

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Ребенок Е. В., магистрант; Хорхордин А. В., проф., к.т.н., доц.

(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)

Актуальность. При проведении исследований и разработок в области ветроэнергетики широко используются физические и математические модели, так как натурные эксперименты не всегда возможны как по техническим, так и по экономическим соображениям.

Цель - повышение мощности ветроэнергетической станции, за счет совершенствования системы управления углом поворота лопастей ветроэнергетической установки (ВЭУ) при изменении скорости и направления ветра.

Математическая модель ВЭУ.

Математическую модель ВЭУ с поворотными лопастями получим на основании структурной схемы (рис. 1) [1 – 3].

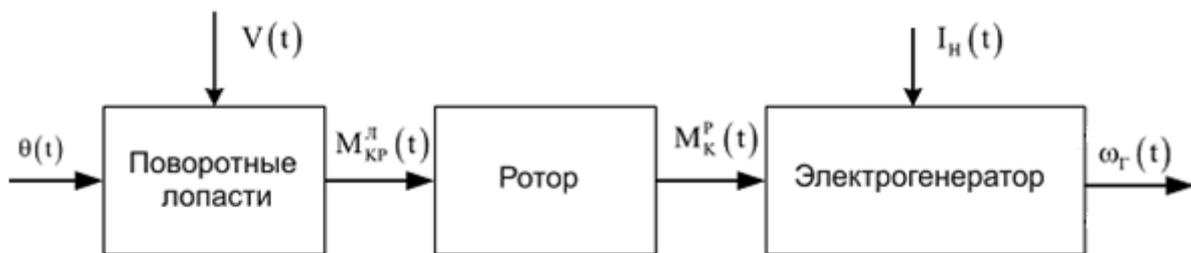


Рисунок 1 – Структурная схема математической модели ВЭУ с поворотными лопастями

На рис. 1 введены обозначения: $V(t)$ - скорость ветра; $\theta(t)$ - угол поворота лопасти относительно оси маха; $M_{кр}^л(t)$ - крутящий момент, создаваемый лопастью; $M_{кр}^р(t)$ - суммарный крутящий момент, создаваемый ротором ВЭУ; $\omega_r(t)$ - угловая скорость вращения ротора электрогенератора; $I_n(t)$ - ток нагрузки электрогенератора.

На рис. 2 представлена схема влияния воздушного потока на лопасть ВЭУ с горизонтальной осью вращения рабочего колеса [3, 4].

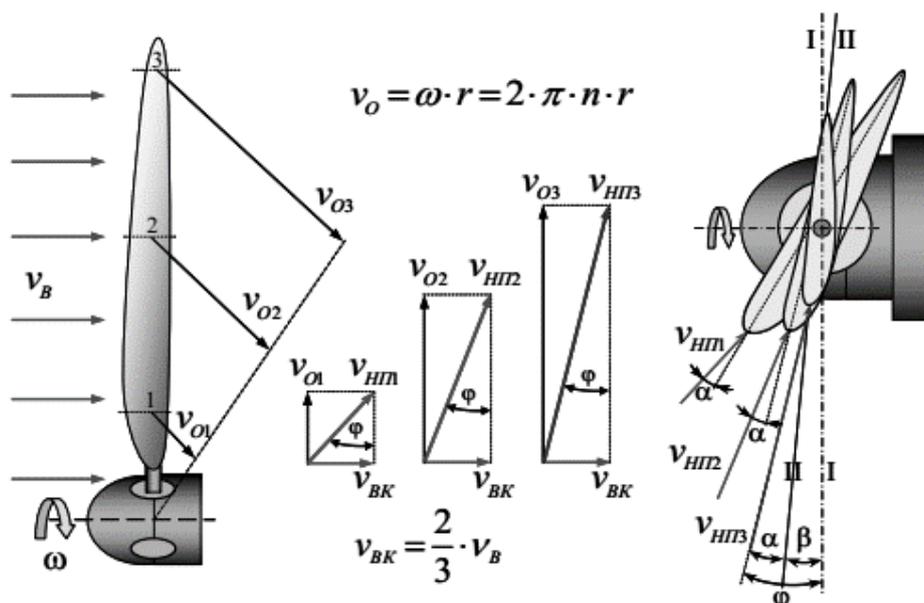


Рисунок 2 – Схема воздействия воздушного потока на лопасть

При поступательном движении аэродинамической плоскости угол набегания воздушного потока α для всех сечений плоскости, а также направление и модуль вектора полной аэродинамической силы F остаются постоянными. При вращении лопастей ВЭУ распределение скоростей и углов носит совсем другой характер.

Согласно теории идеального ветряка скорость ветра v_0 при подходе к рабочему колесу замедляется и в плоскости вращения рабочего колеса составляет величину, равную $v_{вк} = v_0 * 2/3$. Окружной движение лопастей дает дополнительную составляющую окружной скорости v_0 , которую можно найти, если считать лопасти неподвижными, а воздух движется в противоположном направлении. В результате геометрического суммирования скоростей v_0 и $v_{вк}$ получим результирующую скорость воздушного потока $v_{нт}$ которая действует на лопасть (скорость набегающего потока).

Момент относительно оси элементарного ветроколеса равен:

$$dM_{кр}^л = \left[\rho \frac{e}{1+e} \frac{1-\mu\lambda}{\lambda+\mu} V^2 \right] 4\pi r^2 dr, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха; e – коэффициент торможения воздушного потока; λ – соответствующая радиусу быстроходность; μ – обратное качество крыла; r – расстояние от оси до начала лопасти; V – скорость воздушного потока.

Согласно физической модели, приведенной в [1, 3], момент, создаваемый ветровым потоком на валу ротора, составит:

$$M_{кр}^P = \frac{C_P}{\lambda} \frac{\pi \rho}{2} R^2 V^3, \quad (2)$$

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

Быстроходность зависит от типа ротора и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V}, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора ВЭУ.

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

$$C_P = f(\lambda, \theta). \quad (4)$$

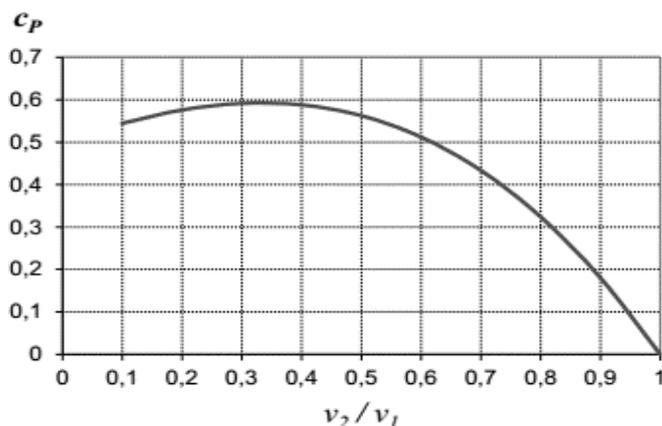


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента использования энергии ветра от соотношения скоростей воздушного потока после и перед ветроколесом

Для того, чтобы коэффициент использования ветра C_P выразить в явном виде, рассмотрим его изменение при различных углах отклонений оси вращения ветроколеса ВЭУ от направления ветра. 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 отводе лопастей из-под ветра, то есть их поворот на тот же угол. Учитывая это допущение, выражение для коэффициента использования энергии ветра принимает вид:

$$C_P = C_{P0} \cos^3 \theta, \quad (5)$$

где C_{P0} - коэффициент использования ветра при $\theta = 0$; θ - угол поворота лопастей относительно оси маха.

Тогда выражение (2) с учетом (3) - (5) запишется как:

$$M_{кр}^P = \frac{\pi \rho}{2} R^2 \frac{V^4}{\omega} C_{P0} \cos^3 \theta,$$

или

$$M_{кр}^P = K_P \frac{V^4}{\omega} C_{P0} \cos^3 \theta, \quad (6)$$

где K_P - постоянный коэффициент для данной конструкции ВЭУ.

Исходя из классических законов механики, уравнения динамики ротора ВЭУ описывается выражением:

$$J_{Пр} \frac{d\omega}{dt} = M_{кр}^P - M_C - M_A - M_{Тр}, \quad (7)$$

где M_C - момент сопротивления электрогенератора; M_A - аэродинамический момент сопротивления; $M_{Тр}$ - момент трения; $J_{Пр}$ - приведенный к оси ротора ВЭУ момент инерции всех движущихся частей.

Поскольку суммарный момент M_A и $M_{Тр}$ намного меньше момента M_C , обусловленного электрогенератором, то выражение (7) запишем в виде:

$$J_{Пр} \frac{d\omega}{dt} = M_{кр}^P - M_C. \quad (8)$$

В качестве исполнительного устройства воздействующего на лопасть ветроколеса для ее поворота чаще всего применяются серводвигатели. Схема физической модели управляемой электромеханической системы приведена на рис. 4.

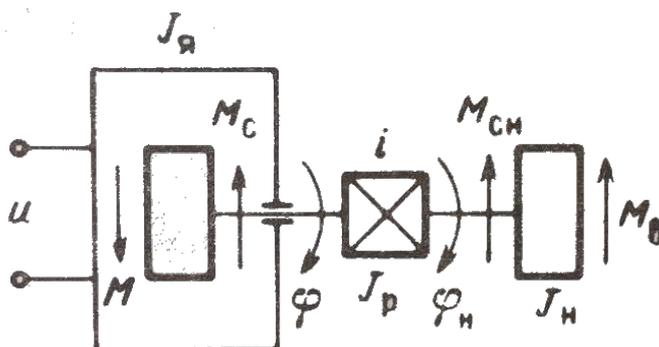


Рисунок 4 – Схема электромеханической системы поворота лопастей ветроколеса

Она состоит из двигателя, механизма передачи вращательного движения и нагрузки (лопасти ветроколеса). Момент инерции якоря двигателя обозначен через $J_я$, редуктора – $J_р$, а нагрузки $J_н$. Угол поворота вала двигателя обозначен φ , а вала нагрузки $\varphi_н$. Управляющим сигналом является напряжение питания якорной цепи u .

Обозначим через $M_н$ момент, прикладываемый к нагрузке со стороны двигателя, а через M – электромагнитный момент, развиваемый двигателем. Кроме того, момент инерции редуктора пересчитаем к валу двигателя по формуле:

$$J'_P = J_P i^{-2}.$$

Тогда уравнения движения рассматриваемой системы можно записать в виде:

$$\begin{cases} (J_Y + J'_P)\ddot{\varphi} = M - M_C - M_H i^{-2}; \\ J_H \ddot{\varphi}_H = M_H - M_{CH} - M_B, \end{cases} \quad (9)$$

где M_C – момент сил сопротивления в двигателе и редукторе, приведенный к валу двигателя; M_{CH} – момент сил сопротивления на валу нагрузки; M_B – возмущающий момент.

Уравнение (9) можно привести к одному уравнению, если использовать кинематическое соотношение $\varphi_H = \varphi i^{-2}$ и провести пересчет момента инерции J_H и моментов, стоящих в правой части второго уравнения, к валу двигателя. Умножим второе уравнение на i^{-1} и сложим оба уравнения:

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} = M - M'_H; \\ J = J_Y + J'_P + J_H i^{-2}; \\ M'_H = M_C + (M_{CH} + M_B) i^{-1}. \end{cases} \quad (10)$$

Уравнение (10) характеризует движение механической системы «двигатель-редуктор-нагрузка». Момент M'_H зависит от параметров движения, конструктивного исполнения элементов системы и других факторов. В основном он определяется силами сухого трения. Обычно принимают:

$$M'_H = c \text{sign} \omega.$$

Реализация математической модели ВЭУ.

В большинстве случаев современные средства моделирования позволяют обеспечить высокий уровень адекватности модели. Одним из таких средств является Simulink – интерактивный инструмент для моделирования, имитации и анализа динамических систем. Он дает возможность строить графические блок-диаграммы, имитировать динамические системы, исследовать работоспособность систем и совершенствовать проекты. На рис. 5 представлена структурная схема полученной ранее математической модели.

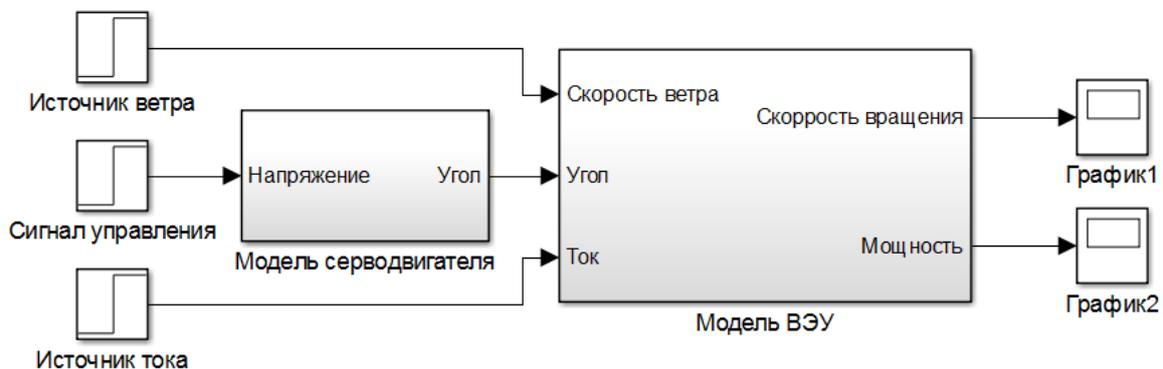
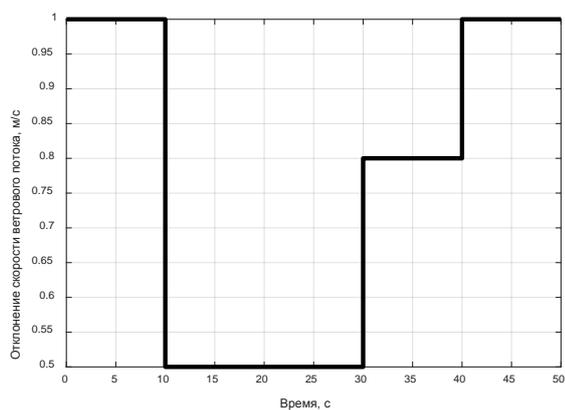


Рисунок 5 – Структурная схема математической модели ВЭУ

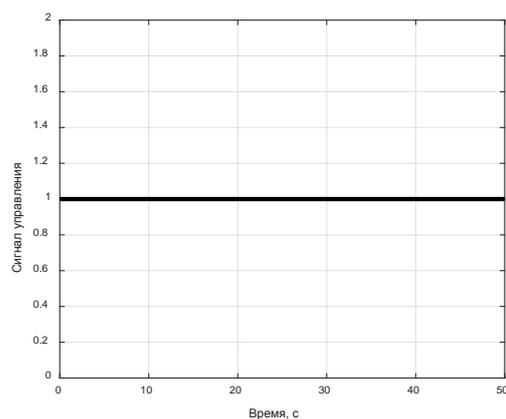
Параметры математической модели задаются в символьном виде, что позволяет проводить исследование поведения ветроэнергетической установки в условиях изменяющихся погодных.

Исследование динамических характеристик ВЭУ.

Зададим отклонение скорости ветра от номинального значения (10 м/с), а также значение сигнала отклонения управления для серводвигателя, изображенных на рис. 6.



а)



б)

Рисунок 6 – Графики изменения входных воздействий

В результате проведения моделирования при заданных входных воздействиях получены следующие результаты, представленные на рис. 7.

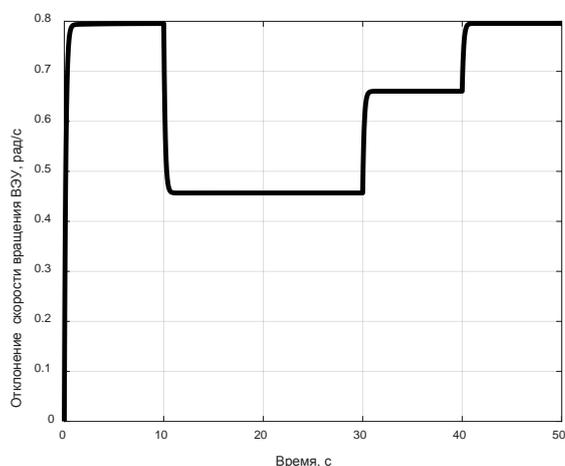


Рисунок 7 – График изменения скорости вращения ВЭУ

Анализ переходного процесса (рис. 7) позволяет сделать вывод, что скорость вращения ВЭУ является величиной непостоянной при изменяющейся скорости ветрового потока, что приводит к повышению или понижению вырабатываемой электрической мощности.

Выводы. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать заключение, что разработанная модель на качественном уровне соответствует основным характеристикам исследуемого процесса преобразования кинетической энергии ветра в электрическую с помощью ВЭУ и есть необходимость непрерывной адаптации частоты вращения ротора к переменной скорости ветра.

Перечень ссылок

1. Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо ; пер. с англ. Я. И. Шефтера. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
2. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергия / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ» ; Севастополь : Севаст. нац. политех. ун-т, 2003. – Кн. 1. : Ветроэнергогенераторы : учебник. – 400 с.
3. Субота, А. М. Система управління ветроенергетичною установкою / А. М. Субота, І. Ю. Дибська, О.В. Заболотній // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – 2009. - №3 (37). – С. 61 – 67.
4. Фатеев, Е. М. Ветро двигатели и ветроустановки : учебное пособие / Е. М. Фатеев. – Москва : Гос-издат. с.-х. лит., 1957. – 536 с.