

УДК 621.311.26

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-65-76

Оценка и выбор гибридной энергетической системы для малых сельскохозяйственных ферм

Хе Хайян, М.Г. Тягунов, Ту Рейн Мин

На основе производственной схемы энергопотребления и состояния природных ресурсов типичных малых ферм создана комплексная система оценки эффективности «зелёных» гибридных энергетических систем для малых ферм и определён метод оценки. На примере небольшой фермы в южном Китае разработаны шесть различных структур «зелёных» гибридных энергетических систем. Выполнено сравнение схем с помощью методов аналитического иерархического процесса и TOPSIS. Показано, что оптимальная гибридная энергетическая система полностью и эффективно использует природные ресурсы и отходы на территории фермы, обладает значительными экономическими и экологическими преимуществами по сравнению с альтернативными решениями.

Ключевые слова: гибридная энергетическая система, комплексное преимущество, система оценки, аналитический иерархический процесс, ферма.

Для цитирования: Хе Хайян, Тягунов М.Г., Ту Рейн Мин. Оценка и выбор гибридной энергетической системы для малых сельскохозяйственных ферм // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 65—76. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-65-76.

Assessment and Selection of a Hybrid Energy System for Small Agricultural Farms

He Haiyang, M.G. Tyagunov, Thu Rein Min

A comprehensive system for evaluating the efficiency of green hybrid energy systems for small farms on the basis of the production pattern, energy consumption, and state of natural resources in typical small farms is elaborated, and a method for carrying out the assessment is defined. Six different structures of green hybrid energy systems are developed taking a small farm in southern China as an example. The developed energy system structures are compared using the analytic hierarchy process (AHP) and TOPSIS methods. It has been shown that the optimal hybrid energy system can fully and efficiently utilize the natural resources and wastes on the farm territory, and features significant economic and environmental advantages in comparison with alternative solutions.

Key words: hybrid energy system, integrated advantage, evaluation system, analytic hierarchy process, farm.

For citation: He Haiyang, Tyagunov M.G., Thu Rein Min. Assessment and Selection of a Hybrid Energy System for Small Agricultural Farms. Bulletin of MPEI. 2023;1:65—76. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-65-76.

Введение

Сельское хозяйство — важный сектор национальной экономики и базовая отрасль, обеспечивающая человека продовольствием и промышленными средствами производства [1].

В современном обществе, особенно с развитием промышленных технологий, все аспекты сельскохозяйственного производства претерпели огромные изменения, которые отразились в:

- повсеместной замене сил человека и животных механическими и электрическими системами;
- уменьшении количества людей, занятых исключительно в сельском хозяйстве, и увеличении числа молодых специалистов, переезжающих в города без навыков сельскохозяйственного производства;
- смене семейной модели сельскохозяйственного производства малыми фермерскими хозяйствами;
- трансформации фермерских хозяйств от выращивания монокультур к развитию гибридного сельско-

го хозяйства с интегрированным растениеводством и земледелием, агротуризмом и др., которое постепенно становится важным источником дохода для фермеров.

Стремительное развитие гибридного сельского хозяйства привело к увеличению спроса на энергию в этой отрасли. В настоящее время, с одной стороны, цены на оборудование для производства электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) быстро снижаются, а установленная мощность устройств на базе ВИЭ наоборот растёт. С другой стороны, общество стремится к чистому, низкоуглеродному и устойчивому развитию производства, а электроэнергия является ключевым видом энергии, который следует рассматривать в рамках энергетического перехода, благодаря своей эффективной передаче, широкому спектру применения и чистым и простым в использовании характеристикам [2]. Интеграция ВИЭ в комплексное энергопотребление фермерских хозяйств позволит, с одной стороны, эффективно использовать природные ресурсы фермы, снизить выбросы углерода

и повысить чистоту фермы, а с другой — уменьшить стоимость энергопотребления на ней. Для проектов, связанных с передачей выработанной энергии в сети, это позволит принести ферме доход от продажи электроэнергии. Таким образом, изучение «зелёных» гибридных энергетических систем на фермах имеет большое значение для оптимизации и преобразования энергетических структур хозяйств, повышения доходов и улучшения условий производства и проживания.

Принципы проектирования энергетических систем для малых ферм

При проектировании энергетических систем малых ферм следует внимательно изучить их уникальные характеристики энергопотребления, которые могут стать основой для выбора характеристик генерирующих источников.

На ферме используется электрическая, тепловая, механическая и другие виды энергии.

Электричество получают от электросети и в меньшей степени от собственного энергогенерирующего оборудования (дизельных генераторов).

Тепло идет от процесса сжигания угля, соломы, древесины и т. д. в индивидуальных котельных, и в меньшей степени — от электронагревателей и кондиционеров.

Холод извлекают из холодильного оборудования, (кондиционеров и холодильников), работающих на электроэнергию, потребляемой из сети.

В настоящее время чистая энергия, производимая солнечными фото- и термо- (СФЭС и СТЭС), ветряными (ВЭС) электростанциями стала экономически конкурентоспособна. Затраты на ее производство значительно снизились [3].

С учётом энергопотребления и состояния природных ресурсов хозяйства, его производственной структуры проектирование и строительство «зелёной» гибридной энергетической системы для малых фермерских хозяйств основывается на следующих принципах:

- эффективном использовании природных ресурсов;
- характере сельскохозяйственной продукции, возможности повышения уровня повторного использования сельскохозяйственных отходов, в том числе для выработки энергии;
- энергетической безопасности и моделей энергоснабжения предприятия, в которых многочисленные источники энергии дополняют друг друга;
- снижении затрат на потребление энергии.

Создание и оценка метода комплексной системы оценки «зелёной» гибридной энергетической системы для малых ферм

Система оценки «зелёной» гибридной энергетической системы для малых ферм. В силу особого географического положения, специфической произ-

водственной структуры и уникальной системы экологического цикла комплексное использование энергии на малых фермах имеет ярко выраженные индивидуальные особенности. Для комплексного использования энергии на предприятиях рассматриваемой формы следует проанализировать следующие аспекты.

Состояние использования природных ресурсов: наличие и степень использования ветровых, солнечных, гидроэнергетических и иных природных ресурсов в районе расположения фермы.

Вторичное использование ресурсов и отходов, под которыми понимаются ресурсы, неиспользуемые в ходе фермерской деятельности помимо производства основной и дополнительной продукции (навоз животных, стебли и листья растений, остающиеся после сбора урожая овощей и фруктов и т.д.). Тип и количество отходов тесно связаны со структурой и масштабами сельскохозяйственной отрасли.

Гарантия энергоснабжения. Надёжность энергоснабжения фермы относится к области, в которой гарантируется возможность использования энергии на производстве.

Воздействие процесса использования энергии на окружающую среду, которое, в основном, относится к типам загрязняющих веществ, образующихся в процессе использования энергии, и их количестве, выбрасываемом в окружающую среду.

Доход от продажи энергии. У подключённых к сети ферм возникает как дефицит энергии, выработанной собственными генераторами (неизбежно приводит к ее нехватке, когда энергию необходимо покупать извне), так и избыток (от собственной энергосистемы фермы, может быть продан для получения дохода).

Для неподключённых к сети ферм доход от продажи энергии отсутствует. Обеспечение надёжности энергоснабжения ложится на систему накопления энергии, поглощающую избыток и выдающую накопленную энергию при ее недостатке.

Выбраны репрезентативные ключевые показатели использования энергии для комплексной оценки «зелёных» гибридных энергетических систем на малых фермах (табл. 1).

Как следует из табл. 1, комплексная система показателей оценки содержит пять типов показателей и шестнадцать индексных элементов.

Показатели использования природных ресурсов.

Если используется определённый тип природного ресурса (ветро- и гидроэнергетические, солнечная радиация и др.), то его значение равно 1, в противном случае — 0.

Показатели повторного использования отработанных ресурсов. К ним относят коэффициент повторного использования отработанных ресурсов (коэффициент ПИОР) и доход от повторного использования отработанных ресурсов (доход ПИОР).

Таблица 1

Комплексная система показателей оценки для «зелёных» гибридных энергетических систем на малых фермах

Слой		
целевой	критериальный	индексный
Комплексная система оценки зеленой гибридной энергетической системы для малых ферм	B1. Показатели использования природных ресурсов	C1. Ветроэнергетические ресурсы
		C2. Ресурсы солнечной радиации
		C3. Гидроэнергетические ресурсы
		C4. Иные природные ресурсы
	B2. Показатели повторного использования отработанных ресурсов	C5. Коэффициент ПИОР
		C6. Доход ПИОР
	B3. Технические показатели	C7. Коэффициент потерь электроэнергии
		C8. Коэффициент нехватки электроэнергии
		C9. Доля ВИЭ
	B4. Экономические показатели	C10. Начальный капитал
		C11. Стоимость Э и О
		C12. Стоимость ЕЭЭ
	B5. Экологические показатели	C13. Выбросы парниковых газов
		C14. Выбросы токсичных и вредных газов
		C15. Выбросы сажи и твердых частиц
		C16. Выбросы конечных твердых и жидких отходов

Коэффициент повторного использования отработанных ресурсов — показатель, характеризующий эффективность использования отработанных ресурсов на фермах.

$$\omega_{\text{от.рес.ис}} = \frac{S_{\text{от.рес.ис}}}{S_{\text{от.рес.сум}}} \cdot 100\%,$$

где $\omega_{\text{от.рес.ис}}$ — коэффициент использования отработанных ресурсов, %; $S_{\text{от.рес.ис}}$ — количество повторно использованных ресурсов, кг/год; $S_{\text{от.рес.сум}}$ — общее количество отработанных ресурсов, кг/год.

Доход от повторного использования отработанных ресурсов связан с количеством и ценой единицы повторно использованных ресурсов:

$$O_{\text{от.рес.ис}} = P_{\text{от.рес.цена}} \cdot S_{\text{от.рес.ис}},$$

где $O_{\text{от.рес.ис}}$ — доход от повторного использования ресурса, юань/год; $P_{\text{от.рес.цена}}$, $S_{\text{от.рес.ис}}$ — цена (юань/кг/год) и количество (кг/год) единицы повторно использованного ресурса.

Технические показатели. К ним относят коэффициент потерь и нехватки электроэнергии и долю ВИЭ.

Коэффициент потерь электроэнергии характеризует долю потерянной электроэнергии от ее общего количества, произведённого гибридной энергетической системой.

$$f_{\text{лиш}} = \frac{E_{\text{лиш}}}{E_{\text{сист}}} \cdot 100\%,$$

где $f_{\text{лиш}}$ — коэффициент потерь электроэнергии, %; $E_{\text{лиш}}$ — количество потерянной электроэнергии, кВт·ч/год;

$E_{\text{сист}}$ — общее количество электроэнергии, выработанной гибридной энергетической системой, кВт·ч/год.

Коэффициент нехватки электроэнергии — важный показатель надёжности гибридной энергетической системы, определяющий долю неудовлетворённого спроса из-за недостаточного электроснабжения к общему потребительскому спросу. Чем меньше коэффициент нехватки электроэнергии, тем выше надёжность гибридной энергетической системы:

$$f_{\text{недост}} = \frac{E_{\text{недост}}}{E_{\text{спрос}}} \cdot 100\%,$$

где $f_{\text{недост}}$ — коэффициент потерь электроэнергии, %; $E_{\text{недост}}$, $E_{\text{спрос}}$ — недопоставленная и потребленная электроэнергия, кВт·ч/год.

Доля ВИЭ — отношение доли выработки электроэнергии на базе ВИЭ в гибридной энергетической системе к общему производству электроэнергии в энергетической системе:

$$f_{\text{ВИЭ}} = \left(1 - \frac{E_{\text{невозобн}}}{E_{\text{сист}}} \right) \cdot 100\%,$$

где $f_{\text{ВИЭ}}$ — доля ВИЭ, %; $E_{\text{невозобн}}$, $E_{\text{сист}}$ — общее количество электроэнергии, произведённой невозобновляемыми компонентами и гибридной энергетической системой, кВт·ч/год.

Экономические показатели.

К ним относят начальный капитал, стоимость эксплуатации и обслуживания (стоимость Э и О) и единицы электроэнергии (стоимость ЕЭЭ).

Стоимость единицы электроэнергии соотносится со стоимостью производства 1 кВт·ч полезной электрической энергии в гибридной энергетической системе:

$$COE = C_{\text{год}} / E_{\text{полез.эл}},$$

где $C_{\text{год}}$ — приведённая стоимость годовой стоимости гибридной энергетической системы, юань/год; $E_{\text{полез.эл}}$ — годовое эффективное производство электроэнергии гибридной энергетической системой, кВт·ч/год.

Экологические показатели.

К ним относят выбросы парниковых, токсичных и вредных газов, сажи и твёрдых частиц (PM), конечных твёрдых и жидких отходов. В области сельскохозяйственного производства распространены диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4) и т.д. К токсичным и вредным газам относят монооксид углерода (CO), диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), сероводород (H_2S) и др.

Метод и процесс оценки «зелёной» гибридной энергетической системы для малых ферм.

На основе созданной системы оценки «зелёной» гибридной энергетической системы для малых ферм разработано несколько схем в соответствии с условиями природных ресурсов района, где расположено предприятие, и его энергопотреблением. Затем с помощью программного обеспечения HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) для моделирования процесса энергопотребления фермы получены оперативные данные, рассчитаны веса каждого показателя в системе оценки с помощью метода аналитического иерархического процесса (АИП) и использован метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) для ранжирования каждой схемы, из которых выбрана схема проектирования «зелёной» гибридной энергетической системы для ферм с наилучшими общими показателями.

АИП — метод субъективного взвешивания, использующий «метод девяти шкал», то есть числа от 1 до 9-и указывают на относительную важность показателей: чем выше важность, тем выше значение. Данный метод обычно используют эксперты для оценки показателей на основе собственного опыта, а затем рассчитывают весовое значение каждого показателя [4]. Общие шаги применения метода АИП следующие.

Шаг 1. Анализ атрибутов каждого элемента в системе индексов и построение аналитической иерархической структуры.

Шаг 2. Применение «метода девяти шкал» для создания матрицы суждений.

Шаг 3. Вычисление весового вектора.

Шаг 4. Тест на согласованность для определения весов показателей.

Метод TOPSIS — метод ранжирования, приближающий идеальное решение. Он сортирует, в соответствии с близостью ограниченной схемы, оценки идеализированной цели, а также оптимизирует и выбирает их в существующей схеме. Общие шаги следующие [5].

Шаг 1. Построение матрицы оценок.

Шаг 2. Определение и стандартизация показателей оценки на основе атрибутов.

Шаг 3. Расчёт взвешенной стандартизации (в настоящей работе веса каждого показателя, рассчитанные методом АИП, умножены на матрицу стандартизации из шага 2).

Шаг 4. Определение наилучших и наихудших решений.

Шаг 5. Вычисление расстояния между каждой расчётной схемой до наилучшего и наихудшего решений.

Шаг 6. Поиск оптимальной расчётной схемы по максимуму или минимуму коэффициентов близости между расчётными схемами.

Пример использования предлагаемого метода

В качестве примера для иллюстрации процесса выбора схемы «зелёной» гибридной энергетической системы для малых ферм выбрана типичная ферма южного Китая.

Анализ структуры сельскохозяйственной отрасли, энергопотребления и состояния природных ресурсов фермы.

Структура сельскохозяйственной отрасли. Ферма расположена в горной деревне на юге Китая. Производство объединяет свиноводство, разведение кур и выращивание овощей в теплицах, причём поголовье свиней составляет 300 голов, кур — 3000 голов, количество теплиц — 5.

Согласно статистическим данным «Китайского сельскохозяйственного ежегодника 2016 года» и «Китайского ветеринарного ежегодника животноводства 2016 года», фекальные выделения 1 свиньи составляют 3,6 кг/день, а выделения мочи — 3,4 кг/день, при этом коэффициент сбора фекалий составляет 100%, а коэффициент сбора мочи — 18%; фекальные выделения 1 курицы — 0,1 кг/день, при этом коэффициент сбора фекалий — 94% [6]. Ферма вырабатывает 1080 кг/день свиного навоза, 1020 кг/день мочи и 300 кг/день куриного помета, из которых 1080 кг/день свиного навоза, 183,6 кг/день мочи, и 282 кг/день куриного помета могут быть переработаны. Опыт показывает, что 60% сухого вещества потребляется в процессе ферментации, а остальные 40% идут в дигестат (продукт, остающийся после анаэробного сбраживания биоразлагаемого сырья: осадки сточных вод, пищевых и органических отходов, отходов животноводства) (около 35%) и жидкие фракции (5%). В результате ферма производит 476,7 кг/день дигестата и 251,7 кг/день жидкого вещества. Дигестат и жидкое вещество используют в качестве первичного удобрения, которое может быть продано по цене 230 и 92 юаней за тонну.

Альтернативное использование — производство биогаза для последующего применения в энергосистеме фермы. Оценка объёма производства биогаза по-

казала, что из навоза пяти свиней или 150 кур в день может быть выработан 1 м³ биогаза. Следовательно, производство биогаза на рассматриваемой ферме составит 80 м³/день.

Потребление энергии на ферме подразделяется на следующие области:

- электрическая энергия: электричество для племенного оборудования, освещения на свинофермах и птицефабриках, для насосного орошения и освещения при выращивании овощей, для электрификации жилых помещений фермы и т. д.

- тепловая энергия: отопление на свинофермах, птицефабриках и в овощных теплицах зимой.

- энергия холода: охлаждение требуется в летний период, когда температура на свиноводческих и птицеводческих фермах становится слишком высокой.

Для отопления используются угольные котлы, однако, в соответствии с современными требованиями экологического характера, они заменяются электрическими бойлерами.

Для охлаждения используются кондиционеры.

Таким образом, в основе энергетического потребления фермы лежит электрическая энергия.

Оценочно потребление электроэнергии на все потребности фермы составляет 196,38 кВт·ч/сут. или 71678,7 кВт·ч/год.

Природные ресурсы в районе расположения фермы.

Ферма расположена в посёлке Нюланг, город Тунжэнь, провинция Гуйчжоу, Китай. В указанном районе среднегодовая температура составляет 14,64 °С, среднегодовая скорость ветра — 2,82 м/с и среднегодовая интенсивность солнечной радиации — 3,03 кВт·ч/м²/день. Распределение температуры, скорости ветра и интенсивности солнечной радиации для каждого месяца показано на рис. 1 — 3.

Схемы проектирования «зелёной» гибридной энергетической системы на ферме.

На ферме есть предприятия по разведению свиней и кур. Навоз, производимый свиньями и курами в процессе выращивания, можно ферментировать для получения биогаза. Оставшаяся жидкость и остатки после ферментации используются в качестве удобрения для выращивания овощей на ферме, что позволяет эффективно перерабатывать отходы. Таким образом, производство электроэнергии на биогазе — необходимая опция при проектировании гибридной «зелёной» энергетической системы. С учетом наличия потенциала солнечной и ветровой энергии рассмотрим возможность сооружения на ферме ВЭС и СФЭС.

Для удовлетворения энергетических потребностей фермы создадим «зелёную» гибридную энергетическую систему, ядром которой станет электроэнергетическая система, а центральным компонентом генерации — биогазовая электростанция (БиоГЭС). Собственная энергетическая система фермы подключена к внешней электросети для обеспечения надёжности энергоснабжения и передачи избыточной электроэнергии, произведённой электроэнергетическими компонентами. Рассмотрены шесть схем данной энергетической системы (рис. 4). Для них с помощью метода АИП создана комплексная система оценки «зелёной» гибридной энергетической системы (рис. 5).

Использование программного обеспечения HOMER фирмы NREL моделирования гибридной энергетической системы минимизировало чистую приведённую стоимость электроэнергетической системы фермы, балансируя почасовой спрос на электричество и тепло потребителя с энергией, которую система, состоящая из различных генерирующих компонентов, может предоставить в каждый из 8760 часов в году [7].

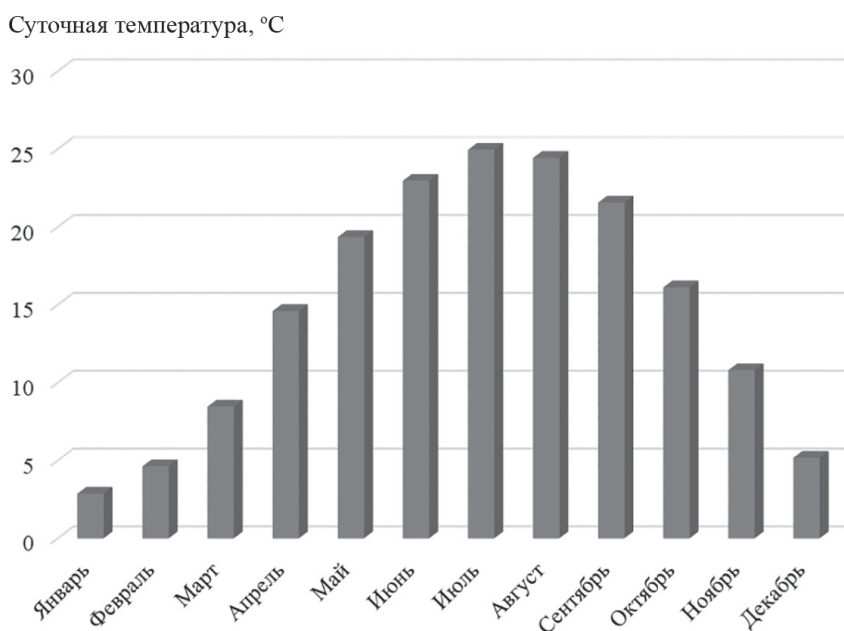


Рис. 1. Среднесуточная температура в разные месяцы в посёлке Нюланг

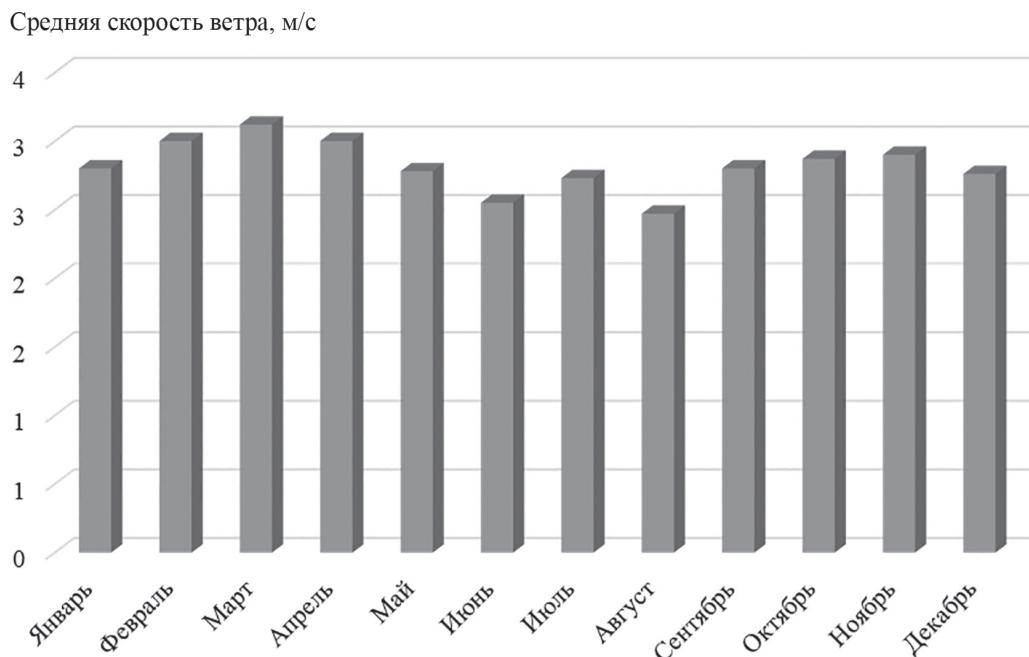


Рис. 2. Среднемесячная скорость ветра в посёлке Нюланг



Рис. 3. Среднемесячная солнечная радиация и индекс ясности в посёлке Нюланг

С помощью программного обеспечения HOMER для моделирования задан ряд начальных условий, приведённых в табл. 2.

Ферма подключена к внешней электросети. Цена продажи электроэнергии на основе ВИЭ установлена на уровне 0,547 юаня/кВт·ч, а цена покупки фермой электроэнергии из внешней электросети — 0,905 юаня/кВт·ч.

Расчётный жизненный цикл гибридной энергетической системы — 20 лет, процентная ставка составляет 8%, а уровень инфляции — 2%. При расчёте

компонентов производства электроэнергии на биогазе учтена только стоимость БиоГЭС (не вошла стоимость метантенка — сооружения для анаэробной стабилизации осадков сточных вод, используемого на городских, промышленных и локальных очистных сооружениях, (чаще всего в нем сбрасывается осадок первичных отстойников или активный ил, или их смесь), оборудования для производства биогаза и т.д.)

Основное сырьё, необходимое для производства биогаза, поступает с ферм, поэтому стоимость сырья низкая. Устанавливаем цену на него на уровне 20 юаней

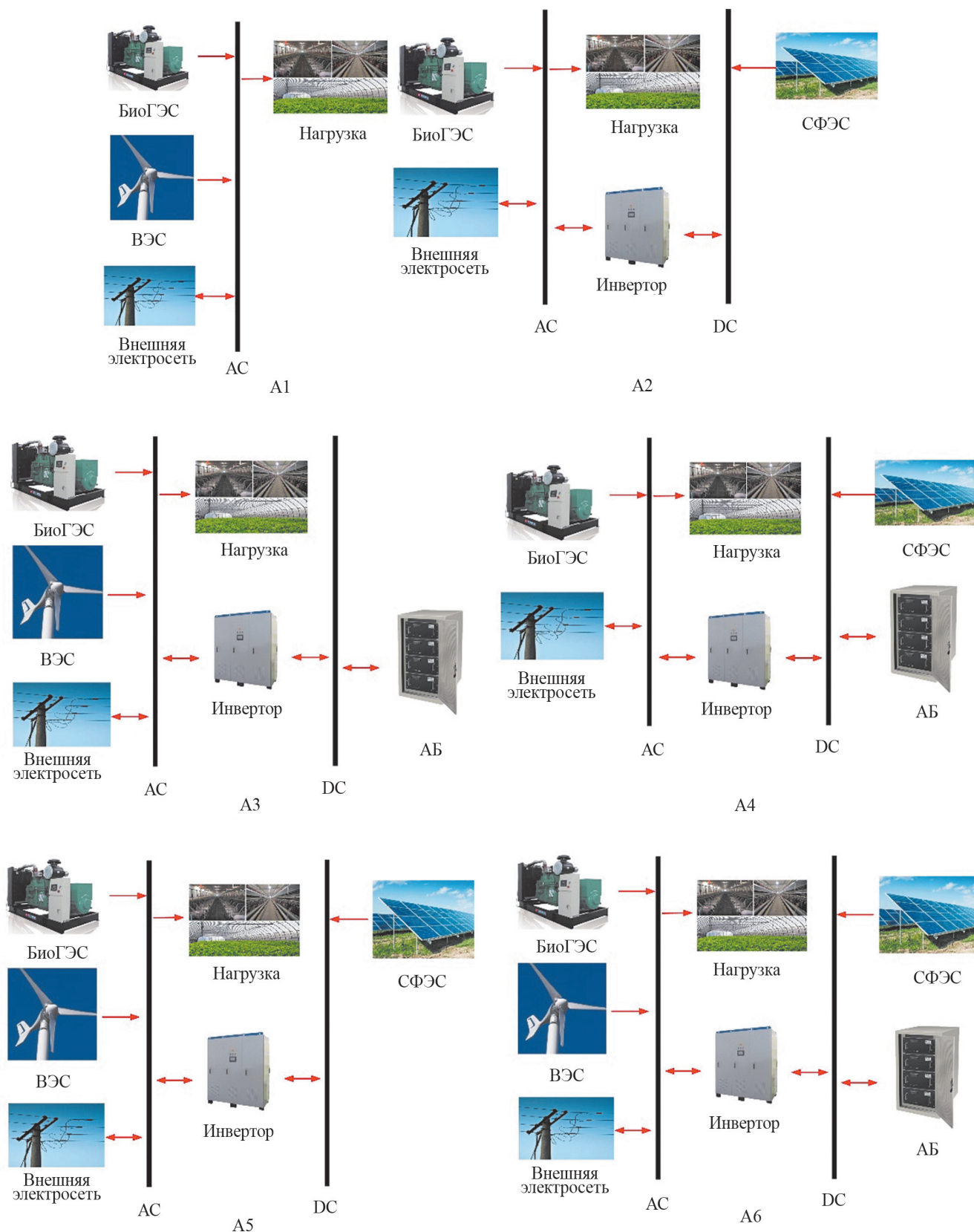


Рис. 4. Схемы проектирования «зелёной» гибридной энергетической системы на ферме:

A1 — ВЭС/Био-ГЭС/Электросеть; A2 — СФЭС/Био-ГЭС/Инвертор/Электросеть; A3 — ВЭС/Био-ГЭС/АБ/Инвертор/Электросеть; A4 — СФЭС/Био-ГЭС/АБ/Инвертор/Электросеть; A5 — ВЭС/СФЭС/Био-ГЭС/Инвертор/Электросеть; A6 — ВЭС/СФЭС/Био-ГЭС/АБ/Инвертор/Электросеть

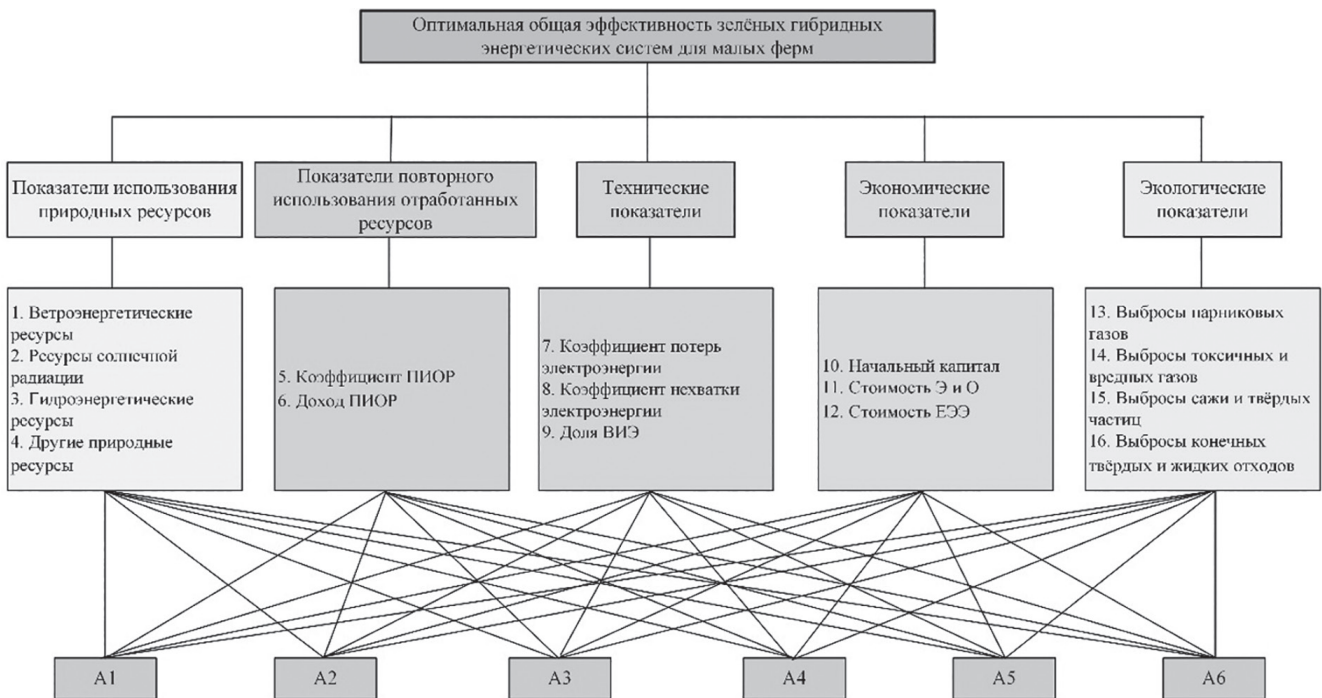


Рис. 5. Структура иерархического анализа «зелёной» гибридной энергетической системы для малых ферм

Таблица 2

Экономические и технические параметры каждого компонента «зелёной» гибридной энергетической системы на ферме

Параметр	БиоГЭС	ВЭС	СФЭС	АБ	Инвертор
Мощность	30 кВт	10 кВт	1 кВт	10 кВтч	1 кВт
Количество	1	Будет определено	Будет определено	Будет определено	Будет определено
Начальный капитал	1200 юаней/кВт	4500 юаней/кВт	3600 юаней/кВт	13000 юаней/шт.	370 юаней/кВт
Стоимость замещения	1160 юаней/кВт	4350 юаней/кВт	3600 юаней/кВт	13000 юаней/шт.	370 юаней/кВт
Стоимость Э и О	0,2 юаней/ч	2000 юаней/шт./год	50 юаней/кВт/год	700 юаней/шт/год	50 юаней/кВт/год
Срок службы	50000 ч	20 лет	25 лет	15 лет	15 лет

за тонну. Загрязняющие вещества, выделяющиеся при производстве биогаза, представлены в основном СО и NO_x, находящимися на уровне 2 г СО и 1,25 г NO_x на 1 кг потреблённого сырья. Количество выбросов загрязняющих веществ от внешней электросети показано в табл. 3 [8].

Таблица 3

Выбросы загрязняющих веществ из электросети, производящей 1 кВт·ч электрической энергии

Загрязнитель	Количество, г
CO ₂	997
SO ₂	30
NO _x	15
PM	272

Моделирование с помощью программного обеспечения HOMER позволило определить мощность каждого энергетического компонента гибридной энергосистемы фермы по шести схемам (табл. 4).

Расчёт и анализ показателей каждой схемы.

Объединение результатов расчёта программного обеспечения HOMER и анализа каждого показателя оценки различных схем дано в табл. 5.

С помощью метода АИП оценена важность показателей критериального слоя: использования природных ресурсов, повторного использования отработанных ресурсов, технических и экономических показателей. Экологические показатели взяты в следующем порядке: экономические показатели > технические показатели > экологические показатели > показатели повторного использования ресурсов > показатели использования природных ресурсов и сведены в матрицу решений В:

Таблица 4

Оптимальные комбинации мощности различных схем для «зелёных» гибридных энергосистем

Номер схемы	ВЭС, кВт	СФЭС, кВт	БиоГЭС, кВт	Электросеть, кВт	АБ, кВт·ч	Инвертор, кВт
A1	10	0	30	Не ограничено	0	0
A2	0	197	30		0	129
A3	20	0	30		10	3,39
A4	0	197	30		10	129
A5	10	197	30		0	129
A6	10	197	30		10	129

Таблица 5

Результаты расчета показателей оценки по каждой схеме

Показатель			Схема					
Тип	Элемент	Атрибут	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Показатели использования природных ресурсов В1	Ветроэнергетические ресурсы С1	▲	1	0	1	0	1	1
	Ресурсы солнечной радиации С2	▲	0	1	0	1	1	1
	Гидроэнергетические ресурсы С3	▲	0	0	0	0	0	0
	Другие природные ресурсы С4	▲	1	1	1	1	1	1
Показатели повторного использования отработанных ресурсов В2	Коэффициент ПИОР С5, %	▲	100	100	100	100	100	100
	Доход ПИОР С6, юань/год	▲	48287	48287	48287	48287	48287	48287
Технические показатели В3	Коэффициент потерь электроэнергии С7, %	▼	0	1,28	0	1,29	1,30	1,25
	Коэффициент нехватки электроэнергии С8, %	▼	0	0	0	0	0	0
	Доля ВИЭ С9, %	▲	35,8	93,1	37,7	93,1	93,3	93,3
Экономические показатели В4	Начальный капитал СЮ, юань	▼	81000,00	792896,13	140252,60	805884,40	837817,42	851068,75
	Стоимость Э и О СП, юань	▼	618114,96	-500969,35	632754,21	-492797,98	-486115,66	-478260,11
	Стоимость ЕЭЭ С12, юань/кВт·ч	▼	0,791	0,145	0,903	0,154	0,168	0,177
Экологические показатели В5	Выбросы парниковых газов С13, кг/год	▼	56670	15123	52750	15131	14742	14751
	Выбросы токсичных и вредных газов С14, кг/год	▼	2556	680	2379	681	663	663
	Выбросы сажи и твердых частиц С15, кг/год	▼	15436	4101	14367	4104	3997	4000
	Выбросы конечных твердых и жидких отходов С16, кг/год	▼	0	0	0	0	0	0

Пр и м е ч а н и е: ▲ указывает на положительный показатель (чем больше значение, тем лучше показатель); ▼ говорит об отрицательном показателе (чем меньше значение, тем лучше показатель)

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/7 & 1/8 & 1/5 \\ 2 & 1 & 1/5 & 1/6 & 1/3 \\ 7 & 5 & 1 & 1/2 & 4 \\ 8 & 6 & 2 & 1 & 5 \\ 5 & 3 & 1/4 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}.$$

Значения собственного вектора W_B , максимального характеристического корня $\lambda_{B-\max}$, индикатора проверки согласованности CI_B и тестового коэффициента CR_B для матрицы суждений вычислены следующим образом:

$$W_B = [0,03945 \quad 0,06449 \quad 0,30721 \quad 0,45367 \quad 0,13518]^T;$$

$$\lambda_{B-\max} = 5,21389; \quad CI_B = 0,05347; \quad n = 5; \quad RI = 1,12.$$

Если

$$CR_B = \frac{CI_B}{RI} = \frac{0,05347}{1,12} = 0,048 < 0,1,$$

тест на согласованность пройден.

Следовательно, веса показателей критериального слоя составляют:

$W_B = [0,03945 \quad 0,06449 \quad 0,30721 \quad 0,45367 \quad 0,13518]^T.$

Весовые значения 16-и показателей комплексной системы оценки индексного слоя, оценённые экспертами, сведены в табл. 6.

Сравнительный анализ и выбор схемы «зеленой» энергосистемы.

После расчёта весов каждого показателя методом АИП значения каждого показателя были объединены (см. табл. 6) и применён метод TOPSIS для расчёта оценок схем А1—А6 (табл. 7).

Как следует из данных табл. 7, схема А2 имеет наивысший балл и считается наилучшей для фермы.

На рисунке 6 продемонстрировано распределение веса каждого показателя оценки, определённое методом АИП. Видно, что стоимость единицы электроэнергии (С12), коэффициент потерь электроэнергии (С8), начальный капитал (С10), доля ВИЭ (С9) и выбросы

токсичных и вредных газов (С14) являются пятью наиболее важными показателями в системе комплексной оценки.

В составе схемы А2 каждая из установок имеет следующие значения мощности: мощность Био-ГЭС — 30 кВт, СФЭС — 197 кВт, инверторов — 129 кВт. Стоимость единицы электроэнергии составляет 0,145 юаней/кВт·ч, коэффициент потерь электроэнергии равен 0, начальный капитал — 792896,13 юаней, доля ВИЭ — 93,1%, выбросы токсичных и вредных газов — 680 кг/год. Кроме того, гибридная энергетическая система использует 100% отходов фермы, а весь производимый на ферме свиной и куриный навоз перерабатывается и принимается в качестве сырья для производства биогаза и удобрений для растениеводства, что обеспечивает эффективное и экологичное использование ресурсов.

Таблица 6

Веса показателей для комплексной оценки «зелёных» гибридных энергетических систем на ферме (метод АИП)

Тип показателя	Вес	Элемент показателя	Начальный вес	Комплексный вес
Показатели использования природных ресурсов В1	03945	Ветроэнергетические ресурсы С1	0,12127	0,00478
		Ресурсы солнечной радиации С2	0,57910	0,02285
		Гидроэнергетические ресурсы С3	0,23260	0,00918
		Другие природные ресурсы С4	0,06703	0,00264
Показатели повторного использования отработанных ресурсов В2	0,06449	Коэффициент ПИОР С5	0,75000	0,04837
		Доход ПИОР С6	0,25000	0,01612
Технические показатели В3	0,30721	Коэффициент потерь электроэнергии С7	0,10616	0,03261
		Коэффициент нехватки электроэнергии С8	0,63335	0,19457
		Доля ВИЭ С9	0,26050	0,08003
Экономические показатели В4	0,45367	Начальный капитал С10	0,25100	0,11387
		Стоимость Э и О С11	0,09601	0,04356
		Стоимость ЕЭЭ С12	0,65299	0,29624
Экологические показатели В5	0,13518	Выбросы парниковых газов С13	0,05074	0,00686
		Выбросы токсичных и вредных газов С14	0,57640	0,07792
		Выбросы сажи и твёрдых частиц С15	0,11724	0,01585
		Выбросы конечных твёрдых и жидких отходов С16	0,25562	0,03456

Таблица 7

Общие баллы и рейтинг каждой схемы

Номер схемы	Общий балл	Рейтинг
А1	0,39164	5
А2	0,66524	1
А3	0,33625	6
А4	0,65872	2
А5	0,64572	3
А6	0,63971	4

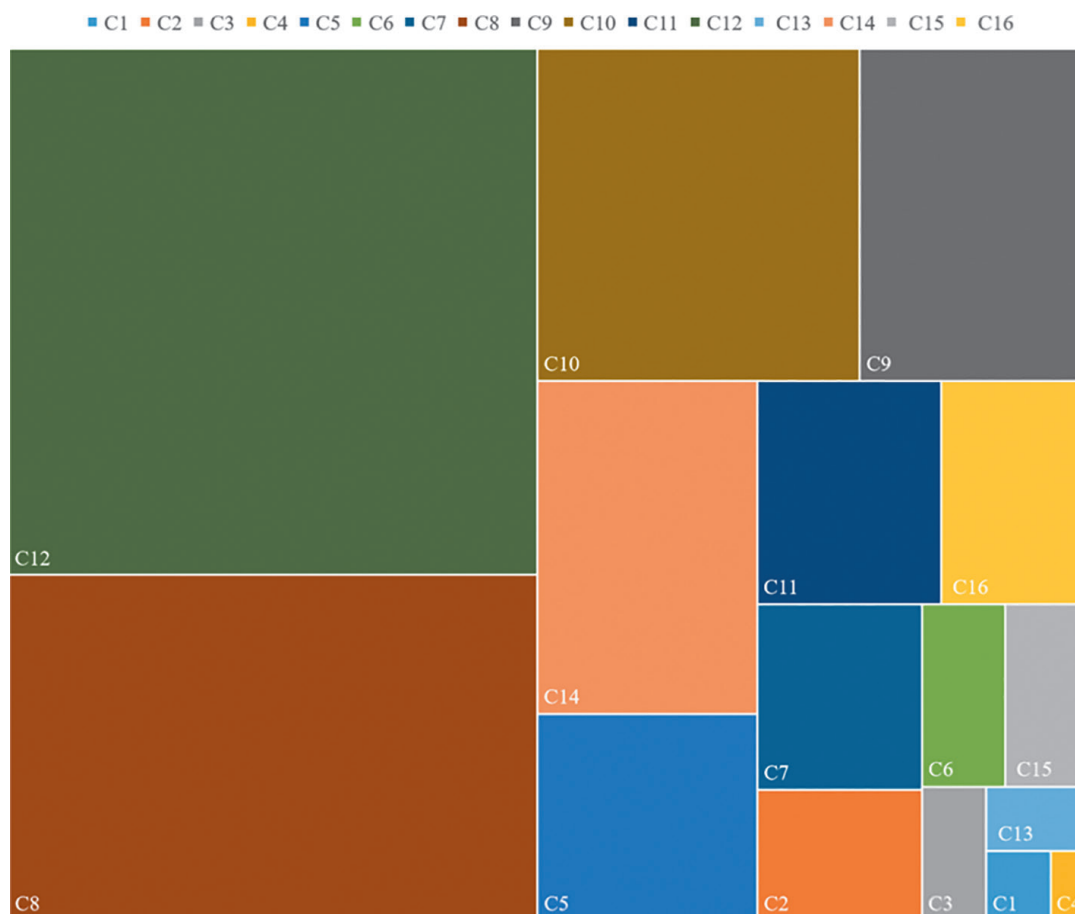


Рис. 6. Распределение веса каждого показателя системы оценки «зелёной» гибридной энергетической системы для малых ферм (метод АИП)

Выводы

Обобщены принципы проектирования гибридных энергетических систем для малых ферм. Комплексная система показателей оценки эффективности «зелёных» гибридных энергетических систем малых ферм создана и проверена на примере типичной фермы на юге Китая, занимающейся разведением свиней и кур, а также выращиванием овощей в теплицах. Описаны методы и процессы оценки.

Литература

1. Pretty J. Agricultural Sustainability: Concepts, Principles and Evidence // *Philosoph. Trans. Royal Soc. London. Series B. Biolog. Sci.* 2008. V. 363(1491). Pp. 447—465.
2. Winkler B., Lewandowski I., Voss A., Lemke S. Transition Towards Renewable Energy Production? Potential in Smallholder Agricultural Systems in West Bengal, India // *Sustainability*. 2018. V. 10(3). Pp. 1—24.
3. BP Energy Outlook 2022 Edition. [Электрон. ресурс] <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (дата обращения 26.12.2022).

Пример расчёта показал, что система комплексной оценки для «зелёных» гибридных энергетических систем малых ферм является разумной, а преимущества и недостатки различных вариантов можно эффективно сравнить посредством расчёта методами АИП и TOPSIS.

Таким образом, метод, принятый в настоящей работе, может служить ориентиром для принятия решений при проектировании и строительстве энергетических систем для малых ферм.

References

1. Pretty J. Agricultural Sustainability: Concepts, Principles and Evidence. *Philosoph. Trans. Royal Soc. London. Series B. Biolog. Sci.* 2008;363(1491):447—465.
2. Winkler B., Lewandowski I., Voss A., Lemke S. Transition Towards Renewable Energy Production? Potential in Smallholder Agricultural Systems in West Bengal, India. *Sustainability*. 2018;10(3):1—24.
3. BP Energy Outlook 2022 Edition. [Elektron. Resurs] <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (Data Obrashcheniya 26.12.2022).

4. **Baffoe G.** Exploring the Utility of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Ranking Livelihood Activities for Effective and Sustainable Rural Development Interventions in Developing Countries // *Evaluation and Program Planning*. 2019. V. 72. Pp. 197—204.

5. **Yingchun Liu e. a.** Optimization of Combustion Characteristics of Blended Coals Based on TOPSIS Method // *Complexity*. 2018. V. 12. Pp. 1—9.

6. **Song Da-Li e. a.** Nutrient Resource Quantity of Animal Manure and its Utilization Potential in China // *J. Plant Nutrition and Fertilizers*. 2018. V. 24(5). Pp. 1131—1148.

7. **HOMER Software** [Официальный сайт] <https://www.homerenergy.com/> (дата обращения 26.12.2022).

8. **Коэффициент выбросов при использовании 1 кВт·ч электроэнергии** [Электронный ресурс] <http://www.tanpaifang.com/tanjiliang/2021/1203/80845.html> (дата обращения 26.12.2022).

4. **Baffoe G.** Exploring the Utility of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Ranking Livelihood Activities for Effective and Sustainable Rural Development Interventions in Developing Countries. *Evaluation and Program Planning*. 2019;72:197—204.

5. **Yingchun Liu e. a.** Optimization of Combustion Characteristics of Blended Coals Based on TOPSIS Method. *Complexity*. 2018;12:1—9.

6. **Song Da-Li e. a.** Nutrient Resource Quantity of Animal Manure and its Utilization Potential in China. *J. Plant Nutrition and Fertilizers*. 2018;24(5):1131—1148.

7. **HOMER Software** [Официальный сайт] <https://www.homerenergy.com/> (Data Obrashcheniya 26.12.2022).

8. **Koeffitsient Vybrosov pri Ispol'zovanii 1 kVt·ch Elektroenergii** [Elektron. Resurs] <http://www.tanpaifang.com/tanjiliang/2021/1203/80845.html> (Data Obrashcheniya 26.12.2022).

Сведения об авторах:

Хе Хайян — магистр техники и технологий по направлению «Электроэнергетика и электротехника», e-mail: oceanyang16@yahoo.com

Тягунов Михаил Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: mtyagunov@mail.ru

Ту Рейн Мин — кандидат технических наук, e-mail: thureinmin06@gmail.com

Information about authors:

He Haiyang — Master of Engineering and Technology in the Direction of «Electric Power and Electrical Engineering», e-mail: oceanyang16@yahoo.com

Tyagunov Mikhail G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: mtyagunov@mail.ru

Thu Yein Min — Ph.D. (Techn.), e-mail: thureinmin06@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 04.12.2022

The article received to the editor: 04.12.2022

Статья принята к публикации: 15.12.2022

The article has been accepted for publication: 15.12.2022