



РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Хамдамов М.М.^{1,2}, Аминов Х.А.²

¹ *Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан.*

² *Ориентал университет, Ташкент, Узбекистан.*

**E-mail: mmhamdamov@mail.ru*

Аннотация. Разработка модели для VAWT Компьютерная модель, разработанная в этой работе, предназначена для имитации того, что происходит в физической среде. Математические уравнения, представленные в предыдущая работе [13] была переведена в систему в программе MATLAB Simulink. Эта имеет простой интерфейс, который позволяет увидеть расчеты в блоке диаграмма и ясно иллюстрирует структуру модели. Общая структура Модель показана на рисунке 1. Эта модель в дальнейшем будет использоваться при определении значений тангенциального направления потока в лопастях ветрогенератора и момента его вращения.

Ключевые слова: Сила ветра, поле скоростей, MATLAB Simulink, блок-схема, математическую модель ВЭУ.

Последние годы в Республике Узбекистан принят комплекс мер, направленные на дальнейшее увеличение эффективности использования электрической энергии в отраслях экономики и в быту, широкому внедрению экономично использующих электроэнергию технологий и развитию возобновляемых источников энергии.

За последние 50 лет 85% доля выработки электроэнергии в республике соответствует природному газу [1-5]. Выбрасываемые в результате сжигания углеводородов углекислого газа и оксиды углерода приводят к загрязнению атмосферы, уменьшению ее прозрачности и увеличению мутности. Это в свою очередь, усиливается «парниковый эффект», который в течение последних сто лет увеличил среднюю температуру атмосферы Земли на 1.5-2 градусов. Такое глобальное изменение климата приводит к таянию ледников северного и южного полюсов Земли, частому образованию аномальных климатических явлений. В конечном итоге это отражается на глобальное экологическое состояние планеты и развитию цивилизации. В связи с этим на сегодняшний



день становится актуальным широкое использование альтернативных источников электроэнергии.

Из альтернативных источников электроэнергии самым дешевым и экологически целесообразным является движущая сила ветра, которая имеет высокий экономический показатель. Исходя из этих суждений, разработали опытный образец ветротурбины с вертикальной осью, которая может работать при малых скоростях ветра и которую можно установить во многих регионах республики.

В Республике Узбекистан ведутся широкомасштабные работы по поддержке энергетической независимости. Проводятся разведочные работы по выявлению новых месторождений и принимаются меры, направленные на увеличение объема разработки нефтегазовых месторождений. Начали строить атомную электростанцию. Постепенно развивается внедрение альтернативных возобновляемых источников электроэнергии. Начали возводить солнечных и ветровых электростанций.

Модель ветроэнергетической установки была разработана с заранее заданным КИЭВ ветродвигателя и универсальным контроллером для обеспечения возможности изменения алгоритма управления, функциональная схема модели приведена на рисунке 1.

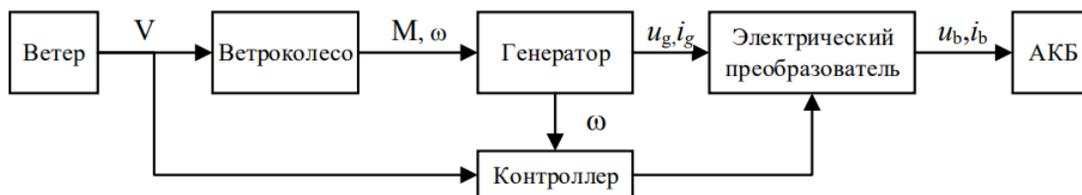


Рисунок 1. Функциональная схема модели ветроэнергетической установки

В качестве среды разработки и исследования выбран пакет программ для математических расчетов MATLAB/Simulink от компании Mathworks Inc, широко распространенный как в научной среде, так и в различных проектных организациях[6-8].

В основе пакета MATLAB/Simulink лежит решатель MATLAB со своей оболочкой [5-10]. Этот решатель позволяет производить сложные математические вычисления с различными объектами: числами, векторами, матрицами, а так же решать системы уравнений различной сложности. Для облегчения процесса моделирования различных систем в дополнение к решателю компанией Mathworks Inc была разработана надстройка Simulink,



содержащая большую библиотеку моделей различных устройств. При этом предлагаемые модели содержат математическое описание, приведенное в документации к библиотеке. Однако при разработке систем управления требуются не только модели объектов управления, но модель управляющего устройства, а его сложность обычно изменяется от задачи к задаче, что создает запрос на применение универсального подхода к разработке модели управляющего устройства.

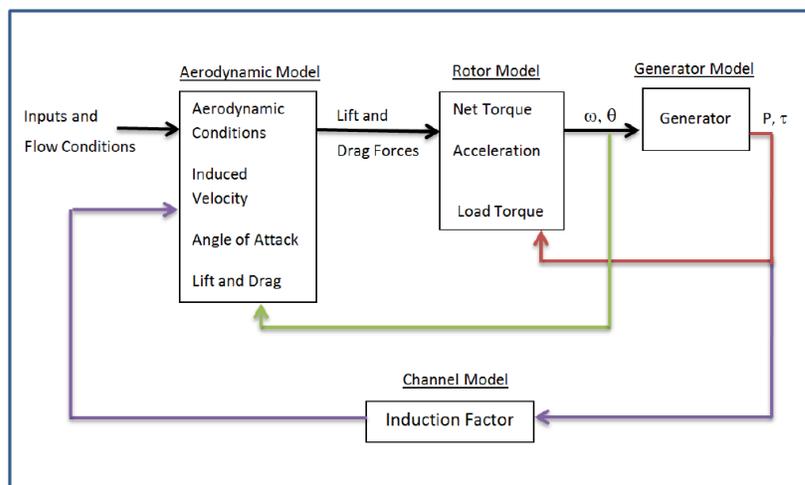


Рис.2. Упрощенная модель программы, показывающая входы и циклы обратной связи

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. Simulink полностью интегрирован с прикладным пакетом MATLAB, обеспечивая доступ к широкому спектру инструментов анализа и проектирования [9-11].

Входные переменные модели разделены на две категории:

– конструктивные параметры установки (максимальный и минимальный диаметры ветроколеса, максимальная и минимальная ширины на лопасти, число лопастей, момент инерции, оптимальный угол атаки, аэродинамические коэффициенты профиля крыла);



– независимые входные переменные (скорость ветра, плотность воздуха, момент нагрузки на валу, угол установки крыла (шаг)...).

Описание зависимостей коэффициентов C_y и C_x от угла атаки (α) создается внутри модели с использованием интерполяционного полинома Лагранжа.

К несомненным достоинствам модели следует отнести возможность исследования переходных режимов, возникающих при изменениях скорости ветра и нагрузки на главном валу.

Наша математическая модель:

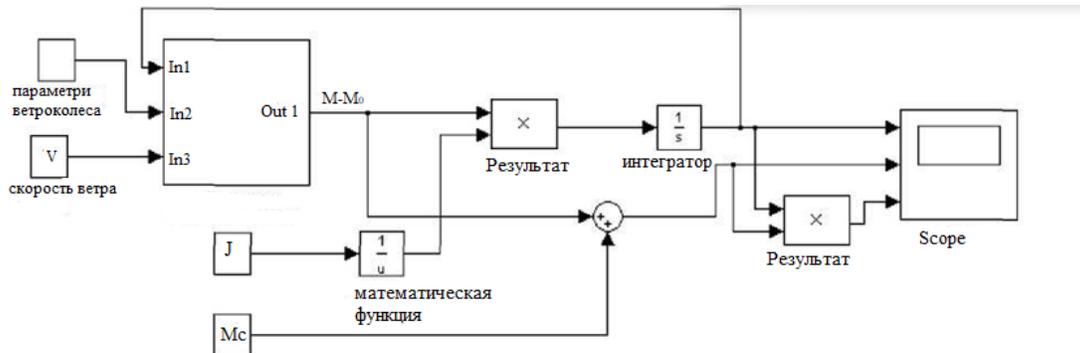


Рис.3. Блок-схема, реализующая математическую модель ВЭУ

Мощность турбины определяется следующим уравнением

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3$$

Здесь:

P_m - механическая выходная мощность турбины (w), $C_p(\lambda, \beta)$ - КПД турбины, ρ - плотность воздуха ($кг/м^3$), A - поверхность турбины ($м^2$), V_w - скорость ветра ($м/с$)

λ - отношение скорости конца лопасти несущего винта к скорости ветра,
 β - угол лезвия

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \cdot \beta - c_4 \cdot \beta^x - c_5 \right) \exp\left(-\frac{c_6}{\lambda_i}\right)$$

Здесь $c_1, c_2 \dots c_6$ они не меняются.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{V_w}$$

Мы проектируем ветряк мощностью 2 кВт. Для этого мы используем следующие значения [10-17]:



λ	1-45
$C_p(\lambda, \beta)$	0.3-0.4
V_w	1-20 м/с
R	3
c_1	0.5
c_2	116
c_3	0.4
c_4	0
c_5	5
c_6	21

$C_p(\lambda, \beta)$ мы рассчитываем:

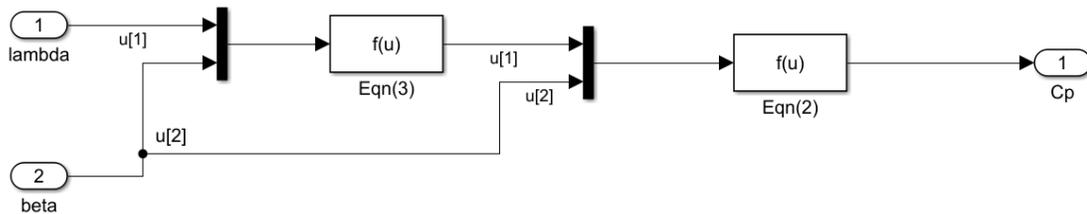


Рис.4. Блок-схема $C_p(\lambda, \beta)$

Здесь:

Eqn(3) наша функция:

$$f(u) = 1 / (u[1] + 0.08 * u[2]) - 0.035 / (1 + u[2]^3)$$

$$\text{Eqn(2): } f(u) = 0.5 * (116 * u[1] - 0.4 * u[2] - 5) * \exp(-21 * u[1])$$

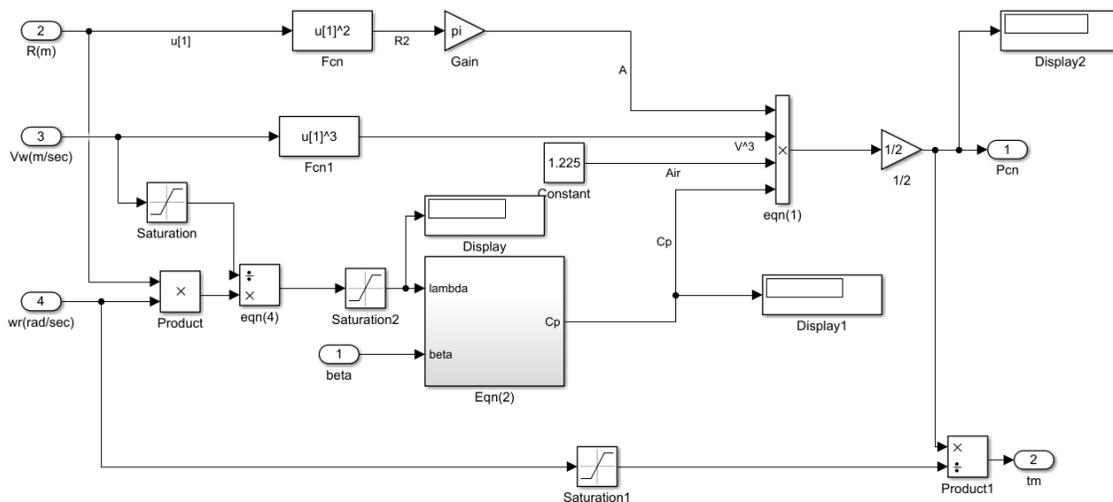


Рис.5. Математическая модель ветряка

В целом, построение модели MATLAB позволило сообщить обсуждение конструкции ветрогенератора. Модель проверена уникальным стартапом



поведение некоторых конструкций VAWT. Высокий режим TSR и высокий КПД при высокой скорости вращения предполагает, что производители изучают конструкции, способные выдерживать высокие скорости вращения и имеют динамические нагрузки генератора, которые позволяют турбинам раскручиваться относительно малоскоростные условия. Модель продемонстрировала преимущества наличия как динамического генератора, так и артикуляции на фолге, и может быть использована в качестве инструмента для тех, кто хочет взвесить преимущества динамических генераторов и шарнирных крыльев по сравнению с дополнительными затратами на сборку, связанная с такими функциями. Те, кто стремится оптимизировать динамический генератор load может использовать модель как инструмент для нахождения идеальной кривой мощности. Это также выявило уникальные уравнения, связанные с вычислением потенциала энергии системы этого типа, показывая, что уравнение эффективности Бетца неприменимо для этих условий. Есть надежда, что этот тезис и компьютерная модель помогут лучше понять уникальное поведение VAWT и турбин в ограниченных каналах, и что такое понимание могут быть применены к будущим конструкциям турбин.

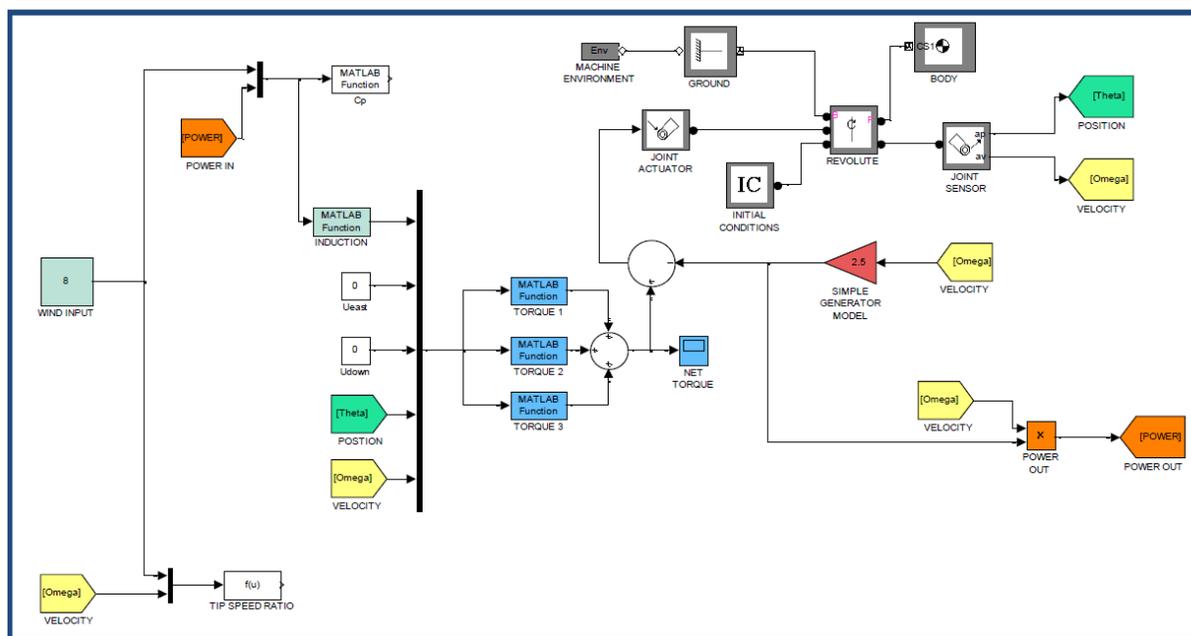


Рис.6. Схема полной модели MATLAB для ветряных турбин

С использованием данной блок-схемы был проведен численный эксперимент. Основная цель этого – определение оптимальных параметров



турбины. Первоначально было принято $C_p=0,3$. В данном случае скорость вращения была принята равной 67 в минуту. При этих значениях были получены следующие результаты для случаев, когда $\omega = 7$.

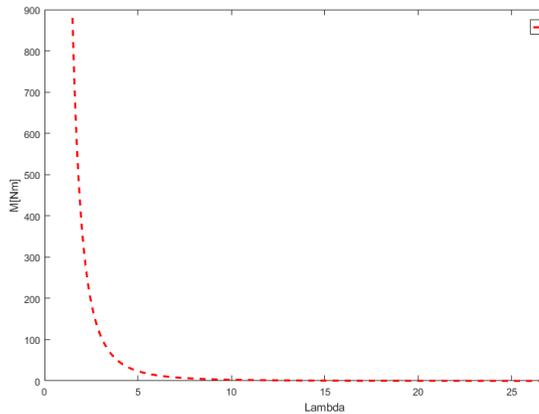


Рис.7. Зависимость момента нагрузки генератора от λ

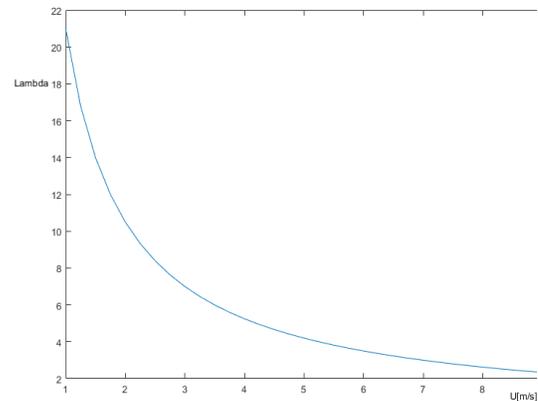


Рис.8. Зависимость λ от скорости ветра

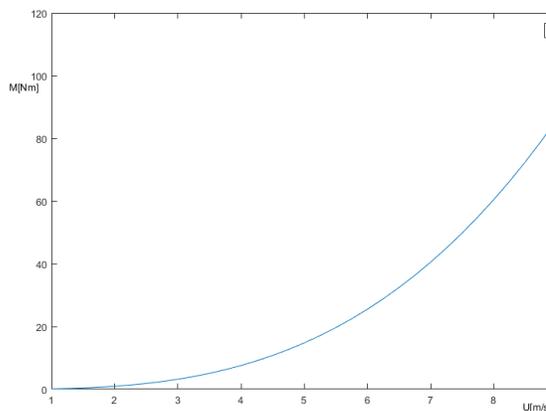


Рис.9. Зависимость скорости ветра генератора холостого хода

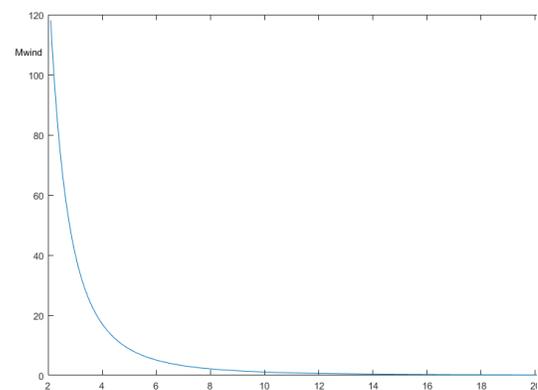


Рис.10. Зависимость момента безнагрузки генератора от λ

С использованием данной блок-схемы был проведен численный эксперимент. Основная цель этого – определение оптимальных параметров турбины. Первоначально было принято $C_p=0,35$. В данном случае скорость вращения была принята равной 67 в минуту. При этих значениях были получены следующие результаты для случаев, когда $\omega = 7$.

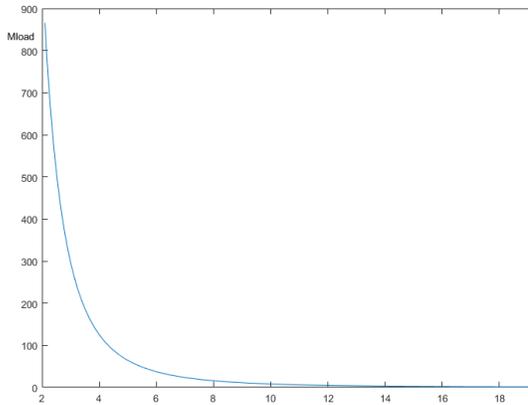


Рис.11. Зависимость момента нагрузки генератора от λ

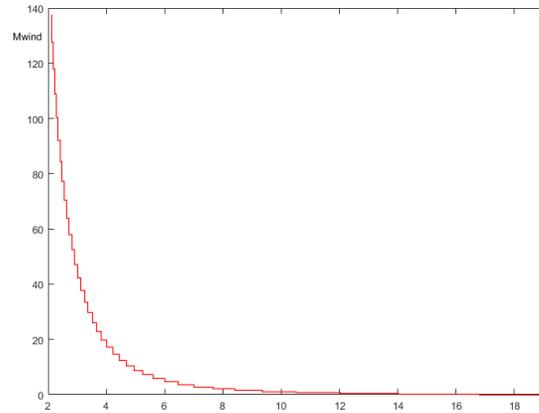


Рис.12. Зависимость момента безнагрузки генератора от λ

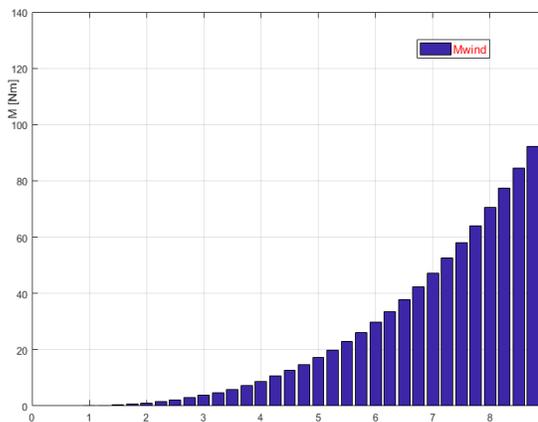


Рис.13. Зависимость скорости ветра генератора холостого хода

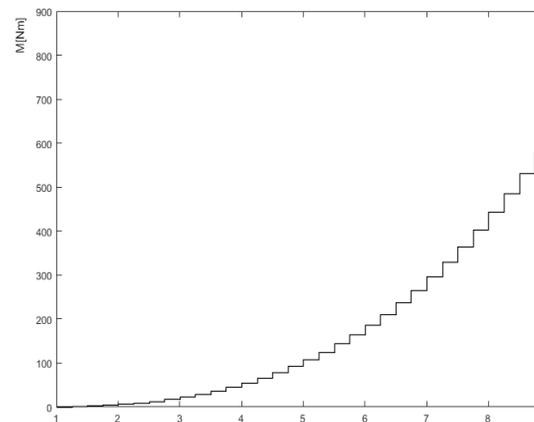


Рис.14. Зависимость момента нагрузки генератора от скорости ветра

С использованием данной блок-схемы был проведен численный эксперимент. Основная цель этого – определение оптимальных параметров турбины. Первоначально было принято $C_p=0,40$. В данном случае скорость вращения была принята равной 67 в минуту. При этих значениях были получены следующие результаты для случаев, когда $\omega = 7$.

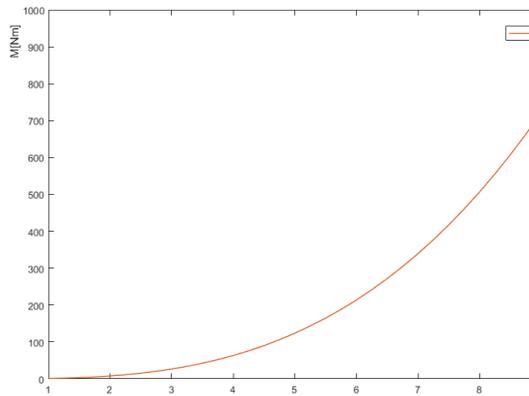


Рис.15. Зависимость момента нагрузки генератора от скорости ветра

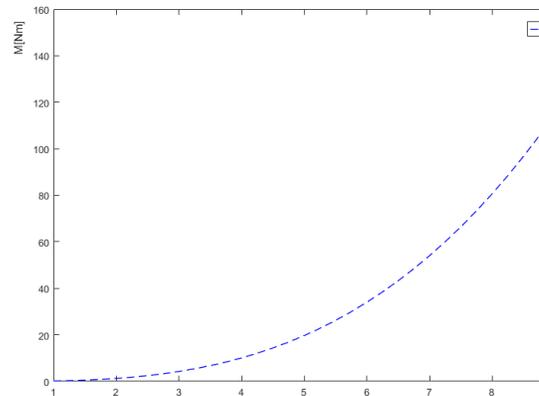


Рис.16. Зависимость момента безнагрузки генератора от скорости ветра

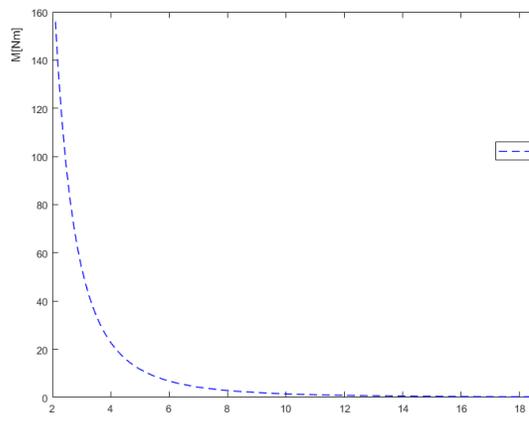


Рис.17. Зависимость момента безнагрузки генератора от λ

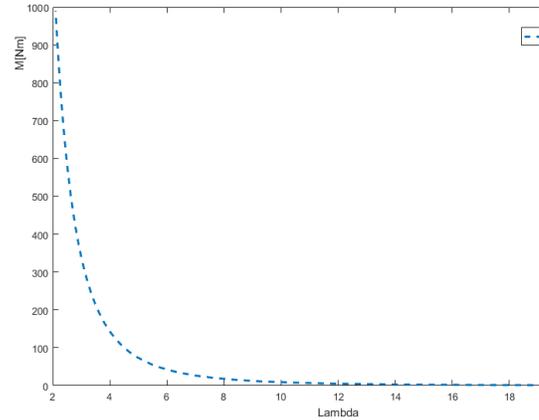


Рис.18. Зависимость момента нагрузки генератора от λ

С использованием данной блок-схемы был проведен численный эксперимент. Основная цель этого – определение оптимальных параметров турбины. Первоначально было принято $C_p=0,40$. В данном случае скорость вращения была принята равной 96 в минуту. При этих значениях были получены следующие результаты для случаев, когда $\omega = 10$.

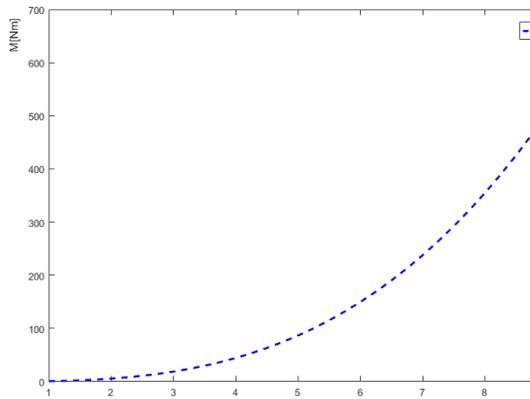


Рис.19. Зависимость момента нагрузки генератора от скорости ветра

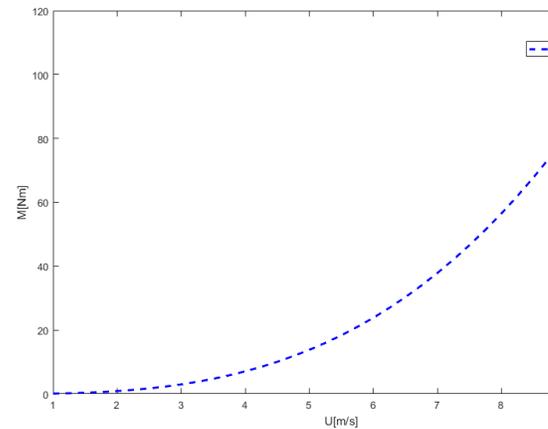


Рис.20. Зависимость момента безнагрузки генератора от скорости ветра

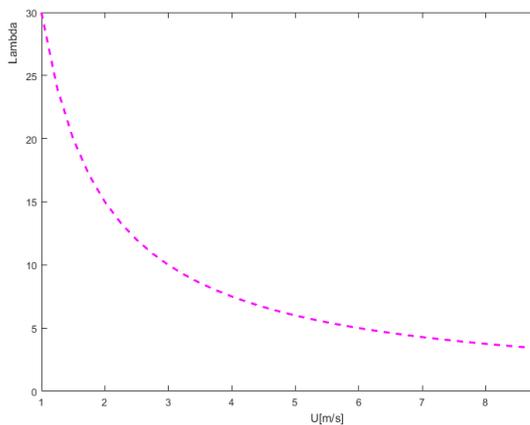


Рис.21. Зависимость λ от скорости ветра

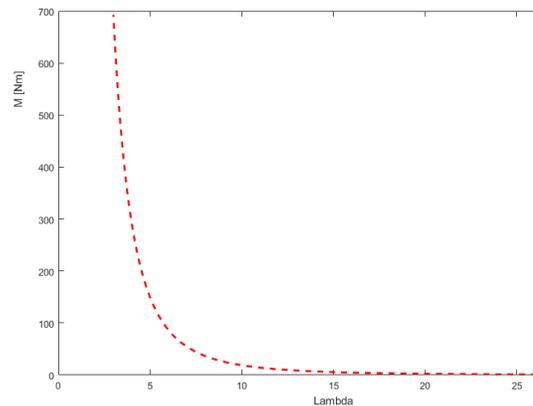


Рис.22. Зависимость момента нагрузки генератора от λ

С использованием данной блок-схемы был проведен численный эксперимент. Основная цель этого – определение оптимальных параметров турбины. Первоначально было принято $C_p=0,40$. В данном случае скорость вращения была принята равной 120 в минуту. При этих значениях были получены следующие результаты для случаев, когда $\omega = 12,56$.

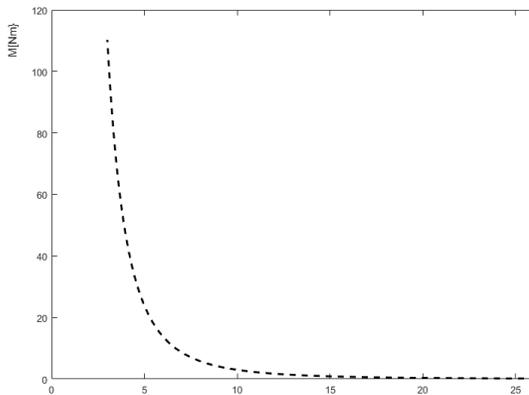


Рис.23. Зависимость момента безнагрузки генератора от скорости ветра

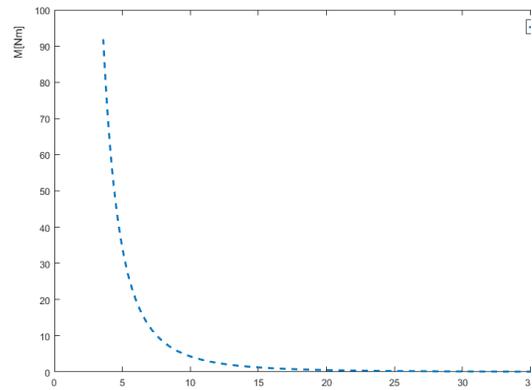


Рис.24. Зависимость момента безнагрузки генератора от λ

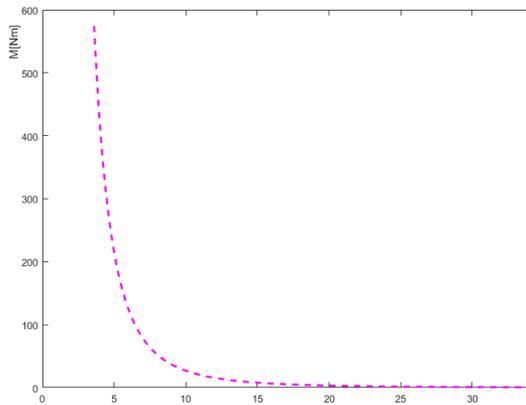


Рис.25. Зависимость момента безнагрузки генератора от λ

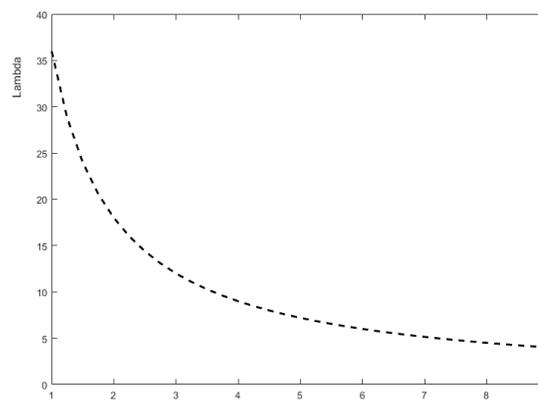


Рис. 26. Зависимость λ от скорости ветра

С использованием данной блок-схемы был проведен численный эксперимент. Основная цель этого – определение оптимальных параметров турбины. Первоначально было принято $C_p=0,40$. В данном случае скорость вращения была принята равной 150 в минуту. При этих значениях были получены следующие результаты для случаев, когда $\omega = 15,7$.

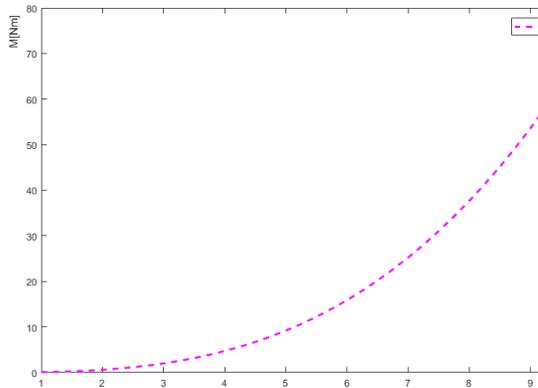


Рис.27. Зависимость момента
безнагрузки генератора от скорости
ветра

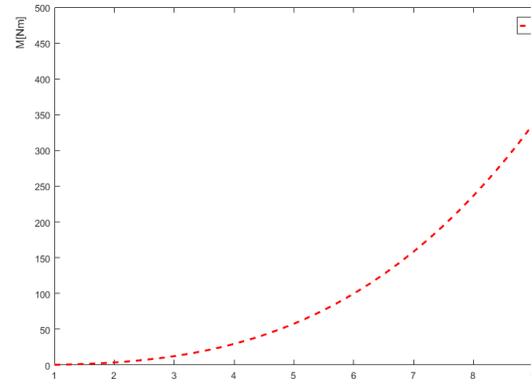


Рис.28. Зависимость момента
нагрузки генератора от скорости
ветра

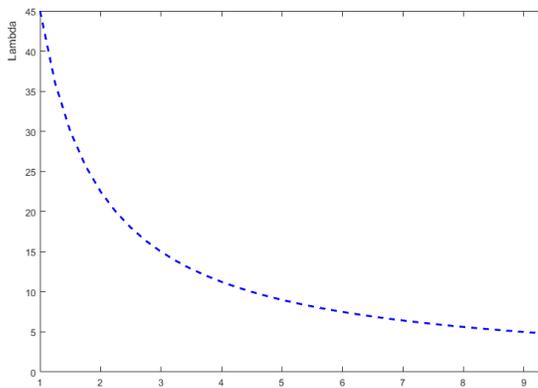


Рис.29. Зависимость λ от
скорости ветра

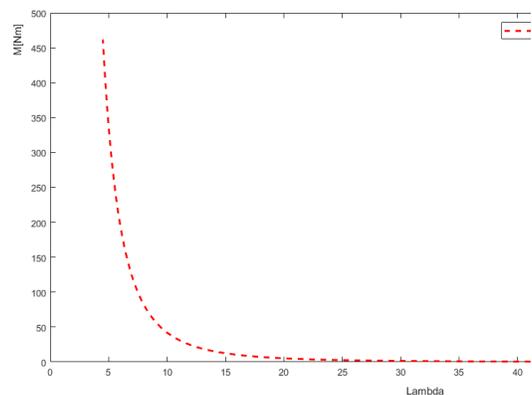


Рис.30. Зависимость момента
безнагрузки генератора от λ

С использованием данной блок-схемы был проведен численный эксперимент. Основная цель этого – определение оптимальных параметров турбины. Первоначально было принято $C_p=0,40$. В данном случае скорость вращения была принята равной 96 в минуту. При этих значениях были получены следующие результаты для случаев, когда $\omega = 15,7$.

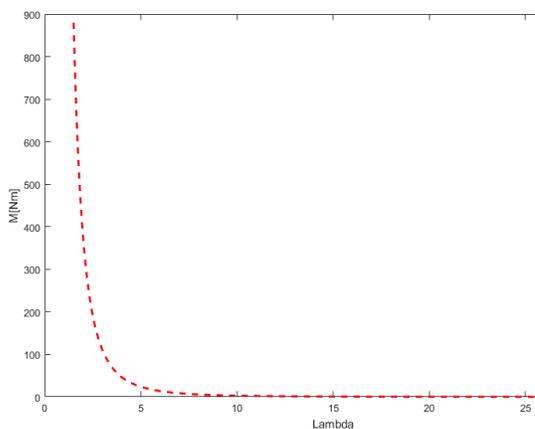


Рис.31. Зависимость момента безнагрузки генератора от λ

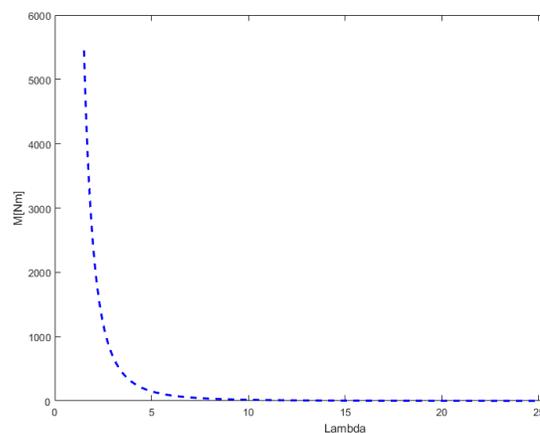


Рис.32. Зависимость момента нагрузки генератора от λ

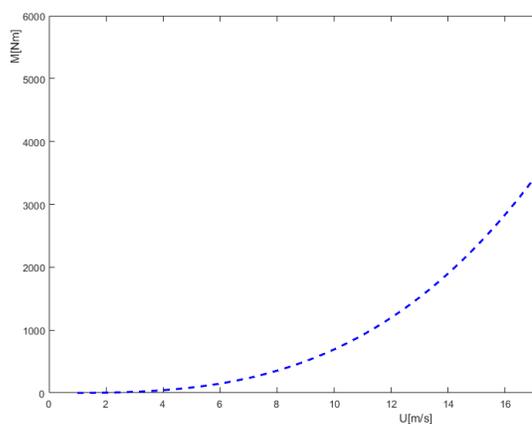


Рис.33. Зависимость момента нагрузки генератора от скорости ветра

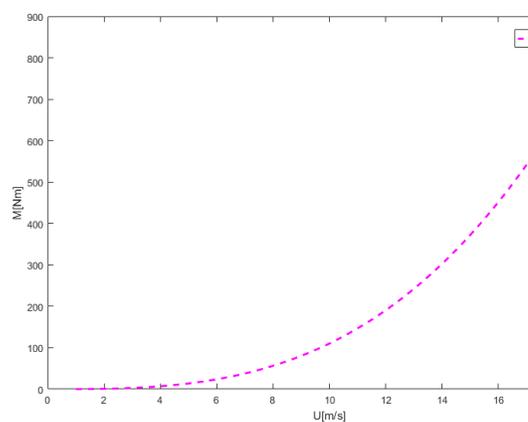


Рис.34. Зависимость момента безнагрузки генератора от скорости ветра

Результаты вычислительного эксперимента по динамике ВЭУ использованы при разработке микропроцессорной системы управления. С помощью модели определен оптимальный закон управления и разработана адаптивная система автоматического регулирования ветроэнергетического комплекса, позволяющая повысить его энергоотдачу.

Разработанная модель позволяет при известных конструктивных параметрах ВЭУ получить для различных скоростей ветра механические и энергетические характеристики, оптимальные сочетания значений шага лопастей, частоты вращения и момента нагрузки и закон управления, обеспечивающий максимум коэффициента использования энергии ветра.



ЛИТЕРАТУРЕ

1. Использование энергии ветра в СССР // Бурят-Монгольская правда. №109 (782) 18 мая 1976 года. – С. 7.
2. R. D. Rauch, J. T. Batira, and N. T. Y. Yang. "Spatial Adaption Procedures on Unstructured Meshes for Accurate Unsteady Aerodynamic Flow Computations". *Technical Report AIAA-91-1106*. AIAA. 1991.
3. Соловьёв Александр, Дегтярёв Кирилл. Ветреная ветряная энергетика // Наука и жизнь. – 2013. – № 7. – С. 42.
4. Тихонов А.М., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука. – 1977. – 736 с.
5. Будак Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физики. – М.: Наука, 1972. – 688 с.
6. Цой П.В. Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса: Прямые и обратные задачи нестационарной теплопроводности и термоупругих напряжений. Гидродинамика и теплообмен в каналах сложного профиля / 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 568 с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М., 1957. – 420 с.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М: Наука, 1987. – 848 с.
9. Обухов С.Г., Сарсикеев Е.Ж. Математическая модель ветротурбины малой мощности в MATLAB SIMULINK // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), №02(106), 2012. – С. 42-48.
10. Математическое моделирование: Методы, описания и исследования сложных систем / Под ред. А.А. Самарского. – М.: Наука, 1989. – 271 с.
11. Kuik, G.A.M., the Lanchester-Betz-Joukowsky Limit, *Wind Energy* 10, 2007, 10, pp. 289-291.
12. Мартянов А.С. Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения: дисс... канд. техн. наук. – Челябинск, 2016. – 174 с.
13. [Hamdamov M.M.](#), [Ishnazarov A.I.](#), [Mamadaliyev K.A.](#) Numerical Modeling of Vertical Axis Wind Turbines Using ANSYS Fluent Software // [Lecture Notes in Computer Science \(including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture](#), 2023, 13772 LNCS, p. 156–170



14. [Khujaev I.K.](#), [Fayziev R.A.](#), [Hamdamov M.M.](#) Numerical Solution of the Combustion Process Using the Computer Package Ansys Fluent // [Lecture Notes in Computer Science \(including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture\)](#), 2023, 13772 LNCS, P. 26–37
15. [Hamdamov M.](#), [Khujaev I.](#), [Bazarov O.](#), [Isabaev K.](#) Axisymmetric turbulent methane jet propagation in a wake air flow under combustion at a finite velocity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1030(1), 012163
16. [Khujaev I.K.](#), [Hamdamov M.M.](#) Axisymmetric turbulent methane jet Propagation in a co-current air flow under combustion at a finite velocity // [Herald of the Bauman Moscow State Technical University](#), 2021, (5), p.89–108
17. Khujaev I., Toirov O., Jumayev J., Hamdamov M. Modeling of vertical axis wind turbine using Ansys Fluent package program// E3S Web of Conferences 401, 04040 (2023).