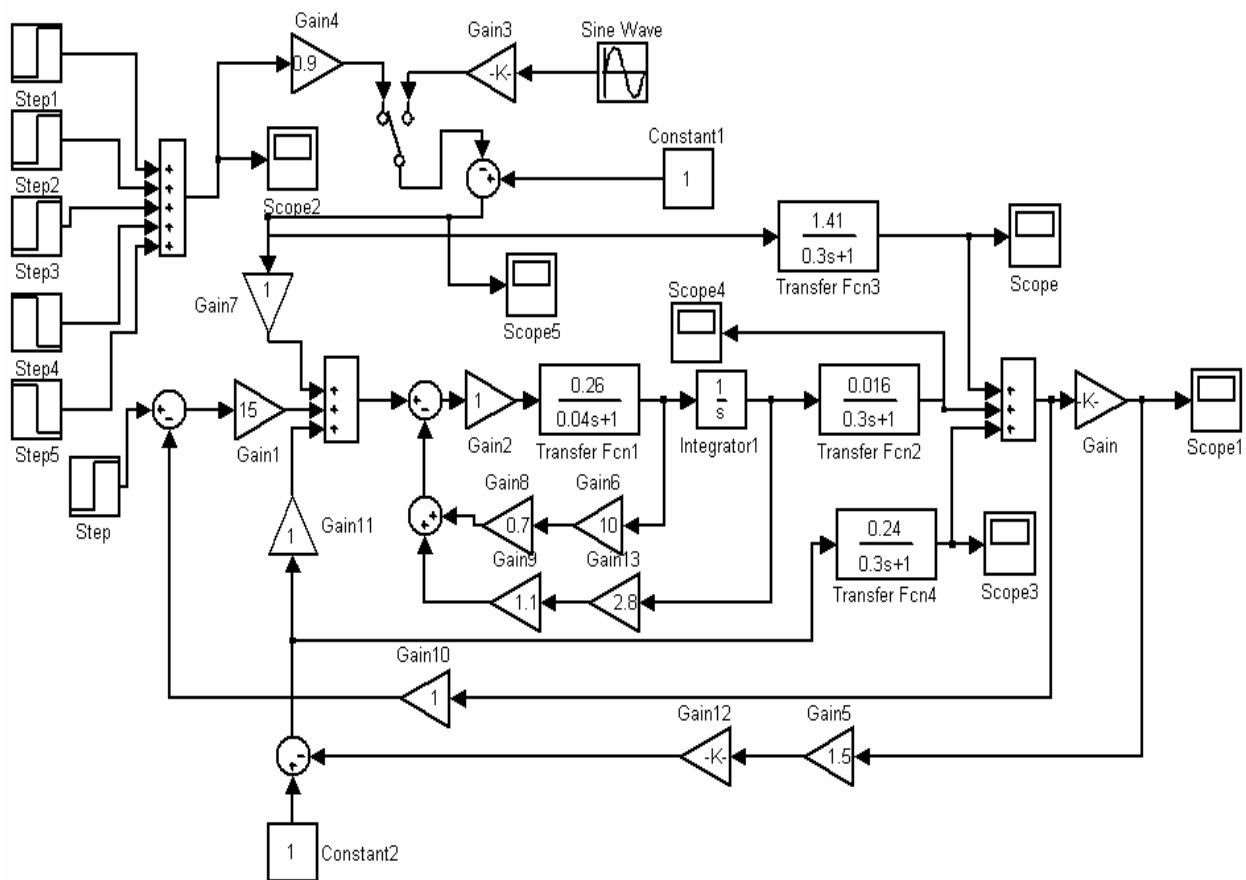


Рис. 5. Схема моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK

Блок Step формирует задающее воздействие в виде ступенчатой функции; Gain1 – усилитель выходного сигнала; блок Transfer Fcn1 – передаточная функция исполнительного механизма; Transfer Fcn2- Transfer Fcn4 – передаточные функции объекта соответственно со входными переменными: скоростью ветра, угла атаки лопасти и изменения нагрузки. Блок Constant2 задает уровень исходной нагрузки.

Блок Gain соответствует уменьшению общего коэффициента передачи системы в результате действия нагрузки.

Блок Gain2 – коэффициент усиления мощно-

сти; Gain8 – коэффициент передачи датчика угловой скорости; Gain9 – коэффициент передачи датчика угла; Gain10 – датчика угловой скорости внешнего контура; Gain12 – датчика нагрузки.

Блоки Gain8 и Gain9 – коэффициенты обратных связей по угловой скорости вращения лопасти и ее углу отклонения соответственно.

Блоки Step, Step1-Step5 предназначены для имитации скачкообразного изменения ветра.

Блок Switch предназначен для исследования качества системы регулирования при различных изменениях ветрового потока: синусоидального и ступенчатого.

Блоки регистрации сигналов позволяют получить реакции: угла лопасти ВЭУ (Score), угловой скорости электрогенератора (Score1), формирования ветрового порыва (Score2), изменения нагрузки (Score3), угловой скорости ротора ВЭУ (Score4), результирующего ветрового воздействия (Score5) соответственно.

Реакция системы на скачкообразно и синусоидально изменяющуюся скорость ветра приведены соответственно на рис.6 и 7.

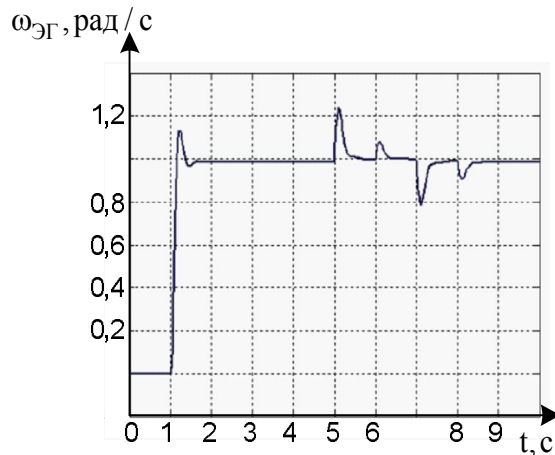


Рис. 6. Реакция системы на скачкообразно изменяющуюся скорость ветра

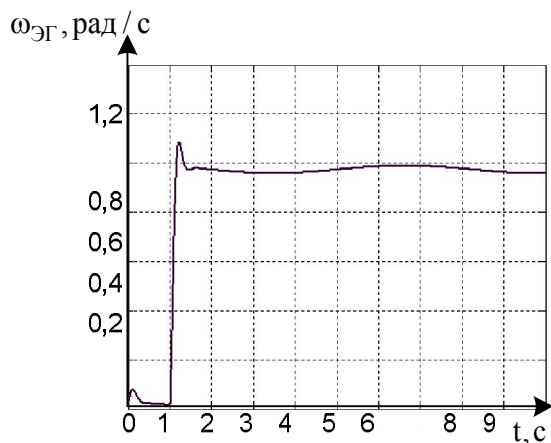


Рис. 7. Реакция системы на синусоидально изменяющуюся скорость ветра

Результаты моделирования показывают, что установившаяся ошибка системы равняется 0 рад/с, время переходного процесса при разных изменениях скорости ветра достаточно мало (до 1 с) и удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к системам такого типа.

Заключение

В статье представлен анализ качества функционирования ВЭУ в условиях изменяющихся ветрового потока, нагрузки и углов установки лопастей. Полученная математическая модель системы управления угловой скоростью ротора ВЭУ горизонтально-пропеллерного типа позволяет провести исследования влияния различных типов ветрового воздействия на показатели качества замкнутой системы. Определены значения коэффициентов трехлопастной ветроустановки с горизонтальной осью вращения и мощностью 600 кВт. Особенностью функциональной схемы системы управления ветроэнергетической установкой является использование принципа управления путем изменения угла атаки лопастей. Введение внутренних обратных связей в системе по углу отклонения лопасти и ее угловой скорости поворота, а также наличие внешней обратной связи по угловой скорости вращения электрогенератора позволило значительно повысить качество управления.

Результаты машинного моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK при различных видах воздействия ветрового потока подтверждают работоспособность ВЭУ и обеспечение заданных показателей качества. Дальнейшие исследования предусматривают проведение следующих мероприятий:

- анализ функционирования ВЭУ с учетом ограничений на ветровые перегрузки и ускорения;
- изучение особенностей работы ВЭУ с асинхронными генераторами, включенными в общую сеть;
- анализ функционирования ВЭУ с использованием маховиков, как инерционных элементов для улучшения реакции на резкие перепады скорости ветра.

Литература

1. Ольсен Гуннар Бой Чи зможе ЄС вдвічі збільшити виробництво поновлюваної енергії, або про що йдеться у White Paper? / Гуннар Бой Ольсен // Зелена енергетика. – 2001. – № 2. – С. 4-5.
2. Кривцов В.С Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэнергетические генераторы: учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. полит. ун-т, 2003. – 400 с.
3. Солод М. Ветроэнергетика. Попытка реанимации? / М. Солод // Наука и техника. – 2008. – №11. – С. 21-26.

4. Fernandez Diez Pedro. *Energia colica* / ЦАГИ, вып. 28 / Г.Х. Сабинин. – М.: ЦАГИ, 1926. – D.P. Fernandez // *Metalucguiz y elea tcicida*. – 1980. – 112 с.
Vol. 44, № 509. – P. 63-68.
5. Gasch R. *Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf* / R. Gasch. – Stuttgart: Teibner, 1995. – 391 с.
6. Сабинин Г.Х. *Характеристики ветродвигателя в зависимости от направления ветра*. Труды
7. Фатеев Е.М. *Ветродвигатели и ветроустановки. Учебное пособие*. / Е.М. Фатеев. – М.: ГосИздат. с.-х. лит., 1957. – 536 с.

Поступила в редакцию 19.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры энергоустановок и двигателей летательных аппаратов А.И. Яковлев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ”, Харьков, Украина.

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ

А.М. Субота, І.Ю. Дибська, О.В. Заболотний

Проведений аналіз впливу якості функціонування вітроенергетичної установки (ВЕУ) в умовах змінювальних вітряного потіка, навантаження та кутів установки лопатей. Наведена функціональна схема ВЕУ. Отримана математична модель системи управління кутової швидкості ротора ВЕУ та визначені коефіцієнти для трилопатевої вітроустановки з горизонтальною віссю обертання і потужністю 600 кВт. Представлено результати машинного моделювання системи в середовищі MATLAB/SIMULINK та визначено задачі подальших досліджень.

Ключові слова: вітроенергетична установка, лопать, кут атаки, управління шляхом повороту лопаті, ротор, електрогенератор.

CONTROL SYSTEM OF WIND-DRIVEN POWER PLANT

A.M. Subota, I.Yu. Dybska, O.V. Zabolotniy

The analysis of wind-driven power plant performance under changeable wind flow, load and angles of blades is presented. The functional diagram of wind-driven power plant control system is proposed. The mathematical model of control system of horizontal propeller wind-driven power plant angular velocity is obtained and coefficients are determined for trilobate wind-driven power plant with the horizontal axis of rotation and power 600 kW. The simulation scheme and results of numerical calculation are given and the tasks of further research are presented.

Key words: wind-driven power plant, blade, corner of attack, control by the turn of blade, rotor, electric generator.

Суббота Анатолий Максимович – канд. техн. наук, проф. кафедри систем управління летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Дыбская Ирина Юрьевна – канд. техн. наук, доцент кафедри систем управління летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: irinadyb@gmail.com.

Заболотный Александр Викторович – инженер-математик НПП Хартрон-Аркас, Харьков, Украина, e-mail: alexx_20@mail.ru.