

На правах рукописи



Ядагаев Эркемен Геннадьевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ
НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2013

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

Научный руководитель:

Манусов Вадим Зиновьевич

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Лукутин Борис Владимирович

доктор технических наук, профессор,

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий»

Симаков Геннадий Михайлович

доктор технических наук, профессор,

Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок

Ведущая организация:

ЗАО «ЗиО-КОТЭС», г. Новосибирск

Защита состоится «29» мая 2013 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «16» апреля 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.

Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наряду с несомненными достоинствами ветроэнергетики, такими как малое отрицательное воздействие работы ветроэнергетических установок (ВЭУ) на окружающую среду, отсутствие необходимости масштабных строителейств, зон отчуждений и т.д., необходимо учитывать недостатки – высокочастотное излучение и невозможность постоянной выработки требуемой мощности ВЭУ при изменении параметров ветра. Следует отметить, что при скорости ветра меньше номинального значения необходимо вырабатывать максимально возможную мощность и при скорости выше – номинальную. Данное обстоятельство является довольно важным аспектом, ведь располагаемый ресурс регулирования часто меньше изменения мощности.

В реальной модели непременно присутствует технологический разброс параметров, вызванный непостоянством характеристик механических элементов. Этот факт является причиной неточности регулирующих воздействий. Для решения данной проблемы необходимо использовать нечеткие понятия и знания, которые описывают процесс регулирования при помощи продукционных правил «если - то». К наиболее важным достоинствам данного метода регулирования относится возможность использования опыта эксперта без составления дифференциальных уравнений. Использование аппарата нечеткой логики для задач регулирования наиболее применимо для систем с плохо формализованными процессами.

Различные аспекты ветроэнергетики были изучены в работах таких ученых, как В.Н. Адрианов, П.П. Безруких, Ю.Г. Шакарян и других.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка эффективной системы регулирования мощности ВЭУ в условиях стохастического изменения параметров энергоносителя, выполненной на аппарате нечеткой логики и позволяющей вырабатывать максимально возможную мощность в режиме рабочих ветров и номинальную – в режиме ограничения. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть необходимые контуры регулирования мощности ВЭУ с учетом их ресурса регулирования;
2. Исследовать совместимость контуров регулирования и алгоритмов нечеткого вывода регуляторов по условию «плавного - жесткого» регулирования;
3. Разработать модели регуляторов с алгоритмами нечеткого вывода, соответствующих ресурсу контуров регулирования;
4. Разработать системную модель нечеткого регулирования мощности ВЭУ;
5. Провести сравнительный анализ функционирования ПИД и Fuzzy- регуляторов с разными алгоритмами нечеткого вывода.

Идеей данной работы является применение разных алгоритмов нечеткого вывода в контурах регулирования мощности ВЭУ.

Методы исследования. В диссертационной работе применялись методы преобразования входных данных с использованием аппарата нечеткой логики в продукционных правилах: фаззификация, агрегирование, композиция, импликация, дефаззификация; метод пропорционального интегрально-

дифференциального регулирования, методы решения дифференциальных уравнений.

Научная новизна. В данной работе получены новые результаты, обеспечивающие повышение эффективности выработки мощности ВЭУ при использовании аппарата нечеткой логики в системе регулирования. Научная новизна заключается в следующем:

- разработаны системы регулирования мощности ветроэнергетических установок на основе нечеткой логики, позволяющие повысить выработку мощности во второй зоне и снизить колебания мощности в третьей зоне за счет использования разных алгоритмов нечеткого вывода;
- разработаны регуляторы нечеткого типа, позволяющие реализовать использование алгоритмов Мамдани и Ларсена для формирования регулирующих воздействий отдельно в контурах поворота гондолы, изменения угла атаки и длины лопасти;
- проведено исследование алгоритмов нечеткого вывода по условию «плавности - жесткости» регулирующих воздействий, учитывающий ресурс контура регулирования;
- проведен анализ совместимости алгоритмов нечеткого вывода и контуров регулирования мощности, заключающийся в использовании алгоритма Мамдани для контура поворота гондолы с большим ресурсом регулирования и алгоритма Ларсена для контуров изменения угла атаки и длины лопасти с малым ресурсом регулирования.

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

- осуществлена программная реализация модели системы регулирования мощности, которая может быть использована в действующих ВЭУ для увеличения выработки мощности;
- установлена степень совместимости контуров регулирования и алгоритмов нечеткого вывода, методика которого может быть использована в других системах нечеткого регулирования в плохо формализованных процессах;
- показана эффективность нечеткого регулирования мощности ВЭУ, которая достигается использованием разных алгоритмов нечеткого вывода в контурах регулирования.

Достоверность результатов. Достоверность и обоснованность разработанных моделей и методов нечеткого регулирования мощности ВЭУ подтверждаются теоретическими обоснованиями и совпадением результатов анализа совместимости контуров регулирования с алгоритмами нечеткого вывода и экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту. По результатам выполненной диссертационной работы на защиту выносятся следующие положения:

- исследование алгоритмов нечеткого вывода по условию «плавности – жесткости» регулирования;
- метод эффективного соответствия алгоритмов нечеткого вывода и контуров регулирования мощности ВЭУ;
- метод регулирования мощности ВЭУ с учетом ресурса контуров;

- модель системы нечеткого регулирования мощности ВЭУ с разными алгоритмами нечеткого вывода.

Личный вклад. Автором предложен анализ алгоритмов нечеткого вывода с учетом ресурса контуров регулирования и разработана модель системы регулирования мощности ВЭУ с использованием алгоритма Мамдани для выдачи управляющих воздействий в контуре поворота гондолы и алгоритма Ларсена в контурах изменения угла атаки и длины лопасти.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах дней науки НГТУ с 2010 по 2012 гг., на Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», Томск, 2011 – 2012; Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», Томск, 2010, 2012; II Всероссийской научно-практической конференции «Научные и технические средства обеспечения энергосбережения и энергоэффективности в экономике РФ», Санкт – Петербург, 2012; II Международной научно-технической конференции «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов», Тольятти, 2012.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 статей, из них: 3 научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит 163 страницы основного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка библиографических ссылок из 117 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, поставлены цели и задачи, даны методы исследования, отражены научная новизна и практическая значимость, связанная с использованием разных алгоритмов нечеткого вывода для контуров регулирования мощности ВЭУ.

В первой главе проведен обзор методов регулирования мощности ВЭУ. Структурная схема регулирования мощности ВЭУ показана на рис. 1.

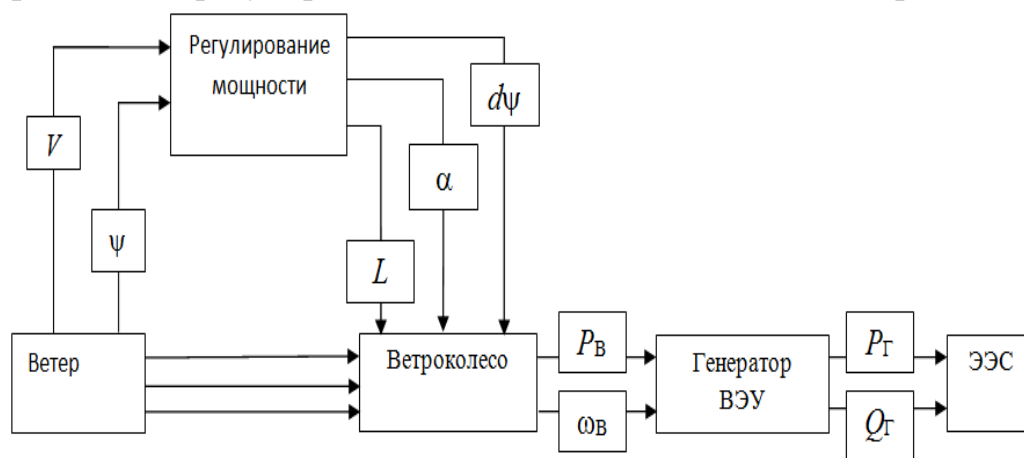


Рис. 1. Структурная схема регулирования мощности ВЭУ

Мощность ветроэнергетической установки зависит от параметров ветра (скорости и направления относительно положения гондолы) и параметров вет-

роколеса (угол атаки лопасти, площадь ометаемой поверхности ветроколеса, положения гондолы к набегающему потоку ветра).

В диссертационной работе рассматривается регулирование выходной мощности ВЭУ изменением угла атаки лопасти (α), поворотом гондолы ($d\psi$) и изменением длины лопасти (L). Используемый энергоресурс (ветер) характеризуется стохастическим изменением параметров: скорости – V и направления – ψ . Показано, что для каждого рабочего диапазона скорости ветра применяется своя целевая функция регулирования мощности ВЭУ. Целевыми функциями каждой зоны работы соответствуют определенные значения контуров регулирования мощности, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зоны работы ВЭУ		
Зона работы ВЭУ	Целевая функция регулирования	Значения контуров регулирования
I	$P_{\text{макс}}$	$\alpha=0; \psi<10^\circ; L_{\text{лоп}} = L_{\text{макс}}$
II	$P_{\text{макс}}$	$\alpha=0; \psi<10^\circ; L_{\text{лоп}} = L_{\text{макс}}$
III	$P_{\text{ном}}$	$\alpha>0; \psi>10^\circ; L_{\text{лоп}} < L_{\text{макс}}$
IV	0	$\alpha=45; \psi>60^\circ; L_{\text{лоп}} = L_{\text{мин}}$

Так, в рабочем диапазоне ветра (зона II) необходимо вырабатывать максимум возможной мощности, в режиме ограничения мощности (зона III) необходимо поддерживать номинальную мощность, в режиме отключения ВЭУ необходимо снижать мощность до нуля.

Мощность ВЭУ Vestas V-27, принятой в данной работе для исследования, показана на рис. 2 в трех зонах работы.

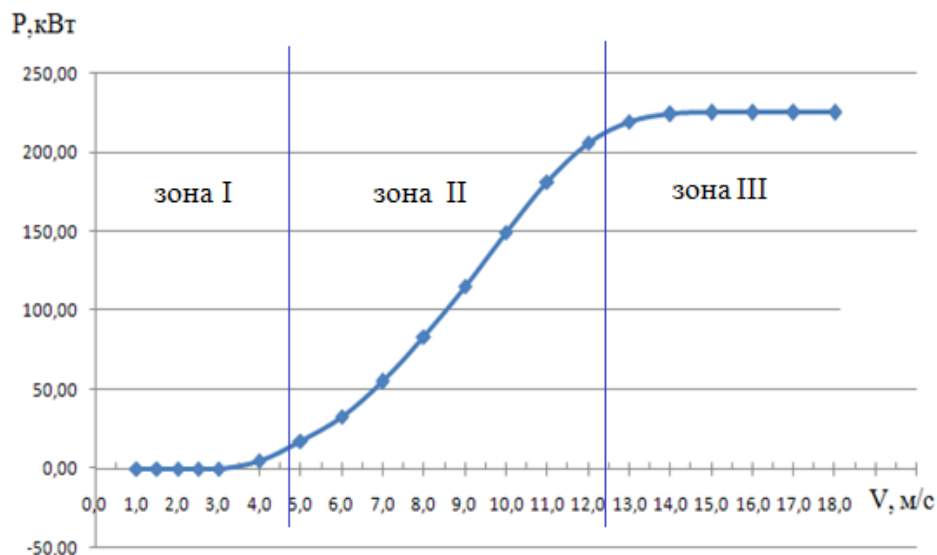


Рис. 2. Мощность ВЭУ

В работе показана необходимость применения систем нечеткого регулирования мощности вследствие изменения энергоресурса – ветра по величине и направлению по стохастическому закону, а также сложности учета изменения параметров элементов ВЭУ, что приводит к неадекватным регулирующим воздействиям при неточной настройке. Также приведены основные положения

теории нечетких множеств, включая операции, лингвистические аналогии, нечеткие модели и нечеткую логику.

Во второй главе даны основные технические данные ветроэнергетической установки, параметров ветра, разработана модель системы нечеткого регулирования мощности ВЭУ. Показано, что регулирование мощности ВЭУ заключается в выработке управляющих воздействий для изменения параметров ветроколеса при переменном значении ветра. Мощность ветроколеса ветроэнергетической установки рассчитывается согласно формуле:

$$P_{BK} = \frac{1}{2} \rho K_P \cdot v^3 \quad (1)$$

Получение и регулирование величин, входящих в уравнение (1) приведено ниже:

- плотность воздуха ρ . Принята неизменной $\rho = 1.009 \text{ кг/м}^3$.
- коэффициент использования энергии ветра C_p . Значение вычисляется согласно формуле:

$$C_p = 0,5(z - 0,022\alpha^2 - 5,6)e^{-0,17z},$$

- где α - угол атаки лопасти, который является выходным значением регулятора.
- ометаемая площадь ветроколеса. Вычисляется согласно формуле площади окружности с радиусом r :

$$A = \pi r^2,$$

где r - длина лопасти. Значение длины лопасти является вторым выходом модели регулятора, регулирующим ометаемую площадь ветроколеса.

- скорость ветра в кубе, перпендикулярная рабочей плоскости ветроколеса. Величина угла ветра, получаемая от динамической модели ветра, складывается с величиной угла поворота гондолы. От полученного угла рассогласования между положением гондолы и направлением ветра рассчитывается проекция, перпендикулярная плоскости ветроколеса.

Модель ВЭУ, созданная в программе Matlab Simulink, приведена на рис. 3.

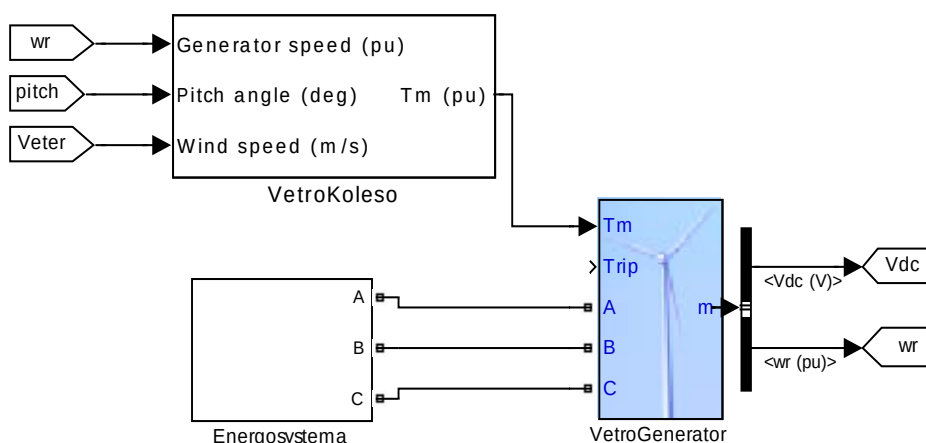


Рис. 3. Модель ВЭУ

Учитывая постоянные флуктуации скорости ветра, довольно трудно поддерживать постоянное значение быстроходности. Скорость вращения ротора равна:

$$\omega_p = \frac{z \cdot V}{r},$$

где r – длина лопасти ветроколеса, z – быстроходность.

Поэтому одной из задач является точное определение скорости вращения ротора и скорости ветра. Система классического регулирования мощности ВЭУ заключается в изменении скорости вращения ротора по кривой $ABCD$ на графике рис. 4.

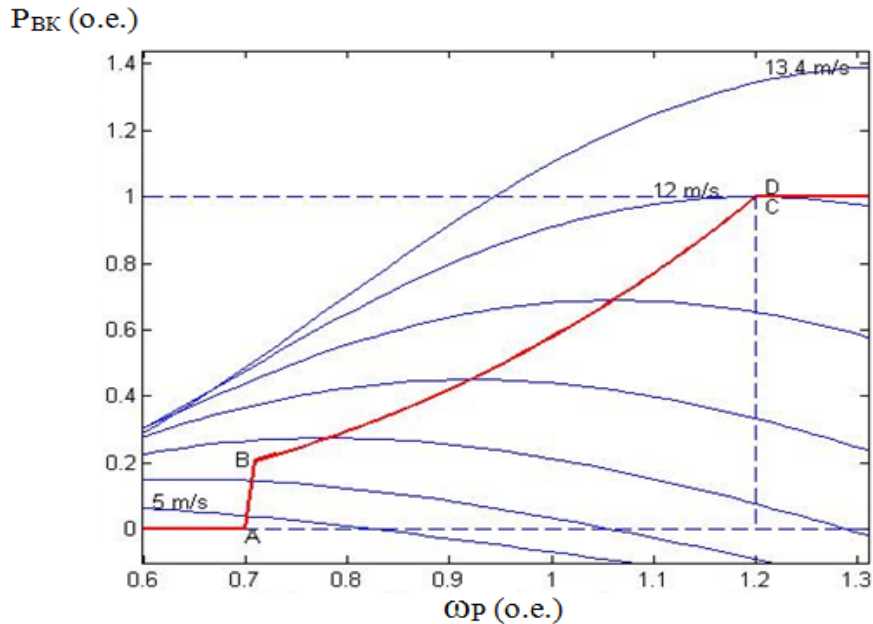


Рис. 4. Зависимость мощности ВЭУ от скорости вращения ротора

Угол атаки лопасти необходимо поддерживать на нулевом значении, пока не будет достигнута номинальная скорость вращения ротора. При номинальной скорости ротора угол атаки лопасти необходимо изменять так, чтобы коэффициент использования энергии ветра снижался.

На кривой зависимости мощности от ω_p выделяют 3 диапазона, в каждом из которых регулирующие воздействия выполняются по разным сценариям:

- диапазон скорости $[B; C]$. Пропорциональное увеличение скорости вращения ротора при изменении скорости ветра для работы в пиках мощности. Данное обстоятельство позволяет работать с максимальным коэффициентом использования энергии ветра и уменьшить механические перенапряжения элементов ВЭУ. При этом угол атаки лопасти равен нулю. Желаемая скорость (уставка) вращения ротора определяется так:

$$\omega_p = \frac{z_{ном} \cdot V}{R}.$$

Как было указано выше, для регулирования скорости вращения ротора необходимо скорость ветра оценивать с высокой точностью.

- диапазон скорости $[C; D]$. Режим ограничения скорости. При достижении номинальной скорости вращения ротора в точке «С» необходимо изменять угол атаки лопасти так, чтобы коэффициент использования энергии ветра снижался.

- диапазон скорости $\omega_p > D$. Режим ограничения мощности. Пропорциональное увеличение угла атаки лопасти для уменьшения вращающего момента ветроколеса, согласно графику. Необходимо точно измерять скорость вращения ротора.

Также во второй главе проведен анализ применимости алгоритмов нечеткого вывода и контуров с учетом ресурса регулирования по условию «плавности - жесткости» выдаваемых решений. Исследована возможность использования аппарата нечеткой логики для регулирования мощности ВЭУ. Так же проведен сравнительный анализ функционирования регуляторов с алгоритмами Мамдани, Ларсена, Сугэно и Цукамото.

В диссертационной работе указано, что известно более десяти разновидностей нечетких продукционных моделей на основе различных комбинаций компонентов. В настоящее время наибольшее распространение получили алгоритмы Мамдани, Ларсена, Цукамото, Такаги-Сугэно.

В данном случае выбор алгоритмов для нечеткого вывода каждой выходной переменной осуществляется исходя из условия «жесткого» и «плавного» регулирования.

Алгоритм Мамдани обладает большой робастностью, но создает нелинейную деформацию функции принадлежности предпосылки α -сечением вершины, обладает плавностью выходных значений.

Алгоритм Ларсена более применим для «жесткого» - быстрого регулирования по причине использования операции умножения в импликации. Поэтому функции принадлежности выводов сжимаются, основание не изменяется, что и характеризует возможность резкого перехода между управляющими сигналами.

Алгоритм Цукамото целесообразно применять в тех системах автоматического управления, где необходимо обеспечивать робастность при несогласованности базы правил и нет четких границ по времени.

Алгоритм Сугэно подходит для упрощения контроллеров, использующих дифференциальные уравнения высоких порядков.

Результаты анализа совместимости алгоритмов и контуров регулирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

Совместимость алгоритмов нечеткого вывода и контуров регулирования мощности

	Мамдани	Ларсен	Цукамото	Такаги-Сугэно
Изменение угла атаки лопасти	-	+	+	-
Изменение длины лопасти	-	+	+	-
Поворот гондолы	+	-	-	+

С учетом всех свойств алгоритмов для нечеткого вывода значения получены следующие выводы:

- для поворота гондолы применим алгоритм Мамдани;
- для изменения угла атаки и длины лопасти применим алгоритм Ларсена.

На рис. 5 представлена модель системы регулирования мощности ВЭУ при применении одного алгоритма нечеткого вывода. Как было указано ранее, это алгоритмы Мамдани, Ларсена, Цукамото, Сугэно. Создание регулятора нечеткого типа начинается с определения функций принадлежности терм мно-

жеств каждой входной и выходной величины. В данном регуляторе приняты треугольные и трапециевидальные функции принадлежности. Далее определена база правил, состоящая из продукционных правил вида «если - то».

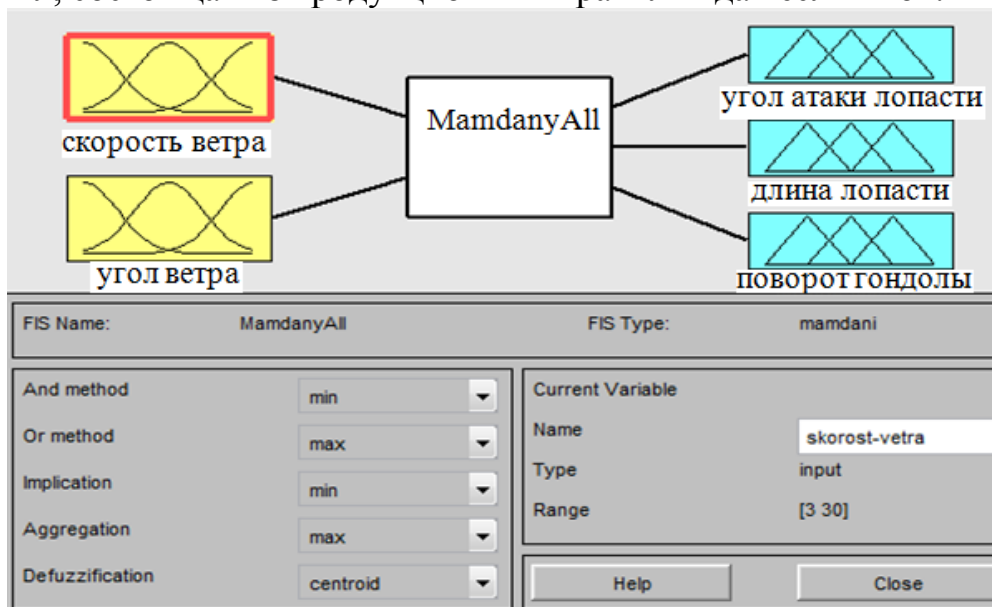


Рис. 5. Модель регулятора нечеткого типа в программе Fuzzy Logic

В крупных ВЭУ регулирование мощности происходит в основном за счет регулирования лопасти, что требует использования скоростных приводных механизмов и алгоритмов вывода, способных выдавать резкие переходы между управляющими сигналами.

База правил и принятые функции принадлежности терм-множеств даны в виде трехмерных графиков зависимости выходных величин от входных (рис. 6 - рис. 8).

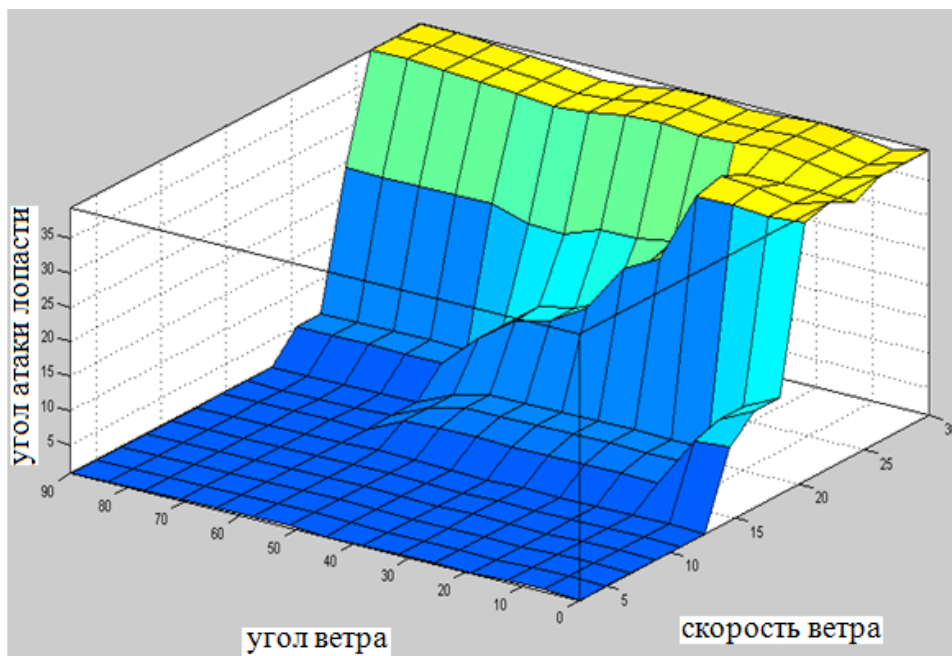


Рис. 6. Поверхность базы правил для изменения угла атаки лопасти

Контур регулирования поворота гондолы по причине высокого ресурса запускается при больших значениях угла между направлением ветра и положением гондолы или при необходимости регулирования мощности, когда рабочий ресурс регулирования угла атаки лопасти исчерпан. В режиме ограничения

мощности ВЭУ испытывает большие механические, гироскопические, гравитационные и аэродинамические перенапряжения, по причине которых необходимо уменьшать ометаемую площадь ветроколеса уменьшением длины лопасти. В результате анализа создан регулятор с разными алгоритмами нечеткого вывода для контуров.

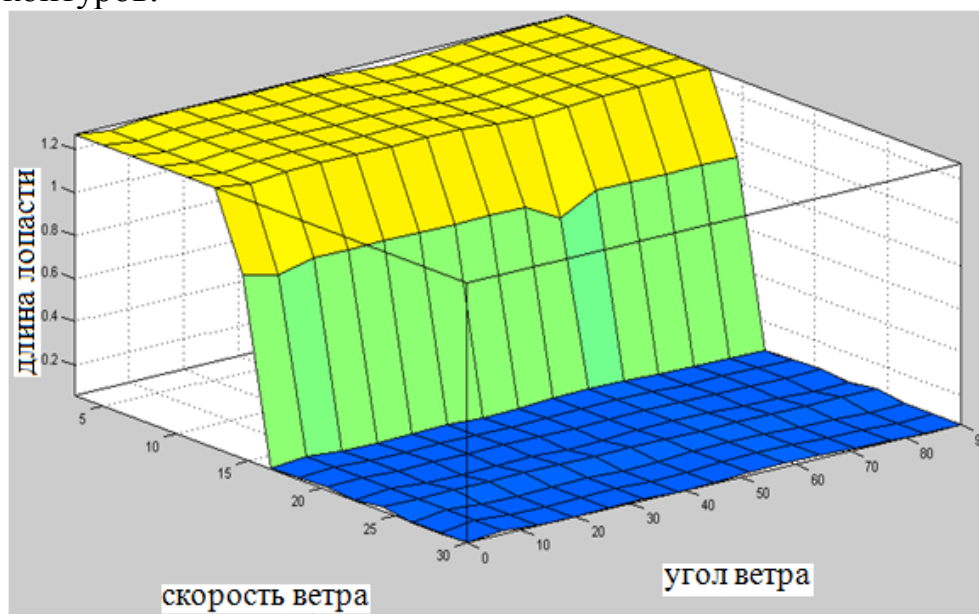


Рис. 7. Поверхность базы правил для изменения длины лопасти

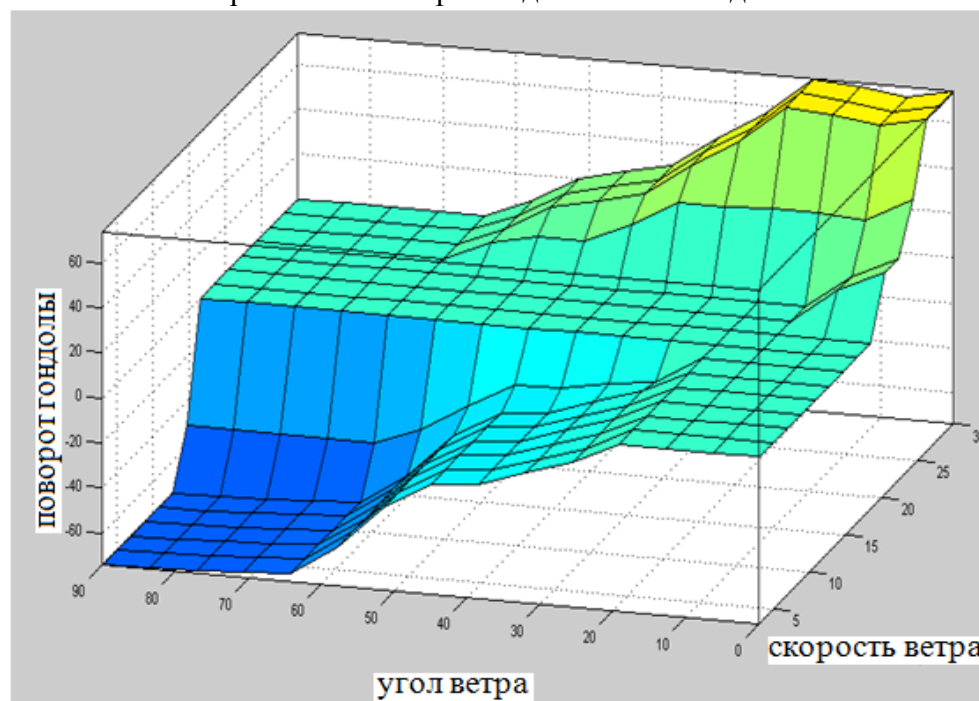


Рис. 8. Поверхность базы правил для поворота гондолы

На рис. 9 представлена структура модели регулирования мощности регуляторами с разными алгоритмами нечеткого вывода. Контур с малым ресурсом (изменение угла атаки и длины лопасти) регулируются одним регулятором, в котором может быть заложен любой алгоритм. Контур с большим запасом (поворот гондолы) регулируется другим регулятором.

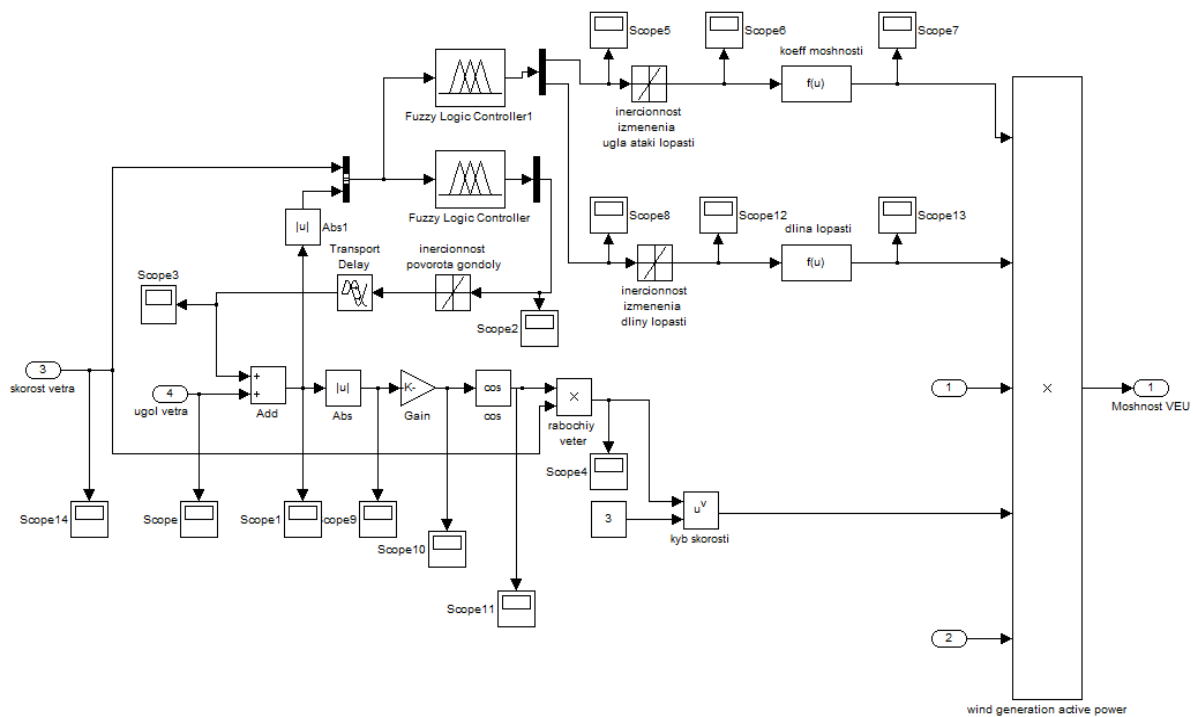


Рис. 9. Модель системы нечеткого регулирования мощности

Особенностью данной модели регулирования мощности является то, что в ней есть возможность проверить критерий применимости «плавного – жесткого» регулирования в зависимости от алгоритмов нечеткого вывода.

В третьей главе проведено сравнение функционирования регуляторов нечеткого типа в зависимости от используемых алгоритмов нечеткого вывода в четырех режимах работы: пуск (зона I), выработка максимально возможной мощности (зона II), ограничение мощности номинальным значением (зона III), отключение при ураганных скоростях ветра и переход между II и III зонами работы.

График изменения мощности для режима рабочих ветров показан на рис. 10.

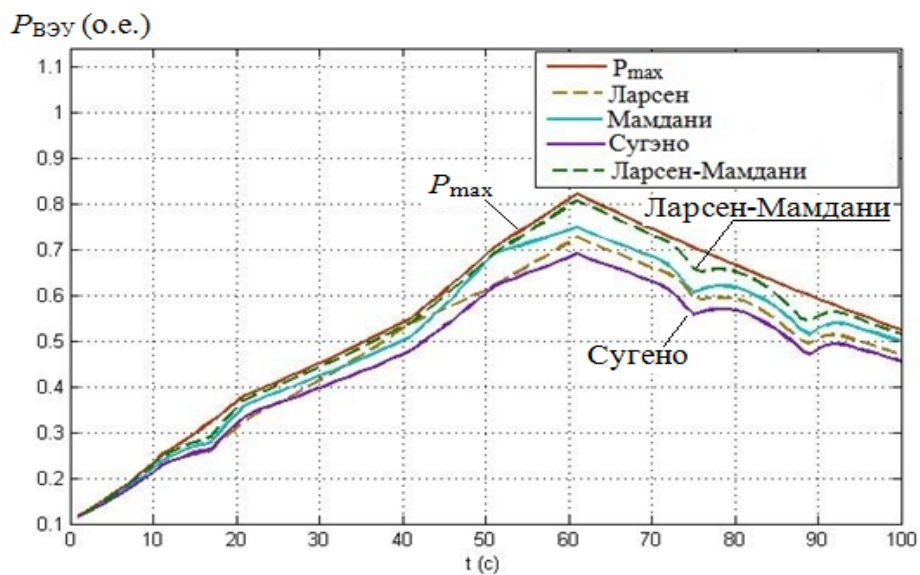


Рис. 10. Мощность ВЭУ при регулировании разными алгоритмами нечеткого вывода в режиме рабочих ветров

Изменение параметров ветра (скорость и направление) было задано так, что располагаемое время регулирования оказывалось больше и меньше постоянной изменения параметров. В качестве алгоритмов нечеткого вывода применены Мамдани, Ларсен, Сугэно, Цукamoto и комбинированный Ларсен – Мамдани. Целевой функцией регулирования мощности приняты условия выработки требуемой мощности в каждой зоне работы. В программе Matlab Simulink проведено сравнение результатов функционирования по каждому контуру регулирования и мощности.

На рис. 10 приведены графики изменения мощности ВЭУ, при этом максимальное приближение к максимальной мощности показывает регулятор с алгоритмом Ларсена для изменения угла атаки и длины лопасти и алгоритмом Мамдани для поворота гондолы. Как видно, неплохой результат регулирования мощности достигается при применении регулятора с алгоритмом Ларсена для всех контуров. Применение оставшихся двух регуляторов показывает наименее благоприятный результат, что объясняется плавным процессом вывода управляющих сигналов алгоритмом Мамдани, не обеспечивающего быстрое действие.

Графики мощности ВЭУ в режиме ограничения даны на рис. 11. Наибольшее значение мощности достигается при регуляторе с алгоритмом Ларсена для изменения угла атаки и длины лопасти и алгоритмом Мамдани для поворота гондолы. Наименьшее значение мощности характерно для функционирования регулятора с алгоритмом Мамдани для изменения угла атаки и длины лопасти и алгоритмом Ларсена для поворота гондолы. Необходимо сделать вывод о важности анализа совместимости контуров регулирования с учетом их ресурса и алгоритмов нечеткого вывода по условию «плавного – жесткого» регулирования.

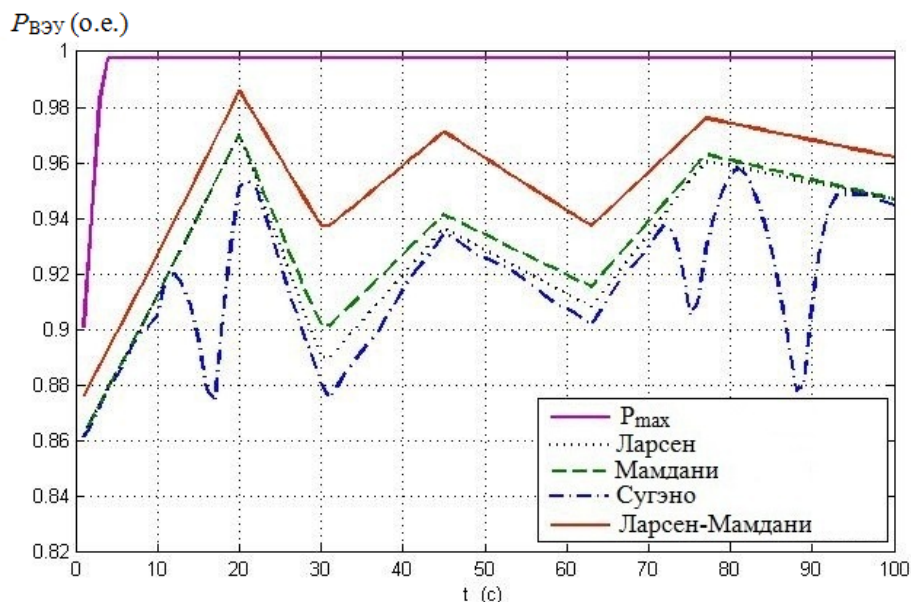


Рис. 11. Мощность ВЭУ при регулировании разными алгоритмами нечеткого вывода в режиме ограничения

В режиме отключения ВЭУ регуляторы показывают аналогичное функционирование (рис. 12), что обусловлено выдачей регуляторами крайних значений для контуров регулирования.

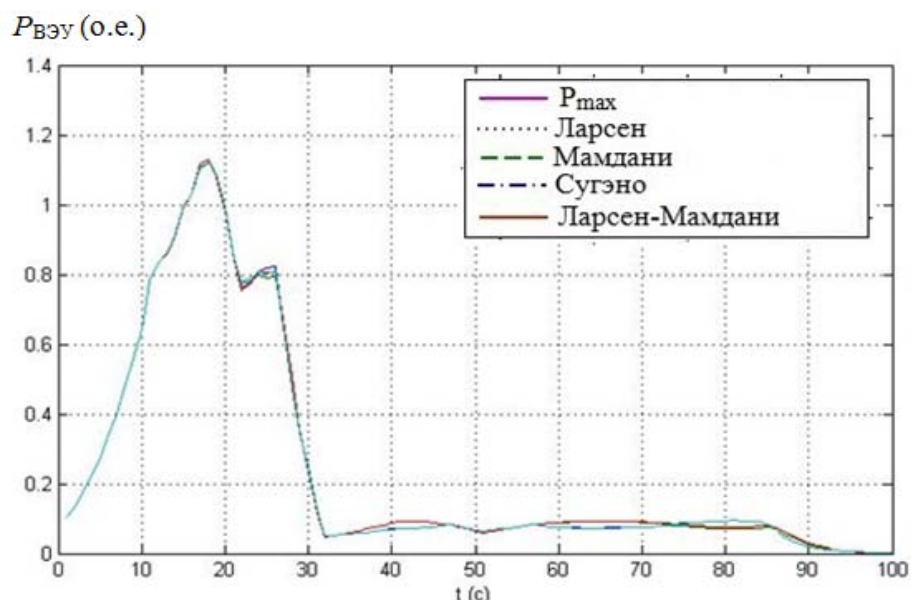


Рис. 12. Мощность ВЭУ при регулировании разными алгоритмами нечеткого вывода в режиме отключения

В четвертой главе получены результаты функционирования регулятора нечеткого типа с разными алгоритмами нечеткого вывода и ПИД – регулятора в трех зонах работы и на стыке зон II и III. Для оценки эффективности регулирования приведены графики мощности при безынерционном регулировании, что является теоретическим максимум в режиме рабочих ветров и номинальной мощностью в режиме ограничения.

На рис. 13 приведены графики изменения углов атаки лопасти для регулятора нечеткого типа и ПИД – регулятора в режиме рабочих ветров.

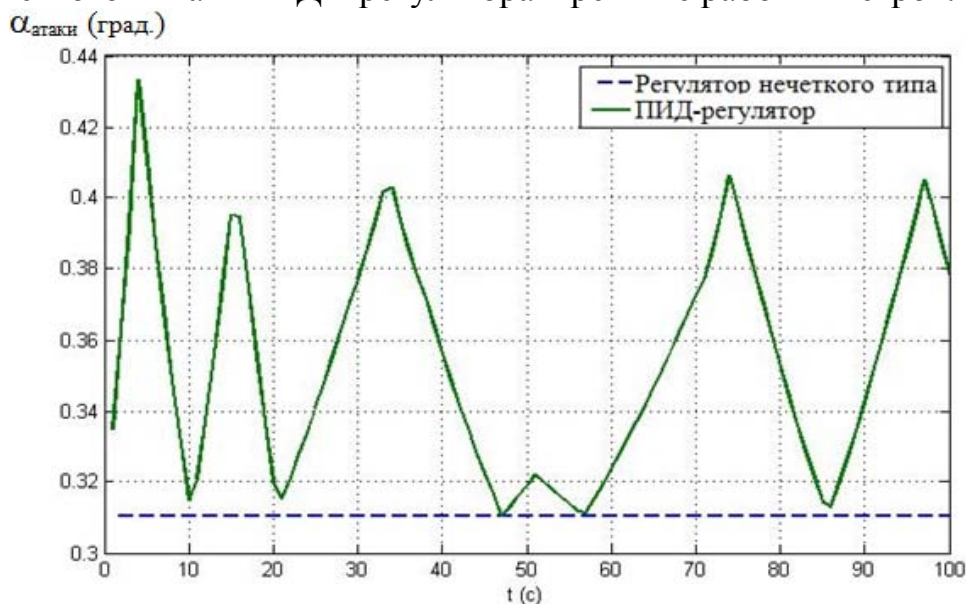


Рис. 13. Угол атаки лопасти

Скорость ветра изменяется внутри диапазона 5-12 м/с. При данных скоростях ветра осуществляется выработка большей части энергии ВЭУ, поэтому способам регулирования отводится значительная роль. ВЭУ работает с постоянной быстроходностью, соответствующей максимуму коэффициента мощности C_p , что означает вращение ветроколеса с переменной скоростью при изменении скорости ветра.

База правил регулятора нечеткого типа поддерживает $\alpha_{атаки} = 0,31^\circ$ выполнением команды «нулевое значение». Как видно из графика, поворот лопасти в необходимое положение производится без запаздывания, что объясняется правильной базой правил. При изменении направления ветра команда ПИД – регулятора на установку угла лопасти в положение, соответствующее нулевому углу атаки, выполняется с запаздыванием.

Целевая функция регулирования длины лопасти – максимальное значение для всех скоростей ветра в режиме выработки максимальной мощности. Длина лопасти максимальна для всех значений ветра (рис. 14).

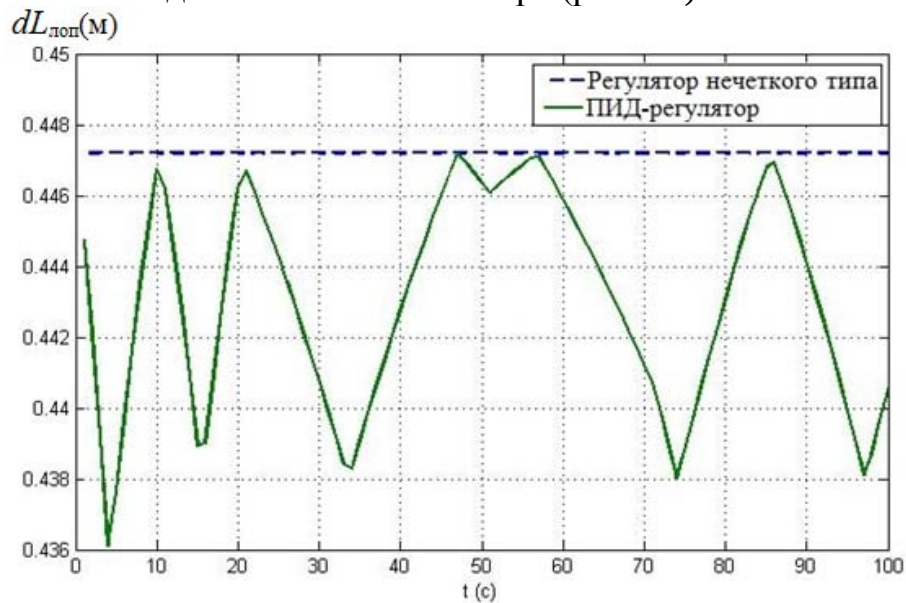


Рис. 14. Длина изменяемой части лопасти

Видно, что регулятор нечеткого типа функционирует без перерегулирования, что обусловлено правильно составленной базой правил.

В режиме рабочих ветров необходимо поддерживать угол рассогласования между положением гондолы и направлением ветра $\psi < 10^\circ$. На рис. 15 видно, что угол ψ на всем диапазоне регулирования поддерживается меньше 10° , что говорит о правильности составленной базы правил.

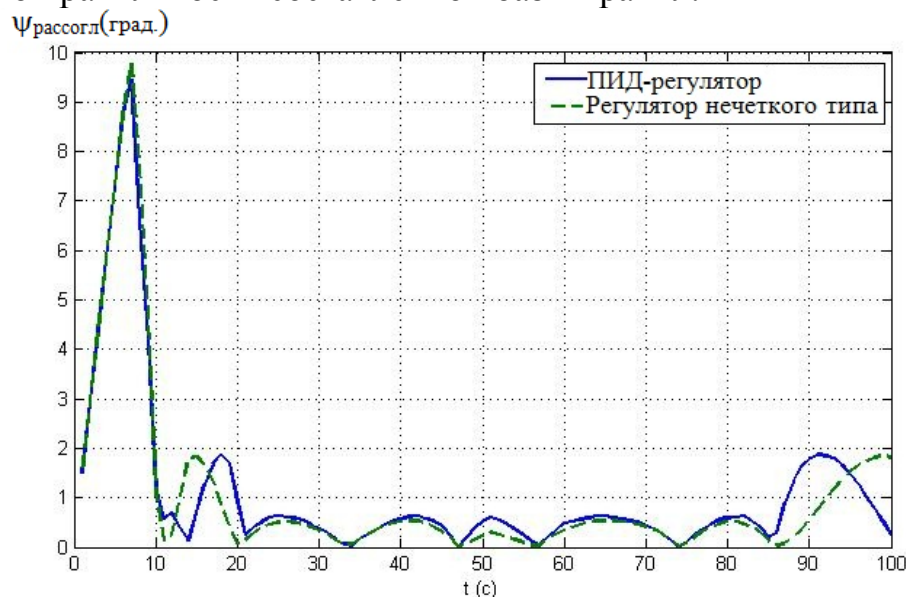


Рис. 15. Угол рассогласования

При изменении угла между направлением ветра и положением гондолы необходимо поворачивать гондолу с целью уменьшения этого угла. На рис. 16 видно, что угол поворота достигает -45° (знак минус означает поворот в сторону уменьшения ψ).

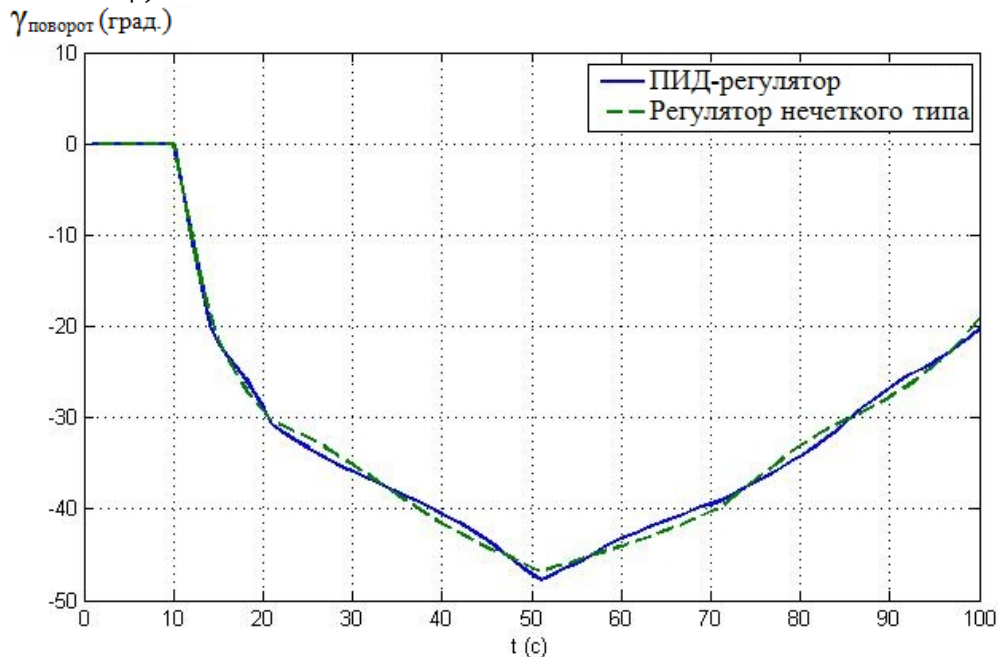


Рис. 16. Угол поворота

Поворот гондолы является контуром с самым большим ресурсом регулирования. Точность ориентации должна быть не менее 10° , так как при отклонении в 10° потеря мощности составляет 5 %. Максимальная скорость поворота должны быть рассчитана исходя из предельного гироскопического момента:

$$M_{гир} = J \cdot \Omega \cdot \omega,$$

где, J – момент инерции ротора, Ω и ω – угловые скорости вращения ветроколеса и поворота гондолы. Графики мощности даны на рис. 17.

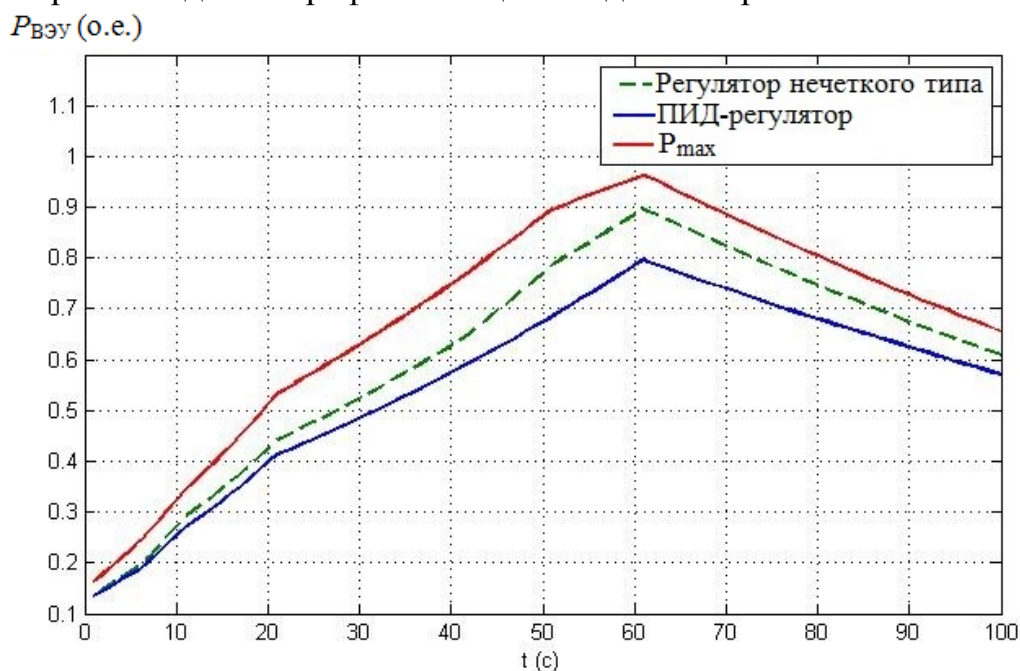


Рис. 17. Мощность ВЭУ

При всех режимах работы должны соблюдаться устойчивость положения гондолы в потоке, то есть ориентация должна выполняться только при существенном и относительном долговременном изменении направления ветра, а не при случайных его пульсациях. Максимально допустимая угловая скорость поворота гондолы больших ветроколес с диаметром более 20 м принимается $\Omega_{\text{макс}} \leq 0,1$ рад/с.

Видно, что регулятор нечеткого типа позволяет ВЭУ вырабатывать больше мощности. Максимум мощности составляет 0,97 о.е. В данном режиме ВЭУ работает с максимальным коэффициентом мощности C_p . Мощность колеблется из-за изменения скорости и направления ветра, соответственно изменяются угол атаки лопасти и угол ψ .

При рассогласовании угла между направлением ветра и положением гондолы более чем на 10° запускается контур регулирования поворота гондолы, стремящийся уменьшить данный угол.

Рассчитано увеличение выработки электроэнергии ВЭУ при нечетком регулировании для реальных данных повторяемости скорости ветра по градациям, представленных в таблице 3.

Таблица 3

Повторяемость скорости ветра по градациям

Диапазон скоростей ветра (м/с)	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	>15
Частота повторяемости f (%)	35,4	33	22	7	2	0,53	0,05	0,02	0,01

Увеличение выработки мощности за счет использования нечеткого регулирования вычисляется следующим образом:

1. Суммарная выработка электроэнергии по градациям $W_{\text{ВЭУ}} = \sum P_i \cdot t_i$.
2. Увеличение выработки электроэнергии происходит за счет нечеткого регулирования в зоне II: $dW = W_{\text{ВЭУ}}^F - W_{\text{ВЭУ}}^{\text{ПВД}} = 67252 \text{ кВт} \cdot \text{ч} - 64036 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3216 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$
3. Прибыль с учетом тарифа на электроэнергию равна: $d\Pi = dW \cdot T = 3216 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot 3,5 \text{ руб. / (кВт} \cdot \text{ч)} = 11256 \text{ руб.}$
4. Прибыль от ветроэлектростанции, состоящей из 36 ВЭУ, равна: $\Sigma d\Pi = n \cdot d\Pi = 36 \cdot 11256 \text{ руб.} = 405216 \text{ руб.}$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

По результатам исследования работы регулятора на нечеткой логике можно сделать следующие выводы:

- достигается увеличение вырабатываемой мощности ВЭУ в режиме рабочих ветров до 5-7 %;
- наблюдается точное поддержание номинальной мощности ВЭУ в режиме ограничения мощности;
- показана возможность эффективного регулирования мощности ВЭУ регулятором нечеткого типа на основании базы правил, составленных по типу «если-то»;
- наиболее эффективное применение характерно для скорости ветра от 5 до 12 м/с, то есть в режиме поддержания максимального коэффициента использования энергии ветра;
- доказана целесообразность применения критерия «плавного-жесткого» регулирования для совместимости алгоритмов нечеткого вывода и ресурса контуров регулирования, а именно использование алгоритма Ларсена для изменения угла атаки лопасти и изменения длины лопасти и алгоритма Мамдани для поворота гондолы показало эффективность;
- результаты управления классического и нечеткого регуляторов аналогичны для режимов вывода ВЭУ из работы. При выводе ВЭУ из работы контуры регулирования выдают граничные (крайние) команды, не добиваясь плавных действий.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Поддержание номинальной мощности ветроэнергетической установки регулятором на основе нечеткой логики // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока № 1 2012, с. 354 – 358.
2. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Анализ функционирования нечеткого регулятора мощности ветроэнергетической установки в режиме рабочих ветров // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, № 1 (25), часть 1. июнь 2012, с. 221-225.
3. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Регулирование мощности ветроэнергетической установки на основе нечеткой логики // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, №5, 2012, с. 18-22.

Научные публикации в других изданиях:

4. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Использование распределенной генерации на базе ВЭС для снабжения автономных электропотребителей // Каталог инновационных проектов СФО, 2010. – с. 277
5. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Перспективы развития ЭЭС с распределенной генерацией в Республике Алтай // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», Томский политехнический университет. – Изд-во Томского политехнического университета, 2010, с. 80-82.
6. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Влияние уменьшения размеров единичной генерации на устойчивость ВЭС при неизменной общей мощности на примере

Республики Алтай // Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» в 3 т. Т.1., Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011, с. 136-137.

7. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Функционирование фаззи – регулятора мощности в III зоне работы ВЭУ // Сборник научных статей по материалам I Международной научно-практической конференции «Современные исследования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности», Юго-Зап. гос. ун-т, Курск, 2012, с.107-113.

8. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Выбор алгоритмов нечеткого вывода регулятора мощности ВЭУ// Сборник научных трудов 2-ой Всероссийской научно-практической конференции «Научные и технические средства обеспечения энергосбережения и энергоэффективности в экономике РФ», СПбГПУ, 2012, с.35-37.

9. Манусов В.З., Ядагаев Э.Г. Работа нечеткого регулятора мощности системных ВЭУ в режиме штормовых ветров // Труды XII Междунар. науч. конф. «Интеллект и наука», Железногорский филиал СФУ. – Красноярск: Центр информации, 2012, с. 233-234.

10. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Требования к ВЭС по подключению и работе в составе ЭЭС //Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», Томский политехнический университет. – Изд-во Томского политехнического университета, 2012, с 58-60.

11. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Исследование работы нечеткого регулятора ВЭУ в режиме ограничения мощности //Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», Томский политехнический университет. – Изд-во Томского политехнического университета, 2012, с. 60-62.

12. В.З. Манусов, Э.Г. Ядагаев Особенности параллельной работы ветроэлектростанций и электроэнергетических систем // Молодёжь и наука: сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.

13. Манусов В.З., Ядагаев Э.Г. Регулирование мощности системных ВЭУ регулятором нечеткого типа // Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» в 3 т. Т.1., Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012, с. 139-140.

14. Манусов В.З., Ядагаев Э.Г. Анализ функционирования нечеткого регулятора мощности ВЭУ на границе II и III зон работы // Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» в 3 т. Т.1., Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012, с. 141-142.

15. Манусов В.З., Ядагаев Э.Г. Функционирование нечеткого регулятора мощности ВЭУ в режиме порывов ветра// Сборник трудов II Международной

научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов», Тольят. гос.ун-т. , 2012, с. 98-101.

16. Манусов В.З., Ядагаев Э.Г. Регулирование мощности ветроэнергетической установки на основе нечеткой логики // Сборник трудов конференции Восьмой всероссийской научной молодежной школы «Возобновляемые источники энергии», Московский государственный университет имени Ломоносова, 2012, с. 470-475.