

УДК 621.311.24

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В ПРОГРАММЕ В MATLAB/SIMULINK**

*Е.М. Гордиевский, А.А. Мирошниченко, А.З. Кулганатов,  
А.А. Ковалёв, В.И. Станчаускас*

В данной работе была создана имитационная модель ветроэнергетической установки (ВЭУ) с отображением элементов и режимов её работы в программной среде MATLAB. ВЭУ являются одним из наиболее перспективных решений для автономного электроснабжения изолированных потребителей. В статье представлена модель ветроэнергетической установки и по итогам её работы были получены результаты моделирования.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, MATLAB, ВИЭ, децентрализованное энергоснабжение.

Энергия ветра является наиболее привлекательным решением глобальных энергетических проблем. Её использование не загрязняет окружающую среду и не зависит от топлива. Кроме того, ветровые ресурсы присутствуют в любой части мира, и их достаточно для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию. За последние двадцать лет производство ветряных турбин прошло большой путь. В результате современная ветроэлектростанция по своим характеристикам не уступает традиционной электростанции. Также использование возобновляемых источников энергии, включая энергию ветра, позволяет избежать рисков, связанных с ухудшением экологии, которые возникают при использовании традиционных источников энергии [1]. Целью моделирования различных алгоритмов управления ветротурбинами является определение эксплуатационных характеристик ветротурбин при работе под управлением этих алгоритмов при различных внешних изменяющихся воздействиях, а также разработка и оптимизация новых алгоритмов при проведении дальнейших исследований и разработок, в том числе натурных испытаний реальных объектов.

### **Разработка имитационной модели ветроэнергетической установки**

Разрабатываемая имитационная модель ветроэнергетической установки (ВЭУ) будет содержать следующие компоненты:

- имитатор источника ветровой энергии;
- модель преобразователя ветровой энергии в механическую энергию вращения;
- модель электромеханического преобразователя (электрического генератора);
- модули для контроля и анализа параметров и характеристик модели.

### Математическая модель

Для построения и математической модели ВЭУ запишем уравнение моментов. Дифференциальное уравнение для описания вращательного движения ветроколеса имеет вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_a - M_g - M_c), \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения ротора, рад/с;  $t$  – время, с;  $J$  – момент инерции системы, кг·м<sup>2</sup>;  $M_a$  – аэродинамический момент ветроколеса, Н/м;  $M_g$  – электромагнитный момент генератора, Н/м;  $M_c$  – момент сопротивления потерь, учитывающий трение и другие потери, Н/м.

Аэродинамический момент ротора будет равен:

$$M_a = \frac{P}{\omega} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3}{2\omega}, \quad (2)$$

где  $P$  – мощность, кВт;  $c_p$  – коэффициент мощности (зависит от быстроты  $\lambda$ );  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup> (примем  $\rho=1,25$ );  $S$  – ометаемая ротором ВЭУ площадь, м<sup>2</sup>;  $V$  – скорость ветра, м/с.

Тогда аэродинамическая мощность равна:

$$P_a = \frac{c_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3}{2}. \quad (3)$$

Момент сопротивления на валу равен:

$$M_c = \frac{P_M}{\omega}, \quad (4)$$

где  $P_M$  – механическая мощность на валу генератора.

Основной характеристикой, влияющей на эффективность ветроэнергетической установки, является коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ,  $c_p$ ), который представляет собой отношение механической мощности ветроколеса к полной мощности энергии ветра, проходящей через ометаемую площадь ветроколеса ВЭУ. Выразим КИЭВ через формулу быстроты [2]:

$$c_p = f(\lambda), \quad (5)$$

где

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{V}, \quad (6)$$

где  $\omega$  – частота вращения ветроколеса,  $r$  – радиус ротора,  $V$  – скорость ветра.

Обычно низкоскоростная ВЭУ имеет значение коэффициента быстроты конца лопасти ( $\lambda$ ) от 1 до 5, а высокоскоростная ветряная турбина от 5 до 9. На рис. 1 представим типовой график аэродинамической характеристики ветротурбины с вертикальной осью вращения [3].

Для вертикально-осевых ВЭУ быстрота примерно равна 3, а коэффициент мощности, который представляет собой соотношение механической и поступающей энергий, не превышает обычно 0,5 (в данном случае примем равным 0,5). Чтобы получить приближенное уравнение данного графика воспользуемся методом подбора коэффициентов в программе

Microsoft Excel . Для этого по заданным нами приблизительным точкам построим график с добавлением линии тренда и полиномиальной аппроксимацией сглаживания четвертой степени. График по заданным точкам для получения уравнения представим на рис. 2. Полученный полином (приближительное уравнение графика типичной аэродинамической характеристики) в дальнейшем будет прописан в блоке «f(u)» первой подсистемы уравнений.

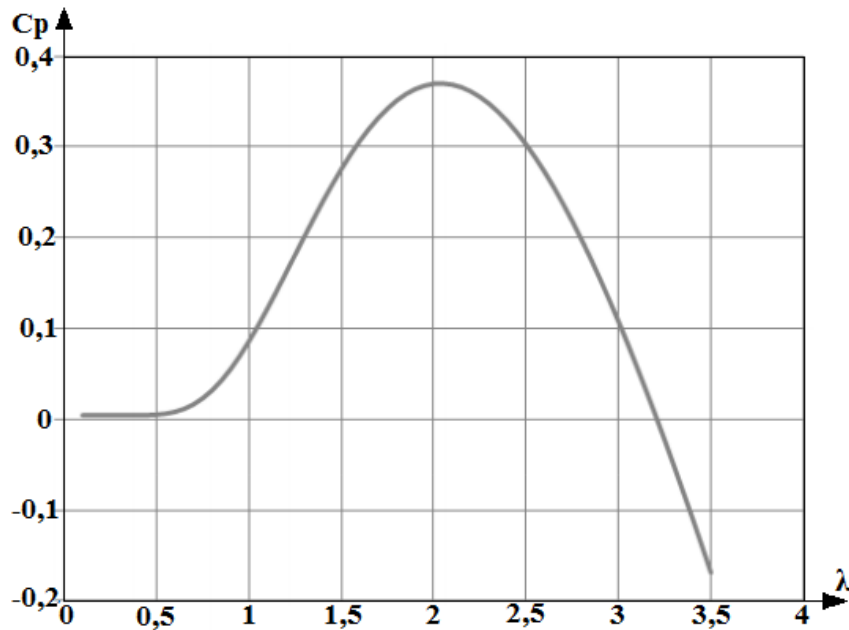


Рис. 1. Типовая аэродинамическая  $C_p = f(\lambda)$  характеристика ветротурбины с вертикальной осью вращения

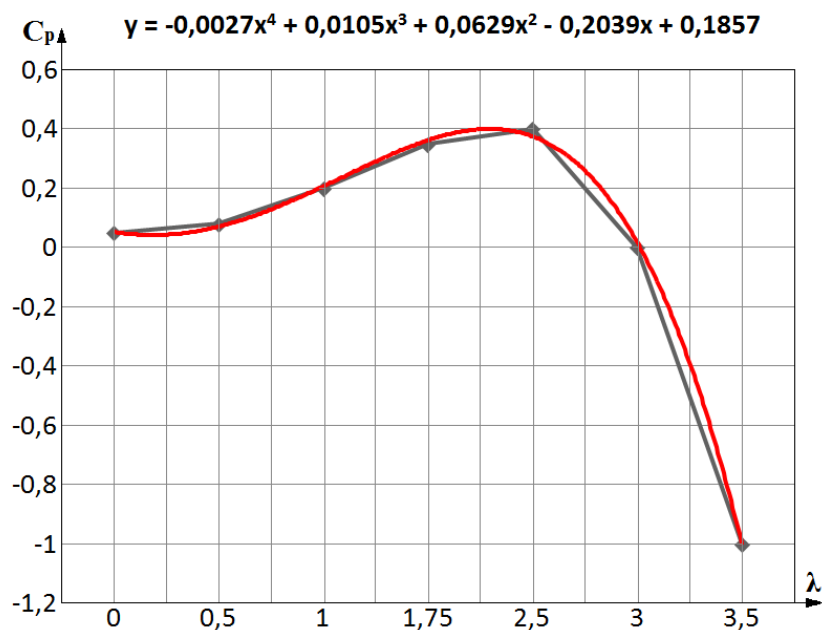


Рис. 2. Сопоставление графика, полученного методом подбора коэффициентов, с графиком полученного полинома

*Компьютерная модель*

Компьютерная модель ветроэнергетической установки разработана согласно функциональной схеме, приведенной на рис. 3.

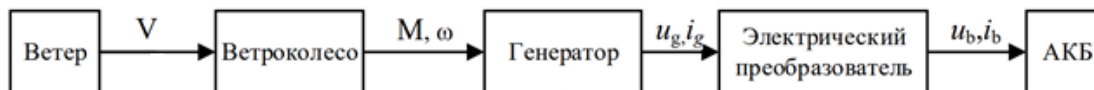


Рис. 3. Функциональная схема имитационной модели ветроэнергетической установки

Построение имитационной модели начнем с создания источника ветровой энергии. Для этой цели нам подойдут блоки «Sin Wave» (блок источника синусоидального сигнала, предназначенный для формирования синусоидального сигнала с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением) и блок «Uniform Random Number» (блок источника случайного дискретного сигнала с нормальным распределением, предназначенный для формирования случайного сигнала с равномерным распределением уровня и получения наиболее разнообразной и стохастической формы сигнала [4].

Имитационная модель для симуляции энергии ветра, проходящего через ометаемую площадь ветроколеса ВЭУ, представим на рис. 4.

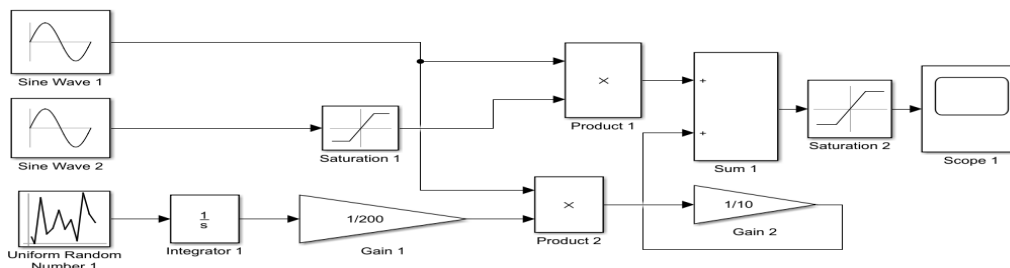


Рис. 4. Имитационная модель энергии ветра

Для предотвращения попадания отрицательных значений скорости ветра добавим блок «Saturation» (ограничитель). В параметрах каждого ограничителя укажем диапазон только положительных значений. Превышение скорости ветра величины 9 м/с не свойственно для Челябинской области, поэтому модель была спроектирована таким образом, чтобы скорость ветра не превышала 9 м/с.

Следующим этапом стала реализация уравнений электрической схемы замещения ВЭУ, представленной на рис. 5.

Запишем уравнения к данной схеме замещения:

Сила тока:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{BH} + R_H}, \quad (7)$$

где  $R_{вн} = 0,05 \text{ Ом}$ .

ЭДС:

$$\varepsilon = k \cdot \omega, \quad (8)$$

где коэффициент связи для ЭДС и угловой скорости  $k = 1,8$ .

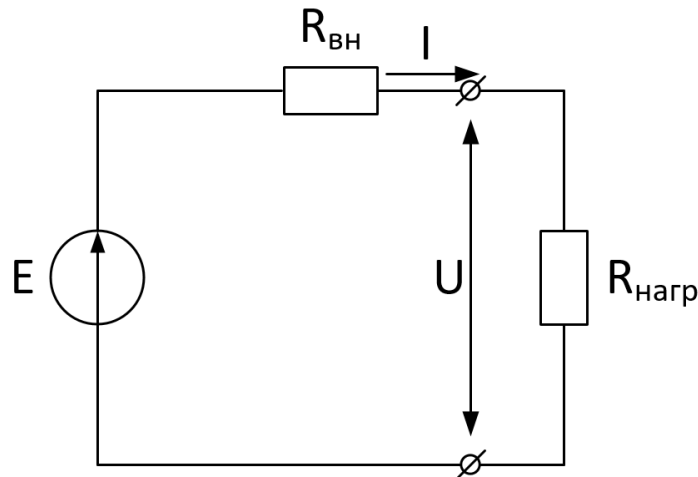


Рис. 5. Упрощенная электрическая схема замещения ВЭУ

В качестве объекта исследования авторами рассматривается вертикально-осевая ветроэнергетическая установка, расположенная на одном из корпусов Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

Номинальные характеристики ветроэнергетической установки равны:

- мощность  $P = 3000 \text{ Вт}$ ;
- частота вращения  $\omega = 180 \text{ об/мин}$ ;
- напряжение  $U = 300 \text{ В}$ .

В таком случае, электромагнитный момент будет равен:

$$T = M_{\varepsilon} = \frac{P}{\omega} = \frac{3000}{180 \cdot \frac{2\pi \cdot 14}{60}} = \frac{3000}{18,954} = 158,3 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad (9)$$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3000}{300} = 10 \text{ А}. \quad (10)$$

Уравнение полезной мощности имеет вид:

$$P_{\text{пол}} = R_{\text{н}} \cdot I^2. \quad (11)$$

Отразим вышеуказанные уравнения, отражающие электрическую составляющую работы ВЭУ во второй подсистеме.

Следующим шагом стало объединение двух подсистем (рис. 6) с добавлением в объединенную систему блока «Step», который предназначен для генерирования ступенчатого сигнала. Также в общую систему необходимо добавить блок «PID Controller» ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор). ПИД-регулятор предназначен для поддержания на требуемом уровне некоей величины. В нашем слу-

чае параметры ПИД-регулятора настроены таким образом, чтобы он мог регулировать сопротивление нагрузки пропорционально изменениям скорости ветра.

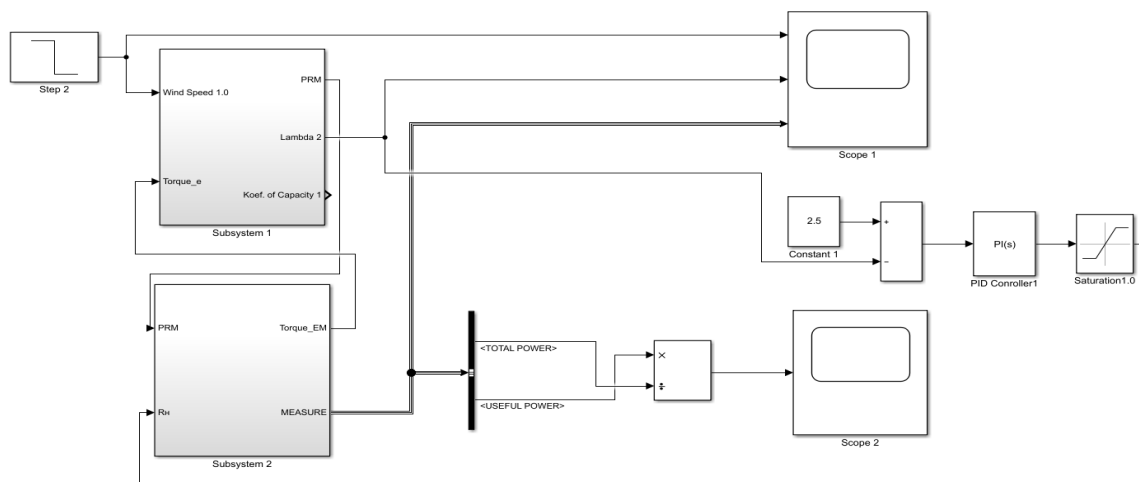


Рис. 6. Объединенная имитационная модель ВЭУ

Построенная модель позволила с помощью графиков, снятых с осциллографа «Scope 1», проанализировать зависимость быстроходности, полной и полезной мощностей от скорости ветра (рис. 7).

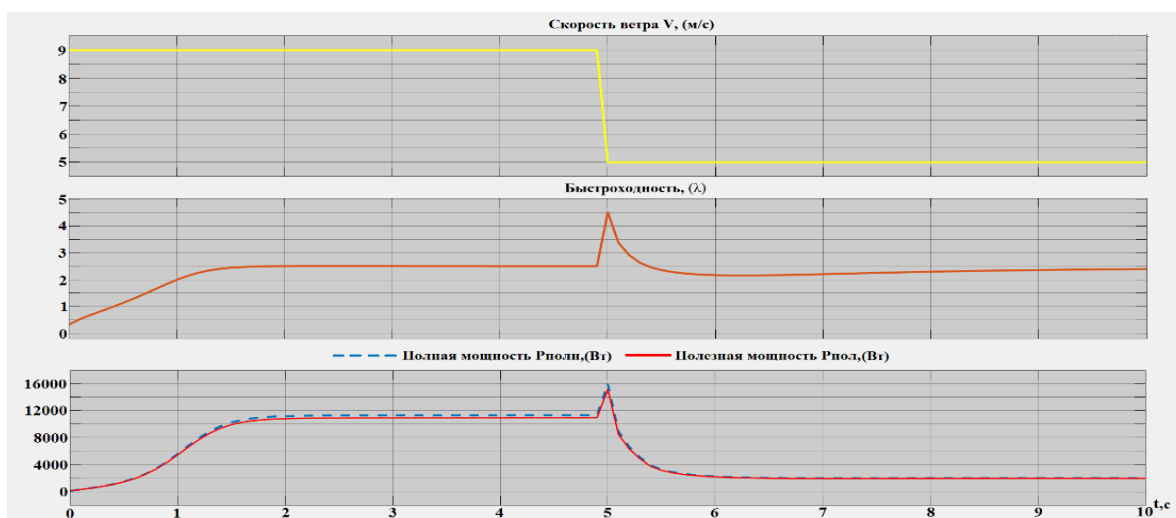


Рис. 7. Результаты вычислительного эксперимента, отображающие влияние ступенчатого изменения скорости ветра (верхний график) на быстроходность (средний график), полную и полезную мощности (нижний график)

Анализируя графики с осциллографа «Scope 1», заметим, что при скачкообразном снижении скорости ветра (Wind Speed) (верхний график) происходит резкое возрастание быстроходности ( $\lambda$ ) (средний график). Сразу после резкого снижения значения скорости, благодаря регулированию сопротивления нагрузки пропорционально изменениям скорости ветра, ПИД-

регулятор осуществляет стабилизирующие действие. На нижней осциллограмме видно, что график полезной мощности (сплошная линия) располагается ниже графика полной мощности (пунктирная линия).

Также построенная модель позволила с помощью графиков, снятых с осциллографа «Score 2» проанализировать зависимость тока и напряжения от скорости ветра (рис. 8).

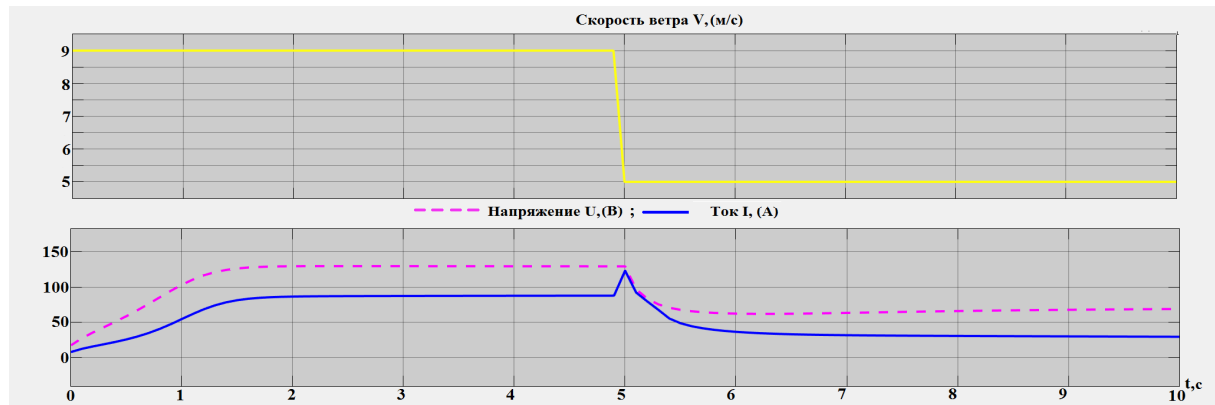


Рис.8. Результаты вычислительного эксперимента, отображающие влияние ступенчатого изменения скорости ветра (верхний график) на напряжение и ток (нижний график)

### Заключение

При снижении скорости ветра регулятор скорости стремится снизить частоту вращения ротора ветроустановки путем увеличения нагрузки на валу. Тем самым достигается оптимальная быстроходность. Нагрузка на валу ветроустановки увеличивается за счет повышения тока в якорной обмотке генератора, что, в свою очередь, приводит к увеличению потерь в обмотке генератора и снижению его КПД. Это подтверждает тот факт, что эффективность ВЭУ напрямую зависит от скорости ветра. Таким образом, разработанная имитационная модель ветроустановки включает в себя две подсистемы. Первая подсистема базируется на уравнениях зависимости энергии ветра, передающей механический момент вращения. Вторая подсистема включает в себя электромеханический преобразователь. Общая система объединяет подсистемы для контроля, преобразования и анализа параметров.

Разработанная модель ветроэнергетической установки может быть применена к любым вертикально-осевым ветроустановкам. Особенно полезной она станет для построения модели мобильного гибридного масштабируемого энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии [5].

Библиографический список

1. Разработка имитационной модели мобильного энергокомплекса на базе ВИЭ в программе MATLAB / Е.М. Гордиевский, А.А. Мирошниченко, А.З. Кулганатов, Е.В. Соломин // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 31. – С. 51-71.
2. Соломин, Е.В. Преобразование энергии в ветроэнергетических установках / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова, А.С. Мартьянов // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 93–97.
3. Соломин, Е.В. Электромеханическая система аварийного торможения ветроэнергетической установки / Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин, С.В. Козлов // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – Том 1. – С. 19–23.
4. Сироткин, Е.А. Особенности технологии управления ветроэнергетическими установками / Е.А. Сироткин // Наука ЮУрГУ: материалы 68-й научной конференции. – 2016. – С. 849–858.
5. Гордиевский, Е.М. О старте разработки мобильного масштабируемого ветро-солнечного комплекса / Е.М. Гордиевский, А.А. Мирошниченко, А.З. Кулганатов // Наука ЮУрГУ: материалы 71-й научной конференции. – 2019. – С. 223–231.

[К содержанию](#)