

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

М.А. Андреева, С.Н. Удалов

В статье рассмотрено теоретическое моделирование ветроколеса и редуктора. Для ветроколеса предложены модель с переменным углом заклинения и модель с фиксированным углом заклинения.

Ключевые слова: лопасть, ступица, ветроколесо, силовая передача, математическая модель.

Введение

Ветроэнергетика является наиболее развивающимся направлением электроэнергетики. В настоящее время широко используются конфигурации СПЭВ (Система Преобразования Энергии Ветра) (рисунок 1). Одной из важных проблем преобразования является управление ветроэнергетической установкой (ВЭУ). Многочисленные исследования, посвященные контролю и управлению СПЭВ, свидетельствуют, что контроль и управление значительно улучшают многие характеристики СПЭВ.

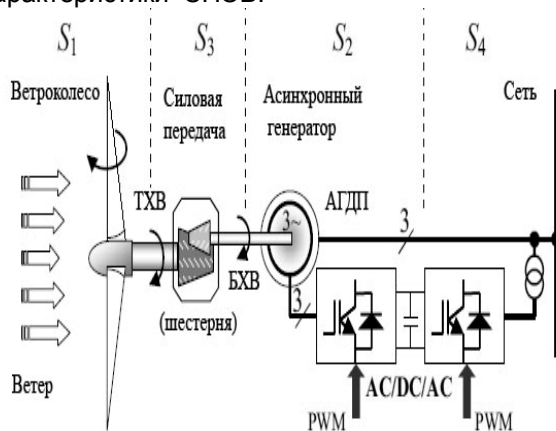


Рисунок 1 – Общая конфигурация СПЭВ

В компоновку СПЭВ входят: асинхронный генератор двойного питания, силовая электроника, соединяющая ротор с сетью, для управления частотой скольжения, редуктор и ветроколесо, а также низкоскоростной вал – ТХВ и высокоскоростной вал – БХВ. Наибольший интерес представляет математическая модель механической части СПЭВ.

Модель ветроколеса

Случай переменного угла заклинения.

Момент, развиваемый ветротурбиной на ТХВ

под действием подъёмной силы, можно представить в следующем виде:

$$\Gamma_{wt} = \Gamma_{wt}(\beta, v, \Omega_l), \quad (1)$$

где β – угол закручивания лопасти; v –



скорость ветра; Ω_l – угловая скорость ТХВ. Эти переменные должны быть заданы.

Для представления лопасти в воздушном потоке используется теория элемента лопасти, согласно которой лопасть разделена на составные элементы.

Рисунок 2 – Аэродинамические нагрузки вдоль профиля лопасти ветроколеса

Допустим, турбина находится в потоке воздуха, имеющего скорость v , направленную по нормали к ротору. Профиль лопасти и действующие на него аэродинамические нагрузки изображены на рисунке 2, где условно обозначено: v – скорость ветра; Ω – угловая скорость вращения турбины; ω – скорость ветра относительно лопастей (с учётом

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

вихревого движения); ω_0 – скорость ветра относительно лопастей без учёта вихревого движения; α – аксиальный коэффициент сопротивления потоку; b – тангенциальный коэффициент сопротивления потоку; dF – суммарная сила, действующая на элемент лопасти; dD – единичная сила сопротивления; dL – единичная подъёмная сила; dF_t – единичная тангенциальная сила в направлении вращения; dF_a – единичная сила вдоль оси. Основные допущения при моделировании посредством теории элемента лопасти: пренебрегаем взаимным влиянием смежных элементов одной лопасти и радиальной составляющей скорости; аэродинамические коэффициенты являются функциями угла

атаки и профиля лопасти, пренебрегаем любыми эффектами, связанными с влиянием числа Рейнольдса; допускается бесконечное количество лопастей. Каждый j -й элемент лопасти характеризуется следующими переменными: расстоянием до оси ступицы – $r(j)$, соответствующая значению $r(j)$ хорда $c(j)$ – известна для данного профиля, соответствующий угол наклона относительно ступицы, $\beta(j)$ – угол заклинивания лопасти, коэффициент быстроходности единичного конца лопасти –

$$\lambda_r(j) = \frac{r(j) \cdot \Omega_l}{v}$$

Таблица 1-Значения осевых и тангенциальных коэффициентов сопротивления для каждого элемента лопасти

$r(j), \%$	15	25	35	45	55	65	75	85	95
$a(j)$	0.46	0.46	0.44	0.41	0.39	0.38	0.37	0.35	0.32
$b(j)$	0.012	0.011	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006

Ключевой переменной, полностью определяющей аэродинамический характер поведения турбины, является угол атаки i_0 , который может меняться в зависимости от изменения скорости ветра и скорости вращения.

Единичная сила сопротивления в направлении вращения dF_a , зависит пропорционально от коэффициента лобового сопротивления C_x , а единичная подъёмная сила dF_t , зависит пропорционально от коэффициента подъёмной силы C_z . Отношение C_z/C_x есть мера аэродинамической эффективности турбины.

Единичные осевой и тангенциальный коэффициенты сопротивления $a(j)$ и $b(j)$, соответственно, рассчитываются исходя из $\lambda_r(j)$ и коэффициента Лагранжа, K [1]:

$$a(j) = \frac{K}{(1-K)^2} \cdot \frac{\lambda_r^2(j)}{1 + \lambda_r^2(j)/(1-K)^2}, \quad (2)$$

$$b(j) = \frac{K}{1-K} \cdot \frac{1}{1 + \lambda_r^2(j)/(1-K)^2}. \quad (3)$$

Угол заклинивания лопасти β :

$$\beta(j) = \arccotg(z_u) - i(j), \quad (4)$$

где Z_u - число относительных модулей. Находится из выражения:

$$z_u = \frac{1}{2} \left[\frac{\lambda_r}{1-m} - \varepsilon \left(1 + \frac{m}{1-m^2} \right) \right] + \sqrt{\frac{1}{4} \left[\frac{\lambda_r}{1-m} - \varepsilon \left(1 + \frac{m}{1-m^2} \right) \right]^2 + \frac{m}{1+m^2} + \varepsilon \frac{\lambda_r}{1-m}}. \quad (5)$$

Зададимся значениями коэффициента торможения ветрового потока - m в пределах от 0,28 до 0,35 и наиболее выгодным углом атаки, а по диаграмме рисунок 3 для данного профиля находим значение ε .

Угол атаки j – го элемента лопасти:

$$i(j) = a \tan \left(\frac{1}{\lambda_r^2(j)} \cdot \frac{1-a(j)}{1+b(j)} \right) - \beta(j). \quad (6)$$

Скорость ветра относительно лопасти $\omega(j)$, определяется из диаграммы скоростей (рисунок 2):

$$\omega(j) = v \cdot \sqrt{(1-a(j))^2 + \lambda_r^2(j)(1+b(j))^2} \quad (7)$$

Единичная подъёмная сила в направлении вращения:

$$dF_t(j) = 0.5 \rho c(j) \omega^2(j) C_z(i) \cdot \sin(\beta(j) + i(j)) \cdot [1 - \varepsilon \cdot c \tan(\beta(j) + i(j))] dr, \quad (8)$$

где $C_z(i)$ – коэффициент подъёмной силы, $C_x(i)$ – коэффициент лобового сопротивления и $\varepsilon(i)$ – отношение, характеризующее аэродинамическую эффективность турбины -

$$\varepsilon(i) = C_x(i) / C_z(i). \quad (9)$$

Зависимости коэффициентов $C_z(i)$ и $C_x(i)$ от угла атаки известны для данного профиля лопасти [2] (рисунок 3).

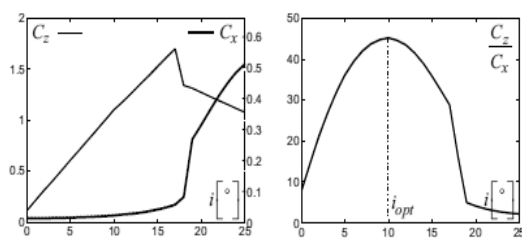


Рисунок 3 – Зависимости кривых C_x , C_z и $1/\varepsilon$ от угла атаки i

Каждый элемент лопасти создает единственный вращающий момент:

$$d\Gamma(j) = r(j) \cdot dF_t(j). \quad (10)$$

Интегрируя уравнение 10 по длине лопасти, и используя уравнение 8, получаем суммарный вращающий момент, создаваемый ротором ветряной турбины:

$$d\Gamma(j) = \int r(j) \cdot dF_t(j). \quad (11)$$

Данный результат получен из предположения, что колесо имеет бесконечное число лопастей. Фактически же, число лопастей N_B конечно и в уравнение 11 вводится поправка в виде поправочного коэффициента, называемого коэффициентом Прандтля:

$$\sigma_p = 1 - \frac{0.93}{N_B \cdot \sqrt{(\lambda_r(j))^2 + 0.445}}. \quad (12)$$

В конце процедура расчёта вращающего момента турбины может быть синтезирована при помощи выражений, приведённых выше, как в ниже следующем алгоритме [3, 4].

Постоянные: N_B , длина лопасти, плотность воздуха, число конечных элементов, изменение хорды и угла падения по длине лопасти, аэродинамические характеристики C_x и C_z в зависимости от угла атаки. Входные

переменные величины: v , Ω , угол наклона (на ступице). Для каждого элемента j рассчитать: коэффициент $\lambda_r(j)$; расстояние до ступицы $r(j)$, суммарный угол заклинивания соответствующий элементу $\beta(j)$; угол атаки $i(j)$; осевой и тангенциальный коэффициенты сопротивления $a(j)$ и $b(j)$; относительную скорость ветра $w(j)$; коэффициенты подъёмной силы и лобового сопротивления C_z и C_x ; единичный вращающий момент (функция от множества рассчитанных выше величин). Применить коэффициент Прандтля. 4. Выполнить численное интегрирование уравнения единичного вращающего момента (используя подходящий выбранный метод).

Случай фиксированного угла заклинивания. Модель аэродинамической подсистемы описывает (посредством усреднения) взаимодействие ротора турбины с воздушными массами. Эта подсистема моделируется в виде механического момента вращения, создаваемого вращением ротора. В соответствии с предположениями, перечисленными выше, для ветротурбины с фиксированным углом заклинивания (β), этот момент вращения зависит от скорости вращения медленного вала и от скорости ветра:

$$\Gamma_{\text{от}} = \Gamma_{\text{от}}(\Omega_l, v) \big|_{\beta=\text{constant}}, \quad (13)$$

$$\Gamma_{\text{от}} = \frac{P_{\text{от}}}{\Omega_l} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot v^2 \cdot R^3 \cdot C_T(\lambda), \quad (14)$$

где $C_T = C_p / \lambda$ – коэффициент момента.

Более подробные аэродинамические модели можно получить, применяя вращающийся образец, пространственную фильтрацию или индукционное запаздывание, приводящие к более полному описанию создаваемого аэродинамического момента, $\Gamma_{\text{вт}}$. Кроме того, характеристика коэффициента мощности должна учитывать влияния числа Рейнольдса и изменения плотности воздуха. Для маломощных ветротурбин, этим влиянием, а также динамическими характеристиками конструкций можно пренебречь, так как упрощённые модели более предпочтительны.

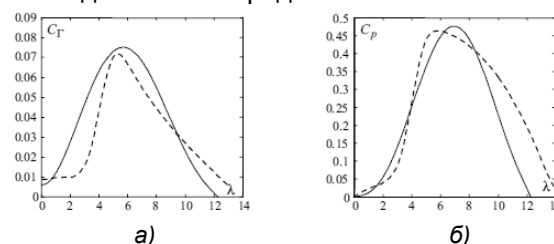


Рисунок 4 – Типичные кривые $C_T - \lambda$ (а) и $C_p - \lambda$ (б) для ветротурбины с горизонтальной осью (ВТГО)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Коэффициент момента может быть описан полиномиальной функцией коэффициента скорости конца лопасти λ (рисунок 4):

$$C_r(\lambda) = a_6 \cdot \lambda^6 + a_5 \cdot \lambda^5 + a_4 \cdot \lambda^4 + a_3 \cdot \lambda^3 + a_2 \cdot \lambda^2 + a_1 \cdot \lambda^1 + a_0. \quad (15)$$

Параметры a_i , $i=0...6$, обычно определяются путём подбора по таблицам, в которых представлены экспериментальные моментные характеристики по методу наименьших квадратов. Типичные статические изменения C_r и C_p в зависимости от коэффициента скорости конца лопасти для двухлопастных ВТГО приведены на рисунке 4. Различные профили лопастей обладают аэродинамическими характеристиками различной формы; например, на рисунке 4 представлены кривые $C_r - \lambda$ и $C_p - \lambda$, соответствующие ротору с пассивно регулируемым торможением (пунктирная линия) и ротору с активно регулируемым торможением (сплошная линия).

Соответствующие характеристики зависимости момента и мощности от скорости медленно вращающегося вала, параметризованные относительно скорости ветра, показаны на рисунке 5 [6].

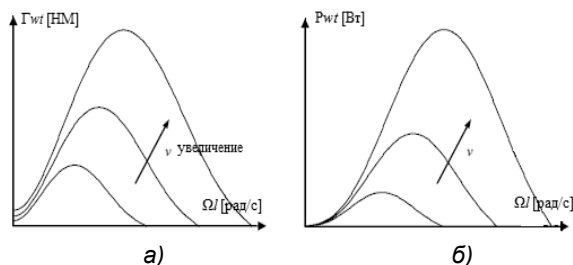


Рисунок 5 – Типичные характеристики зависимости момента (а) и мощности (б) ВТГО (для тихоходного вала)

Моделирование силовой передачи

Силовую передачу можно рассматривать как систему, посредством которой подсистемы S1 и S2 (см. рисунок 1) взаимодействуют механически. Таким образом, момент ветротурбины, Γ_{wt} , и электромагнитный момент генератора, Γ_G , являются входными переменными, в то время как скорость вращения является выходной переменной. Моделирование выполняется из предположения, что механическая трансмиссия имеет постоянный КПД для всего диапазона скоростей; влияние конструктивных особенностей (например, вибраций, типа шестерни, зазор ме-

жду шестернями) на её работу считается паразитным, и не будет учитываться. Кроме того, механическая и электрическая система считаются абсолютно сбалансированными, и любая её неисправность рассматривается как особый режим.

Основным элементом жёсткой силовой передачи является одноступенчатый жёстко сцеплённый редуктор, с постоянным передаточным числом i и КПД - η (рисунок 6). В этом случае модель описывается уравнением движения первого порядка, записанного либо для быстроходного, либо для тихоходного вала.

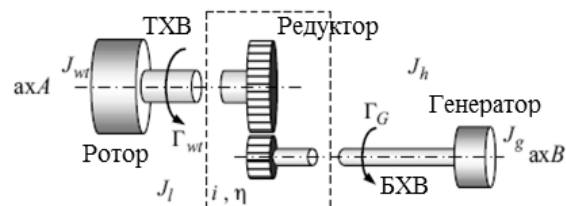


Рисунок 6 – Жёсткая силовая передача

На выходе редуктора и входе генератора момент уменьшается в i раз, а скорость увеличивается в i раз, $\Omega_h = i \cdot \Omega_l$. Исходя из ранее принятых допущений моделирования, динамика СПЭВ может быть выражена как через запись для БХВ так и через запись для ТХВ в двух эквивалентных формах [6].

$$J_h \cdot \frac{d\Omega_h}{dt} = \frac{\eta}{i} \cdot \Gamma_{wt}(\Omega_l, v) - \Gamma_G(\Omega_h, c), \quad (16)$$

$$J_l \cdot \frac{d\Omega_l}{dt} = \Gamma_{wt}(\Omega_l, v) - \frac{i}{\eta} \cdot \Gamma_G(\Omega_h, c), \quad (17)$$

где $\Gamma_{wt}(\Omega_l, v)$ – аэродинамический момент, в зависимости от скорости ветра v ; $\Gamma_G(\Omega_h, c)$ – электромагнитный момент, в зависимости от переменной нагрузки, обозначаемой c ; J_h , J_l – моменты инерции, записанные для БХВ и ТХВ соответственно, и рассчитываемые по формулам:

$$J_h = (J_1 + J_{wt}) \cdot \frac{\eta}{i^2} + J_2 + J_g, \quad (18)$$

$$J_l = J_{wt} + J_1 + (J_g + J_2) \cdot \frac{i^2}{\eta}, \quad (19)$$

где J_1 , J_2 – моменты инерции повышающих зубчатых передач; J_{wt} , J_g – моменты инерции

ротора турбины и электрогенератора соответственно.

Поскольку силовая передача является жёсткой, динамический момент задаётся только линейным изменением скорости вращения первого порядка.

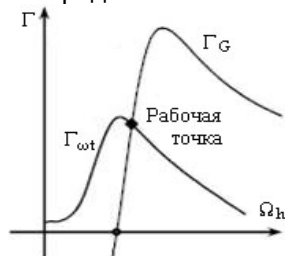


Рисунок 7 – Установившийся режим работы СПЭВ

На рисунке 7 показан установившийся режим взаимодействия между ротором турбины и асинхронным генератором посредством быстроходного вала, вращающегося со скоростью Ω_h . Рабочая точка установившегося режима СПЭВ, определяется как точка пересечения механической характеристики ротора ветротурбины и генератора.

Электрические генераторы представляют собой системы, режимы, мощности которых в основном контролируются при помощи преобразователей тока на силовой электронике. С этой точки зрения, независимо от их конкретной конструкции, управляемые электрогенераторы являются системами, входными параметрами которых являются напряжения статора и ротора, а переменными состояниями являются токи и магнитные потоки статора и ротора. Они состоят из электромагнитной подсистемы, которая выдаёт электромагнитный момент, далее обозначаемый Γ_G , и электромеханической подсистемы, при помощи которой генератор осуществляет механическое взаимодействие минимизации колебаний момента, и, таким образом, лучшего управления движением.

Далее, моделирование генератора заключается в выражении электромагнитной подсистемы в математическом виде. Таким образом, результатом будет являться система уравнений, включающих в себя электрические переменные генератора – напряжения, магнитные потоки и токи. В СПЭВ генератор взаимодействует с силовой передачей; поэтому, в систему этих уравнений обычно добавляется уравнение движения быстроходного вала (БХВ), записываемое в виде:

$$J \frac{d\Omega_h}{dt} = \Gamma_{mec} - \Gamma_G, \quad (20)$$

где трением покоя и внутренним трением пренебрегают, J – эквивалентный момент инерции на БХВ, Γ_{mec} – механический момент, Ω_h – скорость вращения БХВ и Γ_G – электромагнитный момент, являющийся результатом взаимодействия магнитных потоков статора и ротора и различный для каждой конкретной конструкции генераторов. Моделирование подразумевает, что влияние конструктивных особенностей генератора на его динамические характеристики (например, гармоники высших порядков, асимметрию, и т.д.) пренебрежимо мало и его параметры постоянны.

Заключение

В статье рассмотрено моделирование механической части ВЭУ. В результате исследования можно сделать вывод, что предложенный алгоритм расчёта вращающего момента, создаваемого ветром, применим для любого аэродинамического профиля лопасти. А так же подходит для разного числа лопастей. Алгоритм расчёта моментов реализован в программной среде Microsoft Excel.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Le Gourières D. Wind energy – Theory, design and practical calculation of wind energy systems. Editions Eyrolles. – Paris, 1982.
2. Nichita C., El Mokadem M., Dakyo B. Wind turbine simulation procedures. – Wind Engineering, 2006. – P. 187-200
3. Munteanu I., Bratcu A. I., Cutululis N.-A., Ceang E.. Optimal Control of Wind Energy Systems Towards a Global Approach.
4. Diop A.D., Nichita C., Belhache J.J., Dakyo B., Ceang E. Modelling variable pitch HAWT characteristics for a real time wind turbine simulator. Wind Engineering, 1999. – 23(4). – P. 225-243.
5. Munteanu I. Study and simulation of wind power systems. Application to a direct current generator based wind power system. Master Degree Dissertation, – Université du Havre, France, 1997.
6. Nichita C. Study and development of structures and numerical control laws for building up of a 3 kW wind turbine simulator. Ph.D. Thesis, Université du Havre, France, 1995.

Андреева М.А., инженер по специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», выпускник Новосибирского Государственного Технического Университета, E-mail: morgen69@mail.ru;

Удалов С.Н., Новосибирский Государственный Технический Университет, кандидат технических наук, доцент, тел.: (383) 346-08-43, E-mail: Unelli47@cn.ru