

Светличный Никита Игоревич

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРЯНОГО КОЛЕСА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ**

*В работе осуществлено численное моделирование характеристик ветряного колеса горизонтально-осевой ветроэнергетической установки малой мощности. Дано обоснование актуальности исследования и разработки ветроэнергетических систем, приведена разработанная схема модели ветряного колеса ветроэнергетической установки в программной среде визуального моделирования Engae с использованием блоков базовой библиотеки, описаны ее основные элементы, исходные и получаемые в результате моделирования характеристики.*

*Модель ветрогенератора, визуальное моделирование, ветряная турбина, ветряное колесо, механическая мощность.*

## **NUMERICAL SIMULATION OF WIND WHEEL CHARACTERISTICS OF A WIND-DRIVEN GENERATOR WITH A HORIZONTAL AXIS**

*The paper presents a numerical simulation of the characteristics of a wind wheel of a low-power horizontal-axial wind-driven generator. The relevance of the research and development of wind energy systems is substantiated, the developed diagram of the wind wheel model of a wind energy generator in the Engee visual modeling software using blocks of the basic library is presented, its main elements, initial and resulting characteristics are described*

*Wind generator model, visual modeling, wind turbine, wind wheel, mechanical power.*

### **Введение**

Необходимость экономии запасов невозобновляемого ископаемого топлива, снижения объемов выбросов вредных веществ в атмосферу и диверсификации источников энергии обуславливает актуальность развития возобновляемой энергетики, представленной, в основном, различными электрогенерирующими системами, использующими энергию солнца и ветра. Лидерами в области возобновляемой энергетики являются, как правило, промышленно-развитые страны, имеющие доступ к самым современным технологиям в энергетике.

При этом доля возобновляемых источников, таких как ветрогенераторы, в структуре общей генерации непрерывно растет, повышается спрос на разработку и проектирование различных конструкций ветроэнергетических установок. Однако не все регионы обладают значительным потенциалом для использования энергии ветра, поэтому актуальной является задача повышения эффективности преобразования энергии ветра, расчета необходимых характеристик ветряная турбины под конкретные условия и построения наглядных моделей, позволяющих исследовать этот вопрос [1] – [2].

### **Основная часть**

Принцип работы ветряного колеса электрогенератора заключается в следующем. Кинетическая энергия воздушного потока воздействует на ветроколесо, которое осуществляет преобразование этой энергии в механическую и передает ее вал установки [3] – [4].

Кинетическая энергия воздушного потока прямо пропорциональна массе  $m$  (кг) квадрату скорости  $V$  (м/с) и характеризуется известной формулой:

$$E = \frac{m \cdot V^2}{2}, \text{ Дж.}$$

Преобразуем эту формулу, заменив массу воздуха на массовый расход через площадь сечения потока  $F$  со скоростью  $V$  и плотностью  $\rho$ :

$$M = \rho \cdot V \cdot F, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Получим выражение для мощности потока воздуха, выразив его с помощью двух предыдущих соотношений:

$$P = \frac{\rho \cdot V^3 \cdot F}{2}, \text{ Вт.}$$

При воздействии потока воздуха на лопасти ветроколесу сообщается только часть энергии. Учтем эту разницу с помощью коэффициента мощности  $C_p$ :

$$P = C_p \frac{\rho \cdot V^3 \cdot F}{2}, \text{ Вт.}$$

Применим формулу для нахождения площади сечения  $F$  через радиус ветряного колеса  $R$

$$P = C_p \frac{\rho \cdot \pi \cdot V^3 \cdot R^2}{2}, \text{ Вт.}$$

Коэффициент мощности  $C_p$  можно охарактеризовать следующим соотношением:

$$C_p = 4 \cdot a(1 - a^2).$$

Здесь через  $a$  обозначен коэффициент торможения потока, определяемый выражениями

$$a = \frac{v - v'}{v} = \frac{v - v''}{2v},$$

где  $V$  – невозмущенная скорость потока,  $V'$ ,  $V''$  – скорости потока воздуха в плоскости лопастей и за ветроколесом соответственно, м/с. Численно реальные значения коэффициента мощности  $C_p$  лежат в диапазоне 0,4–0,5 [4] – [5].

Отношение скорости точки на самом конце лопасти ветроколеса к скорости ветра, который воздействует на установку, называется быстроходностью  $Z$  [4]:

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V},$$

где  $\omega$  – угловая скорость, рад/с.

Оптимальная быстроходность и количество лопастей  $N$  связаны формулой:

$$Z_{\text{опт}} = \frac{4 \cdot \pi}{N}.$$

Считается, что 3-х лопастные турбины обладают оптимальными характеристиками, поэтому ими оснащены  $\frac{3}{4}$  всех используемых ветроустановок.

Отношение мощности ветроколеса к угловой скорости характеризует крутящий момент на валу, который можно определить с помощью соотношения:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{C_p \cdot F \cdot \rho \cdot V^3 \cdot R}{2ZV}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$$

Обозначим отношение коэффициента мощности  $C_p$  и быстроходности  $Z$  через  $C_m$  – коэффициент крутящего момента

$$C_m = \frac{C_p}{Z}$$

Тогда выражение для крутящего момента на валу примет вид:

$$M = C_m \frac{\pi \cdot \rho \cdot V^2 \cdot R^3}{2}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$$

По приведенным соотношениям построена модель ветроколеса в программном комплексе Engее [6]. Это российская платформа для модельно-ориентированного проектирования, позволяющая моделировать и исследовать сложные технические системы и алгоритмы работы. Система представляет собой среду для инженерных исследований, сочетающую инструменты для программирования расчетов и алгоритмов и программную оболочку для динамического моделирования с помощью блок-схем. На рис. 1 приведена общая схема модели, включающая подсистему, в которой реализован основной алгоритм расчета, блоки, задающие исходные параметры, такие как скорость ветра и радиус ветроколеса, и блоки, логирующие результаты моделирования.

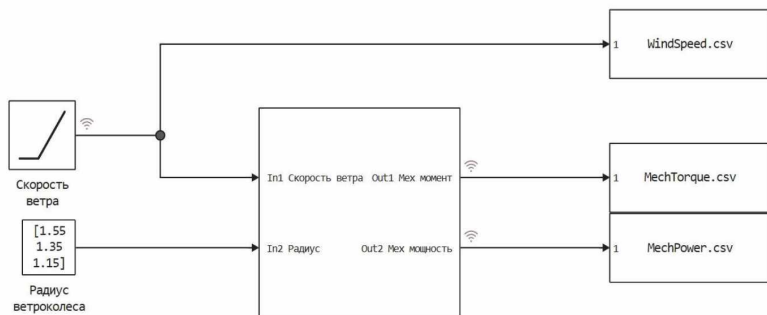


Рис. 1. Общая схема модели ветроколеса ветроэнергетической установки

На рис. 2 приведена схема подсистемы, построенная на основе приведенных соотношений, осуществляющая расчет механической мощности и момента ветроколеса ветроэнергетической установки. Здесь же задаются дополнительные параметры, необходимые для расчетов [5].

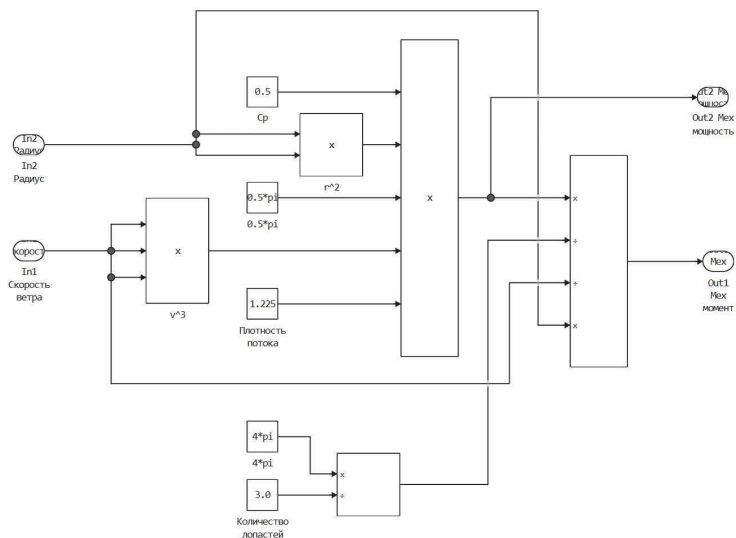
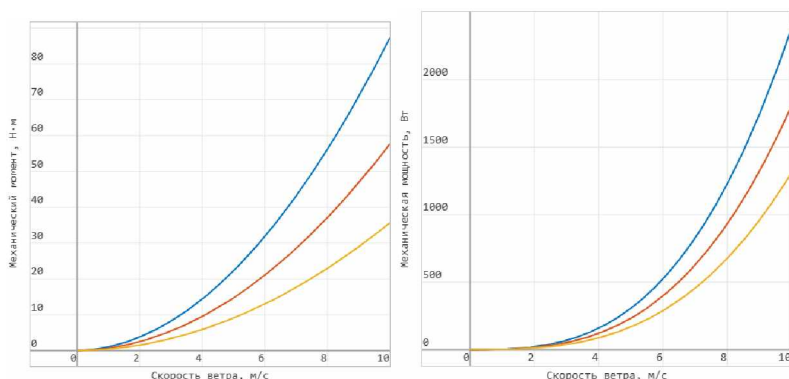


Рис. 2. Схема подсистемы модели, реализующая зависимости мощности и момента ветроколеса

Результаты моделирования в виде графиков приведены на рис. 3, описывающие зависимость механической мощности и момента ветроколеса от скорости ветра при различных диаметрах ветроколеса (1.55, 1.35 и 1.15 метра). Графики демонстрируют нелинейную зависимость конструктивных и мощностных параметров ветроколеса. Вопросы моделирования и проектирования электрических схем, исследования электроэнергетических характеристик систем подробнее рассмотрены в работах [7] – [12].



*Рис.3. Графики, демонстрирующие зависимость механической мощности и момента ветроколеса от скорости ветра при диаметрах ветроколеса равных 1.55, 1.35 и 1.15 метра*

## **Выводы**

В работе осуществлено численное моделирование характеристик ветряного колеса горизонтально-осевой ветроэнергетической установки малой мощности. Дано обоснование актуальности исследования и разработки ветроэнергетических систем, приведена разработанная схема модели ветряного колеса ветроэнергетической установки в программной среде визуального моделирования Engoe. Получены графики, демонстрирующие зависимость механической мощности и момента ветроколеса от скорости ветра при различных диаметрах ветроколеса. Полученную модель можно использовать для построения комплексной модели ветроэнергетической установки, а результаты моделирования – при проектировании конструкции и схемы ветрогенератора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Елистратов В.В., Кузнецов М.В., Лыков С.Е.* Ветроэнергостановки. Автономные ветроустановки и комплексы: учебное пособие. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", 2008. – 100 с. – EDN RXWBVZ
2. *Гисцов В.Г., Волощенко Ю.П.* Расчет и выбор электрооборудования ветроэнергетической установки малой мощности для электроснабжения жилого загородного дома // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2021): материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Таганрог: Издательство ЮФУ, 2021. – С. 49-56. – EDN TOAVVU
3. *Канов Л.Н.* Схемное моделирование ветроэлектрических установок в системе распределенного электроснабжения // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международный сборник научных трудов. Том Выпуск 14. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. – С. 117-125. – EDN YWLKUE
4. *Гавриленко В.В.* Выбор проектных параметров ветроколеса ветроэнергетической установки. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 128 с. – EDN QMIPRB
5. *Батагов К.А., Гисцов В.Г., Волощенко Ю.П.* Исследование характеристик модели автономной электрической системы с маломощной ветроэнергетической установкой // Проблемы современной системотехники: сборник научных статей. Том Выпуск XIV. – Таганрог: ИП Ступин С.А, 2020. -вып. XIV. С. 63-69. – EDN KYGEAE
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610334 Российская Федерация. Среда моделирования и технических вычислений ENGEE: № 2021682369 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 11.01.2022 ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "РИТМ". – EDN INVVEG
7. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Основы теории одномерной нелинейной электрической и электронной волновой цепи: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2015. – 100 с. – EDN: VGYXNH
8. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование нелинейных электрических процессов в элементах электронной волновой цепи: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2018. – 116 с. – EDN: YTPREQH

9. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование электронных компонентов интегральных схем методами теории электрических цепей. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2017. – 111 с. – EDN: YHOZPL
10. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование и исследование источника электрической энергии на фотозлектронных модулях с преобразователем и нагрузкой // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: Материалы XXX научной конференции. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2023. – С. 74-77. – EDN WGUBPS
11. *Волощенко Ю.П., Волощенко П.Ю.* Нелинейные электрические колебания в электронной цепи учебное пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2020. 106 с. – EDN: WKEESE
12. *Бурьков Д.В., Волощенко Ю.П.* Математическое и имитационное моделирование электротехнических и робототехнических систем: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2020. – 159 с. – EDN: EGHJRJ

**Светличный Никита Игоревич**, студент гр. РТ603-31, кафедра электротехники и мехатроники, Южный федеральный университет, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; e-mail: svetlichnyi@sfnu.ru.

**Svetlichnyi Nikita Igorevich**, student gr. RT603-31, Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; e-mail: svetlichnyi@sfnu.ru.