

## ПЕРЕРАБОТКА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ЭТАНОЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

© 2025 г. U. Das<sup>a</sup>, T. H. Dar<sup>a</sup>, C. Nandi<sup>a</sup>, \*

<sup>a</sup>Department of Electrical Engineering, Tripura University, Agartala, Tripura, 799022 India

\*e-mail: chmpnandi@gmail.com

Поступила в редакцию 22.02.2023 г.

После доработки 05.10.2023 г.

Принята к публикации 01.11.2023 г.

Тепловые электростанции признаны самыми загрязняющими объектами энергетики в мире. В этой связи использование для производства энергии солнечных установок имеет важное значение, поскольку позволяет сократить выбросы оксидов углерода на ТЭС. Гибридные солнечно-тепловые станции нуждаются в отработанных технологиях получения и распределения энергии и утилизации диоксида углерода, которые помогут грамотно управлять энергосистемой, поддерживать баланс между произведенной и потребляемой энергией и, в конечном итоге, сделают ТЭС более экологичной. В настоящей работе описывается система управления энергопотреблением на основе нечеткой логики, предназначенная для гибридной солнечно-тепловой электростанции. Также рассматривается технология преобразования уловленного углекислого газа в химические продукты после расчета воздействия автономной ТЭС на окружающую среду, выполненного с помощью оценки ее жизненного цикла (life cycle assessment – LCA). Результаты исследования показывают, что предлагаемые схемы осуществимы, эффективны и экологически приемлемы. Гибридные солнечно-тепловые электростанции могут работать без нанесения ущерба окружающей среде, если углекислый газ, образующийся при эксплуатации ТЭС, будет преобразован в иное химическое вещество, которое может быть полезно использовано.

*Ключевые слова:* гибридная солнечно-тепловая электростанция, контроллер для управления энергопотреблением, технология преобразования диоксида углерода, методы нечеткой логики, окружающая среда

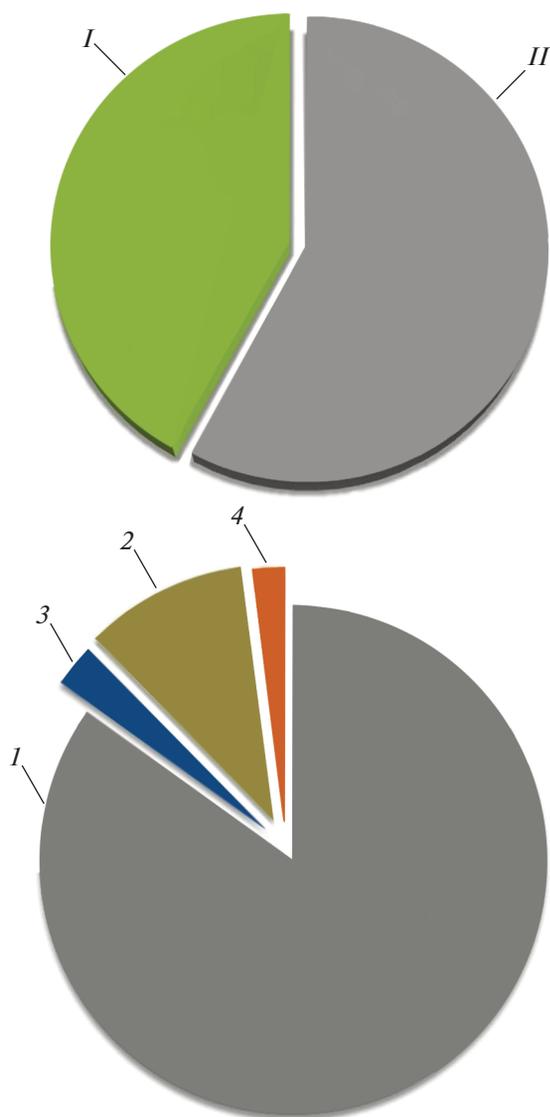
DOI: 10.56304/S0040363624700681

На электроэнергетический сектор приходится 28% выбросов парниковых газов во всем мире [1]. Среди всех электрогенерирующих систем тепловые электростанции выделяют в атмосферу самое большое количество CO<sub>2</sub>, диоксида серы и других парниковых газов. Однако ТЭС составляют основу энергетики Индии. С недавнего времени они – единственный источник освещения в стране. Более 50% электроэнергии вырабатывается на угольных ТЭС [2]. Уголь является самым востребованным ресурсом для производства электроэнергии, которая используется в самых разных отраслях экономики. Поскольку Индия занимает второе место в мире по численности населения, в стране было построено большое число ТЭС для обеспечения потребностей в электроэнергии [3]. Более того, Индия – крупнейший потребитель угля после США и Китая [4], что делает весьма актуальной проблему сокращения выбросов вредных веществ, которые образуются при сжигании этого вида топлива [5]. На рис. 1 представлено распре-

деление различных ресурсов в энергетическом секторе страны [2].

Выработка электроэнергии на ТЭС в мире в целом и в Индии в частности достигла впечатляющих показателей – 9 915 558 и 1 180 775 ГВт · ч соответственно [6], однако такая выработка сопровождается значительными выбросами парниковых газов. Согласно проведенным исследованиям, суммарный объем эмиссии углекислого газа электростанциями в мире составляет почти 14 990 метрических тонн (далее просто тонн), из которых на долю Индии приходится 1629 т. На рис. 2 показана динамика выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу от разных источников энергии в мире (см. рис. 2, а) и Индии (см. рис. 2, б) за последние 30 лет с пятилетним интервалом [7]. Очевидно, что почти 85% выбросов приходится на ТЭС, сжигающие уголь [2].

Попытки снизить эмиссию вредных веществ от тепловых электростанций предпринимаются во всех странах. В [1] установлено: если система выработки электроэнергии не будет модифицирована, уровень выбросов возрастет до 130% теку-



**Рис. 1.** Распределение ресурсов, используемых в энергетике Индии.

Доля видов топлива в топливном балансе: I – неископаемых (42%); II – ископаемых (58%).

1 – уголь (85%); 2 – газ (10%); 3 – бурый уголь (3%); 4 – дизельное топливо (2%)

шего значения. Поскольку основу энергетического сектора Индии составляют генерирующие мощности ТЭС, а сами электростанции представляют собой крупнейшего “поставщика” парниковых газов среди всех прочих источников энергии, необходимо предпринять меры для снижения их выбросов в атмосферу. Из общего количества парниковых газов 77% приходится на углекислый газ [8]. Поэтому, для того чтобы снизить вред, наносимый диоксидом углерода, необходимо прежде всего рассчитать воздействие ТЭС на окружающую среду и разработать меры по утилизации веществ, которые содержатся в “отхо-

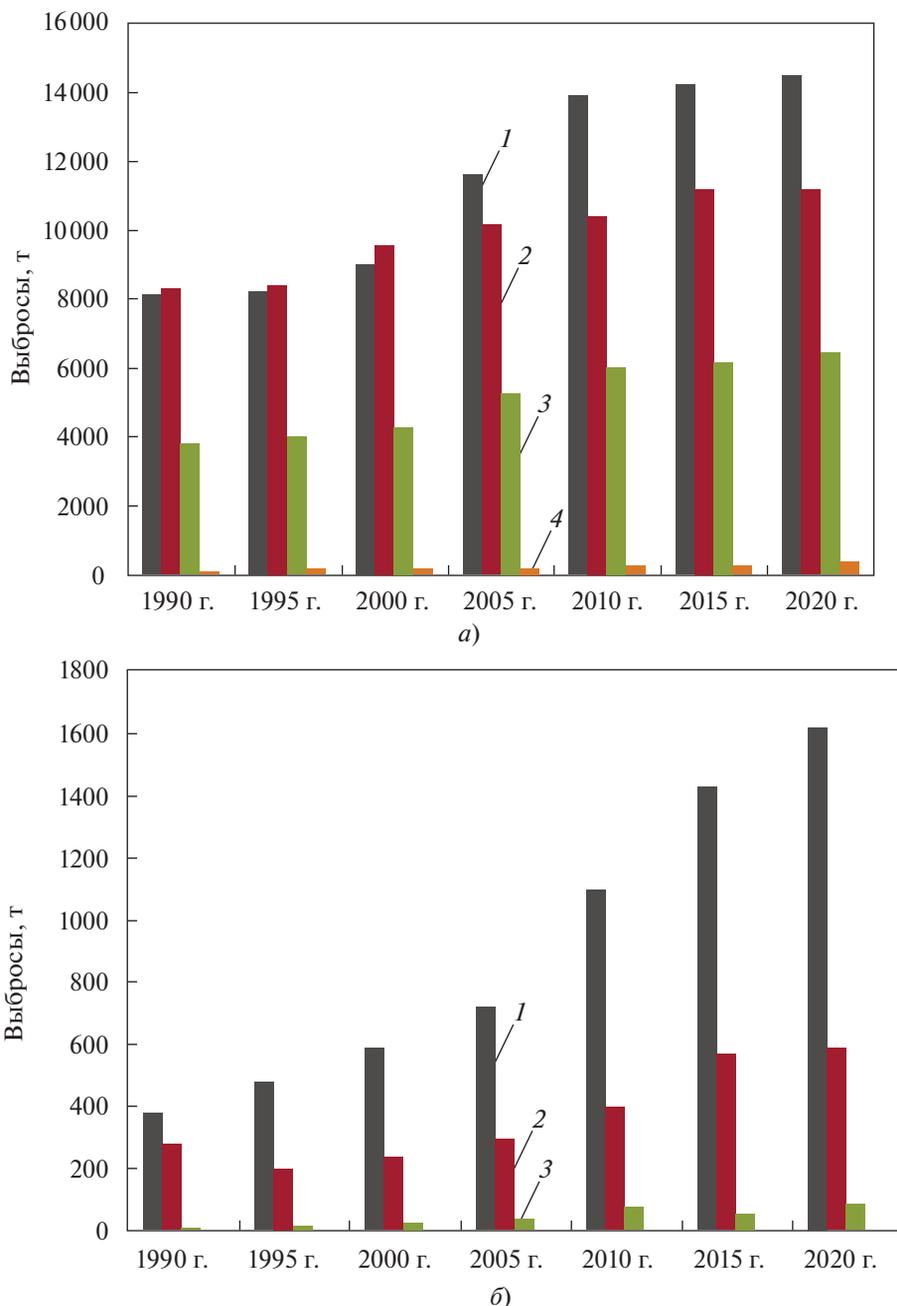
дах” производства электроэнергии. Кроме того, нужно реализовать возможность использовать возобновляемые источники энергии на традиционных электростанциях, чтобы уменьшить нагрузку на них и на сети.

Оценка воздействия жизненного цикла – это своего рода инструмент для определения влияния любого функционирующего оборудования или объекта на окружающую среду [9]. В настоящей работе эта оценка применяется для расчета воздействия ТЭС, а за функциональную единицу принимается 1 МВт · ч. После проведенного вычисления предпринимается попытка использовать экологически чистые (возобновляемые) источники энергии совместно с ТЭС для уменьшения ее нагрузки. Снижение нагрузки на ТЭС и электросети не единственная цель данного исследования – разрабатывались также меры по сокращению выбросов вредных веществ на конкретной ТЭС. Так как предполагается перенос части нагрузки на возобновляемые источники энергии, интенсивность выбросов должна снизиться. Но при “добавлении” этого источника к ТЭС, на которой используются невозобновляемые источники энергии (гибридная система), необходимо организовать идеальное регулирование отпускаемой мощности для покрытия требуемой нагрузки [10]. Однако очевидно, что и гибридная энергетическая система является источником выбросов вредных веществ, так как ТЭС продолжает функционировать в штатном режиме. Поэтому для уменьшения их эмиссии от гибридной системы требуется хорошо продуманное решение.

Далее представлены несколько исследований, посвященных разработке контроллера для управления генерацией энергии и ее распределением с нулевым уровнем выбросов углекислого газа. В [11] предлагается использовать нечеткую логику для управления энергетической системой, включающей в себя ветряные и солнечные генераторы и аккумулирующие установки, а также для уменьшения затрат потребителей на электроэнергию.

В [12] рассматривается модернизация солнечно-тепловой электростанции с помощью солнечных и аккумулирующих систем в разном исполнении для повышения ее эффективности. Применение гибридного концентратора солнечной и тепловой энергии может повысить эффективность ТЭС и сократить объемы выбросов CO<sub>2</sub> [13], так как концентраторы устанавливаются на ТЭС для увеличения коэффициента использования тепла топлива.

В [14] предложен алгоритм (интеллектуальная мажоритарная система управления энергопотреблением), позволяющий снизить стоимость энергии и обеспечить бесперебойное снабжение ею потребителей по их собственному выбору



**Рис. 2.** Изменения выбросов углекислого газа из различных источников энергии в атмосферу в мире (а) и в Индии (б) через каждые 5 лет.  
 1 – уголь; 2 – жидкое топливо; 3 – природный газ; 4 – другие виды топлива

(потребитель может выбрать тип энергии по своему усмотрению). Краткое обсуждение возможных способов решения проблемы, связанной с выбросами вредных веществ, с помощью оптимизации режимов работы на основе результатов моделирования и метаэвристических алгоритмов представлено в [15]. В [16] предлагается использовать программируемый контроллер, в котором реализованы различные алгоритмы управления энергопотреблением для сокращения

выбросов вредных веществ, уменьшения затрат на электроэнергию, снижения пик-фактора (peak-to-average ratio – отношение пиковой мощности к средней) и повышения удобства для пользователя.

В [17] разработан фототермический испаритель, в котором используется энергия солнца для выработки электроэнергии без значительных потерь тепла в окружающую среду. В [18] пред-

ставлен алгоритм управления распределением электроэнергии, поступающей от солнечных и ветровых энергетических установок или аккумуляторов, с применением искусственных нейронных сетей. Авторами [19] разработана система управления энергопотреблением для сглаживания пульсаций тока в сети при сохранении постоянного уровня заряда аккумуляторных батарей, причем мощность возобновляемых источников энергии и нагрузка считаются нерегулируемыми. Наконец, для проектирования гибридной электростанции, подключенной к сети, применяется алгоритм оптимизации по сгустку частиц – загрязнителей атмосферы. Он основан на улучшении трех показателей: стоимости электроэнергии, надежности ее получения и количества выбросов  $\text{CO}_2$  при ее (электроэнергии) производстве [20].

Анализ указанных публикаций позволил выявить основные проблемы, которым не было уделено внимание, но которые нуждаются в решении:

авторы нескольких работ рассматривают только нагрузку электротранспортных средств, аккумуляторы которых заряжаются лишь в ночное время, а переменными нагрузками при эксплуатации пренебрегают;

в других публикациях не учитываются потери тепла из-за отсутствия изоляции и расходы на ее установку;

практически ни в одной статье не представлены приемлемые технические решения по снижению эмиссии  $\text{CO}_2$ ;

в некоторых работах рассматриваются возобновляемые источники энергии для оценки нагрузки на сеть, но при этом стоимостные показатели не анализируются;

ни в одном из указанных литературных источников не придается значение выбросам, образующимся при эксплуатации системы;

вероятности отказа генерирующей установки и время готовности возобновляемого источника подключиться к работе практически не обсуждаются;

ни в одной публикации не исследовалось влияние управления генерацией энергии на ТЭС и ее распределением на показатели эмиссии  $\text{CO}_2$ .

Таким образом, с учетом факторов, которые не были рассмотрены в перечисленных литературных источниках, были определены основные функции, которые должна выполнять гибридная система:

управление не только генерацией и распределением энергии, но и с помощью технических средств снижением выбросов  $\text{CO}_2$ ;

формирование условий, способствующих внедрению возобновляемых источников энергии на традиционных ТЭС;

посредством интеллектуального контроллера управление генерацией энергии и ее распределением с помощью набора правил с функциями принадлежности нечетких множеств;

возможность применять коэффициент выбросов  $\text{CO}_2$ , рассчитанный для конкретной ТЭС.

Цель настоящего исследования – разработка метода управления генерацией энергии и ее распределением без выбросов углекислого газа. Его (исследования) основные направления следующие:

расчет воздействия работы ТЭС на окружающую среду;

создание интеллектуального контроллера для управления генерацией энергии и ее распределением в гибридной системе с использованием функций принадлежности нечетких множеств;

использование на ТЭС коэффициента выбросов, прежде всего углекислого газа (так как он является одной из основных причин глобального потепления).

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В этом разделе описываются “технический маршрут” работы, структура LCA, а также подробно обсуждаются используемая система управления энергопотреблением и методология преобразования диоксида углерода или сокращения его эмиссии.

### *Технические решения*

Рассматривая сценарии изменения климата в мире, можно сказать, что именно ТЭС обуславливают повышение риска нанесения необратимого ущерба окружающей среде [21]. С учетом этого обстоятельства концепция LCA применяется для расчета воздействия ТЭС на состояние окружающей среды. После того как будет получена отрицательная оценка, в состав ТЭС будет включена новая энергетическая установка, в которой используется возобновляемый источник – солнечная энергия, для того чтобы уменьшить нагрузку как на ТЭС, так и на сети. При разработке гибридной системы возник вопрос: как управлять потоками энергии, генерируемой в обеих частях электростанции? Для этого на основе принципов нечеткой логики был разработан специальный контроллер. Однако при эксплуатации гибридной системы проблема, связанная с выбросами  $\text{CO}_2$ , остается все-таки нерешенной, так как ТЭС по-прежнему продолжает функционировать. Для устранения этой проблемы применяется технология улавливания углекислого газа, который в дальнейшем можно будет использовать для получения полезных продуктов.

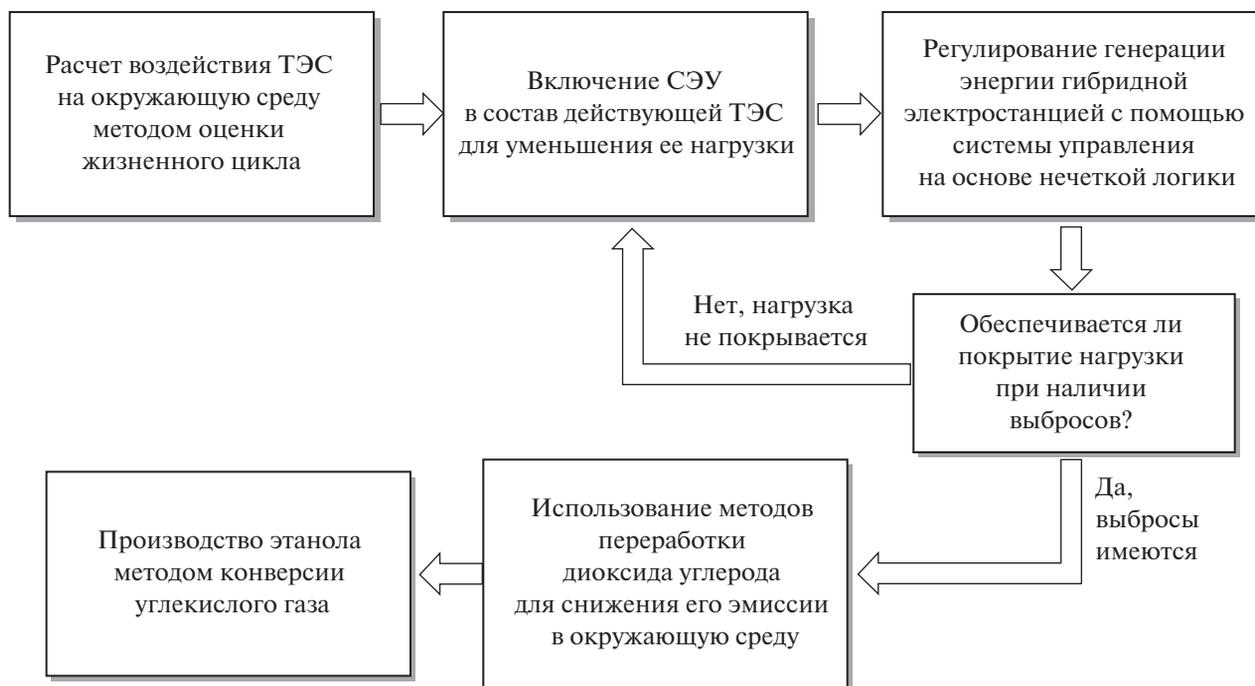


Рис. 3. Логическая структура работы гибридной солнечно-тепловой электростанции

Логическая структура проведенного исследования представлена на рис. 3. Так как цель настоящей работы – оценка выбросов CO<sub>2</sub> на ТЭС, постановка задачи включает в себя следующее соотношение (описывающее выбросы CO<sub>2</sub>):

$$CO_2(\text{total}) = F(C_{rec} - C)(44/12),$$

где CO<sub>2</sub>(total) – общее количество выбросов CO<sub>2</sub>, т/ч; F – суммарный расход топлива, т/ч; C<sub>rec</sub> – содержание углерода в рабочем топливе, %; C – общее количество несгоревшего углерода в виде летучей золы и зольного остатка; (44/12) – коэффициент массового баланса [22].

#### Структура оценки воздействия жизненного цикла

Оценка воздействия жизненного цикла включает в себя четыре этапа:

определение целей исследования и объема работы;

инвентаризация жизненного цикла (собираются все входные и выходные данные для выбранного технического задания);

собственно сама оценка воздействия жизненного цикла (устанавливаются категории воздействия на основе данных инвентаризации);

интерпретация (формируются выводы с учетом результатов всех трех предыдущих этапов).

Расчет воздействия ТЭС на окружающую среду проводится в соответствии со стандартами ISO 14040/14044 [23, 24]. В данном случае для анализа данных инвентаризации рассматривается весь производственный цикл от транспортировки угля до выработки электроэнергии. Сценарий окончания срока службы ТЭС здесь отсутствует.

#### Система управления генерацией и потреблением энергии

Анализ жизненного цикла ТЭС показал, что именно тепловые электростанции оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду. Поэтому ТЭС мощностью 6 МВт предложено объединить с солнечной энергоустановкой (СЭУ) мощностью 4 МВт, чтобы снизить нагрузку первой и уменьшить выбросы вредных веществ при эксплуатации ТЭС и сети. Предполагается, что передача части нагрузки солнечной энергоустановке позволит сократить эмиссию парниковых газов на ТЭС. Однако при этом возникает проблема: как распределить выработку электроэнергии между СЭУ и ТЭС для покрытия графика нагрузки? По этой причине была разработана система управления энергопотреблением для обеспечения устойчивой ритмичной работы гибридной станции.

Такая система управления создана на основе нечеткой логики: она схожа с человеческим мышлением, в ней используются языковые выражения

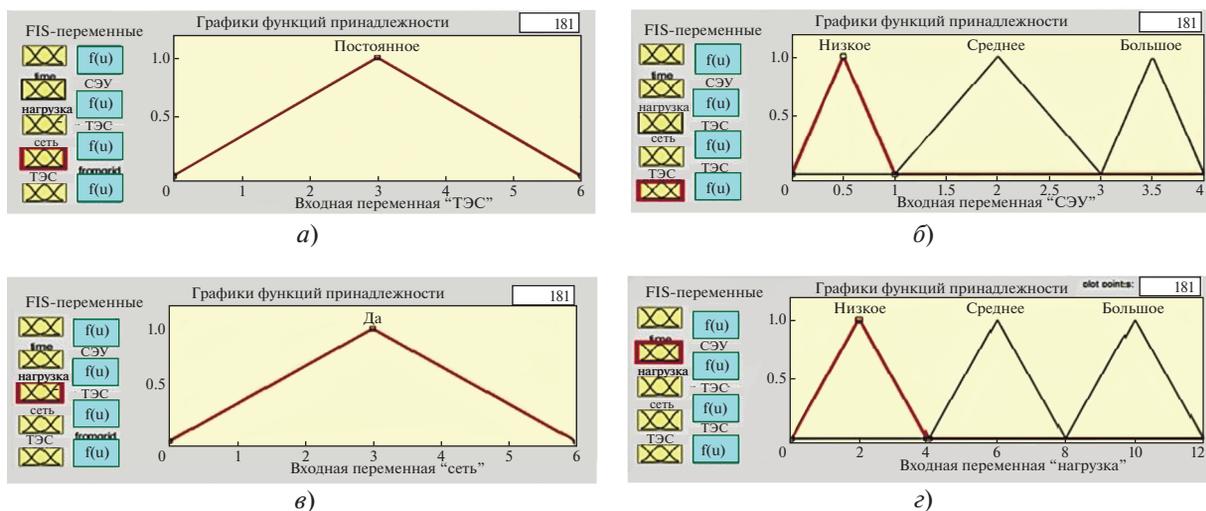


Рис. 4. Графическое представление различных функций принадлежности [переменные входные данные для ТЭС (а), солнечной энергоустановки (б), сети (в) и переменной нагрузки (г)]

в большей степени, чем классические логические системы [25]. Это позволяет преобразовать лингвистический подход к управлению, базирующийся на экспертных знаниях, в формализованный метод автоматического управления [26].

**Моделирование функций принадлежности нечетких множеств.** Функции принадлежности нечетких множеств представляют собой отображение входных данных в систему нечеткой логики [27], которая является многофункциональной системой с разветвленной логикой. Такая логика учитывает частичные условия ввода, которые находятся между значениями, определяющими тип функции принадлежности [28].

Функции принадлежности подразделяются на функции ввода и вывода и формируются таким образом, чтобы включать в себя всевозможные изменения вводимой информации. Функции принадлежности ввода охватывают тепловую мощность, мощность СЭУ, параметры сети и требуемую нагрузку в соответствии с графиком. В данном случае сеть используется для исключения влияния любых отказов гибридной электростанции.

Функция принадлежности для входных параметров ТЭС может иметь значение от 0 до 6. Разделение диапазонов для выходных параметров ТЭС не предусмотрено, так как они поддерживаются постоянными. Для входных параметров СЭУ функция принадлежности варьируется в диапазоне от 0 до 4, который подразделяется на поддиапазоны низкой (0–1), средней (1–3) и большой (3–4) мощности, поскольку мощность такой энергоустановки зависит от погодных условий. Для национальной электросети функция принадлежности соответствует значениям от 0 до 6. Как и для ТЭС, диапазон изменения входных параметров для сети остается неизменным.

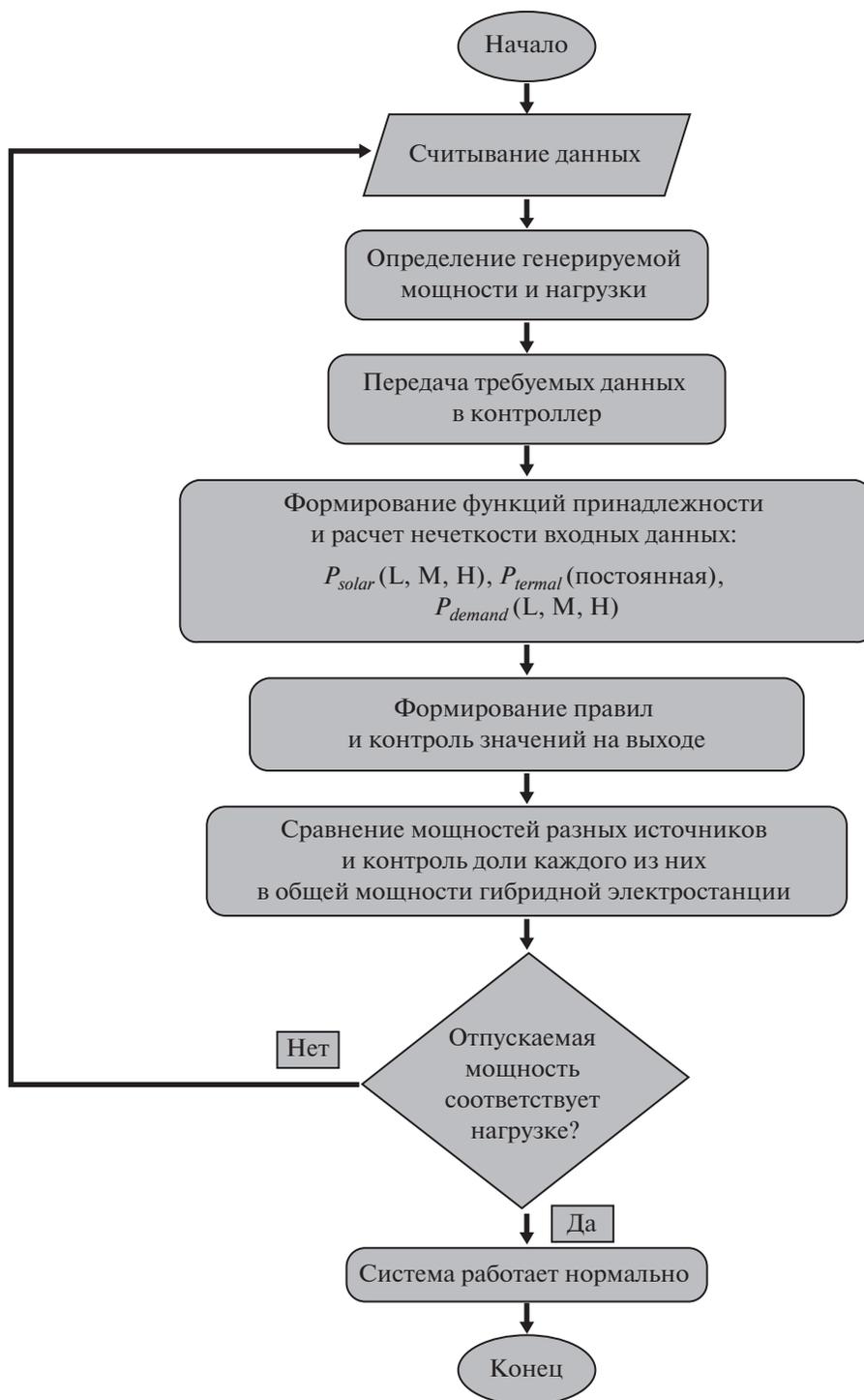
Наконец, для нагрузки диапазон составляет 0–12 и подразделяется на поддиапазоны низкой (0–4), средней (4–8) и большой (8–12) нагрузки.

Графическое представление входных переменных (функций принадлежности), а именно мощностей ТЭС, СЭУ, сети и нагрузки, дано на рис. 4.

Нечеткие множества могут перекрываться. Такое перекрытие указывает на неопределенность в участии элементов множества в следующем конкретном множестве. Принципиально важно отметить, что элемент нечеткого множества зависит от элемента некоторого другого нечеткого множества с некоторой степенью принадлежности. В зоне неопределенности нечеткое решение принимается на основе предыдущего поведения набора данных. Точки 1 и 3 (см. рис. 4, б, ось абсцисс) и точки 4 и 8 (см. рис. 4, г, ось абсцисс) являются точками перекрытия зон неопределенности средних значений и имеют следующие значения: точки 1, 4 – точки перекрытия зон низких и средних значений, точки 3, 8 – средних и больших значений.

В этих точках решение в нечетких условиях принимается в зависимости от наборов средних данных: если максимальные значения набора предварительных данных оказываются ниже точки 1 (см. рис. 4, б), то будет определено, что решение находится в зоне низких значений, а если выше точки 1 – в зоне средних значений. В том случае, если максимальные значения будут ниже точки 3 (см. рис. 4, б), то полагают, что решение соответствует зоне средних значений, а если выше точки 3 – то в зоне больших значений. Контроллер на основе нечеткой логики примет аналогичные решения для точек 4 и 8 (см. рис. 4, г).

**Управление и алгоритмы управления на основе нечеткой логики.** Применение систем и алгоритмов на основе нечеткой логики является одним из



**Рис. 5.** Блок-схема контроллера управления энергопотреблением.  
 Мощность:  $P_{solar}$  – СЭУ;  $P_{thermal}$  – ТЭС;  $P_{demand}$  – нагрузка; значение: L – низкое; M – среднее; H – высокое

наиболее успешных адаптивных методов решения проблемы управления энергопотреблением. Это обусловлено тем, что такой подход позволяет учесть многочисленные ограничения и задачи в качестве входных данных, чтобы обеспечить их соответствие реальным условиям эксплуатации [29].

На рис. 5 показана блок-схема алгоритма управления энергопотреблением.

После запуска системы сканируются все данные и определяются объем генерируемой энергии и требуемая нагрузка. Далее все полученные дан-

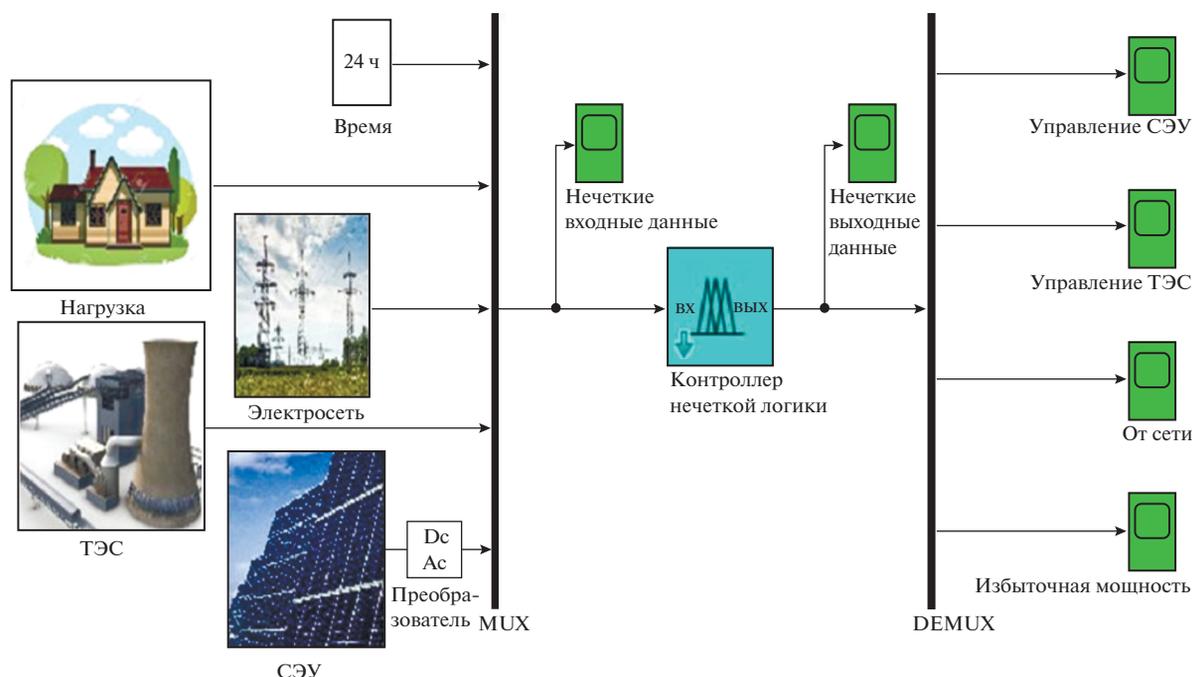


Рис. 6. Моделирование гибридной системы в целом в контроллере нечеткой логики

ные передаются в контроллер, который вводит все функции принадлежности и рассчитывает нечеткость всех входных данных. После завершения ввода в действие и практической реализации всех функций принадлежности контроллер проверяет выполнение всех правил и сравнивает выходные данные с источниками. Если входные данные по генерируемой мощности соответствуют требуемой нагрузке, система будет действовать правильно, в противном случае процесс управления повторится с начала.

На рис. 6 показана структурная схема, смоделированная с помощью набора прикладных программ для построения и анализа нечетких множеств из программного пакета MATLAB. В разработанной системе управления энергопотреблением используются пять входных данных: тепловая мощность ТЭС, мощность СЭУ и сети, нагрузка и время. Эти входные данные содержат всю информацию, необходимую для обеспечения эффективного функционирования гибридной электростанции. Контроллер управления энергопотреблением на основе нечеткой логики принимает решение о выборе источника энергии в зависимости от поступающих входных данных; он создан на основе набора правил, которые позволяют учесть все возможные условия эксплуатации.

Начальные операции обработки данных показаны на блок-схеме (см. рис. 5) и включают свод из 12 правил, обеспечивающих эффективное выполнение алгоритма. В этих правилах предусмот-

рены все вероятные условия эксплуатации, чтобы система управления функционировала точно и эффективно. Наборы правил разработаны с учетом всех возможных сочетаний больших, средних и низких значений входных параметров и очень низких, средних, больших и очень больших значений выходных параметров. Комбинации правил составлены путем формирования функций принадлежности с помощью набора прикладных программ для построения и анализа нечетких множеств. Эти комбинации представлены на рис. 7. Функции принадлежности имеют вид треугольников (см. рис. 7) и для выходных параметров принимают значение логического минимума, а используемый метод называется методом минимакса. Для восстановления четкости применяют метод центра тяжести, который отличается простотой и быстротой нахождения решения.

В концепции нечеткой логики выбор методов — сложная и трудновыполнимая задача. Наиболее популярными являются алгоритм Мамдани и алгоритм Сугено. Первый из них очень удобен и позволяет просто и легко выполнять вычисления, а второй используется с несколькими системами вывода [27]. Поэтому в настоящей работе применяется алгоритм Сугено. Свод правил представлен в графическом виде на рис. 7.

Есть пять входных функций принадлежности, которые находятся в диапазонах L, M и H, и четыре выходные функции принадлежности — в диапазонах VL, L, M, H и VH (VL — очень низкое значе-

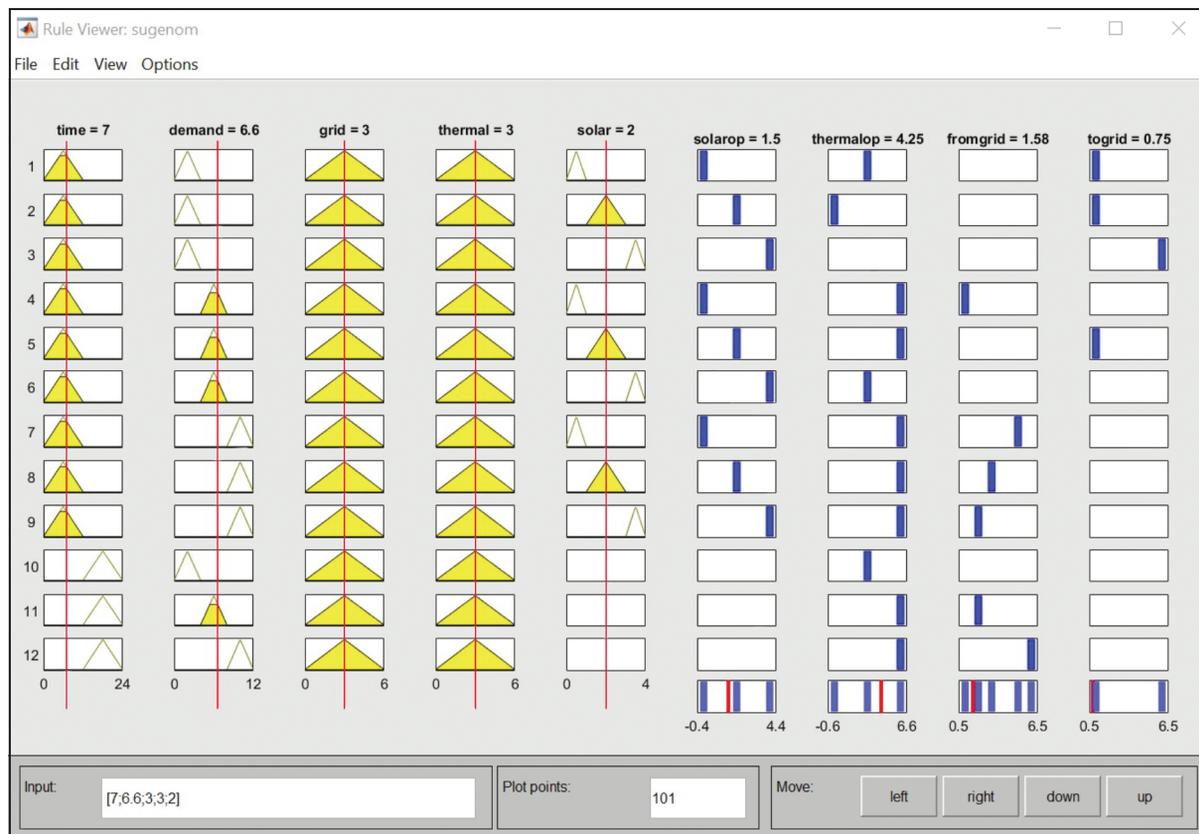


Рис. 7. Набор правил контроллера нечеткой логики

ние, L – низкое значение, M – среднее значение, H – большое значение, VH – очень большое значение). Предполагается, что требуемая нагрузка по графику – переменный параметр, который определяется ежечасно в течение суток (24 ч). Время ограничено дневным и ночным периодами в зависимости от имеющихся ресурсов. На рис. 7 показаны 12 правил нечеткой логики, обеспечивающих нормальную работу системы управления энергопотреблением. Правила 1–9 действуют с 6:00 до 18:00, правила 10–12 – с 18:00 до 6:00. В каждом случае вводимые входные параметры ТЭС и электросети принимаются постоянными. Далее приводится описание всех 12 правил.

**Правило 1.** Входные данные: низкие нагрузка и мощность СЭУ; выходные данные: низкие мощности СЭУ и ТЭС и отпуск очень небольшой избыточной мощности в сеть.

**Правило 2.** Входные данные: низкая нагрузка и средняя мощность СЭУ; выходные данные: средняя мощность СЭУ, низкая мощность ТЭС и отпуск очень небольшой избыточной мощности в сеть.

**Правило 3.** Входные данные: низкая нагрузка и большая мощность СЭУ; выходные данные: высокая мощность СЭУ и ТЭС, отпуск очень боль-

шой мощности в сеть для обеспечения нормального покрытия нагрузки.

**Правило 4.** Входные данные: средняя нагрузка и низкая мощность СЭУ; выходные данные: низкая мощность СЭУ, большая мощность ТЭС и отпуск очень небольшой мощности из сети для покрытия нагрузки.

**Правило 5.** Входные данные: средняя нагрузка и средняя мощность СЭУ; выходные данные: средняя мощность СЭУ, большая мощность ТЭС, отпуск очень небольшой мощности в сеть для обеспечения нормального покрытия нагрузки.

**Правило 6.** Входные данные: средняя нагрузка и большая мощность СЭУ; выходные данные: большая мощность СЭУ, средняя мощность ТЭС и отсутствие отпуска мощности в сеть и получения мощности из сети для обеспечения нормального покрытия нагрузки.

**Правило 7.** Входные данные: большая нагрузка и низкая мощность СЭУ; выходные данные: низкая мощность СЭУ, большая мощность ТЭС, получение большой мощности из сети для покрытия нагрузки.

**Правило 8.** Входные данные: большая нагрузка и средняя мощность СЭУ; выходные данные: средняя мощность СЭУ, большая мощность

ТЭС, средняя мощность из сети для покрытия нагрузки.

Правило 9. Входные данные: большая нагрузка и большая мощность СЭУ; выходные данные: большие мощности СЭУ и ТЭС, низкая мощность из сети для покрытия нагрузки.

Правило 10. Входные данные: низкая нагрузка и отсутствие мощности СЭУ; выходные данные: отсутствие мощности СЭУ, средняя мощность ТЭС и отсутствие отпуска мощности в сеть и получения мощности из сети для обеспечения нормального покрытия нагрузки.

Правило 11. Входные данные: средняя нагрузка и отсутствие мощности СЭУ; выходные данные: отсутствие мощности СЭУ, большая мощность ТЭС, низкая мощность из сети для покрытия нагрузки.

Правило 12. Входные данные: низкая нагрузка и отсутствие мощности СЭУ; выходные данные: отсутствие мощности СЭУ, большая мощность ТЭС и очень большая мощность из сети для покрытия нагрузки.

Рассматриваются четыре входных параметра, два из которых имеют одну функцию принадлежности, а остальные два входных параметра – три функции принадлежности. Из двух значений функции принадлежности наибольшее значение равно 3. Установлено, что представленные 12 правил обеспечивают нормальное управление генерацией и распределением энергии при всех возможных условиях эксплуатации.

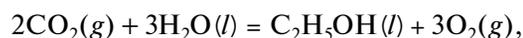
*Технология переработки углекислого газа как способ сокращения его выбросов в окружающую среду*

После решения задачи о соответствии мощности солнечно-тепловой электростанции требуемой нагрузке было установлено, что ТЭС по-прежнему выделяет парниковые газы. Одна из наиболее отработанных технологий сокращения выбросов ТЭС – улавливание диоксида углерода и его дальнейшее использование [30]. Так как выбросы  $\text{CO}_2$  являются основной причиной глобального изменения климата, их количество должно быть ограничено [31]. Технологии улавливания  $\text{CO}_2$  позволяют уменьшить его содержание в окружающей среде. Уловленный диоксид углерода может храниться до момента его преобразования в метанол, этанол и другие химические продукты в результате проведения различных каталитических реакций [32].

Далее представлен расчет выбросов диоксида углерода на ТЭС. Приведенные уравнения дают также представление о том, в каком количественном соотношении углекислый газ может быть преобразован в этанол. Обсуждается вопрос о

том, какое количество диоксида углерода выбрасывается на ТЭС мощностью 6 МВт.

Реакция получения этанола из диоксида углерода следующая:



где  $l$  и  $g$  обозначают жидкость и газ соответственно.

Масса диоксида углерода, произведенного на ТЭС мощностью 600 МВт, составляет 134.1 кг. Для ТЭС мощностью 1 МВт она равна 0.2235 кг, мощностью 6 МВт – 1.341 кг.

Формула этанола  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , элементный состав следующий:  $\text{C} = 52.5\%$ ,  $\text{H} = 13.0\%$ ,  $\text{O} = 34.8\%$ , молярная масса равна 46 г/моль ( $2 \times 12 + 6 \times 1 + 1 \times 16$ ). Для получения одной молекулы этанола требуется следующее количество элементов: 24 г углерода, 1 г водорода и 16 г кислорода.

Водород и кислород можно получить путем электролиза воды, используя мощность солнечной энергоустановки как составной части гибридной электростанции.

Масса 1 моль диоксида углерода равна 12.0107 г. Для справки, на ТЭС образуется 1341 г (1.314 кг)  $\text{CO}_2$ . Следовательно, общее количество диоксида углерода составляет  $1341 \times 12.0107 = 16\,106.34$  г/моль. Суммарное количество образующихся молекул этанола равно  $16\,106.34/24 = 671.09$  г/моль.

Для проведения реакции конверсии этанола требуются температура 200–500°C (традиционный процесс) и давление 4–6 МПа (стандартное). Но эти параметры зависят от типа катализатора, применяемого для конверсии диоксида углерода в этанол.

Чтобы нейтрализовать углекислый газ, содержащийся в выбросах ТЭС, его можно улавливать и преобразовывать в этанол. Последний может быть получен в биореакторе при предусмотренных температуре и давлении, которые зависят от типа используемого катализатора. В барботажных и аэролитных биореакторах этанол перерабатывается в материал, пригодный, например, для изготовления одежды. В предыдущих исследованиях были предложены различные методы нейтрализации углекислого газа, но, насколько известно авторам настоящей статьи, представленный здесь метод обсуждается впервые. Эта технология принесет значительную пользу окружающей среде.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *Анализ оценки жизненного цикла*

Для анализа воздействия на окружающую среду выбросов различных загрязняющих веществ рассматривается ТЭС мощностью 6 МВт [33]. Влияние выбросов проанализировано с помощью оценки воздействия жизненного цикла.

**Таблица 1.** Суммарное воздействие загрязняющих выбросов ТЭС на окружающую среду, приведенное к мощности 1 МВт

Категория	Генерируемая мощность	Транспортировка материала	Суммарная оценка воздействия
Изменение климата, кг CO <sub>2</sub> -экв.	134.100 00	119.200 00	253.300 00
Образование твердых частиц, кг частиц PM10 (экв.)	0.238 00	0.074 40	0.312 40
Фотохимическое окисление, кг NMVOC*	0.460 81	0.139 46	0.600 27
Загрязнение морской среды водорослями, кг N-экв.	0.155 60	0.046 68	0.202 28
Закисление почвы, кг SO <sub>2</sub> -экв.	0.974 00	0.307 20	1.281 20

\* NMVOC – единица фотохимического окисления.

**Таблица 2.** Входные данные для проведения исследования

Объект	Мощность, МВт	Источник информации
Солнечная энергоустановка	4	Данные по солнечному излучению заимствованы из базы данных NASA [34]
ТЭС	6	Теплотехнические характеристики угольной ТЭС определены по данным из работы [33]
Требуемая нагрузка	12	Прогнозируемые (теоретические) данные

Углекислый газ, выделяющийся при производстве энергии, образуется в основном при сжигании топлива на ТЭС. Так как в настоящей статье рассматривается оценка полного жизненного цикла, сценарий окончания срока службы ТЭС не учитывается. Показатели категорий влияния жизненного цикла определяются методом ReCiPe для общей средней точки.

В табл. 1 показано воздействие на состояние окружающей среды загрязняющих веществ, образующихся при эксплуатации ТЭС, среди которых наиболее высокий показатель имеют выбросы CO<sub>2</sub>. К последствиям изменения климата можно отнести глобальное потепление, изменение погодных условий и характера распределения осадков, повышение уровня моря, ускорение деградации почв и т.д.

Что касается подкисления почв, то оно вызвано воздействием оксидов серы и азота, входящих в состав загрязняющих веществ. Закисление почвы может нанести наибольший ущерб экосистеме и биоразнообразию. К фотохимическому окислению приводят оксиды углерода, диоксид серы, оксид азота и метан, содержащиеся в воздухе. Образование твердых частиц спровоцировано сульфатами, нитратами, органическими веществами, металлами, частицами почвы и пыли, которые также находятся в воздухе. Воздействие аммиака, азота и фосфора в составе воздуха может привести к эвтрофикации как пресных водоемов, так и

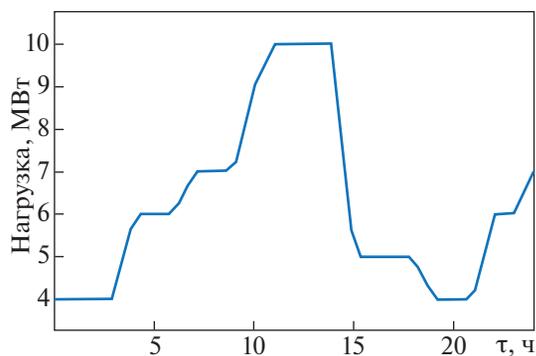
морей и полностью разрушить всю экосистему, если будет превышен некоторый предельный показатель [9]. В табл. 2 приведены входные данные, использованные в этой работе.

*Оценка характеристик системы управления и алгоритма управления, основанных на методах нечеткой логики*

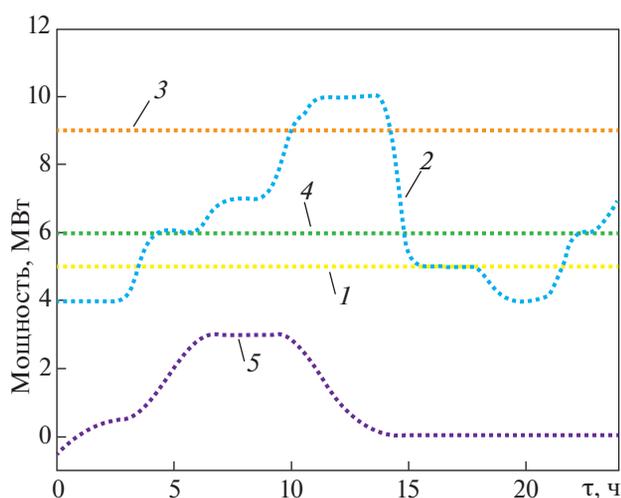
Для определения эффективности системы разработаны правила. Каждая функция принадлежности присваивается конкретному правилу. Эффективность оценивается по соответствию между нагрузкой и располагаемой генерируемой мощностью. Показано, что ТЭС, СЭУ и национальная сеть вместе покрывают всю нагрузку. Представленные результаты относятся к одной из упомянутых ранее логических комбинаций.

Информация по солнечному излучению получена для региона, указанного в [33]. Выходные данные заимствованы из располагаемых источников мощности, как показано в окне просмотра правил на рис. 7. Установлено, что гибридная солнечно-тепловая электростанция и сеть позволяют покрыть нагрузку. В ночное время, когда СЭУ не работает, большая часть нагрузки обеспечивается ТЭС и сетью.

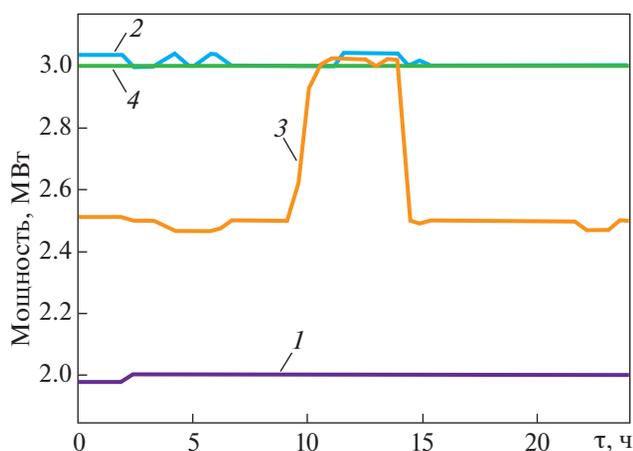
Суточный график нагрузки представлен на рис. 8. Она имеет максимум в дневное время, когда функционируют промышленные предприятия, фабрики, офисы и т.д. Входные данные для



**Рис. 8.** Суточный график нагрузки. Кривая построена по данным из справочной таблицы



**Рис. 9.** Входные данные контроллера. 1 — время; 2 — нагрузка; мощность: 3 — сети; 4 — ТЭС; 5 — СЭУ



**Рис. 10.** Выходные данные контроллера по мощности имеющихся источников. Мощность: 1 — СЭУ; 2 — ТЭС; 3 — сети; 4 — отпуск избытка мощности в сеть

контроллера, полученные по результатам моделирования, приведены на рис. 9. Видно, что ТЭС и сеть — это постоянно действующие источники мощности, а СЭУ не может вырабатывать электроэнергию в течение большей части суток, что вызвано исключительно малым объемом солнечного излучения в ночное время.

Данные по мощности на выходе из контроллера, полученные путем моделирования, представлены на рис. 10: в графическом виде показано потребление мощности, выработанной различными источниками, для покрытия требуемой нагрузки. Результаты моделирования свидетельствуют о необходимости постоянного потребления мощности из сети, так как энергетические ресурсы, имеющиеся в выбранном районе, недостаточны для покрытия нагрузки.

Таким образом, с учетом возможных изменений окружающей среды предлагаемая система должна получать больше мощности от установок на возобновляемых источниках энергии: биомассе, силе ветра и т.д., чтобы обеспечить потребителей энергией в необходимом объеме.

#### *Анализ технологии конверсии диоксида углерода для уменьшения его выбросов*

Согласно концепции конверсии  $\text{CO}_2$ , технологии его преобразования в химически иное вещество являются целесообразным решением. Его реализация позволит ограничить выбросы углекислого газа в окружающую среду, причем любая его утилизация окажется полезной как для окружающей среды, так и для общества. Из всех химических продуктов, которые можно получить из уловленного  $\text{CO}_2$ , наиболее востребованным для практического применения является этанол. Этанол можно использовать в медицине, пищевой, химической и других отраслях промышленности. Результаты расчетов, представленные в предыдущем разделе, показывают, что из 16 106.34 г диоксида углерода можно получить 671.097 г этанола.

Таким образом, с учетом возможности получения дополнительных продуктов при утилизации углекислого газа КПД солнечно-тепловой электростанции еще более возрастает.

## ВЫВОДЫ

1. Тепловые электростанции являются крупнейшим источником выбросов парниковых газов среди всех объектов электрогенерации. В настоящее время именно здесь требуется принять меры для снижения выбросов диоксида углерода в атмосферу. Поэтому для расчета негативного воздействия на окружающую среду, связанного с эмиссией загрязняющих веществ от ТЭС, используется метод оценки жизненного цикла. При применении этого метода было установлено, что

ЛСА оказывает на изменение климата и окружающую среду значительно большее влияние, чем другие факторы, из-за огромного количества выбрасываемого CO<sub>2</sub>. Более того, тепловая электростанция не в состоянии удовлетворить потребности в электрической мощности. Решение этой задачи зависит от централизованной (например, традиционной) электросети. Поэтому после расчета воздействия на окружающую среду методом оценки влияния жизненного цикла ТЭС и проверки графика ее нагрузки к ТЭС можно подключить СЭУ для уменьшения нагрузки на ТЭС и сети. Однако при создании гибридной солнечно-тепловой электростанции необходимо организовать четкое регулирование отпускаемой мощности от каждого источника в зависимости от их установленной нагрузки. Для решения этой задачи предлагается использовать контроллер, функционирующий на основе методов нечеткой логики.

2. Контроллер управления энергопотреблением на основе нечеткой логики обеспечивает постоянное взаимодействие гибридной электростанции и централизованной сети для покрытия требуемой нагрузки. Но, так как тепловая электростанция продолжает работать, выбросы загрязняющих веществ продолжают поступать в окружающую среду.

3. Для ограничения этих выбросов предложена технология конверсии диоксида углерода в химический продукт – этанол и выполнен расчет параметров этого процесса. В данном случае учитывается только CO<sub>2</sub>, так как он оказывает наибольшее негативное влияние на изменение климата. Полученный этанол может быть далее использован в медицине, пищевой, химической и других отраслях промышленности. Проводя преобразование диоксида углерода в этанол, можно сократить выбросы CO<sub>2</sub> не только от ТЭС, но и от многих других его источников.

4. В целом, предлагаемое решение по созданию гибридной солнечно-тепловой электростанции позволяет эффективно решить задачу покрытия нагрузки в соответствии с установленным графиком и ограничить выбросы загрязняющих веществ на ТЭС. Однако при увеличении нагрузки такая гибридная электростанция должна дополнительно поддерживаться другими источниками энергии, например возобновляемыми на основе биомассы, ветра и т.д., для обеспечения нормального покрытия графика нагрузки и выполнения требований по защите окружающей среды.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедр электротехники Университета Tripura за под-

держку и создание условий, необходимых для проведения исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **A systematic** literature review on hybrid energy system / U. Das, C. Nandi, S. Mandal, S. Bhattacharjee // *Energy Environ.* 2022. V. 34. Is. 8. P. 3417–3449. <https://doi.org/10.1177/0958305X221140576>
2. **Power Sector at a Glance ALL INDIA is correct.** [Электрон. ресурс.] <https://powermin.gov.in/en/content/power-sector-glance-all-india>
3. **Vulnerability** assessment of thermal power plants in India under water stress conditions / M.R. Panda, A. Tyagi, C.T. Dhanya, A. Verma, A. Swain // *Energy.* 2023. V. 276. P. 127553. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127553>
4. **Abdallah L., El-Shennawy T.** Reducing carbon dioxide emissions from electricity sector using smart electric grid applications // *J. Eng.* 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/845051>
5. **Life cycle** assessment and environmental cost accounting of coal-fired power generation in China / J. Wang, R. Wang, Y. Zhu, J. Li // *Energy Policy.* 2018. V. 115. P. 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.040>
6. **A streamlined** life cycle assessment of a coal-fired power plant: the South African case study / I. Dunmade, N. Madushele, P.A. Adedeji, E.T. Akinlabi // *Environ. Sci. Pollution Res.* 2019. V. 26. P. 18484–18492. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05227-6>
7. **Global CO<sub>2</sub> emission.** [Электрон. ресурс.] <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021>
8. **Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future** / Farahiyah Abdul Rahman, Md Maniruzzaman A. Aziz, R. Saidur, Wan Azelee Wan Abu Bakar, M.R. Hainin, Ramadhansyah Putrajaya, Norhidayah Abdul Hassan // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2017. V. 71. P. 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.011>
9. **Das U., Nandi C.** Life cycle assessment on onshore wind farm: An evaluation of wind generators in India // *Sustainable Energy Technol. Assess.* 2022. V. 53. Part C. P. 102647. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102647>
10. **Mohammadzadeh A., Rathinasamy S.** Energy management in photovoltaic battery hybrid systems: A novel type-2 fuzzy control // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2020. V. 45. Is. 41. P. 20970–20982. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.187>
11. **Energy** management in solar thermal power plants with double thermal storage system and subdivided solar field / A. Rovira, M.J. Montes, M. Valdes, J.M. Martínez-Val // *Appl. Energy.* 2011. V. 88. Is. 11. P. 4055–4066. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.036>

12. **Dimitroulis P., Alamaniotis M.** A fuzzy logic energy management system of on-grid electrical system for residential prosumers // *Electr. Power Syst. Res.* 2022. V. 202. P. 107621.  
<https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107621>
13. **Solar** thermal hybrids for combustion power plant: A growing opportunity / G.J. Nathan, M. Jafarian, B.B Dally, W.L. Saw, P.J. Ashman, E. Hu, A. Steinfeld // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2018. V. 64. P. 4–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.08.002>
14. **Bhattacharjee S., Nandi C.** Design of a voting based smart energy management system of the renewable energy based hybrid energy system for a small community // *Energy.* 2021. V. 214. P. 118977.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118977>
15. **Bi-objective** optimization of a grid-connected decentralized energy system / O. Altıntaş, B. Okten, O. Karsu, A.S. Kocaman // *Int. J. Energy Res.* 2018. V. 42. Is. 3. P. 447–465.  
<https://doi.org/10.1002/er.3813>
16. **Heuristic-based** programable controller for efficient energy management under renewable energy sources and energy storage system in smart grid / A. Imran, G. Hafeez, I. Khan, M. Usman, Z. Shafiq, A.B. Qazi, A. Khalid, K.D. Thoben // *IEEE Access.* 2020. V. 8. P. 139587–139608.
17. **Boosting** solar steam generation by structure enhanced energy management / Y. Wang, X. Wu, B. Shao, X. Yang, G. Owens, H. Xu // *Sci. Bulletin.* 2020. V. 65. Is. 16. P. 1380–1388.  
<https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.04.036>
18. **Hong I., Kang B., Park S.** Design and implementation of intelligent energy distribution management with photovoltaic system // *IEEE Trans. Consumer Electron.* 2012. V. 58. Is. 2. P. 340–346.  
<https://doi.org/10.1109/TCE.2012.6227432>
19. **Fuzzy** logic-based energy management system design for residential grid-connected microgrids / D. Arcos-Aviles, J. Pascual, L. Marroyo, P. Sanchis, F. Guinjoan // *IEEE Trans. Smart Grid.* 2016. V. 9. Is. 2. P. 530–543.  
<https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2555245>
20. **Wang L., Singh C.** PSO-based multi-criteria optimum design of a grid-connected hybrid power system with multiple renewable sources of energy // *Proc. of the IEEE Swarm Intelligence Symp. Honolulu, HI, USA,* 1–5 Apr. 2007.  
<https://doi.org/10.1109/SIS.2007.367945>
21. **Can** China realize its carbon emission reduction goal in 2020: From the perspective of thermal power development / L. Liu, H. Zong, E. Zhao, C. Chen, J. Wang // *Appl. Energy.* 2014. V. 124. P. 199–212.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.001>
22. **Life** cycle assessment of coal-fired power plants and sensitivity analysis of CO<sub>2</sub> emissions from power generation side / L. Yin, Y. Liao, L. Zhou, Z. Wang, X. Ma // *Proc. of the 2nd Asia Conf. on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2017).* Shanghai, China, 24–26 March 2017 // *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017. V. 199. P. 012055.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/199/1/012055>
23. **Guezuraga B., Zauner R., Pölz W.** Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines // *Renewable Energy.* 2012. V. 37. Is. 1. P. 37–44.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.008>
24. **Odeh N.A., Cockerill T.T.** Life cycle analysis of UK coal fired power plants // *Energy Convers. Manage.* 2008. V. 49. Is. 2. P. 212–220.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.014>
25. **Optimum** design of fuzzy controller using hybrid ant lion optimizer and Jaya algorithm / M. Azizi, S.A.M. Ghaseemi, R.G. Ejlali, S. Talatahari // *Artificial Intelligence Rev.* 2020. V. 53. P. 1553–1584.  
<https://doi.org/10.1007/s10462-019-09713-8>
26. **Mandi R.P., Yaragatti U.R.** Carbon emission reduction by improving performance of primary air fans in thermal power plants through energy conservation techniques // *Int. J. Environ. Eng.* 2016. V. 8. No. 1. P. 54–69.  
<https://doi.org/10.1504/IJEE.2016.078240>
27. **An approach** for parameterized shadowed type-2 fuzzy membership functions applied in control applications / P. Melin, E. Ontiveros-Robles, C.I. Gonzalez, J.R. Castro, O. Castillo // *Soft Computing.* 2019. V. 23. P. 3887–3901.  
<https://doi.org/10.1007/s00500-018-3503-4>
28. **An energy** management system for residential autonomous DC microgrid using optimized fuzzy logic controller considering economic dispatch / S. Al-Sakkaf, M. Kassas, M. Khalid, M.A. Abido // *Energies.* 2019. V. 12. Is. 8. P. 1457.  
<https://doi.org/10.3390/en12081457>
29. **Zangeneh M., Aghajari E., Forouzanfar M.** Fuzzy membership function selection in electrical systems: A review // *J. Novel Res. Smart Power Syst.* 2020. V. 8. Is. 3. P. 13–25.
30. **Ravikumar D., Keoleian S., Miller G.** The environmental opportunity cost of using renewable energy for carbon capture and utilization for methanol production // *Appl. Energy.* 2020. V. 279. P. 115770.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115770>
31. **A review** of different configuration of hybrid energy systems with case study analysis / U. Das, S. Mandal, S. Bhattacharjee, C. Nandi // *Int. J. Environ. Sustainable Dev.* 2022. V. 21. No. 1/2. P. 116–137.  
<https://doi.org/10.1504/IJESD.2022.119387>
32. **Cesium-induced** active sites for C–C coupling and ethanol synthesis from CO<sub>2</sub> hydrogenation on Cu/ZnO (000 $\bar{1}$ ) surfaces / X. Wang, P.J. Ramirez, W. Liao, J.A. Rodriguez, P. Liu // *J. Am. Chem. Soc.* 2021. V. 143. Is. 33. P. 13103–13112.  
<https://doi.org/10.1021/jacs.1c03940>
33. **Life** cycle assessment of a cleaner supercritical coal-fired power plant / R. Rasheed, H. Javed, A. Rizwan, F. Sharif, A. Yasar, A.B. Tabinda, S.R. Ahmad, Y. Wang, Y. Su // *J. Cleaner Prod.* 2021. V. 279. P. 123869.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123869>
34. **The POWER** Project. [Электрон. ресурс.] <http://power.larc.nasa.gov/>

## Processing Carbon Dioxide Into Ethanol based on Thermal Energy Supported by Solar Energy

U. Das<sup>a</sup>, T. H. Dar<sup>a</sup>, and C. Nandi<sup>a</sup>, \*

<sup>a</sup> Department of Electrical Engineering, Tripura University, Agartala, Tripura, 799022 India

\*e-mail: chmpnandi@gmail.com

**Abstract**—The thermal power plant recognized as the most pollutants emitted power plant in the world. The use of the solar systems is essential for reducing carbon emissions from thermal power plants. Such hybrid systems need a skillful energy management technology as well as incorporation of carbon conversion technology that will help to run the system expertly to maintain the power generation-demand balance and make the thermal plant more cleaner than before respectively. This work describes a fuzzy logic-based energy management system for a thermal-solar hybrid system and a carbon conversion technology to convert the captured carbon into the chemical products after calculating the environmental impact of a stand-alone thermal power plant through life cycle assessment (LCA) tool. The results of a case study demonstrate that the suggested schemes are feasible, effective and environmentally acceptable. Thermal-solar-based hybrid power plant can work environmentally harmlessly if the carbon produced from the plant is converted into the chemical product.

*Keywords:* thermal-solar hybrid power plant, energy management controller, carbon conversion technology, fuzzy logic approach, environment