
УДК 681.516.54:621.311

Е.П. Голик, канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет
(Украина, 25006, Кировоград, пр. Университетский, 8,
тел. (066) 5201940, e-mail: dego@ukr.net)

Автоматическое управление процессом энергоснабжения автономных потребителей на основе аппарата нечеткой логики с нейросетевой адаптацией

Рассмотрена система автоматизированного энергоснабжения автономных потребителей от возобновляемых источников энергии. Для создания системы автоматического управления процессом энергоснабжения предложен подход, основанный на использовании методов нечеткой логики с нейросетевой адаптацией, что дает возможность оптимизировать структуру системы в условиях реального времени.

Розглянуто систему автоматизованого енергопостачання автономних споживачів з використанням відновлюваних джерел енергії. Для створення системи автоматичного керування процесом енергопостачання запропоновано підхід, базований на використанні методів нечіткої логіки з нейромережевою адаптацією, що дає змогу оптимізувати структуру системи в умовах реального часу.

К л ю ч е в ы е с л о в а: возобновляемый источник энергии, энергоснабжение, нечеткая логика, нейросетевая адаптация, система автоматического управления, автономный потребитель.

В настоящее время во всем мире происходит переход от централизованного энергоснабжения к децентрализованному. Для Украины такой переход рационален, прежде всего, при энергоснабжении автономных потребителей (АП), в частности фермерских хозяйств. Сельские электрические сети не могут обеспечить стабильность энергоснабжения во времени и качество параметров электрической энергии по основным характеристикам — колебанию напряжения по амплитуде и гармоническому составу, что приводит к значительным экономическим потерям. Поэтому для энергообеспечения таких АП целесообразно создание собственных систем энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и резервного источника (линии центральных электропередач или электростанции с двигателями внутреннего сгорания).

© Е.П. Голик, 2013

Постановка задачи. Наиболее распространенными и доступными ВИЭ являются солнечная энергия и энергия ветра. Их основные преимущества: экологическая чистота, экономия средств, территориальная распространенность, продолжительность существования в перспективе. Основным недостатком — их стохастический характер.

Задача управления процессом энергоснабжения АП от разнотипных источников энергии — определить, какой источник энергии необходимо использовать для удовлетворения энергетических потребностей АП в определенный момент времени. Для этого необходим эксперт — специалист в данной области, способный оценить и сравнить количество энергии, необходимое потребителю, с количеством энергии, поступающей от энергетических установок в данный момент времени. В результате такой оценки эксперт должен принять решение об использовании того или иного источника энергии, который в данный момент может удовлетворить энергетические потребности АП.

Поскольку энергетические потоки источников энергии и потребности АП имеют случайный характер, эксперту трудно вовремя принять соответствующее решение, что приводит к аварийным отключениям системы и, как следствие, невозможности обеспечить энергетические потребности АП и рационально использовать источники энергии.

Мировой опыт свидетельствует о том, что функции человека-эксперта целесообразно осуществлять с помощью систем автоматического управления (САУ). В состав современных систем автоматизированного энергоснабжения (САЭС) АП входят соответствующие преобразующие энергоустановки, аккумуляторные батареи, автономный инвертор и САУ. Использование аккумуляторных батарей и автономного инвертора позволяет осуществлять надежное и бесперебойное энергоснабжение, поддерживая стабильность необходимых показателей качества электрической энергии.

В результате анализа методов и способов автоматизации процесса управления энергоснабжением АП от ВИЭ и резервного источника установлено, что основная проблема заключается в невозможности прогнозирования и согласования процесса энергопотребления с процессом энергоснабжения таким образом, чтобы управление процессом энергоснабжения было автоматическим и энергетические потребности АП были максимально удовлетворены за счет ВИЭ при минимальном использовании резервного источника энергии.

Подход к решению задачи. Для решения задачи предлагается использовать методы, позволяющие САУ принимать решение на основе знаний о ситуациях, которые возникали ранее, в частности методов нечеткой логики (НЛ) с нейросетевой адаптацией (НСА).

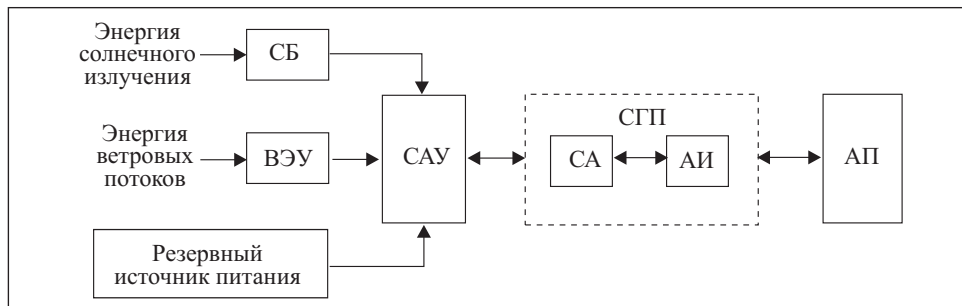


Рис. 1. Структурная схема САЭС АП от ВИЭ и резервного источника энергии: СБ — солнечная батарея; ВЭУ — ветроэлектрическая установка; СГП — система гарантированного питания; СА — система аккумуляции; АИ — автономный инвертор; АП — автономный потребитель

Входящая в структуру САЭС (рис. 1) САУ осуществляет перераспределение энергии от энергоустановок согласно энергетическим потребностям АП. Поскольку энергетические потребности и энергетические потоки имеют стохастический характер, САУ приходится принимать решение в условиях значительной неопределенности. При создании САУ с использованием методов нечетких множеств и нейронных сетей (НС) требуется предварительное обучение НС, для чего необходимо иметь информацию о диапазонах изменения входных и выходных параметров объекта управления.

Входными параметрами объекта управления являются энергетические потребности АП и энергетические потоки источников энергии, а выходным параметром — выбор энергетического потока (или потоков), который способен в данный момент времени удовлетворить энергетические потребности АП. Для определения диапазонов изменения этих параметров следует проанализировать возможности удовлетворения энергетических потребностей АП и установить взаимосвязь между процессами энергопотребления и энергоснабжения АП. Установить такую взаимосвязь можно, имея информацию о количестве энергии, необходимой потребителю, и количестве энергии, поступающей от энергоустановок в определенные моменты времени.

Информацию о количестве энергии, необходимой потребителю, получают, определив число, мощность и продолжительность работы электроприемников. Для определения количества энергии, генерируемой энергоустановками, необходима информация об их мощности в климатических и метеорологических условиях данной местности, так как мощность энергетических установок зависит от энергетических потенциалов источников энергии.

Решение задачи. Исследования были проведены в условиях Кировоградского региона. В [1] приведены результаты исследования энергетических потребностей АП (на примере фермерского хозяйства). Дневной максимум нагрузки этого фермерского хозяйства составляет 7 кВт, суммарные среднесуточные энергетические потребности: зимой — приблизительно 96 кВт·ч, весной и осенью — приблизительно 92 кВт·ч, летом — почти 90 кВт·ч.

В работах [2, 3] приведены методики и результаты исследования энергопотенциалов солнечной и ветровой энергии (для условий Кировоградского региона). Полученные результаты дали возможность моделировать работу СБ и ВЭУ в условиях фермерского хозяйства. Методика и результаты моделирования приведены в работах [4—7]. Наибольшая среднесуточная мощность СБ — летом (≈ 2250 Вт), ВЭУ имеет максимальную мощность весной (≈ 5200 Вт).

Полученные значения среднесуточных мощностей СБ и ВЭУ позволили провести анализ возможностей удовлетворения энергетических потребностей фермерского хозяйства [8]. В результате анализа выявлена взаимосвязь между процессами энергопотребления и энергоснабжения фермерского хозяйства. Энергетические потребности фермерского хозяйства могут быть полностью удовлетворены в результате использования солнечной и ветровой энергий: зимой — с 23 до 6 часов утра; весной и летом — с 1 до 17 часов; осенью — с 23 до 6 часов и с 12 до 15 часов. В остальные интервалы времени целесообразно также использовать резервный источник энергии.

В [9] приведена функциональная схема САЭС фермерского хозяйства. Упрощенный алгоритм работы системы состоит в подключении энергетических установок с помощью соответствующих силовых электронных ключей. Следовательно, задача САУ — определять, в каком состоянии должен быть тот или иной силовой электронный ключ, чтобы соответствовать энергетическим потребностям фермерского хозяйства и возможностям энергетических источников в данный момент времени. Решать данную задачу предлагается с помощью методов НЛ и НС. В [10] приведены аргументированные обоснования необходимости использования аппарата НЛ с НСА.

Результаты исследования нейронечеткой САУ энергоснабжением фермерского хозяйства описаны в работе [11]. Схема комплекса принятия решений САУ процессом энергоснабжения представлена на рис. 2. На вход поступают данные о двух параметрах: мощности СБ и ВЭУ. Третий входной параметр — мощность, необходимая АП в данное время. В зависимости от значений этих трех параметров коммутационное устройство должно обеспечить один из следующих режимов:

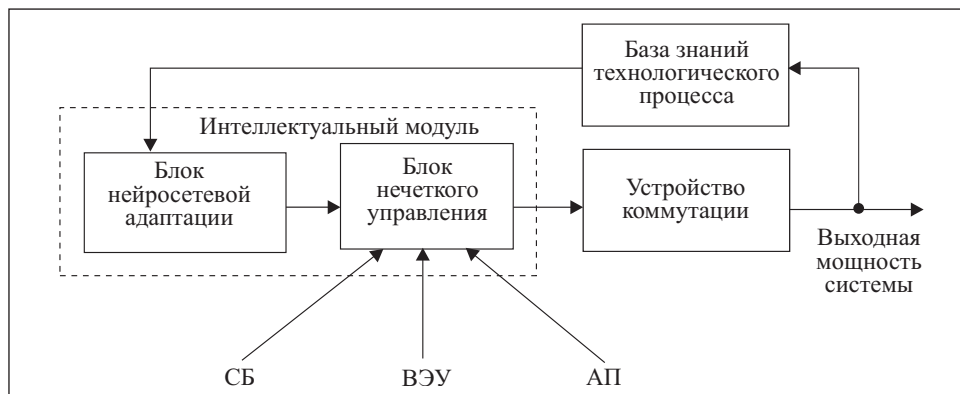


Рис. 2. Блок-схема САУ САЭС

- 1 — подключение СБ;
- 2 — подключение СБ и ВЭУ;
- 3 — подключение СБ, ВЭУ и резервного источника энергии.

На начальном уровне с помощью НС и экспертных данных происходит адекватная настройка системы управления на основе НЛ. Затем осуществляется запуск САЭС. База знаний технологического процесса постоянно пополняется. При несоответствующем качестве управления или через определенный интервал времени (устанавливаемый специалистом-экспертом) информация из базы знаний передается на интеллектуальный модуль, где с помощью НС осуществляется переобучение нечеткой системы.

Весь процесс выполняется на основе алгоритма обратного распространения ошибки, реализуемого с помощью модуля Fuzzy Logic Toolbox программного пакета MatLab[®], а именно графического интерфейса гибридных (нечетких) НС ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System), который позволяет автоматически синтезировать из экспериментальных данных нейронечеткие сети [12—15].

Для создания ANFIS-системы использованы входные данные, выбранные в результате анализа возможностей удовлетворения энергетических потребностей АП (фермерского хозяйства) [8].

Входные параметры:

мощность, обеспечиваемая СБ: 0—2,5 кВт;

мощность, обеспечиваемая ВЭУ: 0—6 кВт;

мощность, необходимая АП: 0—8 кВт.

Выходной параметр системы:

выбор одного из трех указанных выше режимов.

Для эффективного моделирования использовано три блока: учебные (training data) и контрольные (testing data) — по 150 наборов экспертных данных и 35 наборов проверочных данных (checking data). Наличие трех блоков данных улучшает качество последующей работы системы управления, так как обеспечивает уверенность в том, что не произошло «переобучение» сети [13].

Информационные блоки заполнялись с учетом особенностей нейросетевого синтеза, т.е. данные должны изменяться плавно и максимально насыщено заполнять всю область их значений. В таблице приведена часть данных, которые были использованы для обучения нейронной сети.

Нормирование параметров и уменьшение размерности матрицы входов не выполнялись, так как они технологически взаимосвязаны и изменяются в одинаковых порядковых областях.

После активации ANFIS Editor была загружена учебная выборка (рис. 3, а, см. вклейку). По результатам ряда апробаций выбрана функция принадлежности (gbellmf) (рис. 3, б, см. вклейку). При этом 1000 тренировочных итераций обеспечивает среднеквадратическую ошибку 0,095 у.е., что составляет 9,5 %.

После загрузки блока контрольных данных было установлено, что среднеквадратическая ошибка нечеткой системы составляет 41 %. В результате повторных циклов обучения удалось достичь среднеквадратической ошибки, составляющей 11 % (рис. 4, а, см. вклейку). Затем был загружен блок проверочных данных (рис. 4, б, см. вклейку), который подтвердил адекват-

Исходные данные											
Учебные				Контрольные				Проверочные			
СБ, кВт	ВЭУ, кВт	АП, кВт	Режим	СБ, кВт	ВЭУ, кВт	АП, кВт	Режим	СБ, кВт	ВЭУ, кВт	АП, кВт	Режим
2	2,5	2	1	2,5	1,5	2,5	1	2,5	2,5	1,5	1
2,5	1	3,5	2	2,5	2,5	4,5	2	0,5	2,5	5	3
1,5	2	3,5	2	2,5	6,5	8,5	2	1	3,5	1,5	2
2	2,5	4	2	1,5	4,5	5,5	2	1,5	4,5	2	2
1,5	1,5	5	3	1	4,5	5	2	0,5	5	6	3
1	4	5	2	0,5	4,5	4,5	2	1,5	2,5	5	3
0,5	1,5	2	2	0	1,5	1	2	0	3	4	3
0	6	6	2	0	6,5	6	2	2	4	3	2
0,5	1,5	2,5	3	1	2	5	3	1	5	7	3
0,1	2	0,1	1	1,5	6	1	1	2	1,5	3	2

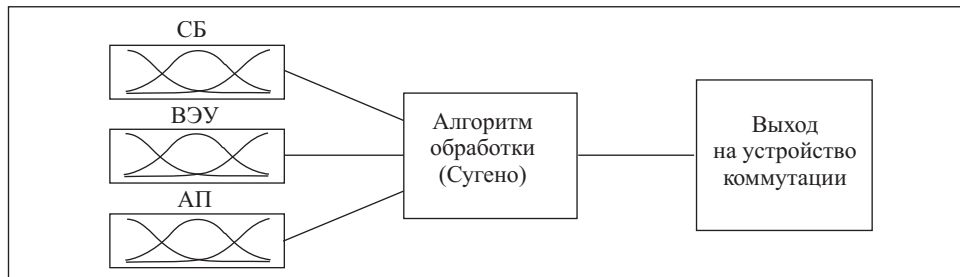


Рис. 5. Структура нечеткой базы знаний САУ САЭС (модуль FIS-Editor MatLab®)

ность работы нечеткой системы, т.е. среднеквадратическая ошибка составила 6,28 %, эффект переобучения отсутствует.

Созданная система нечеткого вывода (FIS-система) аппроксимирует зависимость между входами и выходами на основе нечеткой базы знаний и нечеткого логического вывода (рис. 5). Для обработки информации использован алгоритм Сугено, т.е. нечеткая база знаний, в которой пространство входных переменных делится на нечеткие зоны. В этих зонах связь между входными и выходными переменными задана линейной функцией. Результат нечеткого вывода получают как взвешенную линейную комбинацию результатов нечетких логических выводов для каждого правила [13—15].

В алгоритме Сугено используется набор правил в следующей форме:

Π_1 — если x есть A_1 и y есть B_1 , то $z_1 = a_1 x + b_1 y$;

Π_2 — если x есть A_2 и y есть B_2 , то $z_2 = a_2 x + b_2 y$.

На первом этапе находят степени истинности для предпосылок каждого правила: $A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(y_0), B_2(y_0)$, где A_1, A_2, B_1, B_2 — нечеткие множества входных параметров САУ; x и y — входной и выходной сигналы.

На втором этапе находят степени истинности,

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \quad \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0), \quad (1)$$

и индивидуальные выходы правил:

$$z_1^* = a_1 x_0 + b_1 y_0, \quad z_2^* = a_2 x_0 + b_2 y_0. \quad (2)$$

На третьем этапе определяют значение переменной вывода (выход сети):

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (3)$$

В рассматриваемом случае система нечеткого управления содержит семь нечетких выводов с соответствующими функциями принадлежности (рис. 6, см. вклейку). Как видно из рис. 6, число функций принадлежности

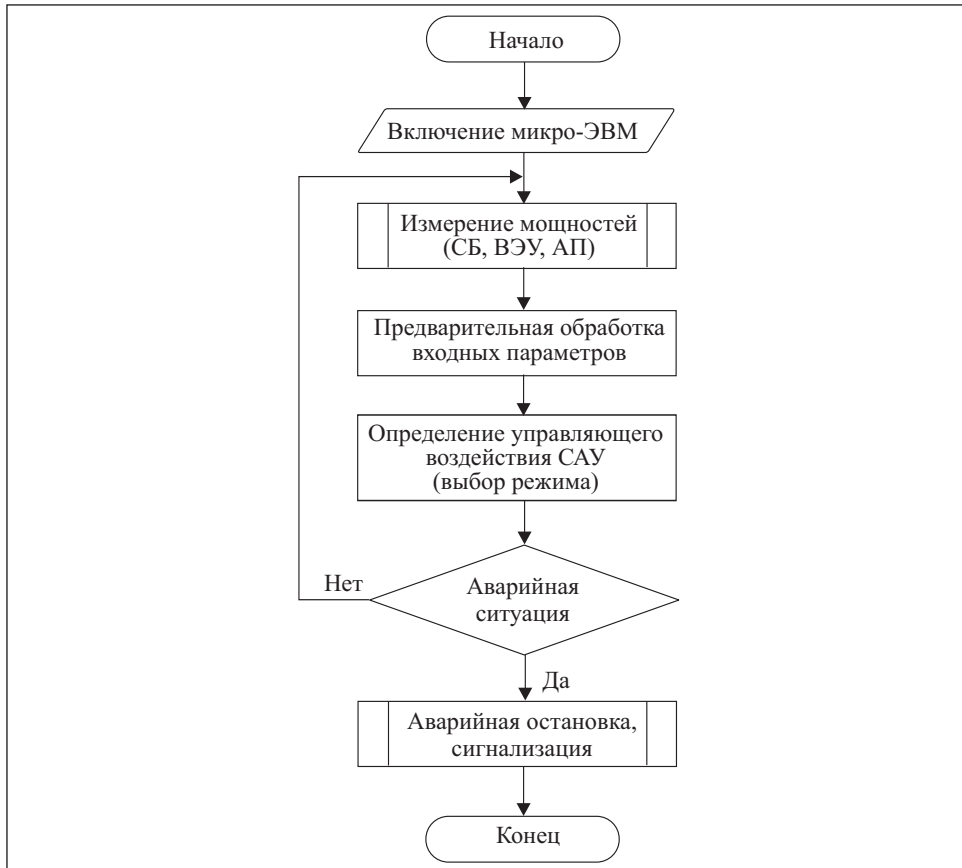


Рис. 8. Блок-схема алгоритма работы программного обеспечения нечеткой НС САУ САЭС

достаточно велико, что указывает на некоторую неопределенность. В таком случае необходимо дополнительно проводить исследования по определению приоритетов использования той или иной функции принадлежности.

На рис. 7 (см. вклейку) представлена синтезированная система (см. рис. 5) в виде нечеткой системы с нейросетевыми настроенными параметрами функций принадлежности.

Программный код такой нечеткой системы с помощью функциональных блоков MatLab® можно легко преобразовать в код языка программирования FCL (Fuzzy Control Language). Это дает возможность инкапсулировать программное обеспечение, разработанное на языке нечеткого управления FCL, в функциональный блок (на основе стандарта IEC 1131-3) программируемых логических контроллеров (PLC — Programmable Logic Controllers) в виде структурированного текста.

Для реализации алгоритма нечеткого управления САЭС можно использовать SCADA-системы ISaGRAF и Trace Mode. В данном исследовании был использован способ проектирования ISaGRAF. Реализация алгоритма функционирования программного обеспечения САУ САЭС выполнена функциональным блоком на языке диаграмм FBD/LD с предварительной вставкой листинга программы из FIS-Editor в структурированный язык ST. На рис. 8 представлена блок-схема программного обеспечения нечеткой НС САУ САЭС автономного потребителя.

Программная реализация САУ САЭС на языке диаграмм FBD/LD включает только функциональный блок нечеткого регулятора, что является достаточным для решения данной задачи. Значения входных переменных поступают из воспринимающих элементов непосредственно в функциональный блок диаграмм FBD/LD. Управляющее воздействие (выбор режима) рассчитывают в результате выполнения разработанного алгоритма нечеткого управления. Заданное значение режима поступает на устройство коммутации источников (силовые электронные ключи).

Выводы

В результате исследования входных параметров объекта управления САЭС автономных потребителей установлено, что САЭС работает в условиях неопределенности. Поэтому для создания САУ САЭС целесообразно использование аппаратов НЛ и НС, так как традиционные методы управления объектами в условиях неопределенности, по сути, не касаются проблемы неопределенности.

Решение на основе математического аппарата нечетких множеств оптимизационной задачи построения нечеткой САУ позволило установить правила нечетких выводов с соответствующими функциями принадлежности, что дало возможность осуществлять автономное энергоснабжение с максимальным использованием ВИЭ и минимальным использованием резервного источника энергии.

Использование НСА позволяет оптимизировать структуру САУ в условиях реального времени и создавать энергоэффективную возобновляемую базу знаний режимов работы САЭС автономных потребителей.

Автоматическое управление элементами САЭС создает предпосылки для их более широкого внедрения, поскольку текущая эксплуатация не предусматривает привлечения оперативного персонала, программирование и настройка выполняется на стадии инсталляции оборудования.

Предложенный подход к решению задачи автоматического управления процессом энергоснабжения АП от ВИЭ может быть применен для любых объектов, использующих разнотипные автономные источники энергии.

The paper deals with an automated system of power supply for autonomous consumers through the use of renewable energy sources. To create a system of automatic control of power supply process an approach is proposed, which is based on the use of fuzzy logic with neural adaptation that allows one to optimize the system structure in real time.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Голик О.П., Жесан Р.В., Березюк І.А. Автоматизоване керування процесом автономного енергопостачання на основі вітро-сонячних установок та резервної електростанції // Вісн. Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. Вип. 117. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». — Харків: ХНТУСГ, 2011. — С. 54—57.
2. Голик О.П., Жесан Р.В. Визначення закону розподілу інтенсивності сонячної радіації на основі аналізу даних метеоспостережень в Кіровоградському регіоні // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Зб. наук. статей за матеріалами п'ятої міжнар. науково-практичної конф. 02—03 квітня 2009 р., Львів. — Львів : ЛьВЦНТЕІ, 2009. — С. 200—205.
3. Голик О.П., Жесан Р.В. Одержання імовірнісних характеристик та законів розподілу швидкостей вітру на основі аналізу даних метеоспостережень // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету — Вип. 8. Т.4 — Мелітополь : ТДАТУ, 2008. — С. 57—66.
4. Голик О.П., Жесан Р.В. Розрахунок основних параметрів фотоелектричної системи для автоматизації енергопостачання автономного споживача в умовах Кіровоградського регіону // Відновлювана енергетика XXI століття: Матеріали ІХ міжнародної конф., 15—19 вересня 2008 р. АР Крим. — Київ: ТОВ «БІОЛ ПРИНТ», 2008. — С. 111—113.
5. Голик О.П., Жесан Р.В. Методика визначення основних показників енергоефективності горизонтально-осьової вітроелектричної установки у складі системи автоматизованого енергопостачання автономного споживача // Наук. вісн. Національного ун-ту біоресурсів і природокористування України. — 2009. — № 139. — С. 190—195.
6. Голик О.П., Жесан Р.В. Моделювання, з використанням методу Монте-Карло, інтенсивності сонячного випромінювання, як джерело даних для створення системи автоматичного керування автономним енергопостачанням на основі відновлюваних джерел енергії // «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту»: Зб. наук. праць за матеріалами міжнар. наук. конф. 18—22 травня 2009 р. Євпаторія. Т. 1 — Херсон : ХНТУ, 2009. — С. 43—47.
7. Голик О.П., Жесан Р.В. Моделювання роботи вітроенергетичної установки та визначення її основних характеристик // «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту»: Зб. наук. праць за матеріалами міжнар. наук. конф. 19—23 травня 2008 р. Євпаторія. Т. 2 (частина 1). — Херсон : ХНТУ, 2008. — С. 56—57.
8. Голик О.П., Жесан Р.В., Степанова Я.В. Аналіз можливостей задоволення енергетичних потреб автономного споживача за рахунок відновлюваних джерел енергії // Зб. наук. праць Кіровоградського національного технічного ун-ту «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація». — 2012. — Вип. 25. Ч. II. — Кіровоград: КНТУ. — С. 155—161.
9. Голик О.П., Жесан Р.В. Автоматизована система керування автономним енергопостачанням на основі комбінованих вітро-сонячних установок // Відновлювана енергетика. — 2010. — № 4 (23). — С. 20—22.

10. Голик О.П., Жесан Р.В., Штена В.М. Обґрунтування вибору апарату нечіткої логіки з нейромережною адаптацією для керування системою автономного енергопостачання на основі вітро-сонячних установок // Зб. наук. праць Кіровоградського національного технічного ун-ту «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація». — 2011. — Вип. 24. Ч. II. — Кіровоград: КНТУ. — С. 206—213.
11. Голик О.П., Жесан Р.В., Штена В.М. Нейроадаптивний контур нечіткої системи керування автономним енергопостачанням на основі енергій сонця та вітру // Наук. вісн. Національного ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. «Техніка та енергетика АПК». — 2011. — № 161. — С. 133—142.
12. Дащенко А.Ф., Кириллов В.Х., Коломиец Л.В., Оробей В.Ф. MATLAB в инженерных и научных расчетах.—Одесса.: Астропринт, 2003. — 210 с.
13. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб. : БХВ-Петербург, 2003. — 736 с.
14. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 200 с.
15. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Пер. с польск. — М. : Горячая линия — Телеком, 2004. — 452 с.

Поступила 21.01.13

ГОЛИК Елена Петровна, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов Кировоградского национального технического университета. В 2005 г. окончила Кировоградский национальный технический университет. Область научных исследований — автоматизация процессов управления автономным энергоснабжением с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии.