

Поступила в редакцию 21.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_27

УДК 621.311

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, Л.Е. Веселов

О ПРИМЕНЕНИИ ТОТЭ НА БИОГАЗЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Проанализировано обеспечение энергетической и экологической безопасности сельскохозяйственных предприятий (СХП). Рассмотрены особенности электроснабжения СХП России и возможность применения топливных элементов, работающих на биогазе из переработанных отходов сельхозпроизводства в качестве дополнительного источника энергии. Показано преимущество твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). В качестве основной проблемы интеграции ТОТЭ в систему электроснабжения (СЭС) СХП обозначена низкая маневренность установок, предложен способ ее решения. Приведена структурная схема централизованной СЭС животноводческого СХП в составе с ТОТЭ на биогазе. Разработан алгоритм выбора оптимальной мощности ТОТЭ, учитывающий комплексные затраты на энергоснабжение СХП с учетом дисконтирования. Для реализации алгоритма создана база данных по ТОТЭ. На примере животноводческого предприятия на 2000 голов крупного рогатого скота проведено исследование эффективности интеграции ТОТЭ в централизованную СЭС СХП. Установлена зависимость комплексных затрат на энергоснабжение СХП от мощности ТОТЭ.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент, оптимальная мощность, алгоритм выбора, биогаз, сельскохозяйственное предприятие, система электроснабжения.

I. Введение

Сельское хозяйство – важнейшая отрасль экономики России, обеспечивающая население страны продовольствием, а легкую промышленность – сырьем. По объему производства сельскохозяйственной продукции ведущими отраслями являются растениеводство и животноводство.

Введение антироссийских санкций позитивно отразилось на развитии сельского хозяйства. Распоряжением Минсельхоза России № 24р от 27.03.2015 был утвержден перечень инвестиционных проектов, направленных на поддержку импортозамещающих производств, в том числе – строительство и модернизацию теплиц, овощехранилищ, проекты по мо-

лочному и мясному скотоводству, свиноводству, птицеводству и др. [1]. По оценке Росстата [2], за последние 10 лет объем произведенной сельхозпродукции вырос в 2,4 раза, составив в 2019 г. около 6 трлн руб. Однако, по мере насыщения рынка производители все больше сталкиваются с необходимостью повышения операционной эффективности работы, улучшения качества и конкурентоспособности продукции. В настоящее время в развитии агропромышленного комплекса обозначились две основные проблемы: источники энергии для строительства новых объектов и автоматизации производств и утилизация отходов сельхозпроизводства.

Действующие СХП, подключенные к централизованной электрической сети, отличаются низкой энергетической безопасностью, что связано с частыми нарушениями электроснабжения и низким качеством поставляемой электроэнергии. Основными факторами риска являются высокий физический износ электрооборудования и низкая пропускная способность распределительных электрических сетей, что ведет к частым аварийным отключениям, среднее время которых составляет более 100 часов в год [3]. Основная экологическая проблема СХП связана с постоянным отставанием темпов утилизации отходов сельхозпроизводства от их накопления [4].

В соответствии со Стратегией устойчивого развития сельских территорий России на период до 2030 г. и Энергетической стратегией развития России на период до 2035 г. эффективное решение этих проблем заключается в расширении использования распределенных источников электроэнергии, работающих на местном топливе из переработанных отходов сельхозпроизводства [2, 5]. Для СХП перспективно использование биогаза, характеризующегося относительно низкой себестоимостью и возможностью получения из отходов сельскохозяйственного производства.

Биогаз в качестве топлива успешно применяется в газопоршневых и газотурбинных установках. Однако инновационное направление повышения эффективности и экологичности источников распределенной генерации связано с топливными элементами. ТОТЭ, способными работать на биогазе, по сравнению с традиционными энергоустановками будут отличаться более высоким КПД (электрический КПД до 60 %), отсутствием загрязняющих выбросов в атмосферу, возможностью наращивания мощности за счет модульной конструкции, долговечностью, минимальным обслуживанием [6].

Широкому использованию ТОТЭ препятствует низкая маневренность и дороговизна энергоустановок. Проблема низкой маневренности, затрудняющей совмещение суточных графиков генерации и нагрузки потребителей, может быть решена путем комбинирования ТОТЭ с другими источниками электроэнергии в составе СЭС СХП. Одновременно при интеграции в СЭС СХП возникает задача выбора оптимальной мощности

ТОТЭ [7]. Так, с увеличением доли генерации ТОТЭ увеличивается количество электроэнергии, полученной СХП от собственного экологичного источника, однако вместе с этим растут и капитальные затраты на электроснабжение. Кроме того, при выборе мощности энергоустановки по пиковой нагрузке СХП часть выработанной ТОТЭ электроэнергии не будет востребована в часы минимальной нагрузки. Все это будет снижать экономическую эффективность проектов.

Источники энергии на основе топливных элементов в отечественных и зарубежных научных публикациях представлены достаточно широко. Научные исследования посвящены изучению свойств материалов и конструкций ТОТЭ [8, 9], улучшению технических характеристик элементов [10, 11], снижению рабочей температуры [12, 13], моделированию внутренних процессов преобразования энергии [14, 15]. Однако обоснованные методические рекомендации по оптимальной интеграции ТОТЭ в системы централизованного электроснабжения потребителей пока представлены слабо.

Цель настоящего исследования – разработка алгоритма выбора оптимальной мощности ТОТЭ на биогазе и оценке эффективности применения ТОТЭ в СЭС СХП, подключенного к централизованной электрической сети.

II. Краткая характеристика централизованных СЭС СХП

В сельскохозяйственной отрасли основная доля электропотребления приходится на животноводческие СХП, наиболее энергозатратными среди которых являются предприятия по производству молока, мяса, птицы [16].

В зависимости от суммарной установленной мощности электроприемников (ЭП) можно выделить: крупные (> 5 МВт) СХП, средние (1–5 МВт) СХП и СХП малой мощности (< 1 МВт). Известно, что число уровней централизованных СЭС СХП варьируется от трех (малые СХП) до шести (крупные СХП). В состав СЭС малых и средних СХП входят трансформаторные подстанции (ТП) 6(10)/0,4 кВ, магистральные (ЩМ) и распределительные щиты (ЩР) 0,4 кВ, распределительные электрические сети 0,38 кВ, электроприемники (рис. 1). К крупным ЭП относят насосы, транспортеры и смесители с напряжением питания ЭП 0,4 кВ [17].

Проблемы низкой энергетической и экологической безопасности СХП могут быть решены путем использования отходов сельхозпроизводства в качестве топлива для местных энергоустановок, являющихся дополнительным источником энергии и обеспечивающих как бесперебойное электроснабжение СХП, так и решающих проблемы утилизации.

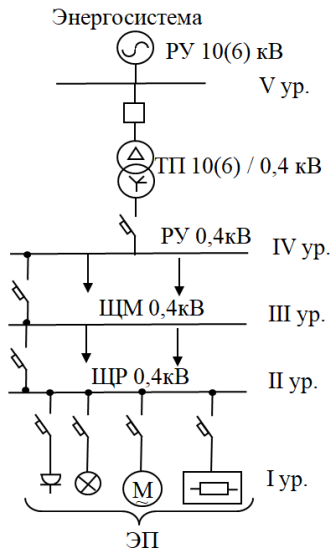


Рис. 1. Уровни СЭС среднего СХП

III. Применение ТОТЭ на биогазе в СЭС СХП

Биогаз – наиболее перспективная форма конвертации отходов в электроэнергию [18]. Результаты сравнительного анализа энергоустановок (ЭУ), работающих на биогазе (ГТУ), газопоршневых (ГПУ), парогазовых (ПГУ) энергоустановок и электрохимических генераторов на основе топливных элементов (ТЭ), приведены в табл. 1. Эти результаты показывают преимущество ТЭ.

Таблица 1.
Сравнительный анализ энергоустановок

Характеристика	ГТУ	ГПУ	ПГУ	ТЭ
Электрический КПД первичного двигателя, %	25–35	40–45	38	50–55
Коэффициент использования топлива, %	до 90	70–92	75–80	до 95
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии без учета утилизации тепла, г/кВт·ч	300–615	360–610	297–370	210–340

Проведен анализ ТЭ по критерию применимости в СЭС СХП. Установлено, что использование биогаза как топлива наиболее эффективно для высокотемпературных ТОТЭ. ТОТЭ не требовательны к качеству топлива и не нуждаются в дорогом катализаторе (платина).

Для оценки возможности использования ТОТЭ в СЭС СХП разработана база данных по ТОТЭ [19]. База данных содержит информацию о технических характеристиках, энергетических параметрах и стоимости ТОТЭ с различной установленной мощностью более чем по 100 моделям ЭУ различных компаний-производителей. Структура базы данных представлена на рис. 2.

Энергоустановки на основе ТОТЭ					
Природный газ (СН4)	Биогаз (СН4)	Синтез-Газ (СО + Н2)	Водород (Н2)	Борогидрид Натрия (NaBH4)	Метанол (СН3ОН)
Производители (15 стран, включая Россию)					
Модели (> 100 моделей)					
Номинальная электрическая мощность (от 0,1 до 3700 кВт)					
Стоимость (\$)					
Эксплуатационно-технологические и экономические параметры (32 параметра)					
1 КПД электрич. 2 КПД тепловой 3 Тип конструкции 4 Тип тока 5 Температура 6 Ресурс (ч) 7 Расход топлива 8 Время разогрева 9 Масса и др.	1 КПД электрич. 2 КПД тепловой 3 Тип конструкции 4 Тип тока 5 Температура 6 Ресурс (ч) 7 Расход топлива 8 Время разогрева 9 Масса и др.	1 КПД электрич. 2 КПД тепловой 3 Тип конструкции 4 Тип тока 5 Температура 6 Ресурс (ч) 7 Расход топлива 8 Время разогрева 9 Масса и др.	1 КПД электрич. 2 КПД тепловой 3 Тип конструкции 4 Тип тока 5 Температура 6 Ресурс (ч) 7 Расход топлива 8 Время разогрева 9 Масса и др.	1 КПД электрич. 2 КПД тепловой 3 Тип конструкции 4 Тип тока 5 Температура 6 Ресурс (ч) 7 Расход топлива 8 Время разогрева 9 Масса и др.	1 КПД электрич. 2 КПД тепловой 3 Тип конструкции 4 Тип тока 5 Температура 6 Ресурс (ч) 7 Расход топлива 8 Время разогрева 9 Масса и др.

Рис. 2. Структура базы данных по ТОТЭ

База данных позволяет проводить систематизацию по 32 параметрам, в том числе, по величине номинальной мощности энергоустановки, КПД, типу топлива, стоимости и др. Выдача и обработка информации реализована в системе управления базами данных *MySQL Workbench 8.0 CE*, язык программирования *SOL:2008*.

Проведенный с помощью разработанной базы данных анализ показал целесообразность интеграции ТОТЭ на биогазе в СЭС СХП малой и средней мощности. Для дальнейшего исследования эффективности применения ТОТЭ рассмотрен вариант интеграции ЭУ на ТОТЭ в централизованную СЭС СХП.

IV. Разработка алгоритма выбора оптимальной мощности ТОТЭ на биогазе для интеграции в централизованную СЭС СХП

На рис. 3 представлен пример структурной блок-схемы централизованной СЭС животноводческого комплекса. Электроснабжение СХП осуществляется от централизованной электрической сети и собственного источника энергии, которым является ЭУ на ТОТЭ, работающая на биогазе.

Биогаз производится из отходов крупного рогатого скота (КРС). Проведен анализ режимов работы рассматриваемой СЭС. При минимальной нагрузке СХП ЭУ на ТОТЭ будет основным источником электроэнергии.

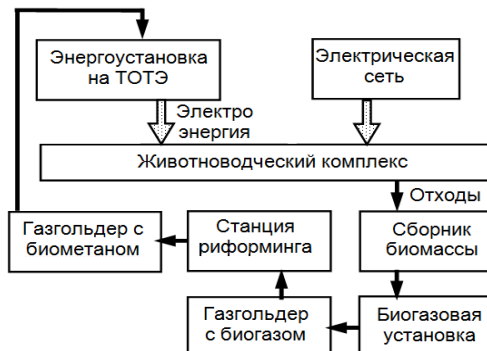


Рис. 3. Структурная блок-схема СЭС СХП с ТОТЭ на биогазе

В период максимальной нагрузки СХП получает дополнительную электроэнергию из электрической сети:

$$P_j = P_{\text{тотэ}} + P_{\text{сэ}}, \quad (1)$$

где P_j – электрическая нагрузка СХП в j -й момент времени (кВт); $P_{\text{тотэ}}$ – электрическая мощность, потребляемая от ТОТЭ (кВт); $P_{\text{сэ}}$ – электрическая мощность, потребляемая от централизованной электрической сети.

В период минимальной нагрузки предусмотрена передача излишков генерации (ΔP_j) от ТОТЭ в электрическую сеть через ТП [20]:

$$\Delta P_j = P_{\text{тотэ}} - P_j. \quad (2)$$

При выборе оптимальной мощности ТОТЭ критерием оптимизации являются комплексные затраты на энергоснабжение СХП за расчетный период:

$$C_{\Sigma i} = \sum_{i=1}^n (C_{\text{кап}} + C_{\text{тех}} + C_{\text{рп}} + C_{\text{сэ}} + C_{\text{ст}} - C_{\text{дс}}), \quad (3)$$

где n – конечный год расчетного периода; $C_{\text{кап}}$ – капитальные затраты на ЭУ на ТОТЭ; $C_{\text{тех}}$ – затраты на техническое обслуживание и ремонт ЭУ на ТОТЭ; $C_{\text{рп}}$ – затраты на рабочий персонал; $C_{\text{сэ}}$ – затраты на покупку электроэнергии от электрической сети; $C_{\text{ст}}$ – затраты на покупку тепловой

энергии от котельной; $C_{ДС}$ – прибыль от продажи излишков генерации от ТОТЭ в электрическую сеть.

Оптимизационным параметром является номинальная мощность ТОТЭ ($P_{НОМ}$). Задача оптимизации заключается в поиске $P_{НОМ}$, при которой $C_{\Sigma} \rightarrow \min$. Разработан алгоритм выбора оптимальной мощности ТОТЭ на биогазе для интеграции в централизованную СЭС СХП, блок-схема которого представлена на рис. 4. Выбор оптимальной мощности ТОТЭ основан на определении минимума целевой функции путем имитации работы СЭС СХП на протяжении расчетного периода при использовании различных ЭУ на ТОТЭ, номинальные мощности которых находятся в границах оптимизации.

Поясним основные элементы блок-схемы. В *Блоке исходных данных* задается количество лет в расчетном периоде, параметры СХП, информация об энергоносителях и тарифах. *Блок поиска границ оптимизации* используется для определения минимально возможной ($P_{МИН}$) и максимально допустимой ($P_{МАКС}$) мощности ТОТЭ:

$P_{МИН}$ принимается равной минимальной электрической нагрузке СХП в нормальном режиме работы. $P_{МАКС}$ рассчитывается с учетом суточного объема производства биогаза:

$$P_{МАКС} = V_m / (F_{ТОТЭ} \cdot t_{ТОТЭ}), \quad (4)$$

где V_m – суточный объем производства биогаза, зависящий от количества КРС; $F_{ТОТЭ}$ – удельный расход биогаза на выработку 1 кВт·ч электроэнергии ($\text{м}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч}$); $t_{ТОТЭ}$ – время работы ТОТЭ в сутках (ч).

Далее из *Информационной базы данных* выбираются N ЭУ на ТОТЭ, значения $P_{НОМ}$ которых находятся в диапазоне:

$$P_{МИН} \leq P_{НОМ} \leq P_{МАКС}. \quad (5)$$

Запускается цикл из N вычислений энергетических и экономических показателей СЭС СХП за расчетный период.

С помощью *Блоков вычислений электрической и тепловой энергии* для каждой k -й ЭУ на ТОТЭ из N выбранных определяются составляющие электрической и тепловой энергии за каждый i -й год расчетного периода:

- $W_{ТОТЭi}^k$ – электроэнергия, потребляемая СХП от ТОТЭ (кВт·ч);
- W_{Ci}^k – электроэнергия, потребляемая СХП от сети (кВт·ч);
- $W_{ПСi}^k$ – электроэнергия от ТОТЭ, продаваемая в сеть (кВт·ч);
- $Q_{ТОТЭi}^k$ – тепловая энергия, потребляемая СХП от ТОТЭ (Гкал);
- $Q_{Ки}^k$ – тепловая энергия, потребляемая СХП от котельной (Гкал).



Рис. 4. Блок-схема алгоритма выбора оптимальной мощности ТОТЭ на биогазе

Для расчета составляющих электрической и тепловой энергии каждый i -й год расчетного периода разделяется на j -е интервалы времени. Значения $W_{\text{ТОТЭ}i}^k$, $W_{\text{С}i}^k$, $W_{\text{П}Сi}^k$, $Q_{\text{ТОТЭ}i}^k$ и $Q_{\text{К}i}^k$ определяются путем распределения электрической и тепловой нагрузки СХП между источниками для каждого j -го интервала времени в течение всего расчетного периода. При этом учитываются перерывы на плановое обслуживание и ремонт.

В Блоке вычислений комплексных затрат для каждой k -й ЭУ на ТОТЭ из N выбранных рассчитываются составляющие комплексных затрат за каждый i -й год и весь расчетный период:

$$C_{\text{СЭ}i} = T_{\text{С}} \cdot W_{\text{С}i}^k; \quad (6)$$

$$C_{\text{ДС}i} = T_{\text{ТОТЭ}} \cdot W_{\text{П}Сi}^k; \quad (7)$$

$$C_{\text{СТ}i} = T_{\text{К}} \cdot Q_{\text{К}i}^k / (Q_{\text{К,МИН}} \cdot \eta_{\text{К}}), \quad (8)$$

где $T_{\text{С}}$ – тариф на электроэнергию, потребляемую от сети (руб/кВт·ч); $T_{\text{ТОТЭ}}$ – тариф на электроэнергию от ТОТЭ, продаваемую в сеть (руб/кВт·ч); $T_{\text{К}}$ – тариф на котельное топливо; $\eta_{\text{К}}$ – КПД котельной.

Особенностью ТОТЭ является высокая стоимость. При этом капитальные затраты относятся к первому году расчетного периода, а экономия за счет использования ТОТЭ, которая должна обеспечить возврат капитальных вложений, приходится на последующие годы. Поэтому, чтобы привести разновременные денежные потоки в сопоставимый вид к одному моменту времени, кроме C_{Σ} расчет комплексных затрат проводится с учетом дисконтирования ($C_{дс}$):

$$C_{дс} = \sum C_{дт} = \sum [C_i \cdot (1+r)^{-t}], \quad (9)$$

где r – ставка дисконтирования; t – количество лет до момента приведения.

В Блоке построения целевой функции сохраняются N результатов вычислений C_{Σ} и $C_{дс}$ и формируются целевые функция $C_{\Sigma}=f(P_{ном})$ и $C_{дс}=f(P_{ном})$. Оптимальное значение $P_{ном}$ определяется путем перебора и сравнения вариантов затрат на энергоснабжение.

V. Результаты исследования эффективности применения ТОТЭ на биогазе в составе централизованной системы электроснабжения СХП

В соответствии с разработанным алгоритмом в приложении Excel составлена компьютерная программа и проведено исследование эффективности применения ТОТЭ в централизованной СЭС животноводческого СХП. Структура исследуемой СЭС соответствует блок-схеме на рис. 3. Выполнен сравнительный анализ недисконтированных (C_{Σ}) и дисконтированных ($C_{дс}$) комплексных затрат для трех вариантов работы централизованной СЭС. Вариант 1 – энергоснабжение СХП от электрической сети и котельной без ТОТЭ. Вариант 2 – энергоснабжение СХП от ТОТЭ, электрической сети и котельной, излишки электроэнергии от ТОТЭ могут быть переданы в централизованную электрическую сеть и вариант 3 – энергоснабжение от ТОТЭ, электрической сети и котельной, излишки электроэнергии от ТОТЭ не передаются в централизованную электрическую сеть.

С учетом границ оптимизации $P_{ном}$ для сравнительного анализа из базы данных выбраны пять ($N = 5$) ЭУ на ТОТЭ, номинальные мощности которых составляют: $P_{ном1} = 100$ кВт, $P_{ном2} = 200$ кВт, $P_{ном3} = 300$ кВт, $P_{ном4} = 400$ кВт, $P_{ном5} = 500$ кВт. Электрический КПД выбранных энергоустановок на ТОТЭ составляет 53-65 %. Задача состоит в выборе оптимальной мощности ЭУ на ТОТЭ.

На рис. 5 представлены результаты расчета комплексных затрат при интеграции каждой из пяти ЭУ на ТОТЭ в централизованную СЭС СХП.

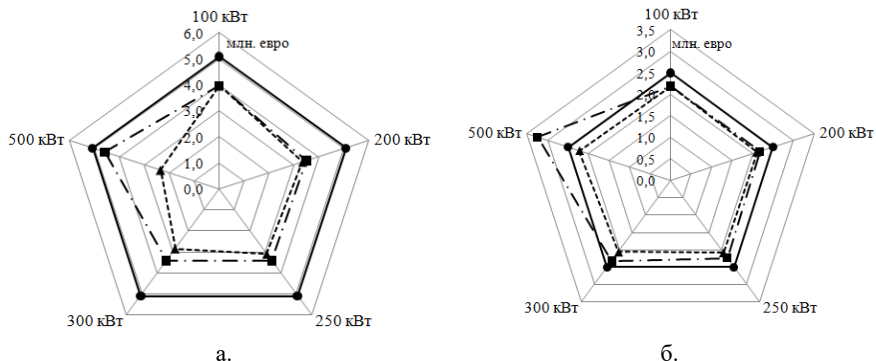


Рис. 5. Комплексные затраты на энергоснабжение:

а – недисконтированные затраты; б – дисконтированные затраты;

— работа СЭС по варианту № 1; - - - - работа СЭС по варианту № 2;

- . - работа СЭС по варианту № 3

Проведенные исследования показали, что при интеграции ТОТЭ в СЭС СХП (варианты 2 и 3) недисконтированные и дисконтированные комплексные затраты на энергоснабжение СХП (для большинства ЭУ на ТОТЭ) будут меньше соответствующих затрат при электроснабжении СХП только от ТП (вариант 1). Полученные результаты подтверждают экономическую целесообразность применения ТОТЭ в централизованных СЭС СХП.

Диаграммы на рис. 5а и 5б, показывающие зависимость недисконтированных и дисконтированных комплексных затрат на энергоснабжение предприятия от мощности ТОТЭ, различаются. Так, если посмотреть на недисконтированные затраты для варианта 2, то оптимальным является использование ТОТЭ с $P_{\text{ном}} = 500$ кВт. Однако, при использовании ТОТЭ такой мощности, дисконтированные затраты будут наибольшими. Это объясняется слишком большими капитальными затратами в 1-й год проекта. С учетом ставки дисконтирования более эффективным является использование ТОТЭ меньшей мощности ($P_{\text{ном}} = 200, 250$ или 300 кВт).

VI. Заключение

Проблемы низкой энергетической и экологической безопасности СХП могут быть решены путем утилизации отходов сельскохозяйственного производства при получении биогаза в качестве топлива для ЭУ на ТОТЭ, являющихся дополнительным источником энергии и обеспечивающих бесперебойное электроснабжение СХП. Основные результаты работы:

- создана информационная база данных по ЭУ на ТОТЭ, содержащая систематизированную и структурированную информацию о характе-

- ристиках более 100 моделей ТОТЭ различных компаний-производителей.
- разработан алгоритм выбора оптимальной мощности ЭУ на ТОТЭ при интеграции в централизованную СЭС СХП. Алгоритм позволяет на этапе проектирования определить мощность ТОТЭ, соответствующую минимальным комплексным затратам на энергоснабжение с учетом дисконтирования.
 - на примере животноводческого комплекса на 2000 голов КРС по разработанному алгоритму проведено исследование эффективности интеграции ТОТЭ в централизованную СЭС. Установлено, что при использовании ТОТЭ комплексные затраты на энергоснабжение СХП будут меньше соответствующих затрат при питании СХП только от ТП, что свидетельствует о привлекательности применения ЭУ на ТОТЭ в системах электроснабжения СХП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение о предоставлении грантов для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук № 075-15-2020-097 (МК-593.2020.8) от 18.03.2020 г.)

© Соснина Е.Н., 2020

© Шалухо А.В., 2020

© Веселов Л.Е., 2020

Библиографический список

- [1] Сельское хозяйство регионов России // Экспертно-аналитический центр агробизнеса [Электронный ресурс]. URL: <https://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-regionov-rossii> (дата обращения 01.10.2020).
- [2] Стратегия устойчивого развития сельских территорий России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 февраля 2015 г. № 151-р.
- [3] Сафронов Р.И., Хомяков Д.С. Проблема и специфика электроснабжения сельского хозяйства // Материалы X Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Молодежная наука – гарант инновационного развития АПК», Декабрь 19–21, 2018, Курск, Россия. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия. 2019. С. 406-409.
- [4] Дашковский И. Дырявая экология. Сельское хозяйство производит 250 млн. т отходов в год // Агротехника и технологии. 2018. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agroinvestor.ru/> (дата обращения 01.10.2020).
- [5] Энергетическая стратегия развития России на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

- [6] BloomEnergy [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bloomenergy.com> (дата обращения 01.11.2020).
- [7] Киселев И.В. Повышение энергетической эффективности твердооксидных топливных элементов и обоснование их применения для энергоснабжения потребителей малой мощности: автореф. дисс. канд. техн. наук, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Москва. 2013. – 20 с.
- [8] Wang J., Yang T., Wen Y., Zhang Y., Sun C., Huang K. Performance and stability of $\text{SrCo}_{0.9}\text{Nb}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ - $(\text{La}_{0.60}\text{Sr}_{0.40})_{0.95}(\text{Co}_{0.20}\text{Fe}_{0.80})\text{O}_{3-\delta}$ bilayer cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells // *Journal of Power Sources*. 2019. Т. 414. С. 24-30. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.12.082.
- [9] Fang W., Yang T., Huang K. In situ synthesis of a high-performance bismuth oxide based composite cathode for low temperature solid oxide fuel cells // *Chemical Communications*. 2019. № 55 (19). С. 2801–2804. DOI: 10.1039/c9cc00442d.
- [10] Pianko-Oprych P., Hosseini S.M. Dynamic analysis of load operations of two-stage SOFC stacks power generation system // *Energies*. 2017. № 10 (12). С. 2103. DOI: 10.3390/en10122103.
- [11] Kupecki J. Off-design analysis of a micro-CHP unit with solid oxide fuel cell fed by DME // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. № 40 (35). С. 12009–12022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.031.
- [12] Шарафутдинов А.У., Федотов Ю.С., Бредихин С.И. Мультифизическое моделирование батареи твердооксидных топливных элементов в приближении эффективной среды // *Химические проблемы*. 2020. № 3 (18). С. 298-314. DOI: 10.32737/2221-8688-2020-3-298-314 (на английском).
- [13] Baharuddin N.A., Rahman N.F.A., Rahman H.A., Somalu M.R., Azmi M.A., Raharjo J. Fabrication of high-quality electrode films for solid oxide fuel cell by screen printing: A review on important processing parameters // *International Journal of Energy Research*. 2020. Т. 44. № 11. DOI: 10.1002/er.5518.
- [14] Milewski J., Szcześniak A., Szablowski L. A discussion on mathematical models of proton conducting solid oxide fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Т. 44. № 21. С. 10925–10932. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.082.
- [15] Wrobel M., Brus G. Mathematical modelling of solid oxide fuel cells revisited - a modified formulation of the problem, 2019 (не опубликована).
- [16] Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации, Минэкономразвития России. Москва, 2019. – 85 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/gosudarstvennyy_doklad_po_energoeffektivnosti_.html (дата обращения 06.10.2020).
- [17] Филатов Д.А., Терентьев П.В. Электромагнитная совместимость систем электроснабжения и электрооборудования сельскохозяйственных предприятий при изменении уровня питающего напряжения // *Вестник Нижегородской Государственной Сельскохозяйственной Академии*. 2016. № 3 (11). С. 57-62.
- [18] Электроэнергия из биогаза и применение биогазовой технологии // Биоконкомплекс [Электронный ресурс]. URL: <http://biogaz-russia.ru> (дата обращения 06.10.2020).

- [19] Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Веселов Л.Е. База данных по твердооксидным топливным элементам (ТОТЭ), Свидетельство о гос. рег. 2020622076; заявл. 21.10.20; опубл. 28.10.20.
- [20] Федеральный закон Российской Федерации «Об электроэнергетике» от 26 марта 2003 г. N 35-ФЗ (с изменениями и дополнениями).

E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, L.E. Veselov

APPLICATION OF SOFCs ON BIOGAS IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF AGRICULTURAL ENTERPRISES

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. One of the main conditions for the country's stability is the creation of an effective agro-industrial complex. The article is devoted to ensuring energy and environmental safety of agricultural enterprises. The features of Russian agricultural enterprises power supply have been considered as well as the possibility of using fuel cells powered by biogas from recycled agricultural waste as an additional energy source. The advantage of solid oxide fuel cells (SOFCs) is shown. The main problem of SOFCs integration into power supply systems for agricultural enterprises, that is their low maneuverability, was noted. The method of its solution was proposed. A block diagram of the centralized power supply system for the livestock agricultural enterprise with the SOFCs on biogas was presented. An algorithm for selecting the optimal SOFCs power was developed taking into account the total discounted costs of agricultural enterprise's energy supply. To implement the algorithm, a SOFCs database was also created. On the example of the livestock enterprise with 2000 heads of cattle, a study of the effectiveness SOFCs integration into the centralized power supply system for an agricultural enterprise was conducted. The dependence of the total costs of agricultural enterprise's energy supply on the SOFCs power was established.

Keywords: agricultural enterprise, biogas, database, power supply system, solid oxide fuel cell.

References

- [1] Sel'skoe hozyajstvo regionov Rossii [Agriculture of Russian regions]. [Online]. Available at: <https://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-regionov-rossii> [Accessed: Oct. 1, 2020] (in Russian).
- [2] Strategiya ustoychivogo razvitiia selskikh territorii Rossii na period do 2030 goda [Strategy for sustainable development of rural areas of Russia for the period up to 2030]. Approved by the order of the Government of the Russian Federation no. 151-r dated Feb. 2, 2015 (in Russian).

- [3] R.I. Safronov and D.S. Khomyakov, “*Problema i spetsifika elektrosnabzheniia selskogo khoziaistva [The problem and specifics of electricity supply in agriculture]*”, in proc. X All-Russia (national) scient.-pract. conf. “*Molodezhnaya nauka - garant innovacionnogo razvitiya APK [Youth science is the guarantor of innovative development of the agro-industrial complex]*”, Dec. 19-21, 2018, Kursk, Russia. Kursk State Agricultural Academy, pp. 406-409, 2019 (in Russian).
- [4] I. Dashkovskiy. “*Dyriavaia ekologiia. Selskoe khoziaistvo proizvodit 250 mln. t ot-khodov v god [Leaky ecology. Agriculture produces 250 million tons of waste per year]*”, *Agrotekhnika i Tekhnologii [Agriculture and technology]*, no. 2, March-Apr. 2018 [Online]. Available at: <https://www.agroinvestor.ru/> (in Russian).
- [5] Energeticheskaia strategiia razvitiia Rossii na period do 2035 goda [Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. Approved by the order of the Government of the Russian Federation no. 1523-r dated June 9, 2020 (in Russian).
- [6] Bloom Energy. Available at: <https://www.bloomenergy.com> [Accessed: Nov. 1, 2020] (in Russian).
- [7] I.V. Kiselev, “*Povyshenie energeticheskoi effektivnosti tverdoosidnykh toplivnykh elementov i obosnovanie ih primeneniia dlia energosnabzheniia potrebiteli maloi moshchnosti [Improving the energy efficiency of solid oxide fuel cells and justifying their use for power supply of low-power consumers]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Russian Federal Nuclear Center, Moscow, 2013 (in Russian).
- [8] J. Wang, T. Yang, Y. Wen, Y. Zhang, C. Sun and K. Huang, “Performance and stability of $\text{SrCo}_{0.9}\text{Nb}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ - $(\text{La}_{0.60}\text{Sr}_{0.40})_{0.95}(\text{Co}_{0.20}\text{Fe}_{0.80})\text{O}_{3-\delta}$ bilayer cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells”, *Journal of Power Sources*, Vol. 414, pp. 24–30, Feb. 2019. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.12.082.
- [9] W. Fang, T. Yang and K. Huang, “In situ synthesis of a high-performance bismuth oxide based composite cathode for low temperature solid oxide fuel cells”, *Chemical Communications*, no. 55 (19), pp. 2801–2804, Feb. 2019. DOI: 10.1039/c9cc00442d.
- [10] P. Pianko-Oprych and S.M. Hosseini, “Dynamic analysis of load operations of two-stage SOFC stacks power generation system”, *Energies*, no 10(12). pp. 2103, Dec. 2017. DOI: 10.3390/en10122103.
- [11] J. Kupecki, “Off-design analysis of a micro-CHP unit with solid oxide fuel cell fed by DME”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, is. 35, pp. 12009–12022, Sept. 2015. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.031.
- [12] A.U. Sharafutdinov, Yu.S. Fedotov and S.I. Bredikhin, “Solid oxide fuel cell stack simulation using effective medium approximation”, *Chemical problems*, vol. 18, no. 3, pp. 298-314, 2020. DOI: 10.32737/2221-8688-2020-3-298-314.
- [13] N.A. Baharuddin, N.F.A. Rahman, H.A. Rahman, M.R. Somalu, M.A. Azmi and J. Raharjo, “Fabrication of high-quality electrode films for solid oxide fuel cell by screen printing: A review on important processing parameters”, *International Journal of Energy Research*, vol. 44, is. 11, Sept. 2020. DOI: 10.1002/er.5518.
- [14] J. Milewski, A. Szczęśniak and L. Szablowski, “A discussion on mathematical models of proton conducting solid oxide fuel cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 21, pp. 10925–10932, Apr. 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.082.

- [15] M. Wrobel and G. Brus, “Mathematical modelling of solid oxide fuel cells revisited - a modified formulation of the problem», Jan. 2019 (preprint submitted to *Applied Energy*).
- [16] Gosudarstvennyi doklad o sostoianii energosberezheniia i povyshenii energeticheskoi effektivnosti v Rossiiskoi Federatsii [State Report on the State of Energy Saving and Energy Efficiency Improvement in the Russian Federation]. Moscow, 2019. [Online]. Available at: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/gosudarstvennyy_doklad_po_energoeffektivnosti_.html [Accessed: Oct. 06, 2020] (in Russian).
- [17] D.A. Filatov and P.V. Terentyev, “Elektromagnitnaia sovmestimost sistem elektrosnabzheniia i elektrooborudovaniia sel'skokhoziaistvennykh predpriatii pri izmenenii urovnia pitaiushchego napriazheniia [Electromagnetic compatibility of electrical supply systems and electrical equipment of agricultural enterprises when the supply voltage level changes]”, *Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy*, no. 3 (11), pp. 57-62, 2016 (in Russian).
- [18] *Elektroenergiia iz biogaza i primenenie biogazovoi tekhnologii [Electricity from biogas and the application of biogas technology]*. [Online]. Available at: <http://biogaz-russia.ru> [Accessed: Oct. 06, 2020] (in Russian).
- [19] E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, and L.E. Veselov, “Baza dannykh po tverdotsidnym toplivnym elementam (TOTE) [Database on solid oxide fuel cells (SOFCs)]”, Certificate of state registration No. 2020622076, Oct. 28, 2020 (in Russian).
- [20] Federal Law of the Russian Federation № 35-FZ on March 26, 2003 “Ob elektroenergetike [On Electric Power Industry]” (in Russian).