

На правах рукописи



ЗУБОВА Наталья Владиславовна

**ПОВЫШЕНИЕ РЕЖИМНОЙ УПРАВЛЯЕМОСТИ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИЗМЕНЯЕМОЙ
ГЕОМЕТРИЕЙ ЛОПАСТЕЙ РЕГУЛЯТОРАМИ
НА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

Официальные оппоненты: **Горелов Сергей Валерьевич**
доктор технических наук, профессор,
Новосибирская государственная Академия
водного транспорта, заведующий кафедрой
«Электроэнергетические системы и электротехника»

Харлов Николай Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Энергетический
институт, ведущий инженер Регионального
учебно-научно-технологического центра ресурсосбережения

Ведущая организация: ЗАО «ЗиО-КОТЭС», г. Новосибирск

Защита состоится 20.06.2014 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/science/cand_dis/zubova

Автореферат разослан «22» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.П. Тимофеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ветроэнергетика является перспективным направлением получения электроэнергии. Использование возобновляемой экологически чистой энергии ветра помогает покрывать увеличивающееся электропотребление растущего мирового населения. Основное препятствие к использованию ветра как энергетического источника – непостоянство его скорости, а, следовательно, и энергии во времени. Ветер обладает не только многолетней и сезонной изменчивостью, но также изменяет свою активность в течение суток и за очень короткие промежутки времени (мгновенные пульсации скорости и порывы ветра).

Конструкции ветроэнергетических установок (ВЭУ) неизменно совершенствуются и их режимную управляемость можно повысить с помощью инновационных решений в этой области, таких как применение устройств активного управления потоком (УАУП) и изменение геометрии лопастей. В России это мало изученное направление. Большой интерес такие способы повышения энергоэффективности режимов работы ВЭУ вызывают у исследователей в тех странах, которые занимают лидирующие позиции по доле энергии, вырабатываемой ВЭУ, например, Китая, США, Германии и др.

При анализе задач управления режимами работ как ВЭУ, так и ветроэлектрических станций (ВЭС) и принятия решений в условиях изменчивости источника энергии, появляются трудно разрешимые традиционными методами проблемы их управляемости. По этой причине большое распространение в последнее время получают адаптивные интеллектуальные системы управления, способные подстраиваться под изменения состояния объекта и входные возмущения.

Системы управления на основе нечеткой логики показали свое преимущество во многих сферах науки и техники. Они неоднократно сопоставлялись с традиционными способами управления, основанных на анализе дифференциальных уравнений, которые описывают объект управления через параметры, полученные от датчиков, и показывали свое преимущество перед ними. В первую очередь они более адекватны в условиях неопределенности, разброса параметров, неточности каких-либо характеристик, необходимости учета влияния разных факторов на ход процесса управления.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка системы управления, выполненной с применением аппарата нечеткой логики, для повышения режимной управляемости и выработки мощности ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей. Такая система управления позволяет вырабатывать максимально возможную мощность ВЭУ в режиме рабочих ветров и номинальную – в режиме ограничений, защищая генератор от перегрузки. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать принципы управления и существующие способы повышения режимной управляемости и выработки электроэнергии ВЭУ;
2. Рассмотреть и исследовать наиболее перспективные устройства быстрого изменения потока вокруг лопасти, позволяющие в короткие промежутки времени изменять подъемную силу;

3. Определить приоритетность действия контуров управления ВЭУ при работе в зонах рабочих ветров и ограничения мощности;
4. Разработать алгоритмы на основе нечеткого вывода для повышения режимной управляемости ВЭУ в составе электрической сети;
5. Разработать систему повышения выработки электрической энергии ВЭУ с использованием предложенных алгоритмов;
6. Провести сравнительный анализ результатов моделирования традиционной и предложенной систем управления.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы преобразования входных данных с использованием аппарата нечеткой логики в продукционных правилах: фаззификация, агрегирование, активизация, аккумуляция, дефаззификация; методы математического программирования; методы теории анализа электроэнергетических систем (ЭЭС), электрических сетей и электромеханических процессов; метод конечных элементов при моделировании процессов, происходящих вокруг лопасти с изменяемой геометрией.

Научная новизна. В работе получены результаты, обеспечивающие повышение режимной управляемости и энергоэффективности выработки электрической энергии ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей при использовании аппарата нечеткой логики в системе регулирования. Научная новизна заключается в следующем:

- на основании проведенного анализа принципов управления ВЭУ разработана модель системы регулирования мощности ветроэнергетических установок на основе нечеткой логики, позволяющая повысить выработку электроэнергии в зоне рабочих ветров и снизить колебания мощности в режиме ограничения при работе ВЭУ в составе электрической сети;
- показана целесообразность применения метода иерархий в качестве способа определения приоритетности действия контуров управления ВЭУ при условии максимальной энергоэффективности режимов работы и согласования выработки электроэнергии с ее потреблением;
- впервые предложена модель совместного применения лопастей переменной длины и устройств активного управления потоком, обтекающего аэродинамический профиль ветроколеса, и получены результаты их влияния на подъемную силу лопасти;
- разработан алгоритм на основе нечеткого логического вывода, позволяющий эффективно управлять изменением длины лопастей и вырабатывать до 30% больше электроэнергии при работе ВЭУ в диапазоне ветров от слабого до сильного;

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм на основе нечеткой логики для изменения длины лопастей, позволяющий эффективно использовать этот контур управления для повышения режимной управляемости ВЭУ, а также увеличения выработки электроэнергии до 30% в зоне рабочих ветров и ограничения мощности ВЭУ при крепких ветрах для обеспечения защиты генератора от перегрузки;

2. Результаты моделирования совместного действия лопастей переменной длины и устройств активного управления потоком, показывающие возможность повышения режимной управляемости ВЭУ за счет изменения геометрии лопастей;
3. Модель системы управления выработкой электрической энергии ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей при применении предложенных алгоритмов на основе нечеткой логики.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов работы подтверждается достаточно полным анализом разработок различных алгоритмов управления ВЭУ на основе нечеткой логики, сопоставлением результатов вычислительных экспериментов, полученных при применении предложенного алгоритма на основе нечеткой логики, с реальными графиками, полученными при эксплуатации ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей. Результаты исследований влияния на подъемную силу устройств быстрого изменения потока, обтекающего ветроколесо, совпадают с экспериментальными данными, опубликованными зарубежными авторами при исследовании этих устройств в аэродинамической трубе.

Практическая значимость. В ходе проведенных исследований были получены результаты, обладающие следующей практической ценностью:

- доказано повышение энергетической эффективности за счёт применения лопастей ВЭУ с изменяемой геометрией, которая достигается использованием устройств активного управления потоком и изменением длины лопасти;
- получены результаты по изменению подъемной силы при активации микроустройств и изменении длины лопастей, показывающие целесообразность изменения геометрии аэродинамического профиля для повышения режимной управляемости ВЭУ;
- осуществлена программная реализация модели системы повышения режимной управляемости ВЭУ с использованием алгоритмов на основе нечеткой логики;
- дана экономическая оценка целесообразности использования ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей и системой управления на основе нечеткой логики в электроэнергетических системах с учетом современных и прогнозируемых цен на электроэнергию и оборудование.

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка алгоритмов и их реализация в программно-вычислительных комплексах, обобщение и анализ результатов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука, технологии, инновации" (НГТУ, г. Новосибирск, 2008 г., 2011 г.); на международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (ТПУ, г. Томск, 2009 г.); на международной научно-практической кон-

ференции «Электроэнергетика в сельском хозяйстве» (ИИЦ ЦНСХБ СО Россельхозакадемии, Республика Алтай, 2009 г.); на первом международном научно-техническом конгрессе «Энергетика в глобальном мире» (ООО «Версо», Красноярск, 2010 г.); на международной конференции «International Scientific conference on energy industry development and ecology» (Монгольский университет науки и технологии, г.Улан-Батор, Монголия, 2010 г.); на всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (ТПУ, г. Томск, 2012 г.); на международных форумах «The international forum on strategic technologies» (HoChiMinh City, Vietnam, IFOST-2009 и Ulaanbaatar, Mongolia, IFOST-2013); на всероссийской конференции молодых ученых «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, 2013 г.) ; на первом международном форуме «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности» (Российская академия наук, г. Москва, REENFOR-2013); на научных семинарах кафедры "Системы электроснабжения предприятий" Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Публикации. Всего по теме диссертационной работы опубликовано 16 работ, в том числе: 1 – монография, 4 - статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации – 190 страниц, рисунков – 109, таблиц – 10. Список использованных источников содержит 99 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решения поставленной проблемы, сформулированы цель и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов исследования, приведены основные положения диссертации.

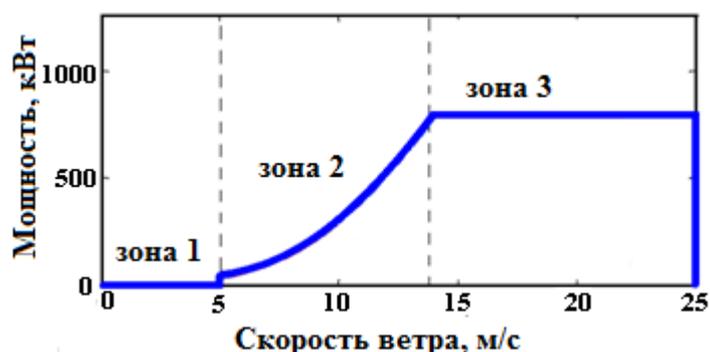


Рисунок 1 – Энергетическая характеристика

В первом разделе рассмотрены основные зоны режимов работы ветроэнергетических установок (рисунок 1). В зоне 1 современные стратегии регулирования не используются, в этой области происходит подготовка ВЭУ к запуску и слежение за скоростью ветра. Зона 2 является рабочим режимом, в котором желательно выработать столько электроэнергии, сколько возможно.

Аэродинамические потери препятствуют достижению ВЭУ ее максимального теоретически возможного отбора энергии из ветра, называемого пределом Бетца

($c_p=0,59$), но цель – приблизиться к этому значению так близко, как возможно. В зоне 2 могут быть использованы два принципа регулирования работы ВЭУ: регулирование поворота гондолы в горизонтальной плоскости, регулирование угловой скорости ротора ветроколеса. В зоне 3 установка должна ограничивать отбираемую долю энергии ветра так, чтобы не выйти за пределы электрических и механических расчетных нагрузок генератора. При работе в этой зоне ВЭУ поддерживают постоянное значение скорости вращения ротора и постоянную, номинальную мощность, изменяя угол заклинения лопастей для сброса избыточной энергии. В этой области могут быть использованы все три выше указанных принципа регулирования выработки мощности.

Механическая мощность, производимая горизонтально-осевой турбиной в установившемся режиме, определяется по формуле:

$$P_m = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 v^3 c_p(\beta, \lambda_{cp}), \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, R – радиус ветроколеса; v – скорость ветра, c_p – коэффициент мощности, который вычисляется следующим образом:

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda_{cp}} - c_3 \cdot \beta - c_4 \right) \cdot e^{-\frac{c_5}{\lambda_{cp}}} + c_6 \cdot \lambda_{cp}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_{cp}} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}, \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_{\text{ветра}}}, \quad (4)$$

где λ – быстроходность, β – угол заклинения лопастей ротора в градусах, ω – механическая угловая скорость вращения ротора ветроколеса. Коэффициенты c_{1-6} задаются заводом изготовителем для ВЭУ. Исходя из выражений (2) – (4), коэффициент мощности в зоне 2 можно поддерживать на постоянном максимальном уровне при установке угла заклинения лопасти в оптимальное положение $0-2^\circ$, при отслеживании направления ветра и ориентации гондолы перпендикулярно ему, изменяя скорость вращения ротора ветроколеса, как было указано выше и, регулируя длину лопасти, что на сегодняшний день является инновационной идеей. Изменение длины лопасти, при возможности уменьшения ее длины ниже номинального значения, может быть применено и в зоне 3.

В данном разделе также проведен анализ существующих способов управления ветроэнергетическими установками и приведены методы оптимального управления ВЭУ по критерию энергетической эффективности с использованием как линейных, так и нелинейных моделей. В качестве одного из способов повышения энергоэффективности ВЭУ рассмотрен метод изменения длины лопастей ветроколеса. А также рассмотрены существующие на сегодняшний день схемы подключения ВЭУ (ВЭС) к электроэнергетической системе.

Второй раздел посвящен обзору основных понятий теории нечетких множеств, их свойств и основных операций над ними. Также рассмотрены основы нечеткой логики, включая нечеткие логические операции и основные алгоритмы нечеткого вывода, так как на их основе базируются последующие разработки.

В данном разделе рассмотрена возможность применения нечеткой логики к задачам регулирования режимов работы ВЭУ и проведен анализ мирового опыта в этой области. Также приведены алгоритмы действия контуров управления ВЭУ на основе нечеткого логического вывода и основные этапы их формирования. На основе этого предложены алгоритмы для разрабатываемой системы управления ВЭУ.

Для реализации идеи изменения длины лопасти ветроколеса, которая более подробно рассмотрена в главе 3, предложен новый алгоритм, в основе которого заложена нечеткая логика. Схема нечеткого регулятора представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Блок-схема нечеткого регулятора для изменения длины лопасти ветроколеса

Основные этапы нечеткого вывода:

- *Формирование базы правил.* База правил систем нечеткого вывода предназначена для формального представления эмпирических знаний или знаний экспертов в той или иной проблемной области и представляет собой совокупность правил нечетких продукций вида:

ПРАВИЛО_i: ЕСЛИ “Условие_i”, ТО “Заключение_i” (F_i),

где F_i (i принадлежит $\{1, 2, \dots, n\}$) есть коэффициенты определенности или весовые коэффициенты соответствующих правил, которые могут принимать значения из интервала $[0, 1]$, если не указано иначе, то $F_i=1$.

База правил считается заданной, если для нее определено множество правил нечетких продукций, множество входных лингвистических переменных и множество выходных лингвистических переменных.

- *Фаззификация (введение нечеткости)* является процессом и процедурой нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (четких) исходных данных. После завершения этого этапа для всех входных переменных должны быть определены конкретные значения функций принадлежности по каждому из лингвистических термов, которые используются в подусловиях базы правил системы нечеткого вывода.

- *Агрегирование* представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. Если условие правила имеет простую форму, то степень его истинности равна соответствующему значению принадлежности входной переменной к терму, используемому в данном условии. В том случае, когда условие состоит из нескольких подусловий вида:

ПРАВИЛО<#>: ЕСЛИ “ β_1 есть α_1 ” И “ β_2 есть α_2 ”, ТО “ β_3 есть v ”, или
 ПРАВИЛО<#>: ЕСЛИ “ β_1 есть α_1 ” ИЛИ “ β_2 есть α_2 ”, ТО “ β_3 есть v ”,

то определяется степень истинности сложного высказывания на основе известных значений истинности подусловий. При этом используются соответствующие формулы для выполнения нечеткой конъюнкции и нечеткой дизъюнкции.

- *Активизация* есть процесс нахождения степени истинности каждого из подзаклучений правил нечетких продукций.

- *Аккумуляция* является процессом нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель аккумуляции – объединить все степени истинности заключений (подзаклучений) для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных.

- *Дефаззификация (приведение к четкости)* представляет собой процедуру нахождения управляющего (четкого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель заключается в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить некоторое количественное значение каждой из выходных переменных, которое может быть использовано специальными устройствами, внешними по отношению к системе нечеткого вывода.

Предлагаемый алгоритм применим к ВЭУ, работающим как с постоянной, так и с переменной скоростью вращения ротора. В качестве входных переменных служат значения скорости ветра (V_B) и приращение вырабатываемой мощности (dP) ВЭУ. Нечеткий вывод осуществляется по алгоритму Ларсена, для процесса дефаззификации используется метод среднего максимума, который определяется как среднее арифметическое левого и правого модальных значений. На выходе получаем конкретное значение изменения длины лопасти ΔL для максимизации выработки энергии. Для разработанного алгоритма сформированы функции принадлежности входных и выходной переменных (рисунки 3,4).

Нижеследующие символы представляют собой терм-множества, используемые для входных и выходных переменных: N – номинальное значение; NS – меньше номинального значения/отрицательное малое значение; B – большое отклонение; VB – очень большое отклонение; PB – положительное большое отклонение; PVB – очень большое положительное отклонение; Z – нет отклонения; M – среднее отклонение. Правила, по которым осуществляется управляющее воздействие предложенного алгоритма визуально представлены на рисунке 5.

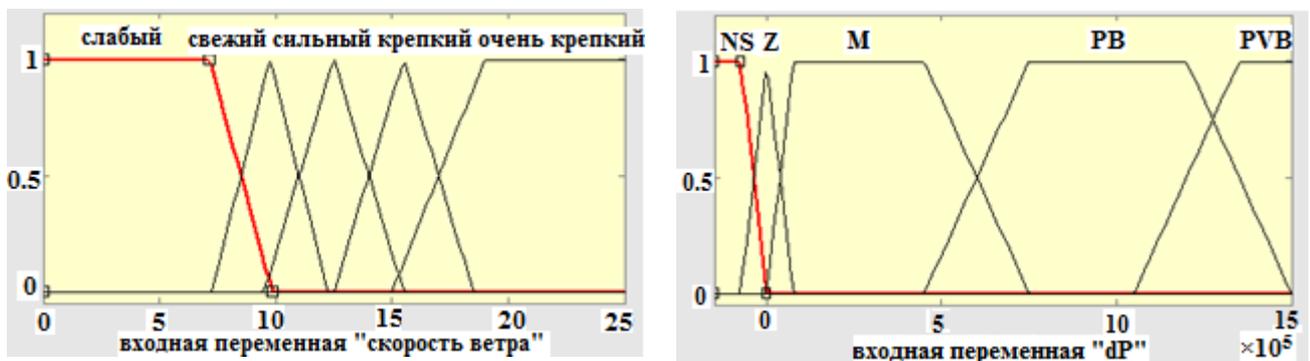


Рисунок 3 – Функции принадлежности для входных лингвистических переменных dP и скорости ветра

Разработанный алгоритм реализован в программе Fuzzy Logic Toolbox/Simulink/Matlab. Возможности этого программного обеспечения позволяют не только создать алгоритм, но и проанализировать его адекватность, оценить влияние изменения значений входных переменных на значение выходной переменной.

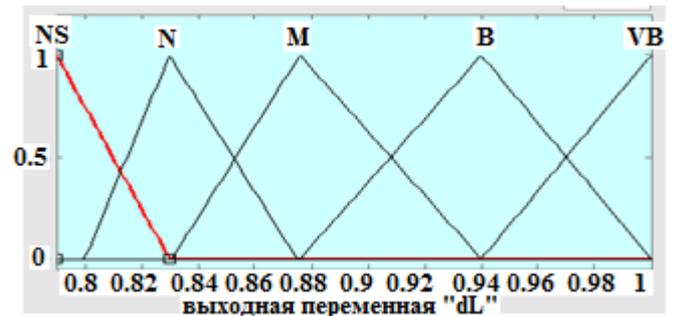


Рисунок 4 – Функция принадлежности для выходной лингвистической переменной dL

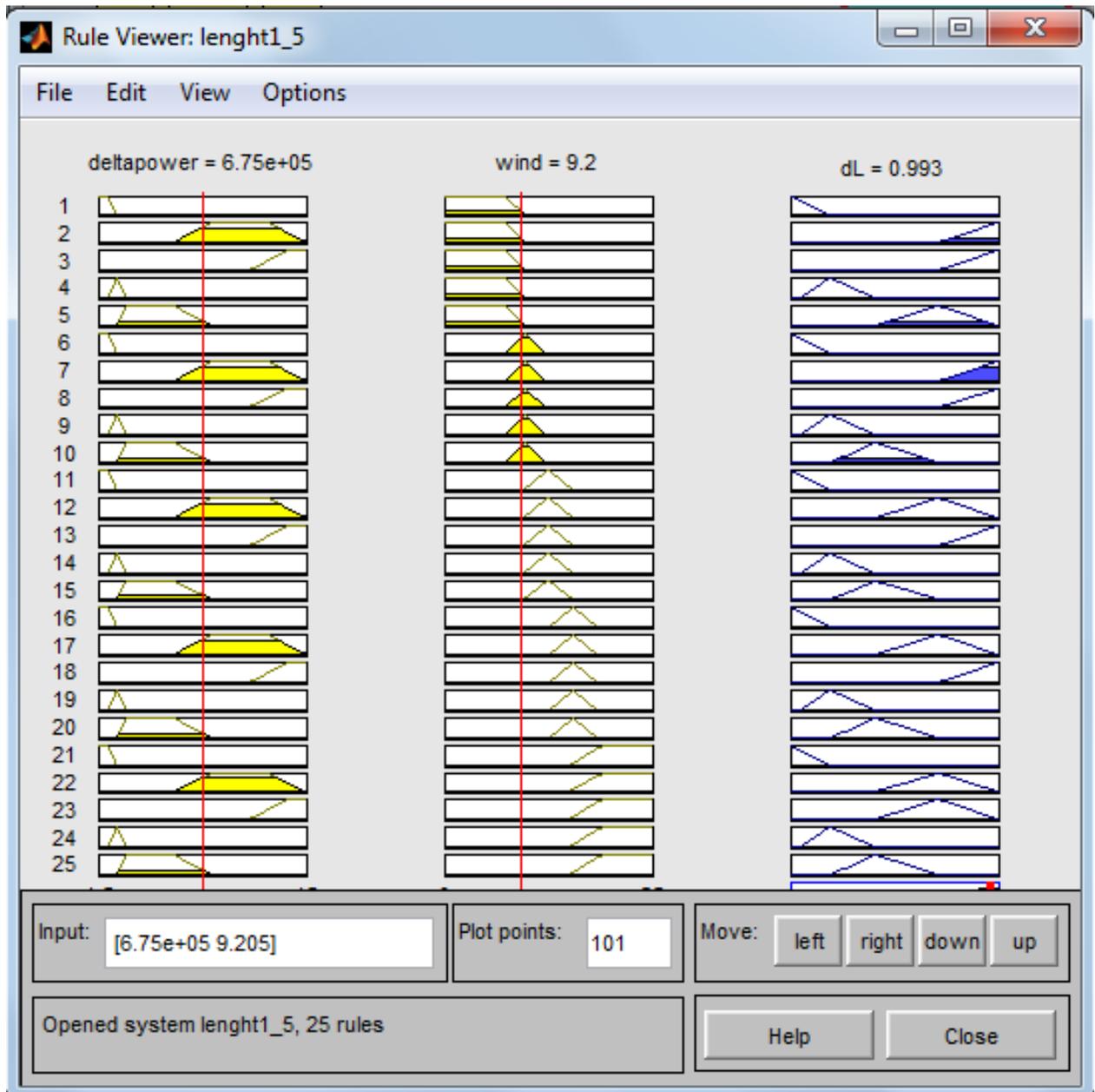


Рисунок 5 – Программа просмотра правил нечеткого вывода в Fuzzy Logic Toolbox/Simulink/ Matlab

В третьем разделе дается общее представление об идее переменной длины лопастей и технике, которая потенциально может быть использована для целей

управления ветровыми турбинами. Методы и принципы, описываемые в указанном разделе диссертации, часто называют интеллектуальными структурами или интеллектуальным управлением ротором. Эта область быстро развивается, некоторые концепции уже ориентированы на индустрию ветроэнергетики, а другие предназначены для использования в других областях, но имеют возможность применения к ветровым турбинам.

Принцип действия лопастей переменной длины заключается в том, что при снижении скорости ветра меньше номинального значения происходит выдвижение дополнительных ступеней с целью увеличения площади, ометаемой ветроколесом. При возрастании скорости ветра - происходит их возвращение в исходное состояние (рисунок 6). Расчеты показали, что применение таких лопастей дает прирост вырабатываемой электроэнергии до 30% (рисунок 7). Эти результаты совпали с натурными испытаниями, произведенными разработчиками данных лопастей.

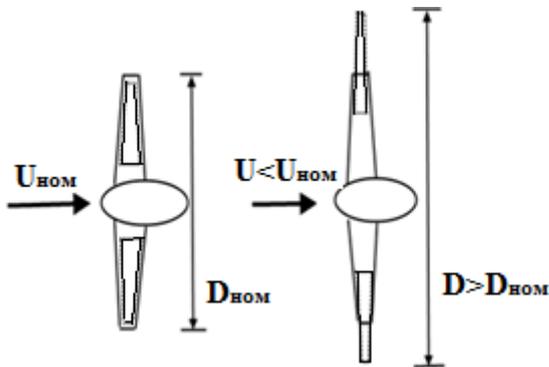


Рисунок 6 – Принцип действия лопастей переменной длины

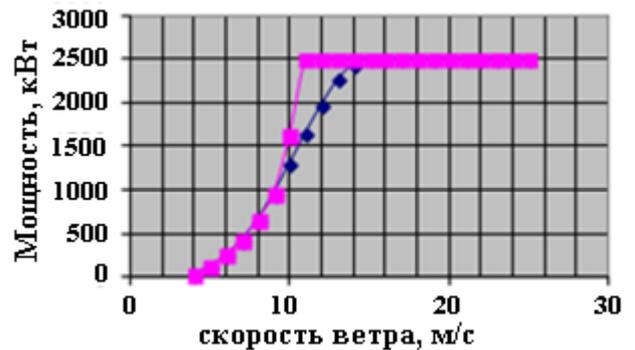


Рисунок 7 – Энергетическая характеристика ВЭУ с лопастями фиксированной длины и с изменяемой геометрией лопастей

В главе также проведен анализ микроустройств, позволяющих активно управлять потоком, обтекающим лопасти. Такие устройства позволяют в течение короткого промежутка времени производить набор мощности в пределах 5-8% за счет изменения подъемной силы ветроколеса. Для наиболее перспективных устройств - микроклапанов (рисунок 8) - приведены результаты моделирования в программных пакетах ElCut и Comsol.

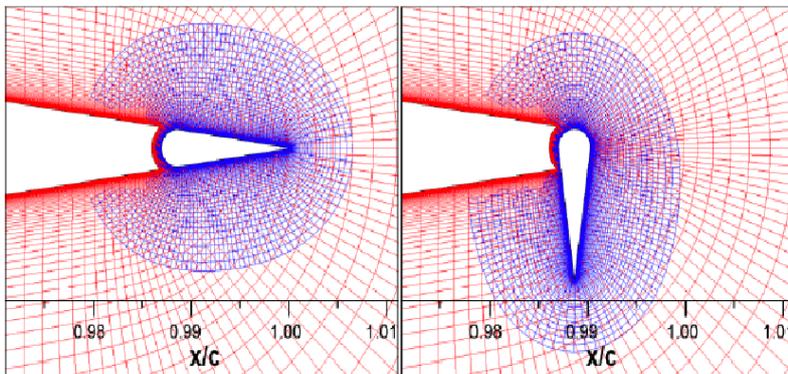


Рисунок 8 – Модель микроклапана в двух положениях

Микроклапан представляет собой поворотное устройство, по длине составляющее 2-3% длины хорды, которое может менять положение на $\pm 90^\circ$ относительно нее. В результате моделирования были получены характеристики распределения давления воздушного потока, действующего на лопасть, распределение поля скоростей ветрового потока в пограничном слое воздуха, окружающего

лопасть и, в качестве конечного результата, была получена зависимость изменения подъемной силы от угла наклона микроклапана к поверхности лопасти (рисунок 9). По полученным результатам видно, что при изменении геометрии лопасти посредством технологии микроклапана достигается 5-10% диапазон регулирования, это дает в период набора мощности достигнуть более быстрого выхода ветроэнергетической установки на номинальную мощность, а в режиме ограничения мощности обеспечивается запас регулирования по углу атаки лопасти.

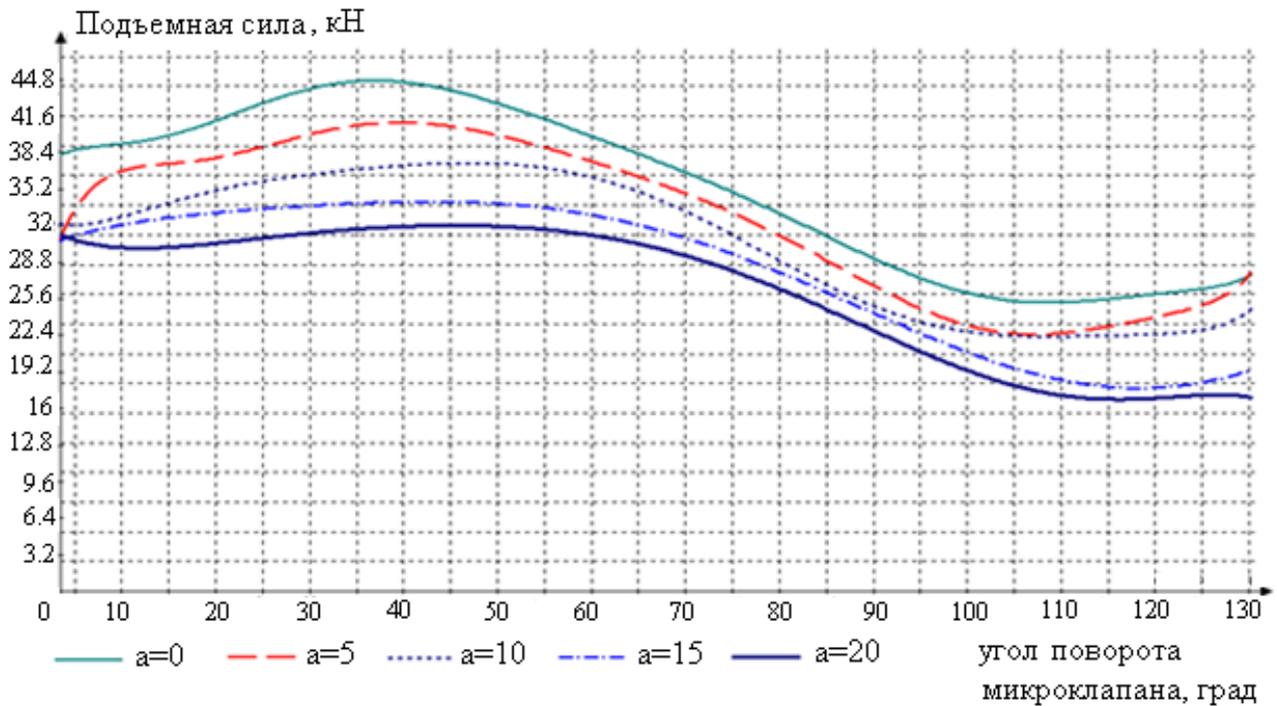


Рисунок 9 – Зависимость подъемной силы от угла поворота микроклапана

Предложена идея совместить два способа изменения геометрии лопастей для реализации повышения эффективности работы ВЭУ и оценки преимущества лопасти с изменяемой геометрией в комплексе. Моделирование также было произведено с помощью программы ElCut. Длина лопасти изменяется от 8 до 12 метров, скорость ветра от 5 до 14 м/с (зона 2 работы ВЭУ), угол поворота микроклапанов ± 40 градусов. Результаты моделирования представлены на рисунке 10.

Из полученных результатов видно, что теоретические предположения подтверждаются – при повороте клапанов в отрицательном направлении происходит увеличение подъемной силы и наоборот.

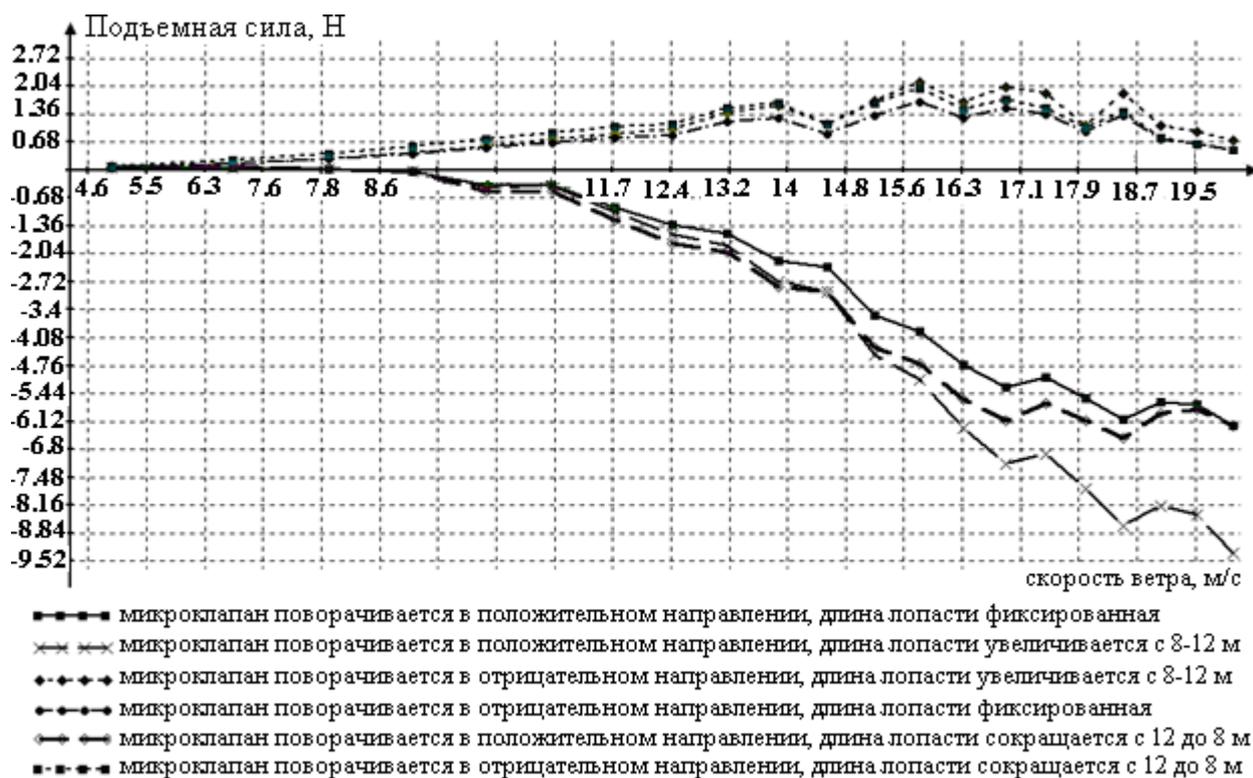


Рисунок 10 – График изменения подъемной силы лопасти при изменении скорости ветрового потока, длины лопасти и угла поворота микроклапана

В четвертом разделе предложена идея применения метода иерархий для создания системы повышения энергоэффективности ВЭУ при различных условиях ее работы. Для определения приоритетности действия управляющих контуров предложен метод парных сравнений с использованием шкалы сравнений Саати, которая соотносится с нечетким восприятием информации и позволяет легко оперировать лингвистическими переменными.

Предлагаемый метод можно описать следующим образом. Допустим, заданы элементы одного уровня иерархии и один элемент следующего более высокого уровня. Нужно сравнить элементы известного уровня *попарно* по силе их влияния на элемент следующего уровня, поместить числа, отражающие достигнутое при сравнении согласие во мнениях, в матрицу и найти собственный вектор с наибольшим собственным значением. Собственный вектор обеспечивает упорядочение приоритетов, а собственное значение является мерой согласованности суждений.

При определенном сочетании условий работы ВЭУ были сформированы матрицы парных сравнений на основе экспертных оценок, в которых представлены степени предпочтения одних контуров управления над другими и проведен их анализ. Для нахождения λ_{\max} - главного собственного значения, используем матрицу, где K_{ij} – степени парных сравнений соответствующих предпосылок А, В, С и D по фундаментальной шкале Саати:

	A	B	C	D
A	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}
B	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
C	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{34}
D	K_{41}	K_{42}	K_{43}	K_{44}

Способы управления работой ВЭУ в зоне 2 для составления матриц парных сравнений представлены следующими переменными: А – изменение скорости вращения ротора; В – изменение длины лопастей; С – поворот гондолы на ветер; D – активация УАУП. В зоне 3 работы ВЭУ исключается переменная А и вводится переменная Е– изменение угла заклинения лопасти.

Фундаментальная шкала Саати, состоящая из девяти степеней предпочтения может быть представлена как: 1 степень – равная предпочтительность; 2 степень – слабая степень предпочтения; 3 степень – средняя степень предпочтения; 4 степень – предпочтение выше среднего; 5 степень – умеренно сильное предпочтение; 6 степень – сильное предпочтение; 7 степень – очень сильное (очевидное) предпочтение; 8 степень – очень, очень сильное предпочтение; 9 степень – абсолютное предпочтение.

Далее вычисляется собственный главный вектор матричных сравнений:

$$\vec{\lambda}(G_1) = \begin{bmatrix} \sqrt[4]{K_{11} * K_{12} * K_{13} * K_{14}} \\ \sqrt[4]{K_{21} * K_{22} * K_{23} * K_{24}} \\ \sqrt[4]{K_{31} * K_{32} * K_{33} * K_{34}} \\ \sqrt[4]{K_{41} * K_{42} * K_{43} * K_{44}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{21} \\ E_{31} \\ E_{41} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Нормализуется:

$$\sum = E_{11} + E_{21} + E_{31} + E_{41} = Q; \quad \vec{\lambda}_H(G_1) = \begin{bmatrix} E_{11}/Q \\ E_{21}/Q \\ E_{31}/Q \\ E_{41}/Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{21} \\ L_{31} \\ L_{41} \end{bmatrix}.$$

И определяется максимальное собственное значение:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{21} \\ L_{31} \\ L_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{21} \\ M_{31} \\ M_{41} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Значения коэффициентов M_{11-41} определяют приоритетность действия контуров управления – чем больше значение, тем предпочтительнее действие указанной системы управления. Разделим элементы полученного вектор-столбца на соответствующие элементы нормализованного вектора приоритетов и усредним их, это и будет максимальное собственное значение матрицы:

$$\lambda_{maxG1} = \frac{M_{11}/L_{11} + M_{21}/L_{21} + M_{31}/L_{31} + M_{41}/L_{41}}{4}. \quad (7)$$

Условия, по которым сравниваются способы управления, могут иметь зависимость как от скорости ветра, так и от вырабатываемой мощности. Принято, что на предпочтение того или иного способа управления будет оказывать влияние мощность, так как именно эта величина имеет первоначальное значение в рамках данного исследования. Для зон 2 и 3 работы ВЭУ заданы входные параметры парных сравнений $G_1 - G_{12}$, определяющие режим и условия работы ВЭУ и вычислены, соответственно, собственные вектора, которые позволяют определить последовательность действия алгоритмов по регулированию работы ВЭУ для получения максимальной выработки или для ограничения мощности. Входными параметрами для ВЭУ при работе в зоне 2 являются:

G_1 – большое отклонение мощности от ее номинального значения при отсутствии отклонения направления ветра; G_2 – среднее отклонение мощности от ее номинального значения при отсутствии отклонения направления ветра; G_3 – малое отклонение мощности от ее номинального значения при отсутствии отклонения направления ветра; G_4 – большое отклонение мощности от ее номинального значения при наличии отклонения направления ветра; G_5 – среднее отклонение мощности от ее номинального значения при наличии отклонения направления ветра; G_6 – малое отклонение мощности от ее номинального значения при наличии отклонения направления ветра.

Соответствующие собственные векторы, говорящие о приоритетности действия управляющих воздействий приведены ниже:

$$\vec{\lambda}_H(G_1) = \begin{bmatrix} 0,148 \\ 0,436 \\ 0,032 \\ 0,384 \end{bmatrix}; \quad \vec{\lambda}_H(G_2) = \begin{bmatrix} 0,148 \\ 0,436 \\ 0,032 \\ 0,384 \end{bmatrix}; \quad \vec{\lambda}_H(G_3) = \begin{bmatrix} 0,436 \\ 0,148 \\ 0,032 \\ 0,384 \end{bmatrix};$$

$$\vec{\lambda}_H(G_4) = \begin{bmatrix} 0,148 \\ 0,384 \\ 0,436 \\ 0,032 \end{bmatrix}; \quad \vec{\lambda}_H(G_5) = \begin{bmatrix} 0,148 \\ 0,384 \\ 0,436 \\ 0,032 \end{bmatrix}; \quad \vec{\lambda}_H(G_6) = \begin{bmatrix} 0,279 \\ 0,142 \\ 0,549 \\ 0,031 \end{bmatrix}.$$

Входными параметрами для ВЭУ при работе в зоне 3 являются: G_7 – небольшое отклонение мощности от ее номинального значения при отсутствии отклонения направления ветра; G_8 – среднее отклонение мощности от ее номинального значения при отсутствии отклонения направления ветра; G_9 – сильное отклонение мощности от ее номинального значения при отсутствии отклонения направления ветра; G_{10} – небольшое отклонение мощности от ее номинального значения при наличии отклонения направления ветра; G_{11} – среднее отклонение мощности от ее номинального значения при наличии отклонения направления ветра; G_{12} – большое отклонение мощности от ее номинального значения при наличии отклонения направления ветра.

$$\vec{\lambda}_H(G_7) = \begin{bmatrix} 0,272 \\ 0,054 \\ 0,535 \\ 0,138 \end{bmatrix}; \vec{\lambda}_H(G_8) = \begin{bmatrix} 0,374 \\ 0,057 \\ 0,425 \\ 0,144 \end{bmatrix}; \vec{\lambda}_H(G_9) = \begin{bmatrix} 0,437 \\ 0,043 \\ 0,37 \\ 0,149 \end{bmatrix};$$

$$\vec{\lambda}_H(G_{10}) = \begin{bmatrix} 0,537 \\ 0,122 \\ 0,03 \\ 0,31 \end{bmatrix}; \vec{\lambda}_H(G_{11}) = \begin{bmatrix} 0,446 \\ 0,113 \\ 0,03 \\ 0,41 \end{bmatrix}; \vec{\lambda}_H(G_{12}) = \begin{bmatrix} 0,446 \\ 0,113 \\ 0,03 \\ 0,41 \end{bmatrix}.$$

По приведенным векторам можно сделать соответствующие выводы, на которых и построена система управления ВЭУ, представленная ниже.

В пятом разделе подробно описана модель ветроэнергетической установки и системы управления режимами ее работы при различных условиях в Simulink/Matlab. Общая схема модели представлена на рисунке 11. Асинхронный генератор двойного питания принят для преобразования механической энергии в электрическую, поскольку он не требует дополнительных преобразователей и обеспечивает постоянную частоту на входе в электроэнергетическую систему.

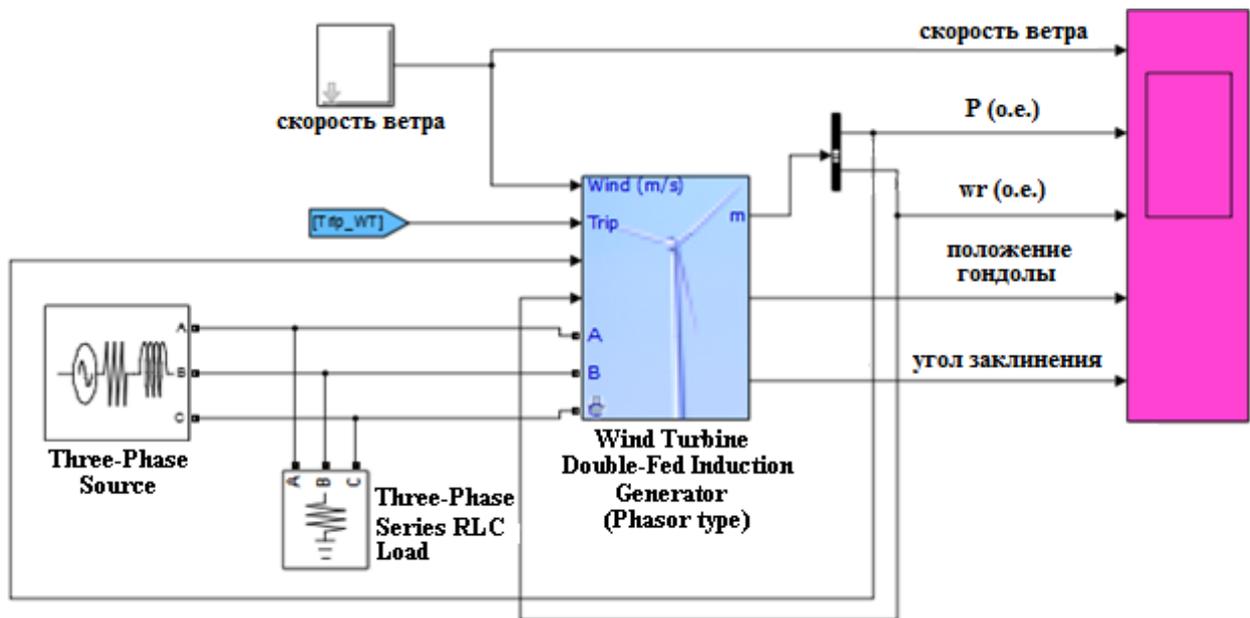


Рисунок 11 – Общий вид модели ВЭУ в Simulink/Matlab

Управление выработкой ВЭУ реализовано по логической схеме, основанной на результатах, полученных по методу парных сравнений. В контуре управления присутствуют контроллеры, с заложенными в них алгоритмами на основе нечеткой логики. Начало работы программы задается активацией блока скорости ветра. В зависимости от того, какая скорость ветра, система управления подает сигнал на активацию первого, второго или третьего порта, соответствующих первой, второй и третьей зоне работы ВЭУ. Определение зоны работы происходит по принципу простого сравнения со скоростями ветра, регламентированными для конкретной ВЭУ – скорость включения, номинальная скорость и предельно допустимая скорость. Результаты сравнения текущей скорости ветра с границами

рабочих диапазонов подаются на логический блок, где с помощью оператора AND – логическое умножение, делается вывод об активации того или иного порта.

На рисунке 12 приведен блок изменения длины лопастей с применением контроллера, в память которого записан fis-файл, содержащий алгоритм нечеткого вывода соответствующего контура управления.

Результаты моделирования алгоритма на основе нечеткой логики для изменения длины лопастей ветроколеса, в сравнении с результатами работы ВЭУ без него, приведены на рисунках 13, 14.

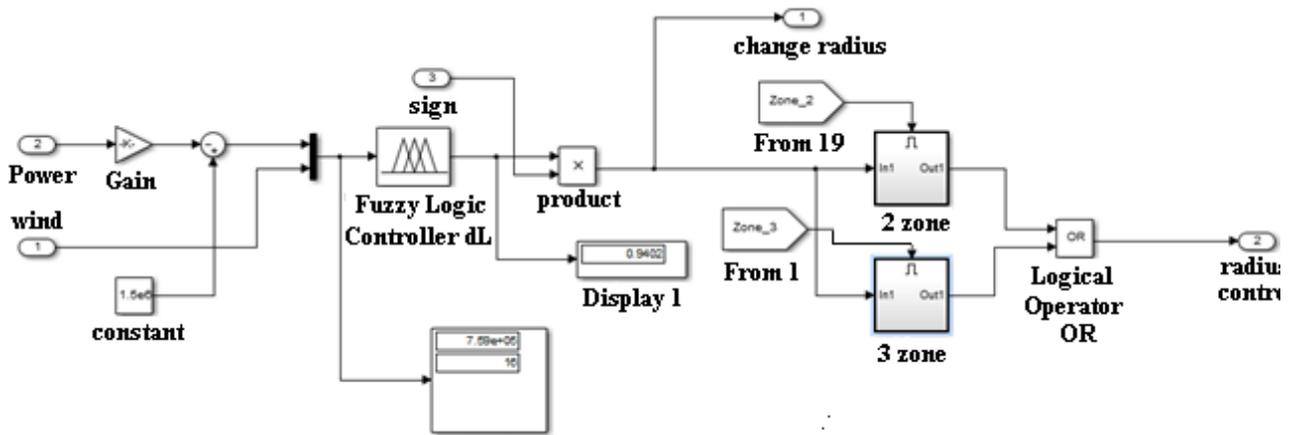


Рисунок 12 – Блок изменения длины лопасти с применением контроллера с реализованным алгоритмом нечеткого управления

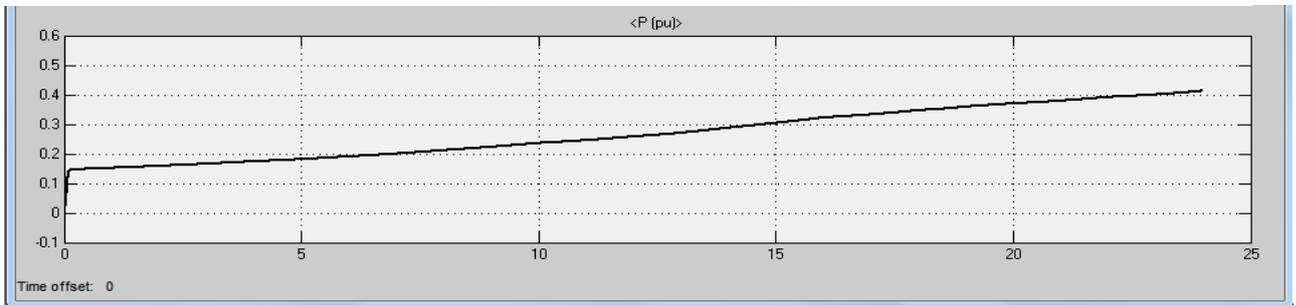


Рисунок 13 – Выработка энергии ВЭУ со стандартной длиной лопасти

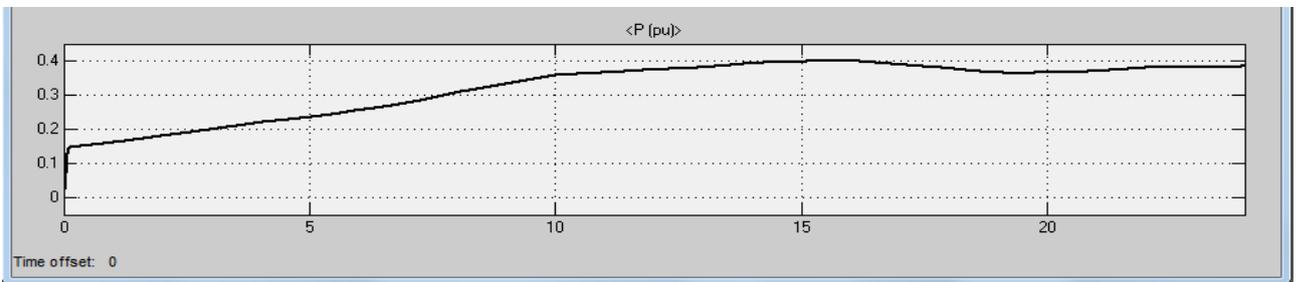


Рисунок 14 – Выработка энергии ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей и управлением ими на основе алгоритмов нечеткой логики

На рисунках 15,16 представлены результаты моделирования работы системы повышения энергоэффективности ветроэнергетической установкой на базе

контроллеров, в контур действия которых заложены алгоритмы нечеткого логического вывода, в сравнении с традиционной системой управления ВЭУ.

В предложенной модели системы управления режимами ВЭУ согласована работа четырех контроллеров с заложенными алгоритмами на основе нечеткого логического вывода – изменения угла заклинения, изменение скорости вращения ротора, ориентация гондолы на ветер, изменение длины лопастей ветроколеса, а также учтено влияние микроустройств на повышение подъемной силы. Для реализации алгоритмов нечеткого вывода таких контроллеров, как изменение длины лопасти, изменение скорости вращения ротора и изменение угла заклинения при-

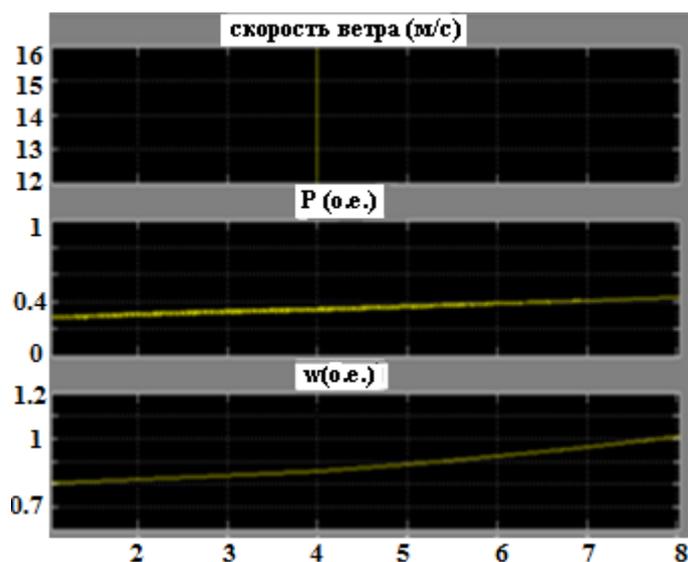


Рисунок 15 – Результаты моделирования работы ВЭУ при стандартной системе управления на базе PI- и PID- контроллеров

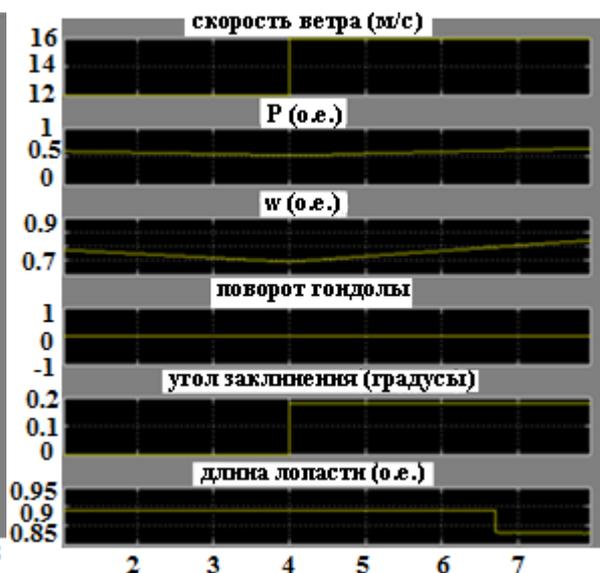


Рисунок 16 – Результаты моделирования работы ВЭУ при системе управления на основе нечеткого логического вывода

нят алгоритм Ларсена, для более инерционного контура – ориентация гондолы на ветер – используется алгоритм Мамдани, согласно результатам, полученным в более ранних работах. Процесс дефаззификации для алгоритмов осуществляется методом среднего максимума, который определяется как среднее арифметическое левого и правого модальных значений. Графики, полученные при прочих равных условиях, подтверждают теоретические предположения об эффективности действия системы на основе нечеткой логики.

Также в данном разделе проведен расчет увеличения выработки электроэнергии ВЭУ с изменяющейся длиной лопастей и нечетким регулированием режимов ее работы по сравнению с ВЭУ с фиксированной длиной лопастей для ВЭУ разной мощности (120 кВт и 2,5 МВт):

$$dW_{120} = W_{ВЭУ}^{ИЗМ} - W_{ВЭУ}^{СТАНД} = 760062 \text{ кВт}\cdot\text{ч} - 555205 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 205 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$$

$$dW_{2,5} = W_{ВЭУ}^{ИЗМ} - W_{ВЭУ}^{СТАНД} = 13491676 \text{ кВт}\cdot\text{ч} - 12166355 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1325 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$$

Прибыль от ВЭУ с изменяемой длиной лопасти и с учетом тарифа на электроэнергию равна:

$$d\Pi_{120} = dW_{120} \cdot T = 205 \text{ МВт}\cdot\text{ч} * 1,83 \text{ руб. / (кВт}\cdot\text{ч)} = 375,15 \text{ тыс. руб.}$$

$$d\Pi_{2,5} = dW_{2,5} \cdot T = 1325 \text{ МВт}\cdot\text{ч} * 1,83 \text{ руб. / (кВт}\cdot\text{ч)} = 2424,75 \text{ тыс. руб.}$$

При оценке рентабельности использования ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей и управлением на основе нечеткой логики были рассчитаны капиталовложения в установку ВЭУ с учетом только того оборудования, которое вносит отличие в стоимость комплекта ВЭУ. По полученным значениям можно сказать, что стоимость комплектации увеличивается в 1,5 – 2 раза. Но, сравнивая прибыль, полученную от разных ВЭУ в год и соотнося с затратами на их сооружение, можно сделать вывод о том, что ВЭУ с изменяемой длиной лопастей и управлением на основе нечеткой логики окупятся на год-два позже, но затем будут приносить существенную прибыль.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ существующих систем и контуров управления ветроэнергетическими установками. На основании этого выбраны алгоритмы нечеткого логического вывода, которые включены в регуляторы для реализации системы управления ВЭУ;

2. Разработан алгоритм на основе нечеткого логического вывода, позволяющий эффективно управлять изменением длины лопастей и вырабатывать до 30% больше электроэнергии при работе ВЭУ в диапазоне ветров от слабого до сильного, и обеспечивающий защиту генератора от перегрузки при скоростях ветра выше номинальной;

3. Получены результаты по изменению подъемной силы при активации микроустройств и изменении длины лопастей, показывающие целесообразность изменения геометрии аэродинамического профиля для цели повышения режимной управляемости ВЭУ;

4. Разработана модель системы управления ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей при применении регуляторов на основе нечеткой логики, позволяющая повысить выработку электроэнергии в зоне рабочих ветров и снизить колебания мощности в режиме ограничения при работе ВЭУ в составе электрической сети. В модели используется приоритетность контуров управления, предварительно оцененная по методу парных сравнений для разных условий эксплуатации ВЭУ. Данная модель позволяет экспериментально проверить правильность теоретических положений по повышению энергетической эффективности ветроэлектрических станций.

5. Дана предварительная экономическая оценка целесообразности использования ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей и системой управления на основе нечеткой логики в ветроэнергетических системах с учетом современных и прогнозируемых цен на электроэнергию и оборудование. Срок окупаемости ВЭУ с изменяемой геометрией лопастей увеличивается на 1-2 года в зависимости от их установленной мощности, но при этом дает значительный экономический эффект от их внедрения в электрические сети.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в лицензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Зубова, Н. В.** Основные принципы управления ветроэнергетической установкой / Н. В. Зубова, С. Н. Удалов // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, №3(48). – 2012. – с.153–161.
2. **Zubova, N.V.** Simulation of wind speed in the problems of wind power/ S.N. Udalov, N.V. Zubova// Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – № 2. – р. 150 –165.
3. **Зубова, Н. В.** Управление ветроэнергетической установкой с изменяемой геометрией лопасти на основе нечеткого контроллера / В. З. Манусов, Н. В. Зубова, С. Н. Удалов // Научный вестник НГТУ, Новосибирск, Издательство НГТУ, №1(38). – 2010. – с. 159 – 163.
4. **Зубова, Н. В.** Устройства быстрого регулирования подъемной силы ветровой турбины / Н. В. Зубова, В. З. Манусов, С. Н. Удалов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, Новосибирск, Издательство ФГОУ ВПО "НГАВТ", №2. – 2010. – с.349 – 352.

Монография:

1. **Зубова, Н.В.** Нечеткое управление ветроэнергетической установкой с изменяемой геометрией лопасти/ Н.В. Зубова, С.Н.Удалов, В.З. Манусов// LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany. – 2012. – 86 с., илл..

Научные публикации в других изданиях:

1. **Зубова, Н. В.** Повышение коэффициента захвата мощности ветроэнергетической установки / В. З. Манусов, Н. В. Зубова, С. Н. Удалов // Международная научно-практическая конференция «Электроэнергетика в сельском хозяйстве», Респ. Алтай, Чемал. р-н, база НГТУ Эрлагол, ИИЦ ЦНСХБ СО Россельхозакадемии, 26 – 30 июня 2009 г. – с.238 – 243.
2. **Зубова, Н. В.** Optimization Of Energy Generation Of Wind Turbine In Region 2 Through Fuzzy Control / Н. В. Зубова, С. Н. Удалов, В. З. Манусов // INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGIES (IFOST 2009) October 21 – 23, HoChiMinh City, Vietnam, Session 4. – p.110–114.
3. **Зубова, Н. В.** Active Control Techniques for Wind Turbines / Н. В. Зубова, В. З. Манусов, С. Н. Удалов // Energy Industry development and ecology, Улан-Батор, Монголия, Монгольский университет науки и технологии, том 1, 25 мая 2010 г. – с.185–212.
4. **Зубова, Н. В.** Методы оптимального управления ветроэнергетической установкой по критерию энергетической эффективности / Н. В. Зубова, С. Н. Удалов, В. З. Манусов // Материалы 5 Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск: Изд-во ТПУ, 17–18 мая 2012 г. – с.16 –19.
5. **Зубова, Н. В.** Нечеткое управление ветротурбинами с изменяемой геометрией лопасти / С. Н. Удалов, В. З. Манусов, Н. В. Зубова, А. А. Ачитаев // Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эф-

фективности, (REENFOR-2013) : материалы 1 междунар. форума, Москва, 22–23 окт. 2013 г. – Москва: Рос. академия наук, 2013. – с.364–368.

6. **Зубова, Н. В.** Development and research of the control system for wind turbine with variable length blade / N. V. Zubova, S. N. Udalov , V. Z. Manusov, A. A. Achitaev // The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013) : proc., Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 2. – p. 600–604.

7. **Зубова, Н. В.** Методы управления выработкой мощности ВЭУ / Н. В. Зубова // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ// Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Часть 3 – с.161–163.

8. **Зубова, Н. В.** Повышение эффективности работы ветроэнергетической установки в зоне 2 / Н. В. Зубова, В. З. Манусов, С. Н. Удалов // XV Международная научно–практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современная техника и технологии", сборник трудов в 3–х томах. Т.1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – с.42 – 44.

9. **Зубова, Н. В.** Регулирование воздушного потока, окружающего лопасть ветроколеса, при изменении профиля лопасти / Н. В. Зубова, С. Н. Удалов, В. З. Манусов // Энергетика в глобальном мире: сборник тезисов докладов первого международного научно–технического конгресса. – Красноярск: ООО"Версо", 16–18 июня 2010 г. – с. 331 – 332.

10. **Зубова, Н. В.** Разработка и проверка адекватности нечеткого контроллера для ВЭУ с изменяемым радиусом ветроколеса / Н. В. Зубова // Наука. Технологии. Инновации.: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, 2–4 дек. 2011 г.: в 6 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – Ч. 2. – с. 204–206.

11. **Зубова, Н. В.** Нечеткое управление ветротурбинами с изменяемой геометрией лопасти [Электронный ресурс] / С. Н. Удалов, В. З. Манусов, Н. В. Зубова, А. А. Ачитаев // Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : тез. докл. Всерос. конф. молодых ученых, Новосибирск, 3 –4 окт. 2013 г. – Новосибирск : Ин-т теплофизики СО РАН, 2013.– с.49–50.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.
заказ №543 подписано в печать 16.04.2014 г.