

УДК 621.311

Нечеткие модели распределенной генерации возобновляемых источников энергии Республики Таджикистан*

ДЖ.С. АХЪЁЕВ¹, А.К. КИРГИЗОВ², Э.Г. ЯДАГАЕВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: Javod_66@mail.ru

² 730092, РТ, г. Душанбе, ул. акад. Рахмоновых, 10, Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, ст. преподаватель. E-mail: alifbek@mail.ru

³ 649000, РФ, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1, Горно-Алтайский государственный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: yadagaev@mail.ru

В статье приведены основные энергетические ресурсы Таджикистана, обусловленные возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Предложены принципы их классификации на основе пересекающихся нечетких классов. Выбраны три класса распределенных источников энергии: «малые», «мини» и «микро». При этом к малым отнесены источники распределенной энергии «малые» до 5000 кВт, «мини» до 2000 кВт, и «микро» до 50 кВт. Представлены функции принадлежности этих лингвистических переменных. Обоснована возможность построения энергетических центров на 100 %, использующих распределенную возобновляемую генерацию энергии. При этом предусмотрена также возможность накопления энергии в виде аккумулярования энергии воды или аккумуляторов другого вида BESS. С учетом того, что выработка электроэнергии в Республике Таджикистан в основном приходится на ВИЭ и с учетом их непредсказуемости и неравномерности режимов на суточном интервале, объединение их в HUB является наиболее рациональным способом повышения надежности энергоснабжения всей инфраструктуры. Таким образом, интегрирование распределенной генерации ВИЭ и всех систем электропотребления в один центр позволяет в зависимости от энергопотребления и способности генерации энергии оптимизировать их совместную работу. В контексте единой энергетической системы и общей инфраструктуры энергоснабжения HUB Республики Таджикистан можно рассматривать как систему связанных энергетических центров. Передача энергии между центрами в комбинированной системе должна обладать, прежде всего, статической устойчивостью, что требует дополнительных исследований. Показано, что гидроэнергетические ресурсы и солнечная энергия являются приоритетными по сравнению с ветроэнергетическими ресурсами. Однако, в совокупности все они должны быть использованы для устойчивого развития энергетики Республики Таджикистан.

Ключевые слова: распределенная генерация, нечеткие модели, возобновляемые источники энергии, пересекающиеся классы, функции принадлежности, гидроресурсы, ветровые ресурсы, солнечные ресурсы, HUB, Республика Таджикистан

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-117-130

* Статья получена 25 апреля 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних лет сельскохозяйственные предприятия и сельское население Республики Таджикистан испытывает постоянный дефицит электрической энергии, которая является основным источником тепла бытового комфорта. Сегодня этот дефицит особенно обострился и население в большинстве сельских районах получает электроэнергию в зимний период года только по несколько часов в сутки. Это приводит к неприятным последствиям во всех сферах жизни и в сельскохозяйственной деятельности районов, а именно в экономике, образовании, здравоохранении, социальной сфере.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Сельские и особенно удаленные и труднодоступные районы Республики Таджикистан могут быть надежно обеспечены электроэнергией только за счет строительства в этих районах малых гидроэлектростанций (МГЭС) или иных возобновляемых источников энергии, таких как ветроустановки и солнечные батареи. Потенциальные ресурсы малой энергетики Республики Таджикистан в целом очень велики и во много раз превышают ее реальные потребности даже с учетом перспективного развития энергетической отрасли в стране в отдаленном будущем.

Преимущества ожидаемых эффектов от развития возобновляемых источников (ВИЭ) при развитии Республики Таджикистан: 1) снижение выбросов парниковых газов за счет безуглеродной возобновляемой энергии; 2) снижение расходов по защите окружающей среды и здоровья населения; 3) снижение цен на электроэнергию на оптовом рынке; 4) создание новых рабочих мест при строительстве и эксплуатации новых станций; 5) мультипликативный эффект от развития ВИЭ.

Несмотря на все это, успехи в реализации программы развития малой распределенной энергетики и строительстве МГЭС в Республике Таджикистан весьма скромные. Одной из основных причин такого медленного развития является отсутствие четко разработанной стратегии по развитию малой распределенной гидроэнергетики республики и основной концепции развития энергетического комплекса, которая в настоящее время в литературе характеризуется термином HUB. HUB – это энергетический узел (комплекс), включающий в себя различные виды источников энергии, использующих минеральное сырье (например, газ, уголь, нефтепродукты и др.). Предлагаемый в данной работе HUB представляет собой композицию из распределенных возобновляемых источников чистой энергии различных видов, таких как малые гидроэлектростанции, ветроустановки малой мощности, солнечные батареи и статические накопители энергии BESS (Battery Energy Storage System). В этом состоит принципиальное отличие предлагаемого HUB в Республике Таджикистан [1–4].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время в Республике Таджикистан существует некоторая путаница в понятиях «малая энергетика». Наряду с названием «малая гидроэнергетика» используется также «нетрадиционная», «альтернативная», что

создает путаницу и трудности в использовании мирового опыта развитых стран, находящихся в условиях, отличающихся от условий Республики Таджикистан.

Прежде всего требуется конкретизировать понятие малой ГЭС и уточнить классификацию МГЭС по мощности и локальных электрических сетей, которые будут участвовать в работе HUB. Особенно это относится к региону Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО), где все базовые ГЭС – как существующие, так и перспективные – формально относятся к «малым», выполняя на самом деле функции «больших». Это может создать неопределенность в их статусе, принадлежности и роли государства в их управлении.

Сегодня в республике не явно, но существует представление, что малые ГЭС – это те же крупные ГЭС, но в миниатюре. По-видимому, необходимо их разделение не только по мощности, но и по структуре потребителей, режиму работы, покрытию графика нагрузки и требованию к строительству и подключению к системе. Будет правильным для составления границ мощностей МГЭС использовать относительные значения мощности к установленной мощности энергосистемы, а также учитывать степень развития страны и ряд других факторов. Следовало бы границы мощностей МГЭС связать с развитостью страны, одним из показателей которых является суммарная мощность энергосистемы. Принятые параметры классификации для больших ГЭС и МГЭС почти одинаковы, кроме предельной мощности, которая в разных странах принимается по-разному. Это создает дополнительную трудность для определения точной классификации МГЭС, особенно в маломощных системах. Более точную приближенную классификацию можно определить по функции принадлежности станции к малым, так как мощность МГЭС – это не фиксированное значение, а пересекающиеся классы.

Гистограмма распределения существующих ГЭС по мощности из общего числа 325 ГЭС Республики Таджикистан представлена на рис. 1.

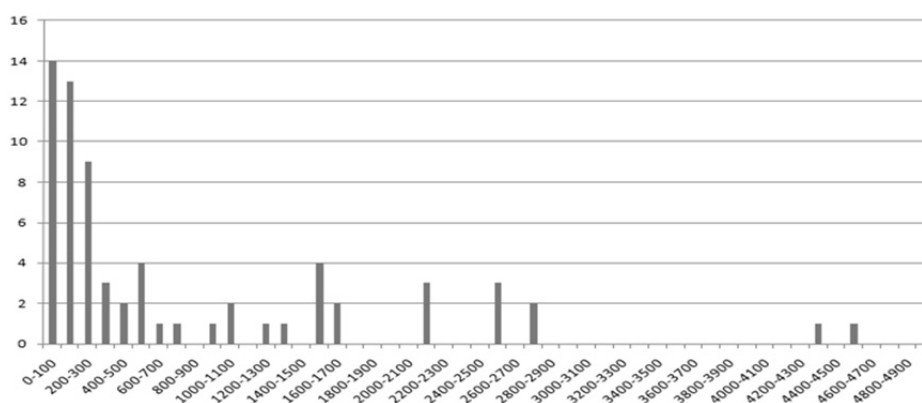


Рис. 1. Гистограмма ГЭС Республики Таджикистана по мощности

По своим функциям участия в оптовом рынке электроэнергии, техническому оснащению и способам управления целесообразно выделить следующие группы распределенной генерации ГЭС: микроГЭС, мини-ГЭС и малые ГЭС. Так как четкое разделение ГЭС по мощности в зависимости от их количества невозможно, то принята нечеткая классификация на основе функций принадлежности пересекающихся классов, которая представлена на рис. 2.

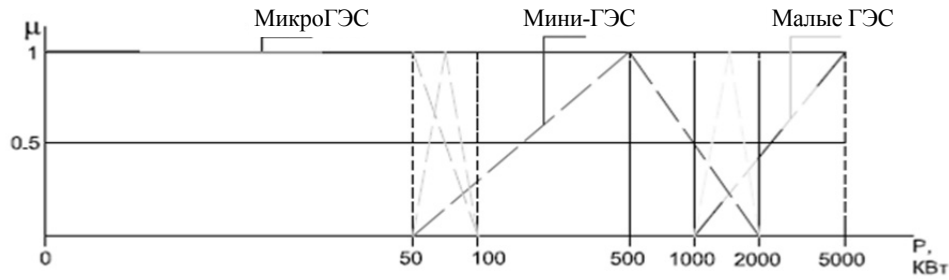


Рис. 2. Нечеткая классификация МГЭС применительно к условиям Республики Таджикистан

Из графиков видно, что к микроГЭС относятся станции от 0 до 50 кВт, к мини-ГЭС – от 50 до 2000 кВт, к малым ГЭС – от 1000 до 5000 кВт.

Эта классификация присваивает некоторую степень принадлежности между микро- и мини-ГЭС в области от 50 до 100 кВт и нечеткую принадлежность для мини- и малых ГЭС в области от 1000 до 2000 кВт. Такая нечеткая классификация предложена впервые и, безусловно, более адекватно отражает реальное положение дел [5–6].

Математическое выражение для функции принадлежности в общем виде треугольной L-R-функции представлено формулой 1. Для класса микроГЭС функция принадлежности определяется формулой (2), для класса мини-ГЭС – формулой (3), для класса малых ГЭС – формулой (4).

$$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & c_i \leq x \leq a_i, \\ \frac{x - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq x \leq b_i, \\ \frac{c_i - x}{c_i - b_i}, & b_i \leq x \leq c_i; \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu(x_{мк}) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq 50, \\ \frac{100 - x}{c_i - 50}, & 50 \leq x \leq 100, \\ 0, & 100 \leq x; \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu(x_{мн}) = \begin{cases} 0, & 50 \leq x \leq 2000, \\ \frac{x - 500}{500 - 50}, & 50 \leq x \leq 500, \\ \frac{2000 - x}{2000 - 500}, & 500 \leq x \leq 2000; \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu(x_{мл}) = \begin{cases} 0, & 1000 \leq x, \\ \frac{x-1000}{5000-1000}, & 1000 \leq x \leq 5000, \\ 1, & 500 \leq x \leq 2000. \end{cases} \quad (4)$$

При оценке энергетических возможностей ветра по городам Республики Таджикистан наиболее часто встречающаяся мощность ветроэлектрических установок (ВЭУ) от 10 до 30 кВт, хотя в некоторых случаях достигает 120 кВт. В соответствии с ранее указанными классами функций принадлежности ВЭУ следует отнести к классу микростанций, определяемых формулой (2). И, следовательно, потенциал ветровой энергии не очень велик, но полезен для сельскохозяйственных районов, так как является распределенной генерацией и требует особых условий управления на основе нечеткой логики [7–12].

Наряду с этим выполнена оценка солнечного потенциала, а именно ясность дней в году, ежедневная солнечная радиация в виде излучения, кВт · ч/м² в день.

Средняя мощность по городам от 1300 до 1600 кВт на солнечную станцию площадью 1000 м². Математическое ожидание составляет 1400 кВт. Рассматриваются гелиоустановки мегаваттного класса. По своей мощности и классификации станций возобновляемых источников энергии они относятся к классу «мини» и определяются функцией принадлежности по формуле (3). Таким образом, солнечный потенциал Республики Таджикистан значительно выше ветрового.

Так как основная выработка энергии в республике приходится на ВИЭ, в зависимости от их непредсказуемости и неравномерности перехода в суточном режиме соединение их в HUB является наиболее рациональным способом увеличения их надежной работы [13–14].

Один способ использовать существующие инфраструктуры более эффективно должен рассмотреть их как одну интегрированную систему в планировании и операции энергией. Для этого необходимо соединять все источники в один центр, который позволяет в зависимости от потребности и от наличия энергии оптимизировать их работу.

Если инфраструктуры объединены должным образом, энергия может быть обмененной среди них интегрированной операцией, особенно во время перегруженности можно осуществлять их управление. Например, в определенном времени путь передачи энергии может быть переполненный и передача может быть уменьшена через передачу части энергетического потока в другую сеть и перемещение его в менее критические точки в системе. Но это потребовало бы соответствующего слияния инструментов всех энергоносителей и их совместной работы.

Рассмотрение многократных входов энергетического центра (HUB), которые могут использоваться для удовлетворения требований потребления продукции, позволяет понять, что этот центр обычно увеличивает доступность энергии для потребителей, потому что это больше не зависит от единственной инфраструктуры.

В контексте энергетических центров целая инфраструктура энергоснабжения может быть рассмотрена как система связанных энергетических центров. На рис. 3 показана связь трех энергетических центров, связь электрических и тепловых сетей. Это пример для энергоснабжения поселков и городов, который примерно разделен на три области: промышленные предприятия, коммерческая сфера и частный жилой фонд.

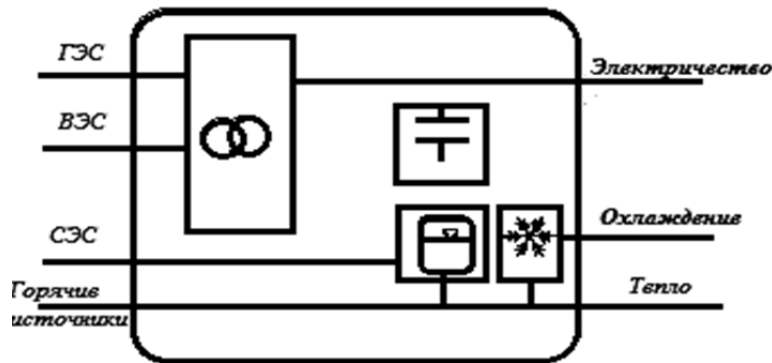


Рис. 3. Объединение всех источников в единый энергетический центр

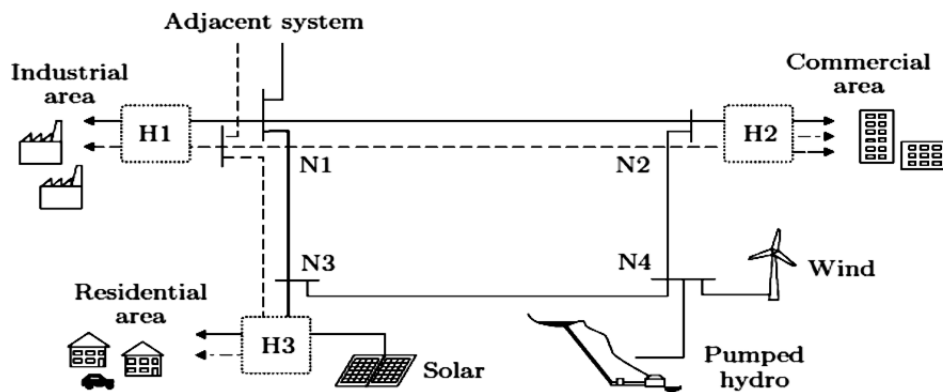


Рис. 4. Системы связанных энергетических центров [15–18]

Каждая область соединяется с распределительными электрическими сетями и тепловыми источниками через энергетические центры (рис. 4). Внутреннее расположение центров адаптировано к определенным требованиям электрических и тепловых потребителей. Мощность передается через смежные сети, фотогальванические источники, соединенные с центром H3, а ветроэлектростанции и гидроэлектростанции соединены с электрической сетью через узел N4. Этот узел может представлять более отдаленную гидроэлектростанцию недалеко от поселков и городов, где имеются водохранилища для аккумуляции энергии воды или аккумуляторов энергии другого вида BESS [15–18].

Другой проблемой работы таких систем являются вопросы выдачи номинальной активной мощности генератора, работающего на высоте выше 1000 метров над уровнем моря. Дело в том, что с ростом высоты из-за уменьшения плотности воздуха снижается его охлаждающая способность,

что снижает мощность генератора, имеющего воздушное охлаждение, которое присуще всем МГЭС. Исходя из вышеприведенных причин собраны многолетние статистические эксплуатационные данные о снижении выдачи активной мощности в систему на существующих МГЭС на территории ГБАО Республики Таджикистан в зависимости от высоты их расположения над уровнем моря, приведенные в таблице, из которой видно, что при высоте 3000 м и выше мощность снижается более чем на 20 %.

Снижение мощности МГЭС в зависимости от высоты

Наименование МГЭС	Марзич	Сомон	Ванч	Рушан	Хорог	Намад-гут	Ак-Су	Булункул
Высота МГЭС над уровнем моря, м	1000	1288	1815	1981	2075	2524	3576	3744
Мощность в процентах от номинальной	100	98	96	94	93	88	81	75

Для выдачи номинальной активной мощности генераторов и баланса мощности в системе стоит вопрос о необходимости уменьшения реактивной составляющей выдаваемой мощности генератора, позволяющего увеличивать выдаваемую активную на долю снижения реактивной. Это приводит к снижению реактивной мощности в системе. В основном в данной системе нагрузка бытовая и имеет резкопеременный характер, и современные бытовые приборы потребляют значительную реактивную мощность. Соединение всех станций в энергетический HUB позволяет за счет использования BESS решить проблему компенсации реактивной мощности.

Передача энергии между центрами в комбинированной системе для различных видов энергоносителей в распределенной системе должна обладать статической устойчивостью, что подлежит дополнительному исследованию.

3. ПРИНЦИПЫ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

За последние два десятилетия интерес к ветроэнергетике значительно вырос из-за условно бесплатного энергоресурса – ветра, скорости монтажа ветроэнергетических установок и возможной распределенной генерации. По прогнозам Мирового совета по ветроэнергетике (GWEC), установленная мощность ВЭУ к 2018 году достигнет 600 ГВт, что составит 8 % от мирового потребления.

Наиболее популярными видами генераторов для ВЭУ являются асинхронные генераторы с короткозамкнутыми роторами и синхронные генераторы. Первые широко применяются по причине невысокой стоимости, надежности конструкции.

Дополнительному обсуждению подлежит управление автономными возобновляемыми источниками энергии, особенно ВЭУ, рассмотренными в работах [5–6]. Мощность ветроэнергетической установки зависит от параметров ветра (скорости и его направления относительно положения гондолы)

и параметров ветроколеса (угол атаки лопасти, положение гондолы к набегающему потоку ветра). Регулирование мощности ВЭУ заключается в выработке управляющих воздействий для изменения параметров ветроколеса при переменном значении ветра. Целевой функцией регулирования мощности ВЭУ является выработка максимально возможной мощности во второй зоне работы – в зоне ветров до номинальной величины.

Мощность ВЭУ определяется по формуле

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot A \cdot V^3,$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра;

A – ометаемая площадь ветроколеса, вычисляется согласно формуле площади окружности с радиусом r ;

V – скорость ветра, перпендикулярная рабочей плоскости ветроколеса;

ρ – плотность воздуха, в диапазоне $\rho = 1,009 \dots 1,3$ кг/м³.

Значение C_p вычисляется по формуле

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

где α – угол атаки лопасти, $z = \omega r / V$.

Рассмотрим преимущество нечеткого регулирования ВЭУ по сравнению с ПИД-регулированием на примере изменения угла атаки лопасти. Необходимость работы в условиях заранее неопределенного входного ресурса – ветра затрудняет использование стандартных систем автоматики – ПИД-регуляторов. ПИД-регуляторы по своему действию вырабатывают сигналы пропорционально, интегрально и дифференциально входному значению согласно заданным коэффициентам. Особенно значимым неудобством в использовании ПИД-регуляторов в регулировании мощности ВЭУ является наличие разных зон работы ВЭУ, в которых необходимо придерживаться полярных целевых функций регулирования (от выработки максимально возможной мощности до ограничения мощности). При работе во время быстрых изменений скорости ветра ПИД-регулятор показывает значительные провалы мощности ВЭУ, так как выработка необходимых регулирующих значений начинается при непосредственном переходе из одной зоны в другую [19–21].

Теория нечетких множеств и нечеткая логика позволяют использовать правила продукции типа «Если... , то... или IF... THEN...», что позволяет без сложных математических уравнений аппарата более плавно регулировать мощность за счет использования экспертных знаний через базу правил.

Зависимость угла атаки лопасти от параметров ветра представлена ниже в виде трехмерного графика для алгоритма Мамдани (рис. 5).

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 был максимален. При достижении номинальной мощности ВЭУ необходимо увеличивать угол атаки лопасти для ограничения мощности на номинальном значении.

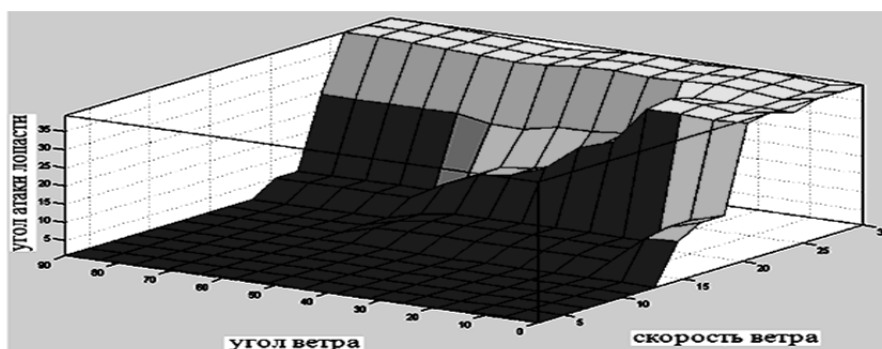


Рис. 5. Нечеткий вывод регулятора для изменения угла атаки лопасти

Управление ВЭУ в заданном диапазоне скоростей ветра выполняет следующие задачи:

- контур регулирования угла поворота лопасти обеспечивает угол атаки лопасти равным нулю, при котором коэффициент использования ветра СР максимален;
- в режиме, не требующем ограничения мощности ВЭУ, угол атаки лопасти должен соответствовать оптимальным условиям работы. На рисунке 6 приведены графики изменения угла атаки лопасти при использовании регулятора нечеткого типа и ПИД-регулятора.

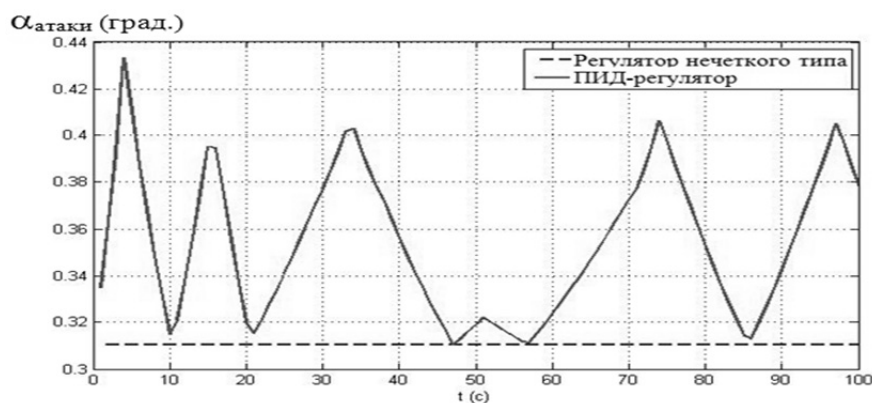


Рис. 6. Угол атаки лопасти ВЭУ

В данном режиме необходимо поддерживать угол атаки лопасти равный нулю для максимального коэффициента использования энергии ветра. При функционировании регулятора нечеткого типа α атаки = $0,31^\circ$, при функционировании ПИД-регулятора угол атаки лопасти изменяется в незначительном диапазоне. При плавном изменении направления ветра угол атаки лопасти поддерживается близким нулю вследствие низкой инерционности приводных механизмов, осуществляющих поворот лопасти.

Таким образом, использование регулятора на нечеткой логике позволяет более точно поддерживать необходимый угол атаки лопасти в режиме изменения скоростей ветра переход из одной зоны в другой особенно в моменты перехода из одной зоны мощности ВЭУ когда она поддерживается максимальной и постоянной в другую когда она сбрасывается.

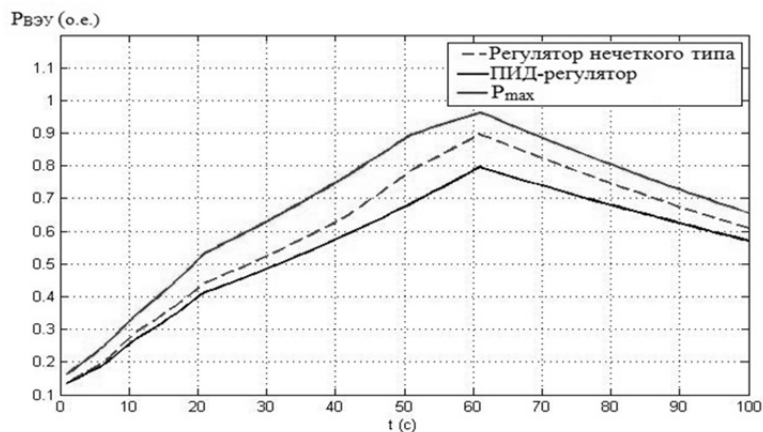


Рис. 7. Мощность ВЭУ

На рис. 7 приведен график мощности ВЭУ для нечеткого регулирования, ПИД-регулирования и показана максимальная мощность ВЭУ, которая может быть теоретически получена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные в данной работе принципы построения HUB представляют собой композицию из распределенных возобновляемых источников «чистой энергии» различных видов, таких как малые гидроэлектростанции, ветроустановки и ветростанции малой мощности, солнечные батареи и статические накопители энергии BESS (Battery Energy Storage System). Показано, что гидроресурсы и солнечная энергия являются приоритетными по сравнению с ветроэнергетическими ресурсами. Однако, в совокупности все они должны быть использованы для развития системы энергоснабжения и снижения уровня бедности населения Республики Таджикистан. В этом состоит принципиальное отличие предлагаемого HUB в Республике Таджикистан.

Уникальность данного HUB заключается в комбинированных режимах работы гидроресурсов, ветроресурсов и солнечных ресурсов в режимах одновременной конкуренции между собой и в дополнение друг друга. Таким образом, электрический HUB Республики Таджикистан будет работать со 100-процентной генерацией чистой энергии всех видов возобновляемых источников. Возможно, это будет единственной в своем роде HUB в мировой энергетике.

Применение нечеткой логики для регулирования мощности ВЭУ при постоянных флуктуациях скорости ветра является средством повышения эффективности. Для корректного применения нечеткой логики необходимо базу правил составлять на основе достаточного опыта экспертов по регулированию мощности. Применение нечеткой логики позволяет повысить эффективность работы ВЭУ по сравнению с ПИД-регуляторами при частых переходах из одной рабочей зоны ВЭУ в другую.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewables as factor of a sustainable development of rural territories of the Republic of Tajikistan / Z. Yuldashev, R. Yuldashev, L. Kasobov, A. Kirgizov // Bulletin of the Tajik technical university. – 2014. – N 2 (26). – P. 59–61.
2. Потенциал нетрадиционных источников энергии в Таджикистане / Р.С. Расулов, А.К. Киргизов, Л.С. Касобов, У.У. Касымов // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы докладов восемнадцатой всероссийской научно-технической конференции. – Томск, 2012. – С. 99–101.
3. Geidl M., Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers // IEEE Transactions on Power Systems. – 2007. – Vol. 22, N 1. – P. 145–155.
4. Koepfel G. Reliability considerations of future energy systems: multi-carrier systems and the effect of storage: Dr. eng. sci. diss. – Zürich: ETH, 2007. – 233 p.
5. Манусов В.З., Удалов С.Н. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с. – (Монографии НГТУ).
6. Manusov V.Z., Khaldarov K. Wind turbine speed control with maximum power extracting based on fuzzy logic // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 168–172. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.168.
7. Geidl M., Andersson G. Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems // European Transactions on Electrical Power. – 2006. – Vol. 16, N 5. – P. 463–477.
8. Зубова Н.В., Удалов С.Н., Манусов В.З. Анализ приоритетности контуров управления ветроэнергетической установкой // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 6. – С. 27–31.
9. Манусов В.З., Бойко К.Н. Прогнозирование мощности ветроэнергетической установки с учетом климатических факторов // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: материалы 2 научной конференции с международным участием, Новосибирск, 24–26 марта 2015 г. – Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2015. – С. 210–212. – ISBN 978-5-89017-041-5.
10. Манусов В.З., Халдаров Ш.К. Система адаптивного управления ветроэнергетической установки на базе элементов нечеткой логики // Современная техника и технологии: проблемы, состояния и перспективы: материалы 5 Всероссийской научно-практической конференции, Рубцовск, 26–27 ноября 2015 г. – Рубцовск: Алт. гос. ун-т им. И.И. Ползунова, 2015. – С. 376–382. – ISBN 978-5-9907711-2-3.
11. Манусов В.З., Халдаров Ш.К. Адаптивное регулирование скорости ветровой турбины с переменной скоростью на базе нечеткой логики // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): труды XII международной конференции, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 292–295. – ISBN 978-5-7782-2516-9. – ISBN 978-1-4799-6019-4.
12. 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): proceedings, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 2. – P. 600–604.
13. Optimization of multiplant cogeneration system operation including electric and steam networks / K. Moslehi, M. Khadem, R. Bernal, G. Hernandez // IEEE Transactions on Power Systems. – 1991. – Vol. 6 (2). – P. 484–490.
14. Groscurth H.M., Bruckner T., Kümmel R. Modeling of energy-services supply systems // Energy. – 1995. – Vol. 20 (9). – P. 941–958.
15. Hernandez-Santoyo J., Sanchez-Cifuentes A. Trigeneration: an alternative for energy savings // Applied Energy. – 2003. – Vol. 76 (1–3). – P. 219–277.
16. Groscurth H.M., Bruckner T., Kümmel R. Energy, cost, and carbon dioxide optimization of disaggregated, regional energy-supply systems // Energy. – 1993. – Vol. 18 (12). – P. 1187–1205.
17. Bouwmans I., Hemmes K. Optimising energy systems – hydrogen and distributed generation // Proceedings of the 2nd International Symposium on Distributed Generation: Power System Market Aspects. – Stockholm, Sweden, 2002. – P. 1–7.
18. Lasseter R.H., Piagi P. Microgrid: a conceptual solution // Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, June 2004. – Piscataway, NJ: IEEE, 2004. – Vol. 6. – P. 4285–4290.

19. Манусов В.З., Ядагаев Э.Г. Анализ функционирования нечеткого регулятора мощности ветроэнергетической установки в режиме рабочих ветров // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1 (1). – С. 221–225.

20. Манусов В.З., Ядагаев Э.Г. Исследование работы нечеткого регулятора ВЭУ в режиме ограничения мощности // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 60–62.

21. Удалов С.Н., Манусов В.З., Зубова Н.В. Управление ветроэнергетической установкой с изменяемой геометрией лопасти на основе нечеткого контроллера // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 159–173.

Ахъёев Джавод Саламшоевич, аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – мониторинг и диагностика текущего технического состояния высоковольтного электрооборудования на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики. Имеет более 15 публикаций. E-mail: Javod_66@mail.ru

Киргизов Алифбек Киргизович, старший преподаватель Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими. Основное направление научных исследований – развитие энергетической системы Республики Таджикистан на основе возобновляемых источников энергии и оптимизации ее режимов по напряжению. Имеет более 25 публикаций. E-mail: alifbek@mail.ru

Ядагаев Эркемен Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент Горно-Алтайского государственного университета. Основное направление научных исследований – применение методов нечеткой логики для формирования энергоэффективных режимов работы ветроэнергетических установок. Имеет более 20 публикаций. E-mail: yadagaev@mail.ru

A fuzzy model of distributed generation of renewable energy in the Republic of Tajikistan*

J.S. AHYOEV¹, A.K. KIRGIZOV², E.G. YADAGAEV³

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate student. E-mail: Javod_66@mail.ru*

² *Tajik Technical University, 10 Acad. Rajabovich Street, Dushanbe, 730092, Republic of Tajikistan, senior lecturer. E-mail: alifbek@mail.ru*

³ *Gorno-Altai state University, 1 Lenkina street, Gorno-Altai, 649000, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: yadagaev@mail.ru*

The article discusses the main energy resources in Tajikistan from the renewable energy sources (RES) perspective. The principles of their classification on the basis of overlapping fuzzy classes are suggested. Three classes of distributed energy sources are selected: small, mini and micro. In doing so the label 'small' is given to small, up to 5000 kW, distributed energy sources, the label 'mini' is given to energy sources of up to 2000 kW, and the label 'micro' implies energy sources of up to 50 kW. The membership function of linguistic variables is presented. The possibility of building energy centers using distributed renewable energy generation by 100% is justified. At the same time, it also provides a possibility energy storage in the form of water energy accumulation or other kinds of battery BESS. Given the fact that the generation of electricity in Tajikistan is mainly accounted for renewable energy sources and in view of their unpredictability and unevenness on the day interval modes combining them in the HUB is the most efficient way to improve the reliability of power supply of the entire infra-

* Received 25 April 2016.

structure. Thus, the integration of distributed generation of renewable energy sources and all energy consumption systems in one center allows, depending on the energy and power generation capacity, optimizing their joint operation. In the context of the unified energy system the overall energy infrastructure HUB of the Republic of Tajikistan can be seen as a system of coupled energy centers. Energy transfer between the centers in the combined system must possess static stability, which requires further study. It is shown that hydropower and solar energy resources are a priority in comparison with wind power resources. However, together they are to be used for a sustainable development of energetics in the Republic of Tajikistan.

Keywords: Distributed generation; fuzzy models; renewable energy; intersecting classes; membership functions; hydro resources; wind resources; solar resources; the HUB; Tajikistan

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-117-130

REFERENCES

1. Yuldashev Z., Yuldashev R., Kasobov L., Kirgizov A. Renewables as factor of a sustainable development of rural territories of the Republic of Tajikistan. *Bulletin of the Tajik technical university*, 2014, no. 2 (26), pp. 59–61.
2. Rasulov S., Kirgizov A., Kasobov L., Kasymov U. [Potential of nonconventional power sources in Tajikistan]. *Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost': materialy dokladov vosemnadtsatoi vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Power: Ecology, Reliability, Safety: materials of the eighteenth All-Russian scientific and technical conference]. Tomsk, 2012, pp. 99–101.
3. Geidl M., Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 145–155.
4. Koeppel G. *Reliability considerations of future energy systems: multi-carrier systems and the effect of storage*. Dr. eng. sci. diss. Zürich, 2007. 233 p.
5. Manusov V.Z., Udalov S.N. *Modelirovanie vetroenergeticheskikh ustanovok i upravlenie imi na osnove nechetkoi logiki* [Simulation of wind turbines and their management on the basis of fuzzy logic]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 200 p.
6. Manusov V.Z., Khaldarov K. Wind turbine speed control with maximum power extracting based on fuzzy logic. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 168–172. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.168
7. Geidl M., Andersson G. Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems. *European Transactions on Electrical Power*, 2006, vol. 16, no. 5, pp. 463–477.
8. Zubova N.V., Udalov S.N., Manusov V.Z. Analiz prioritnosti konturov upravleniya vetro-energeticheskoi ustanovkoi [Analysis of priority control loops of the wind turbine]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 2015, no. 6, pp. 27–31.
9. Manusov V.Z., Boyko K.N. [Power forecasting wind power plant, taking into account climatic factors]. *Energo- i resursoeffektivnost' maloetazhnykh zhilykh zdaniy: materialy 2 nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings: 2 scientific materials conference with international participation], Novosibirsk, 24–26 March 2015, pp. 210–212.
10. Manusov V.Z., Khaldarov Sh.K. [Adaptive wind turbine control system based on elements of fuzzy logic]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyaniya i perspektivy: materialy 5 Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern techniques and technologies: problems status and prospects: materials 5 All-Russian scientific-practical conference]. Rubtsovsk, 26–27 November 2015, pp. 376–382. ISBN 978-5-9907711-2-3.
11. Manusov V.Z., Khaldarov Sh.K. [Adaptive control the speed of the wind turbine at a variable rate based on fuzzy logic]. *Trudy XII mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya", APEP-2014: v 7 t.* [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2014: Proceedings: in 7 vol.], Novosibirsk, Russia, Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, vol. 7, pp. 292–295. ISBN 978-5-7782-2516-9. ISBN 978-1-4799-6019-4.
12. Zubova N.V., Udalov S.N., Manusov V.Z., Achitayev A.A. Development and research of the control system for wind turbine with variable length blade. *The 8 International Forum on Strategic*

Technologies (IFOST 2013): proceedings, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013, vol. 2, pp. 600–604.

13. Moslehi K., Khadem M., Bernal R., Hernandez G. Optimization of multiplant cogeneration system operation including electric and steam networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, no. 6 (2), pp. 484–490.

14. Groscurth H.M., Bruckner T., Kümmel R. Modeling of energy-services supply systems. *Energy*, 1995, no. 20 (9), pp. 941–958.

15. Hernandez-Santoyo J., Sanchez-Cifuentes A. Trigenation: an alternative for energy savings. *Applied Energy*, 2003, no. 76 (1–3), pp. 219–277.

16. Groscurth H.M., Bruckner T., Kümmel R. Energy, cost, and carbon dioxide optimization of disaggregated, regional energy-supply systems. *Energy*, 1993, vol. 18 (12), pp. 1187–1205.

17. Bouwmans I., Hemmes K. Optimising energy systems – hydrogen and distributed generation. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Distributed Generation: Power System Market Aspects*, Stockholm, Sweden, October 2002, pp. 1–7.

18. Lasseter R.H., Piagi P. Microgrid: a conceptual solution. *Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, June 2004, vol. 6, pp. 4285–4290.

19. Manusov V.Z., Yadagaev E.G. Analiz funktsionirovaniya nechetkogo regulatora moshchnosti vetroenergeticheskoi ustanovki v rezhime rabochikh vetrov [Fuzzy Logic regulator using for wind turbine generators active power control]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1 (1), pp. 221–225.

20. Manusov V.Z., Yadagaev E.G. [Work Investigation of a fuzzy controller of wind turbines in the power limit mode]. *Materialy V Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektroenergiya: ot polucheniya i raspredeleniya do effektivnogo ispol'zovaniya"* [Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference "Elektroenergiya: from receiving and distribution before effective use"]. Tomsk, TPU Publ., 2012, pp. 60–62.

21. Udalov S.N., Manusov V.Z., Zubova N.V. Upravlenie vetroenergeticheskoi ustanovkoi s izmenyaemoi geometriiei lopasti na osnove nechetkogo kontrollera [Control of a wind turbine with variable length blades through fuzzy logic controller]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 159–173.