

УДК 51-7:004.052:622.53

В. Г. Черников

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»
83001, г. Донецк, ул. Артема, 58

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОГО ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВЕТРОКОЛЕСА

V. G. Chernikov

State Educational Institution of Higher Professional Education «Donetsk National Technical University»
83001, Donetsk, Artyoma str., 58

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF AN ADAPTIVE DISCRETE CONTROLLER OF THE WIND WHEEL ROTATION SPEED

В. Г. Черніков

Державна освітня установа вищої професійної освіти
«Донецький національний технічний університет»
83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АДАПТИВНОГО ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЯТОРУ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ВІТРОКОЛЕСА

В статье предложена методика определения параметров дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса с учетом его математической модели. Рассмотрена возможность применения нейросети для определения нелинейных параметров ветроколеса как объекта регулирования. Установлена длительность выполнения программы регулирования, которая реализует функцию адаптивного дискретного регулятора скорости на базе промышленного программируемого логического контроллера.

Ключевые слова: ветроустановка, контур регулирования, дискретный регулятор.

The article proposes a method for determining the parameters of a discrete speed controller of a wind wheel, taking into account its mathematical model. The possibility of using a neural network to determine the nonlinear parameters of a wind wheel as an object of regulation is considered. The duration of the control program, which implements the function of an adaptive discrete speed controller based on an industrial programmable logic controller, is determined.

Key words: wind turbine, control loop, discrete controller

В статті запропонована методика визначення параметрів дискретного регулятору швидкості обертання вітроколеса з урахуванням його математичної моделі. Розглянута можливість застосування нейромережі для визначення нелінійних параметрів вітроколеса, як об'єкту регулювання. Визначена тривалість виконання програми регулювання, яка реалізує функцію адаптивного дискретного регулятору швидкості на базі програмуємого логічного контролера.

Ключові слова: вітроустановка, контур регулювання, дискретний регулятор.

Введение

В связи со стремительным развитием энергетических технологий, базирующихся на использовании возобновляемых источников энергии, большое внимание уделяется развитию систем управления, которые способны обеспечить необходимое качество энергии в условиях нестабильного энергетического потока, свойственного возобновляемой энергетике. В первую очередь вышесказанное относится к ветрогенераторным установкам, которым приходится работать в условиях нестабильной, постоянно меняющейся скорости ветра.

Системы управления ветрогенераторными установками интенсивно развивались последние три десятилетия. В [1] показано, что наибольшими преимуществами обладают ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса. Системы регулирования таких ветроустановок состоят из нескольких взаимосвязанных контуров регулирования. Особую сложность для обеспечения качественного процесса регулирования вызывает наличие нелинейностей, обусловленных нелинейными свойствами ветроколеса, входящего в состав объекта регулирования [2], [3].

В связи с наличием нелинейности регулятор должен обладать возможностью адаптации к изменяющимся в процессе работы параметрам объекта регулирования. В литературе приводится метод математического описания параметров ветроколеса при помощи некоторой аппроксимирующей функции в виде полинома с набором необходимых коэффициентов [4]. Однако процесс подбора этих коэффициентов является довольно сложной задачей и не обеспечивает необходимой точности при воспроизведении нелинейных параметров ветроколеса.

В связи с этим задачей данной работы является разработка методики расчета параметров адаптивного регулятора, базирующейся на усовершенствованном способе математического описания нелинейных параметров ветроколеса с использованием нейросети. В работе также анализируется возможность реализации функции адаптивного дискретного регулятора с использованием нейросети на базе современных программируемых логических контроллеров, обладающих достаточной вычислительной мощностью для проведения большого количества вычислительных операций за один период дискретности. Необходимые для решения поставленной задачи предварительные исследования проведены автором в предшествующих работах [6], [7].

Основное содержание и результаты работы

Как уже упоминалось ранее, в настоящее время наибольшее распространение получили ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса, ввиду целого ряда преимуществ по сравнению с генераторами, имеющими фиксированную скорость вращения. Из основных преимуществ можно выделить следующие: возможность отбирать максимальную мощность от ветрового потока при изменяющейся скорости ветра, возможность стабилизировать выходную мощность генератора при колебаниях мощности ветра за счет регулирования момента генератора и угла поворота лопасти (pitch-угол), возможность плавного пуска генератора. Изменение скорости вращения ветроколеса подразумевает применение преобразователей частоты. Структурная схема такой ветроустановки, с выделением основных компонентов силовой части и системы регулирования, приведена на рис. 1.

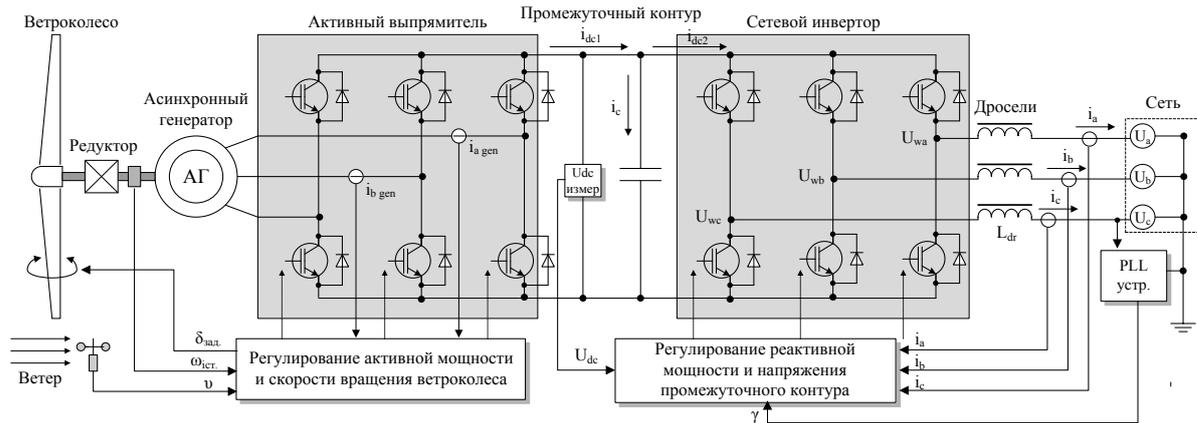


Рисунок 1 – Структурная схема силовой части и системы регулирования ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса

Поскольку система регулирования ветроустановки, изображенная на рис. 1, позволяет контролировать четыре основных параметра, в данной работе основное внимание уделяется той части системы регулирования, которая связана с активным выпрямителем и обеспечивает регулирование активной мощности генератора и скорости вращения ветроколеса за счет наличия двух соответствующих контуров. Структурная схема такой двухконтурной системы регулирования приведена на рис. 2.

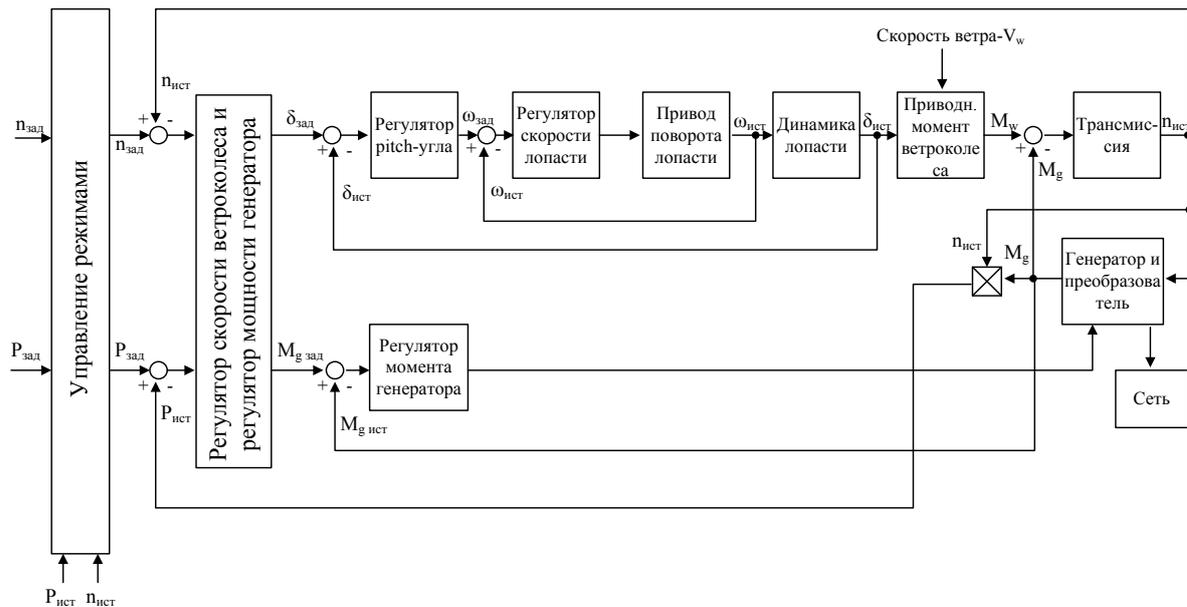


Рисунок 2 – Структурная схема двухконтурной системы регулирования ветроустановки

Приведенная на рис. 2 система регулирования работает в двух основных режимах: режим частичной нагрузки генератора, когда основной задачей является отбор максимальной мощности от ветрового потока, в этом случае работает только контур момента по принципам векторного регулирования [5], а контур скорости бездействует, и режим полной нагрузки генератора, когда основной задачей является поддержание стабильной номинальной мощности генератора в условиях колебаний скорости ветра, в этом случае функционируют оба контура регулирования. Наиболее сложным с точки зрения регулирования является режим полной нагрузки, поскольку именно в этом режиме регулятору скорости приходится взаимодействовать с нелинейным объектом, которым является ветроколесо.

Ветроколесо формирует приводной момент M_w за счёт притекания ветрового потока к его лопастям. Структурная схема притекания ветрового потока к фрагменту лопасти ветроколеса и формирование аэродинамических сил показано на рис. 3.

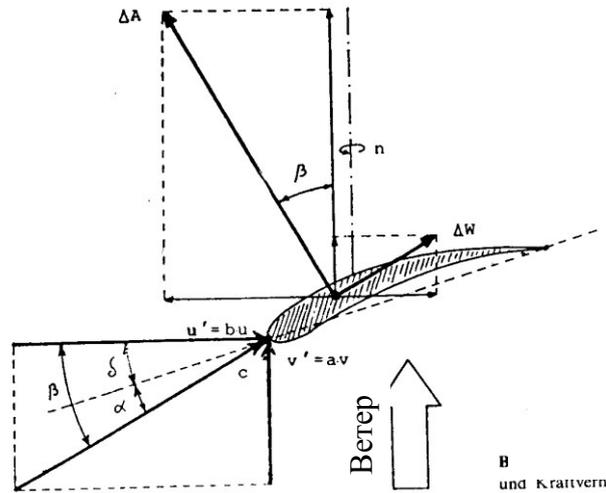


Рисунок 3 – Структурная схема притекания ветрового потока к фрагменту лопасти ветроколеса

На схеме приведены следующие обозначения: β – угол притекания, это угол между плоскостью вращения ветроколеса и направлением ветрового потока, α – угол атаки, угол между направлением ветрового потока и хордой лопасти, δ – установочный угол, это угол между плоскостью вращения ветроколеса и хордой лопасти, a – коэффициент торможения ветрового потока в направлении вращения ветроколеса, b – коэффициент торможения ветрового потока в направлении ветра, ΔA – приводная сила элемента лопасти, ΔW – сила сопротивления элемента лопасти, u' – векторная компонента ветрового потока, которая возникает вследствие вращения ветроколеса, v' – векторная компонента ветрового потока, обусловленная направлением ветра, c – результирующий вектор воздушного потока.

Под действием аэродинамических сил формируется приводной момент ветроколеса – M_w^* , приведенный к валу генератора, в соответствии с формулой

$$M_w^* = \frac{c_{pw}(\lambda, \delta)}{\omega_g} \cdot \frac{\pi \cdot \rho}{8} \cdot D^2 \cdot v^3 = \frac{0,49 \cdot c_{pw}(\lambda, \delta) \cdot D^2 \cdot v^3}{\omega_g}, \quad (1)$$

где, c_{pw} – коэффициент мощности ветроколеса, λ – быстроходность ветроколеса, δ – установочный угол лопасти, D – диаметр ветроколеса, v – скорость ветра, ω_g – скорость вращения генератора, ρ – плотность воздуха (для стандартных условий $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$).

Наибольшую сложность при вычислении момента ветроколеса вызывает определение коэффициента мощности – c_{pw} , который зависит от быстроходности λ и установочного угла лопасти δ . Методика расчета коэффициента мощности ветроколеса на основании его исходных параметров (расч. быстроходность – λ_d , число лопастей – z и диаметр – D) приводится в [7]. Основные этапы этой методики приведены на рис. 4.

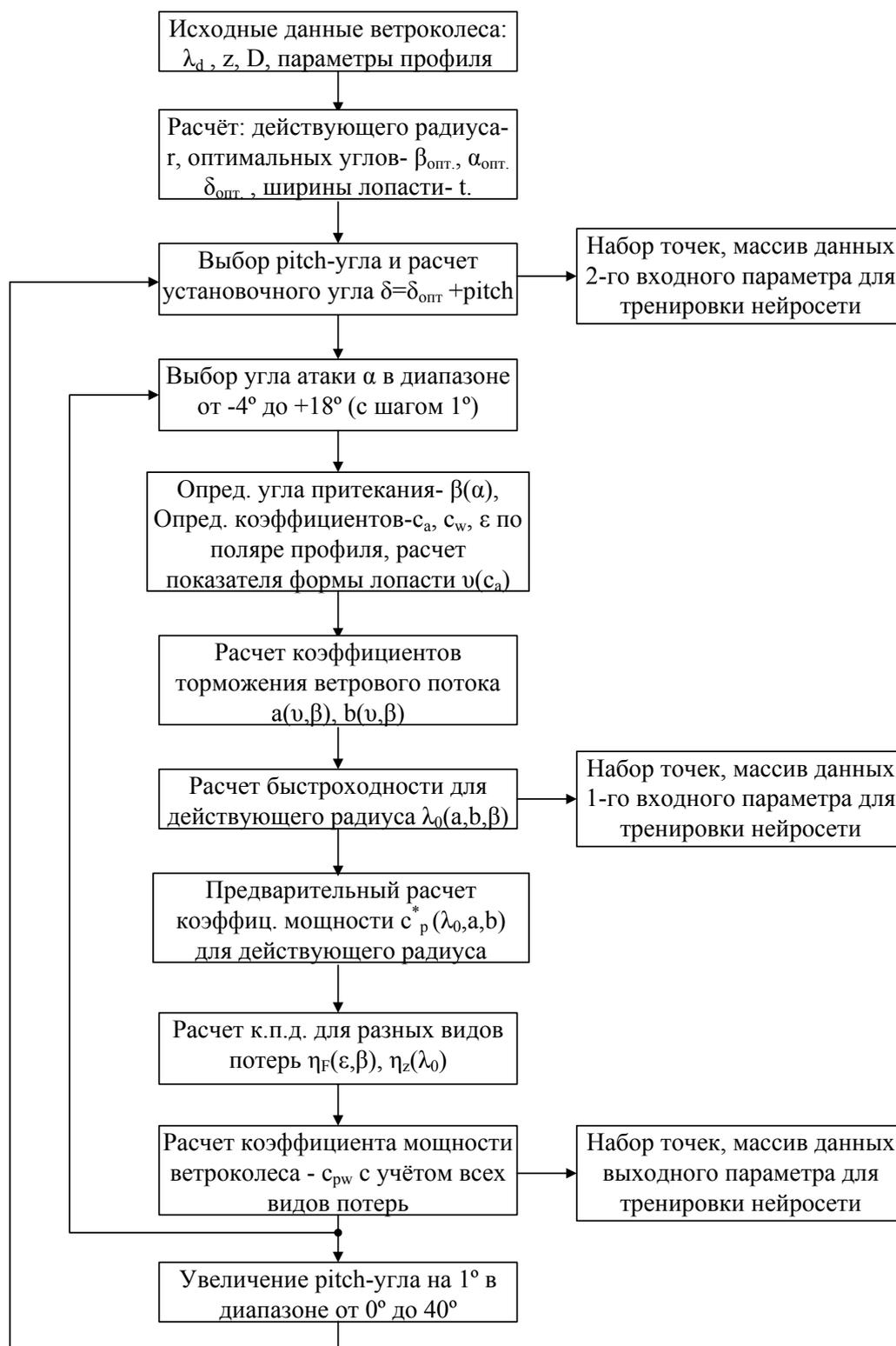


Рисунок 4 – Основные этапы методики расчета коэффициента мощности ветроколеса

Как показывает рис. 4, расчет представляет собой два цикла, в одном из которых происходит изменение угла атаки в диапазоне от -4° до $+18^\circ$ с шагом 1° , а во втором цикле изменяется pitch-угол в диапазоне от 0° до $+40^\circ$ с шагом 1° . В данном случае pitch-угол представляет собой отклонение установочного угла лопасти – δ от опти-

мального положения, см. рис. 3. Расчет производится на основании аэродинамических параметров профиля лопасти NACA 4412. В результате расчета получим набор точек, который позволяет построить трехмерную фигуру зависимости коэффициента ветроколеса – c_{pw} от быстроходности – λ и pitch-угла – $\Delta\delta$. Такая фигура, построенная при помощи программного пакета Matlab, приведена на рис. 5.

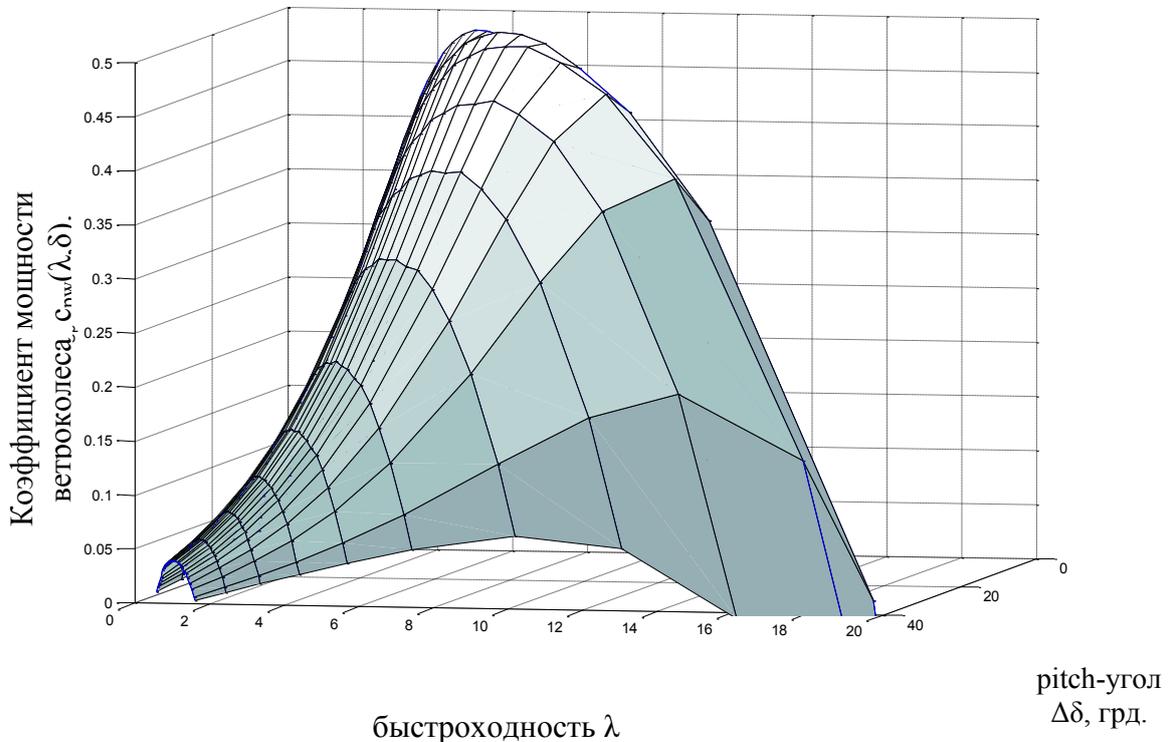


Рисунок 5 – Расчетная зависимость коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ и pitch-угла $\Delta\delta$

В дальнейшем, для реализации системы регулирования, представляет интерес определение характера зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от pitch-угла – $\Delta\delta$ для разных фиксированных значений быстроходности. Такие зависимости можно получить, если разрезать объемную поверхность, изображенную на рис. 5, вертикальными плоскостями, которые соответствуют разным фиксированным значениям быстроходности λ . Быстроходность ветроколеса рассчитывается на основании значений угловой скорости ветроколеса – ω_w и скорости ветра – v по нижеследующей формуле с учетом радиуса ветроколеса – R

$$\lambda = \frac{\omega_w \cdot R}{v}. \quad (2)$$

Кривые, полученные после такого разреза, представлены на рис. 6. Рисунок демонстрирует нелинейность приведенных зависимостей. Это означает, что производная коэффициента мощности ветроколеса по pitch-углу лопасти изменяется в широких пределах вдоль приведенных кривых.

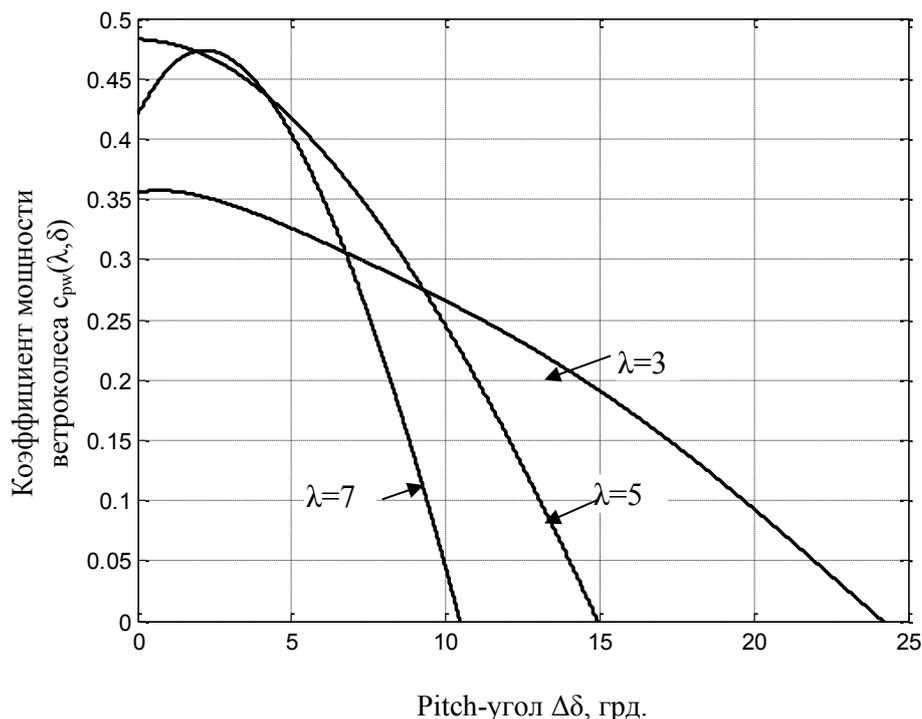


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от pitch-угла $\Delta\delta$ для разных фиксированных значений быстроходности ветроколеса λ

Поскольку при использовании расчетной методики, показанной на рис. 4, затруднительно получить аналитическую зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности и pitch-угла лопасти, поэтому зависимость, приведенная на рис. 5, представляет собой набор точек. Таким образом, для определения коэффициента мощности ветроколеса – $c_{pw}(\lambda, \delta)$, а также для оценки производной $dc_{pw}/d\delta$ целесообразно использовать нейросеть, с помощью которой можно воспроизвести показанную на рис. 5 нелинейную зависимость. Составной частью нейросети выбран нейрон типа перцептрон. Структура нейрона и его расчетные формулы приведены на рис. 7.

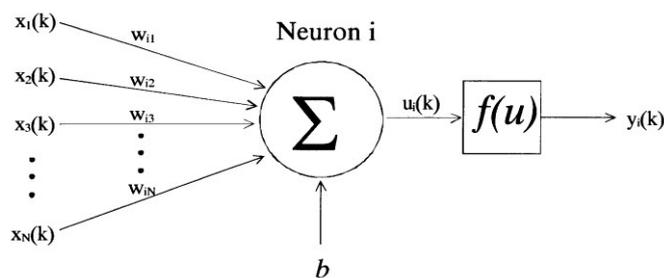


Рисунок 7 – Структура и расчетные формулы нейрона

$$u_i(k) = \sum_{j=1}^N x_j(k) \cdot w_{ij}(k) + b, \quad (3)$$

$$y_i(k) = f\left(\sum_{j=1}^N x_j(k) \cdot w_{ij}(k) + b_i\right), \quad (4)$$

где $x_j(k)$ – входные сигналы, $w_{ij}(k)$ – весовые коэффициенты нейрона, b – биас (коэффициент сдвига), $y_i(k)$ – выходной сигнал нейрона, i – номер нейрона, j – номер весового коэффициента.

Для воспроизведения нелинейной зависимости коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности и установочного угла лопасти, см. рис. 5, нейроны объединяются в нейросеть, структура которой предложена автором, и приведена на рис. 8. Указанная нейросеть состоит из трех слоев. Первый слой содержит пять нейронов с функцией тангенс гиперболический, второй слой – три нейрона с такой же функцией, третий слой содержит один линейный нейрон. Таким образом, выходные значения нейронов первого и второго слоёв рассчитываются согласно формуле

$$y = f(u) = th(u) = \frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}}. \quad (5)$$

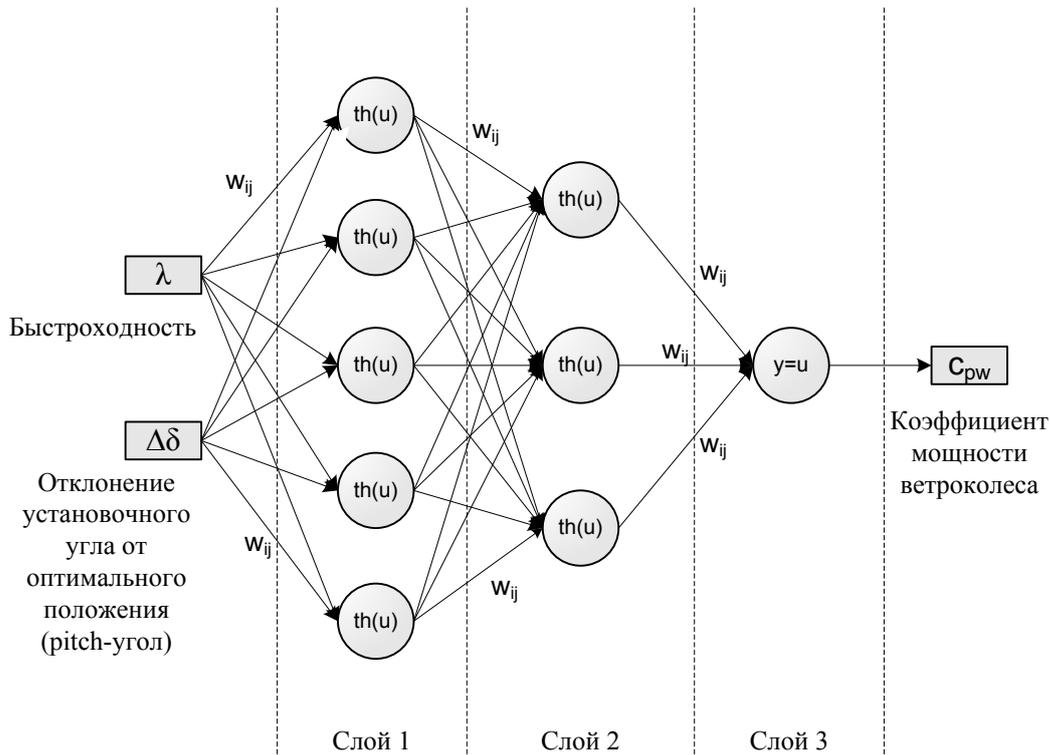


Рисунок 8 – Структура нейросети, которая воспроизводит зависимость $c_{pw}(\lambda, \delta)$

Приведенная структура была создана и минимизирована экспериментальным путем с использованием программного пакета Matlab. Для получения значений весовых коэффициентов проводился процесс тренировки нейросети, при котором в программном пакете MATLAB методом Левенберга-Маркварта находились такие значения весовых коэффициентов w_{ij} , которые позволяют воспроизвести нелинейную зависимость $c_{pw}(\lambda, \delta)$ со значением ошибки, не превышающим $3,0 \times 10^{-5}$.

Таким образом, приведенная на рис. 8 нейросеть позволяет при любых значениях быстроходности λ и pitch-угла $\Delta\delta$ получить необходимое значение коэффициента мощности ветроколеса – c_{pw} .

С учетом вышесказанного и формулы (1), структурная схема формирования момента ветроколеса будет иметь вид, изображенный на рис. 9.

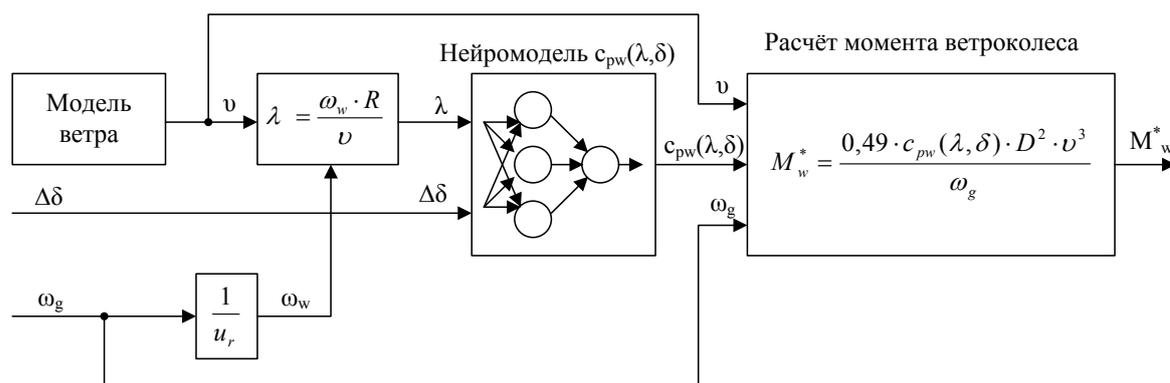


Рисунок 9 – Структурная схема формирования момента ветроколеса, приведенного к валу генератора

Таким образом, на основании структурной схемы формирования момента ветроколеса, приведенной на рис. 9, контур регулирования скорости вращения ветроколеса, показанный в верхней части двухконтурной системы регулирования ветроустановки (рис. 2), будет иметь вид, приведенный на рис. 10.

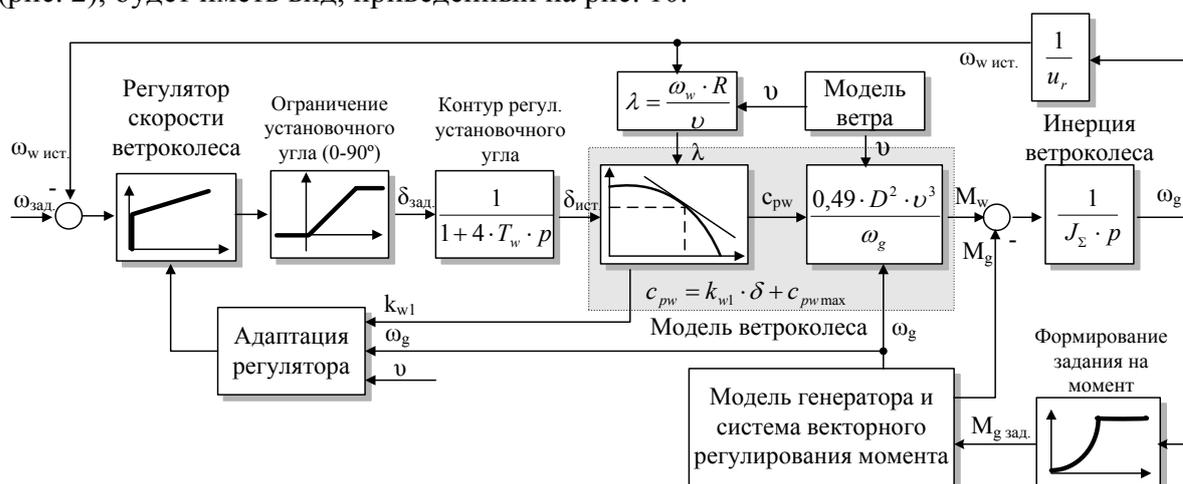


Рисунок 10 – Структурная схема контура регулирования скорости вращения ветроколеса

Контур функционирует следующим образом. Пропорционально-интегральный регулятор скорости, на основании сигнала ошибки по скорости, рассчитывает значение выходного управляющего сигнала в виде задания на pitch-угол – $\delta_{зад}$. Позиционный привод поворота лопасти обрабатывает полученное задание и с некоторой задержкой времени поворачивает лопасть на заданный угол. Задержка при обработке заданного угла поворота обусловлена инерционностью контура регулирования положения, и математически упрощенно описывается наличием апериодического звена с постоянной времени $4T_w$, где T_w – постоянная времени внутреннего контура скорости привода поворота лопасти. Далее ветроколесо, представленное в виде математической модели, на основании реального значения pitch-угла – $\delta_{ист}$, значений быстроходности – λ и скорости ветра – v формирует приводной момент – M_w с учетом использования нейросети, приведенной на рис. 10. Далее разность между приводным моментом ветроколеса – M_w и тормозным моментом генератора – M_g обрабатывается интегратором с постоянной времени, равной моменту инерции ветроколеса – J_Σ , что соответ-

стствует уравнению вращательного движения. На выходе интегратора получаем значение скорости вращения генератора, разделив которое на коэффициент редуктора – u_r , можно получить значение скорости вращения ветроколеса $\omega_{w\text{ усн}}$ и замкнуть его в качестве обратной связи.

Расчет коэффициента мощности ветроколеса, на основании предложенной нейросети, можно упрощенно представить в виде уравнения

$$c_{pw} = k_{wl} \cdot \delta + c_{pw\text{max}}, \quad k_{wl} = \frac{dc_{pw}}{d\delta}, \quad (6)$$

где коэффициент k_{wl} представляет собой значение производной коэффициента мощности ветроколеса – c_{pw} по pitch-углу δ , причем указанная производная будет изменяться в процессе регулирования, смотри рис. 6. Таким образом, в соответствии с рис. 10, результирующий коэффициент передачи – k_{ws} , который связывает реальное значение pitch-угла – $\delta_{\text{усн}}$ и приводной момент ветроколеса – M_w , может быть определен по нижеследующей формуле

$$k_{ws} = 0,49 \cdot D^2 \cdot \frac{v^3}{\omega_g} \cdot k_{wl}. \quad (7)$$

Наличие переменного параметра k_{wl} в контуре регулирования означает присутствие нелинейности, которая должна учитываться при расчете параметров регулятора скорости вращения ветроколеса.

Для контура, изображенного на рис. 10, целесообразно выбрать ПИ-регулятор скорости с адаптацией к изменяющимся параметрам объекта регулирования. Передаточная функция ПИ-регулятора скорости вращения ветроколеса в непрерывном виде соответствует формуле

$$G_{wR}(p) = \frac{T_{wR} \cdot p + 1}{T_{w0} \cdot p}. \quad (8)$$

Регулятор скорости ветроколеса следует настраивать из соображений минимизации влияния возмущающего сигнала, которым является куб скорости ветра, см. рис. 10. Для определения коэффициентов регулятора, представим передаточную функцию контура регулирования скорости ветроколеса по отношению к возмущающему воздействию

$$G_v(p) = \frac{T_{w0} \cdot p \cdot (T_{ws} \cdot p + 1)}{J_{\Sigma} \cdot T_{w0} \cdot T_{ws} \cdot p^3 + J_{\Sigma} \cdot T_{w0} \cdot p^2 + T_{wR} \cdot k_{ws} \cdot p + k_{ws}}, \quad (9)$$

где $T_{ws} = 4 \times T_w$ – постоянная времени в объекте регулирования, обусловленная инерционностью контура регулирования установочного угла лопасти.

Для минимизации влияния возмущающего сигнала на скорость ветроколеса применим принцип модульного оптимума к полиному в формуле (9) за исключением дифференцирующей части – $T_{w0} \times p$, присутствие которой обеспечивает более высокий порядок астатизма контура регулирования. Таким образом, получим значение коэффициентов регулятора скорости – T_{wR} и T_{w0}

$$T_{wR} = 4,25 \cdot T_{ws}, \quad T_{w0} = \frac{8,5 \cdot T_{ws}^2 \cdot k_{ws}}{J_{\Sigma}}. \quad (10)$$

Учитывая то, что коэффициент k_{ws} имеет постоянную и переменную часть, см. формулу (7), в формуле расчета коэффициента регулятора – T_{w0} целесообразно также сгруппировать постоянные и переменные величины отдельно для того, чтобы обеспечить возможность адаптации регулятора к изменениям параметров объекта регулирования. Такая группировка представлена в следующей формуле

$$T_{w0} = \left(\frac{8,5 \cdot T_{ws}^2 \cdot 0,49 \cdot D^2}{J_{\Sigma}} \right) \cdot \left(\frac{\nu^3 \cdot k_{w1}}{\omega_g} \right) = T_{w0}^* \cdot \left(\frac{\nu^3 \cdot k_{w1}}{\omega_g} \right), \quad (11)$$

где коэффициент T_{w0}^* – параметр, объединяющий все постоянные величины.

Дискретная форма ПИ- регулятора скорости ветроколеса будет иметь вид

$$G_{wR}(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1}}{1 + z^{-1}}. \quad (12)$$

Из формулы (12) может быть получено разностное уравнение, которое используется для реализации дискретного ПИ-регулятора в микропроцессорной системе регулирования

$$\delta_{зад}[k] = \delta_{зад}[k-1] + b_0 \cdot \Delta\omega_w[k] + b_1 \cdot \Delta\omega_w[k-1], \quad (13)$$

где $\Delta\omega_w$ – ошибка регулирования скорости вращения ветроколеса, $\delta_{зад}$ – выходной сигнал регулятора (заданный pitch-угол) на указанном шаге регулирования.

При этом значение коэффициентов разностного уравнения регулятора, с учётом выражения (11), можно определить по следующим формулам

$$b_0 = \frac{T_{wR}}{T_{w0}^*} \cdot \left(1 + \frac{T}{2 \cdot T_{wR}} \right) \cdot \frac{\omega_g}{\nu^3 \cdot k_{w1}}, \quad (14)$$

$$b_1 = -\frac{T_{wR}}{T_{w0}^*} \cdot \left(1 - \frac{T}{2 \cdot T_{wR}} \right) \cdot \frac{\omega_g}{\nu^3 \cdot k_{w1}}, \quad (15)$$

где T – период дискретности при работе регулятора.

Структурная схема дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса приведена на рис. 11.

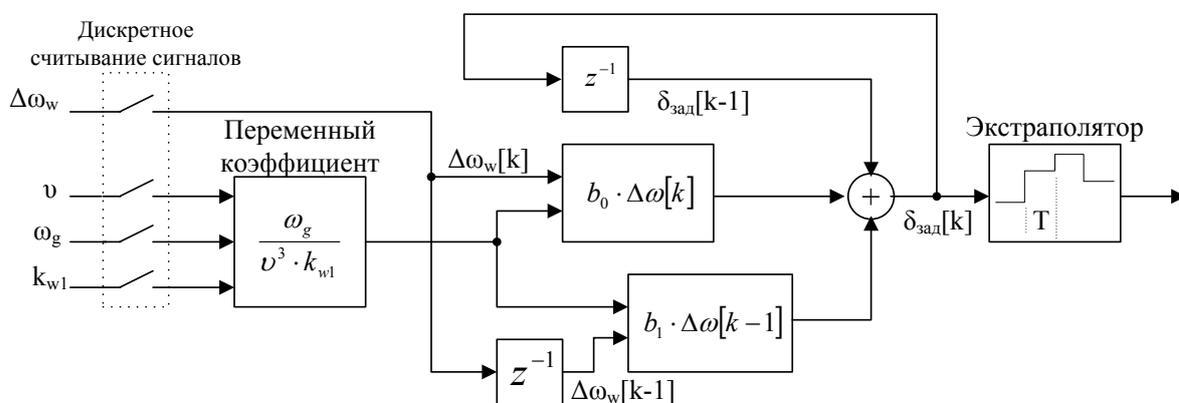


Рисунок 11 – Структурная схема дискретного регулятора скорости ветроколеса

Приведенная структурная схема показывает, что значения коэффициентов разностного уравнения – b_0 и b_1 , определяемые по формулам (14) и (15), будут постоянно корректироваться в зависимости от значения скорости ветра, скорости генератора и нелинейного коэффициента k_{wl} . Постоянный контроль за указанными величинами дает возможность регулятору подстраиваться под изменение параметров объекта регулирования, т.е. делает регулятор адаптивным.

Таким образом, для корректной работы регулятора в процессе регулирования нужно постоянно контролировать переменные величины: скорость ветра, скорость генератора и переменный коэффициент k_{wl} . И если для определения скорости ветра и скорости генератора можно воспользоваться соответствующими датчиками, то переменный коэффициент k_{wl} можно определять, пользуясь нейромоделью зависимости коэффициента мощности ветроколеса – c_{pw} от быстроходности и pitch-угла, см. рис. 8. Процесс определения k_{wl} можно продемонстрировать в виде структурной схемы, приведенной на рис. 12.

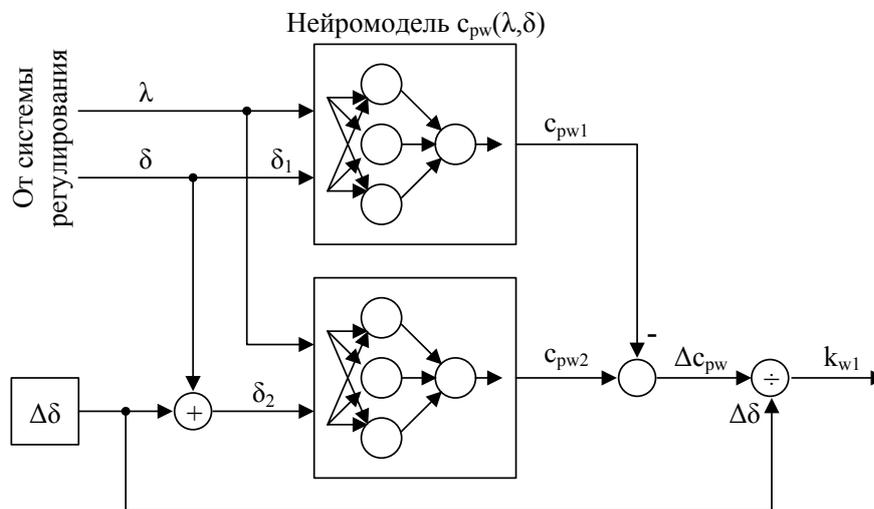


Рисунок 12 – Структурная схема для определения переменного коэффициента k_{wl}

Как показывает рис. 12, определение переменного коэффициента k_{wl} происходит согласно формуле (6) с заменой дифференциалов на малые приращения – $\Delta\delta$ и Δc_{pw} без существенной потери точности. В приведенной структурной схеме двукратно используется нейромодель, показанная на рис. 8 с разными значениями второго входного параметра δ (pitch-угол).

Результаты моделирования процесса регулирования скорости ветроколеса в программном пакете Matlab для контура, изображенного на рис. 10 с дискретным регулятором, изображенным на рис. 11, продемонстрированы на рис. 13. Моделирование проводилось следующим образом, осуществлялся плавный разгон ветроколеса до номинальной скорости, по сигналу задатчика интенсивности, за счет аэродинамического момента при постоянной скорости ветра ($v = 14\text{ м/с}$) и нулевом моменте генератора в течение 8-и секунд. На 10-й секунде скачкообразно прикладывался номинальный момент генератора, а на 12-й секунде имитировались колебания скорости ветра по синусоидальному закону в диапазоне от 13 до 15 м/с с частотой 1Гц.

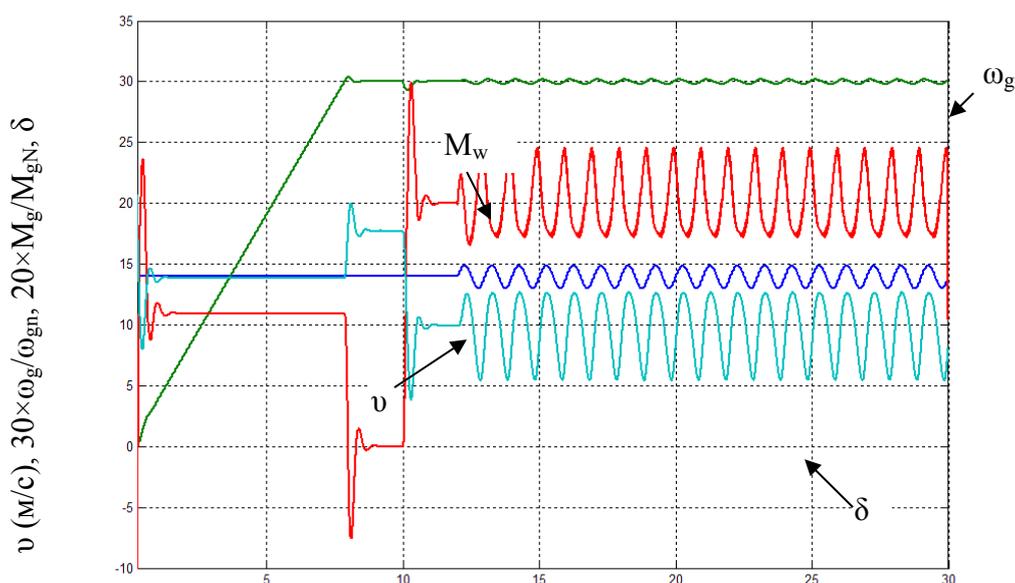


Рисунок 13 – Моделирование процесса регулирования скорости вращения ветроколеса при синусоидальных изменениях скорости ветра

При моделировании использовались следующие параметры: постоянная времени объекта регулирования – $T_{ws} = 60$ мс, суммарный момент инерции системы – $J_{\Sigma} = 19$ кг \times м², номинальная скорость генератора $\omega_{gn} = 158$ рад/с период дискретности регулятора – $T = 2$ мс, диаметр ветроколеса $D = 17$ м, расчетная быстроходность ветроколеса $\lambda_d = 5$, число лопастей $z = 3$. Графики переходных процессов промасштабированы для получения соразмерных графиков поведения наблюдаемых величин.

Результаты моделирования показывают, что приведенный контур справляется с задачей регулирования скорости ветроколеса посредством изменения pitch-угла лопасти. Отклонение скорости ветроколеса от номинальной, обусловленные заданными колебаниями скорости ветра, не превышают 1 рад/с, что составляет менее 1%. Однако в процессе регулирования наблюдаются существенные колебания аэродинамического момента ветроколеса, которые можно объяснить присутствием довольно большой постоянной времени T_{ws} в объекте регулирования.

Для реализации предложенного адаптивного дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса целесообразно оценить, какое время потребует микропроцессорному контроллеру в реальной системе регулирования для реализации программы регулирования с учетом необходимости адаптации и применения предложенной нейросети.

Пример программы реализации дискретного ПИ-регулятора, реализованный на языке программирования STEP 7 для программируемого логического контроллера серии SIMATIC S7-300, приведен на рис. 14. Программа соответствует разностному уравнению см. формулу (13).

L	#sollwert	L	#ek_1	
L	#ist2	L	#b1	Определение третьего
-R		*R		слагаемого разностного
T	#ek	T	#t3	уравнения – t3.
L	#yk_1	L	#t2	
L	#a1	+R		Определение
*R		L	#t1	выходного сигнала
T	#t1	+R		регулятора – uk_1
L	#ek	T	#yk_1	
L	#b0	L	#ek	Пересохранение
*R		T	#ek_1	ошибки регулиров. – ek.
T	#t2			

Рисунок 14 – Пример программы реализации дискретного ПИ-регулятора на языке программирования STEP 7

Как показывает рис. 14, программа содержит 17 команд загрузки и пересылки данных (L и T), на каждую из которых процессорный модуль контроллера CPU-314C 2DP затрачивает 2 мкс, и 6 арифметических команд для чисел с плавающей запятой, на каждую из которых процессорный модуль контроллера затрачивает около 6 мкс. Таким образом, для выполнения программы ПИ-регулятора указанный процессорный модуль затратит 70 мкс. Однако, как показывают формулы (14) и (15), для расчета коэффициентов b_0 и b_1 разностного уравнения нужно постоянно рассчитывать переменный коэффициент k_{wl} , что подразумевает двукратное использование предложенной нейросети, см. рис. 12. При этом количество вычислительных операций с плавающей запятой -m, необходимых для вычисления выходного значения нейросети, см. рис. 8, с использованием выражений (3), (4) и (5), можно определить по формуле

$$m = 4 \cdot (n_{ex} + 1) \cdot n_{N1} + 4 \cdot (n_{N1} + 1) \cdot n_{N2} + (2 \cdot n_{N2} - 1) \cdot n_{N3}, \quad (16)$$

где $n_{ex} = 2$ – кол-во входных параметров нейросети, $n_{N1} = 5$ – число нейронов первого слоя, $n_{N2} = 3$ – число нейронов второго слоя, $n_{N3} = 1$ – число нейронов третьего слоя.

При подстановке приведенных численных значений в формулу (16) и учете того, что одна вычислительная операция занимает около 6 мкс и требуется двукратный расчет выходного значения нейросети, получим время, затрачиваемое процессором на расчет переменного коэффициента $k_{wl} - t_{расчет} = 1644$ мкс. Добавив к этому времени время выполнения программы ПИ-регулятора (70 мкс) и увеличив суммарное значение на 5% для учета дополнительных и вспомогательных команд, получим суммарное время выполнения программы регулирования с учетом адаптации регулятора $t_{прогр.рег.} = 1,8$ мс. То есть процессору потребуется 1,8 миллисекунды для реализации программы регулирования в случае использования процессорного модуля со средним быстродействием – CPU-314C 2DP серии контроллеров SIMATIC S7-300.

Выводы

В работе показаны особенности контура регулирования скорости вращения ветроколеса, а также показана необходимость применения адаптивного ПИ-регулятора скорости по причине изменения параметров объекта регулирования. Предложен новый метод адаптации регулятора к изменяющимся свойствам объекта регулирования с использованием нейросети. К достоинствам предложенной нейросети можно отнести небольшое количество нейронов, что делает возможным ее применение в промышленных программируемых логических контроллерах.

В работе так же приведен пример реализации дискретного ПИ-регулятора на языке программирования STEP 7 и определено суммарное время выполнения программы регулирования с использованием нейросети – 1,8 мс, что существенно ниже (более чем в 10 раз) малой постоянной времени объекта регулирования – $T_{ws} = 60ms$. Таким образом, применение предложенного регулятора не нарушает основного правила для дискретных систем регулирования, согласно которому для получения качественного процесса регулирования период дискретности системы должен быть как минимум в десять раз меньше, чем малая постоянная времени объекта регулирования.

Список литературы

1. Munteanu I. Optimal Control of Wind Energy System [Текст] / Munteanu I., Bratcu A., Cutululis N., Ceanga E. – London : Springer-Verlag, 2008. – P 29–30.
2. Heier S. Windkraftanlagen, Systemauslegung, Netzintegration und Regelung [Текст] / Heier S. – Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009. – P. 182.
3. Burton T. Wind Energy Handbook [Текст] / Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E. – West Sussex : Wiley, 2011. – P. 59–65.
4. Стычинский З. А. Возобновляемые источники энергии. Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика [Текст] / З. А. Стычинский, Н. И. Воропай. – Магдебург : Изд-во ун-та им. Отто фон Герике, 2010. – 209 с.
5. Riefenstahl U. Elektrische Antriebstechnik [Текст] / Riefenstahl U. – Leipzig : Teubner Stuttgart, 2000. – P. 210–212.
6. Черников В. Г. Стабилизация выходной мощности ветрогенераторных установок с асинхронным генератором средствами системы регулирования [Текст] / В. Г. Черников // Сборник научных трудов ДонНТУ, серия «Электротехника и энергетика». – № 2. – 2013. – Донецк : ДонНТУ, 2013. – С. 265–272.
7. Черников В. Г. Оценка энергоэффективности работы ветроустановки в режиме максимальной мощности с использованием спектральной модели ветра Ван дер Ховена [Текст] / В. Г. Черников // Журнал Кременчужского национального университета «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – 2014. – № 2. – Кременчук, 2014. – С. 89–96.

References

1. Munteanu I., Bratcu A., Cutululis N., Ceanga E. *Optimal Control of Wind Energy System*. London, Springer-Verlag, 2008, P. 29-30.
2. Heier S. *Windkraftanlagen, Systemauslegung, Netzintegration und Regelung*, Wiesbaden, Vieweg+Teubner, 2009, P. 182.
3. Burton T. *Wind Energy Handbook*, West Sussex: Wiley, 2011, P. 59-65.
4. Styczynski Z. *Vozobnovlyayemye istochniki energii. Teoreticheskiye osnovy, tekhnologii, tekhnicheskkiye kharakteristiki, ekonomika* [Renewable Energy Systems. Fundamentals, Technologies, Techniques and Economics], Magdeburg, university Otto von Guericke, 2010, P. 39.
5. Riefenstahl U. *Elektrische Antriebstechnik*, Leipzig, Teubner Stuttgart, 2000, P 210-212.
6. Chernikov V.G. Stabilizatsiya vykhodnoy moshchnosti vetrogeneratornykh ustanovok s asinkhronnym generatorom sredstvami sistemy regulirovaniya [Stabilization of the output power of wind turbines with an asynchronous generator by means of a control system]. *Sbornik nauchnykh trudov DonNTU, seriya «Elektrotekhnika i energetika* [Collection of scientific papers DonNTU «Electrical engineering and power engineering»], №2/2013, Donetsk: DonNTU, 2013, P. 265-272.
7. Chernikov V.G. Otsenka energoeffektivnosti raboty vetroustanovki v rezhime maksimal'noy moshchnosti s ispol'zovaniyem spektral'noy modeli vetra Van der Khovena [Evaluation of the energy efficiency of the wind turbine operation in the maximum power mode using the Van der Hoven spectral wind model]. *Zhurnal Kremenchut'skogo natsional'nogo universiteta «Yeletromekhanichni i yenergozberigayuchi sistemi»* [Journal of the Kremenchug National University «Electromechanical and energy-saving systems»], № 2, 2014, Kremenchug: 2014, P. 89-96.

RESUME

V. G. Chernikov

Development of a Methodology for Determining the Parameters of an Adaptive Discrete Controller of the Wind Wheel Rotation Speed

Recently, wind turbines with variable rotation speed of the wind wheel have become widespread. The basis of the power circuits of such wind turbines are frequency converters. The control systems of such wind turbines consist of several interconnected control loops. The main task of the control system of the wind turbine in full load mode is to stabilize the output power of the generator in conditions of unstable wind speed. An important role in solving this problem is played by the control loop of the rotation speed of the wind wheel.

The structure of the wind wheel rotation speed control circuit is considered in the paper, the main components of the control object are determined. The classical modular optimum method was used to optimize the control loop. The Matlab software package was used to simulate the operation of a discrete control loop.

A method for creating a mathematical model of a wind wheel based on its aerodynamic characteristics is proposed. In the course of research, it was found that it is advisable to use a neural network to take into account the nonlinear features of the wind wheel. The transfer function of the discrete controller is transformed into a difference equation with variable coefficients. Recalculation of the coefficients of the difference equation is carried out using the proposed neural network with a minimum number of neurons.

The proposed method for determining the parameters of an adaptive discrete controller can be implemented on the basis of a programmable logic controller with an average speed of floating-point operations. At the same time, the execution time of the control program falls within the permissible range of the discreteness period.

РЕЗЮМЕ

В. Г. Черников

Разработка методики определения параметров адаптивного дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса

В последнее время широкое распространение получили ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса. Основу силовой части таких установок составляют преобразователи частоты. Системы регулирования таких ветроустановок состоят из нескольких взаимосвязанных контуров регулирования. Основной задачей системы регулирования ветроустановки в режиме полной нагрузки является стабилизация выходной мощности генератора в условиях нестабильной скорости ветра. Большую роль в решении этой задачи играет контур регулирования скорости вращения ветроколеса.

В работе рассмотрена структура контура регулирования скорости вращения ветроколеса, определены основные компоненты объекта регулирования. Для оптимизации контура регулирования использовался классический метод модульного оптимума. Для моделирования работы дискретного контура регулирования использовался программный пакет Matlab.

Предложена методика создания математической модели ветроколеса на основе его аэродинамических характеристик. В ходе исследований установлено, что для учета нелинейных особенностей ветроколеса целесообразно использовать нейросеть. Передаточная функция дискретного регулятора трансформирована в разностное уравнение с переменными коэффициентами. Пересчет коэффициентов разностного уравнения осуществляется при помощи предложенной нейросети с минимальным количеством нейронов.

Предложенная методика определения параметров адаптивного дискретного регулятора может быть реализована на базе программируемого логического контроллера со средней скоростью выполнения операций с плавающей запятой. При этом время выполнения программы регулирования укладывается в допустимый диапазон периода дискретности.

Статья поступила в редакцию 25.12.2021.