

УДК 621.311

Е.Н. Соснина, Л.Е. Веселов

**ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ТОТЭ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЭНЕРГОУДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Решается проблема автономного электроснабжения энергоудаленных потребителей за счет применения энергоустановок на твердооксидных топливных элементах (ЭУ на ТОТЭ), работающих на биогазе. Выявлены наиболее перспективные типы ЭУ и топливных элементов. Приведена методика выбора ЭУ на ТОТЭ для электроснабжения сельскохозяйственных предприятий (СХП) малой мощности. Рассмотрены вопросы интеграции ЭУ на ТОТЭ в систему электроснабжения СХП. Разработаны алгоритм и Simulink-модель системы электроснабжения (СЭС) с ЭУ на ТОТЭ, позволяющие проводить исследования основных энергетических характеристик системы.

*Ключевые слова:* энергоустановка на ТОТЭ, твердооксидный топливный элемент, система электроснабжения, энергоудаленный потребитель, биогаз, сельскохозяйственное предприятие, Simulink-модель.

Устойчивая работа потребителей электрической энергии определяется надежным и бесперебойным электроснабжением. Обеспечение потребителей России электроэнергией требуемого качества в условиях прогнозируемого в долгосрочном периоде ежегодного увеличения спроса на электрическую энергию и мощность является актуальной проблемой [1].

Наиболее остро данный вопрос стоит перед энергоудаленными потребителями малой и средней мощности, расположенных в отдаленных районах страны и не имеющих централизованного электроснабжения. К таким потребителям относятся небольшие по численности населенные пункты, объекты связи и навигации, государственные и частные сельскохозяйственные предприятия, объекты вооруженных сил и др. Электрическая нагрузка приведенной категории потребителей может составлять от десятков до сотен кВт [2].

Вместе с тем в ряде государственных программ перспективного развития энергетики страны сделан акцент на внедрении в государственных масштабах нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Одно из актуальных направлений в этой сфере – использование биогаза для последующей выработки электрической и тепловой энергии [3, 4, 5].

Благодаря своему происхождению (анаэробному метановому брожению биомассы) биогаз общепринято считается возобновляемым источником энергии. В его состав входят 55–65% метана, 35–45% двуокиси углерода, приблизительно по 1% водорода и сероводорода, а также иные примеси. Основным источником биогаза являются органические отходы: навоз, солома, твердые бытовые отходы и т.п. Биогаз получают в специальных установках – метантанках (или анаэробных колоннах), которые оборудуют на фермах, СХП, полигонах бытовых отходов или в виде малых (односемейных) биогазовых установок. Производство биогаза является экологически целесообразным (благодаря утилизации промышленных и биологических отходов) и экономически выгодным, особенно при переработке непрерывного потока отходов: стоки животноводческих ферм, скотобоен, растительных отходов. На сегодняшний день применение биогаза широкое распространено в странах Европы (Германия, Швейцария, Дания), Азии (Индия, Китай, Вьетнам) и в США.

Авторами предлагается эффективное решение проблемы бесперебойного электроснабжения энергоудаленных потребителей малой мощности за счет применения автономных мини-ТЭЦ, использующих в качестве топлива биогаз [6].

Мини-ТЭЦ представляет собой когенерационную энергоустановку (ЭУ), способную эффективно преобразовывать продукты сбраживания биоотходов в электрическую и тепло-

вую энергию. Наиболее перспективными представляются мини-ТЭЦ на топливных элементах (ТЭ), использующих прямое преобразование биогаза в электроэнергию. Согласно проведенным исследованиям [7], эффективность когенерационных ЭУ определяется экономичностью первичного двигателя и системы утилизации тепла, коэффициентом использования топлива. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики эффективности когенерационных ЭУ разных типов [8]. ЭУ на ТЭ имеет лучшие показатели эффективности, отсутствие процесса сжигания топлива обеспечивает их высокую экологичность.

Таблица 1

## Эффективность когенерационных энергоустановок

Характеристики эффективности установки	ГТУ	ГПУ	ЭУ на ТЭ
Электрический КПД первичного двигателя, %	25-35	40-45	50-55
Коэффициент использования топлива, %	до 90	70-92	до 95
Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии без учета утилизации тепла, г.у.т./кВт·ч	300-615	360-610	210-340

Наибольшее внимание исследователей и разработчиков во всем мире привлекают твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) они имеют самый высокий КПД, низкую стоимость керамических материалов и могут работать на обычном углеводородном топливе [9, 10].

В данной статье рассмотрено решение проблемы электроснабжения энергоудаленных потребителей с использованием ЭУ на ТОТЭ. Одной из лидирующих компаний на европейском рынке, активно занимающейся разработкой подобных энергоустановок, является швейцарская компания Hesis [11].

Несмотря на преимущества ЭУ на ТОТЭ, они пока не применяются в системах электроснабжения потребителей. Применение таких ЭУ сдерживается их низкой маневренностью, отсутствием технических решений по интеграции в СЭС потребителей при проектировании новых и реконструкции действующих энергосистем [12,13], отсутствием нормативных документов по проектированию ЭУ на ТОТЭ, работающих на биогазе, и рядом других проблем.

Для решения перечисленных проблем: проведено исследование системы электроснабжения СХП молочного животноводства, на примере которой разработана методика выбора мощности энергоустановки на ТОТЭ; предложены схемные решения системы электроснабжения СХП, разработан алгоритм функционирования энергосистемы; проведено компьютерное моделирование с анализом полученных результатов.

## Методика выбора энергоустановки на ТОТЭ

Разработанная методика предназначена для выбора источника питания небольших СХП молочного животноводства установленной мощностью до 1МВт и номинальным напряжением 380 В, имеющих возможность генерации биогаза. Выбор ЭУ на ТОТЭ включает четыре этапа.

На первом этапе определяется расчетная электрическая нагрузка предприятия. Для проектируемых предприятий расчетная нагрузка определяется известными аналитическими и эмпирическими методами [14]. При реконструкции системы электроснабжения (СЭС) – по графикам электрической нагрузки предприятия.

На втором этапе рассчитывается объем суточной выработки биометана ( $V_M$ ) и теоре-

тически возможной мощности ЭУ ( $P_{\text{ТЭЦ.ТЕОР}}$ ). Исходными данными являются численность крупнорогатого скота ( $N_{\text{КРС}}$ ) и масса суточных биоотходов от каждого животного ( $M_i$ ). Расчет проводится в соответствии с [15]:

$$V_M = N_{\text{КРС}} \cdot M_i \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\text{И.Б}} \cdot N_{\text{Б}} \left( 1 - \frac{V}{100} \right) \left( \frac{R_C F G}{100} \right), \quad (1)$$

где  $K_{\text{П}}$  – коэффициент, учитывающий примеси в биомассе, о.е.;  $K_{\text{И.Б}}$  – коэффициент использования биомассы, о.е.;  $N_{\text{Б}}$  – удельный выход биогаза на 1 кг сухого вещества, м<sup>3</sup>;  $V$  – влажность биомассы, %;  $R_C$  – содержание органических веществ в сухой биомассе, %;  $F$  – уровень сбраживания биомассы, %;  $G$  – содержание метана в биогазе, % [16].

На третьем этапе рассчитываются собственные нужды ЭУ на ТОТЭ ( $P_{\text{С.Н}}$ ).

На четвертом этапе производится окончательный выбор мощности ЭУ с учетом электрических потерь в элементах СЭС ( $\Delta P$ ).

Установленная электрическая мощность ЭУ  $P_{\text{ТЭЦ.Э}}$

$$P_{\text{ТЭЦ.Э}} \geq P_{\text{Р.СУМ}} = P_{\text{Р}} + P_{\text{С.Н}} + \Delta P, \quad (2)$$

где  $P_{\text{Р.СУМ}}$  – суммарная расчетная мощность СХП, кВт;  $P_{\text{Р}}$  – расчетная мощность СХП, кВт.

При этом должно выполняться условие (3)

$$P_{\text{ТЭЦ.Э}} \leq P_{\text{ТЭЦ.ТЕОР}} = \frac{V_M}{F_{\text{У.С}}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ТЭЦ.ТЕОР}}$  – теоретически возможная электрическая мощность ЭУ, зависящая от объема суточной выработки биометана на предприятии и удельного расхода топлива ЭУ на ТОТЭ на выработку 1кВт энергии ( $F_{\text{У.С}}$ ).

Установленная тепловая мощность ЭУ определяется на основе выбранной  $P_{\text{ТЭЦ.Э}}$  по данным производителя ЭУ на ТОТЭ.

В качестве примера поразработанной методике произведен выбор ЭУ на ТОТЭ для электроснабжения действующего СХП молочного животноводства. Суммарная установленная мощность СХП – 106 кВт, численность КРС – 550 голов. Предприятие может ежедневно вырабатывать 906,9 м<sup>3</sup> биометана, что позволяет использовать ЭУ на ТОТЭ номинальной электрической мощностью 140 кВт непрерывно в течение года.

### Интеграция энергоустановки на ТОТЭ в систему электроснабжения СХП

Система электроснабжения с ЭУ на ТОТЭ состоит из четырех подсистем:

- основной генерации (ЭУ на ТОТЭ);
- накопления электроэнергии;
- преобразования и распределения электроэнергии;
- резервной генерации.

Система накопления на основе стационарных аккумуляторных батарей (АБ) решает проблему низкой маневренности ЭУ на ТОТЭ путем покрытия пиковых нагрузок в дневные часы и обеспечения необходимого уровня потребления электроэнергии в ночные часы минимума. На рис. 1 приведен суточный график нагрузки исследуемого СХП с наибольшим дневным пиком (типичные зимние сутки). Нижняя пунктирная линия показывает зону покрытия нагрузок ЭУ на ТОТЭ. В периоды минимума нагрузки (min1, min2 и min3) электроэнер-

гия, вырабатываемая ЭУ, идет на заряд АБ. В периоды максимума нагрузки (max1 и max2) происходит обратное действие – разряд АБ, а в случае полного разряда системы накопления в работу включается резервный источник питания – газовый электрогенератор.

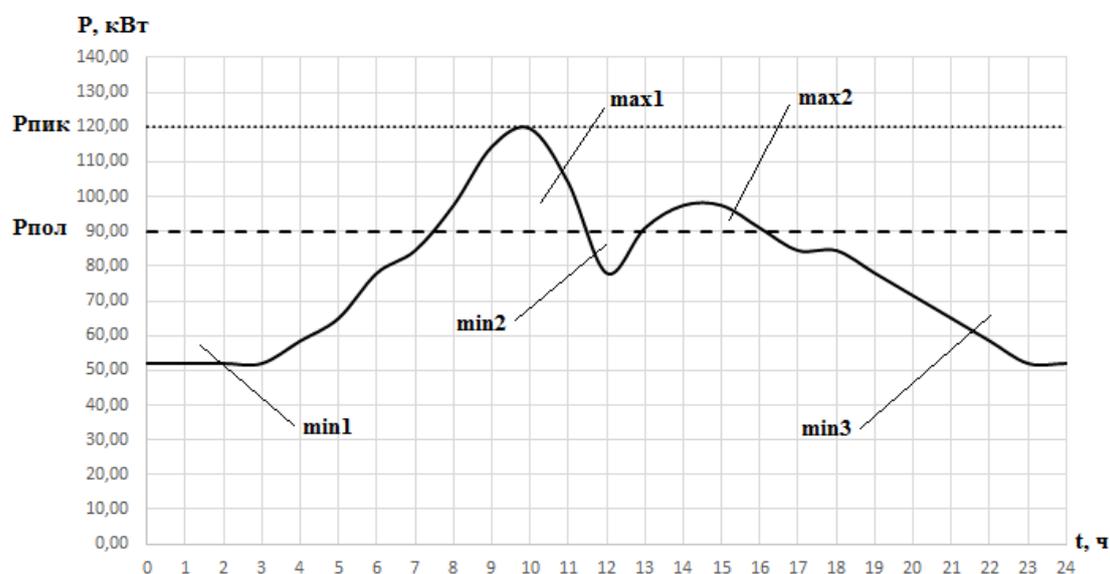


Рис. 1. Суточный график нагрузки исследуемого СХП с ЭУ на ТОТЭ

Интеграция ЭУ и системы накопления в СЭС предприятия осуществляется с помощью подсистемы преобразования на базе инверторов типа DC/AC (рис. 2).

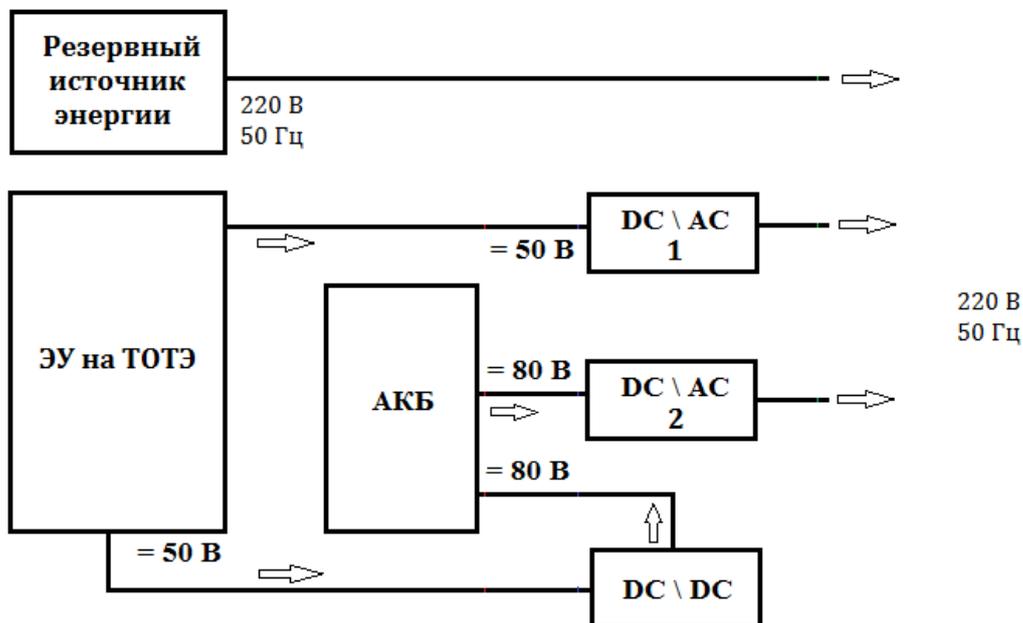
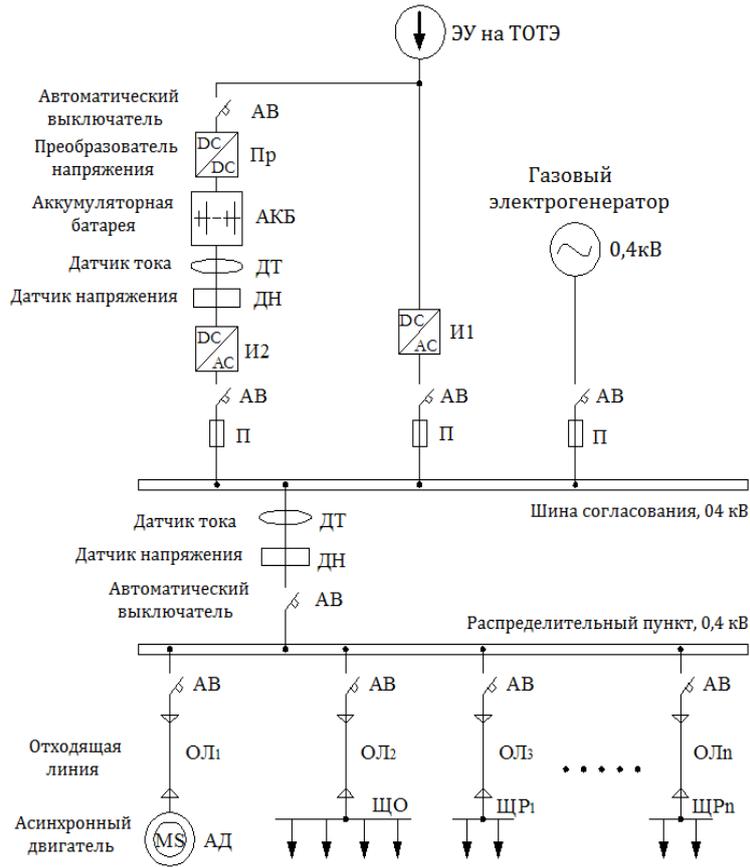


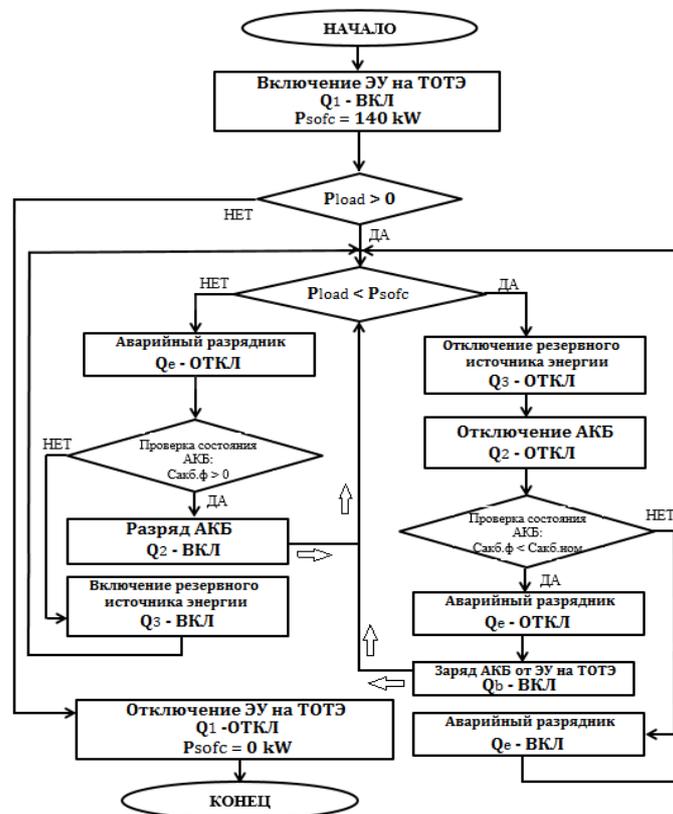
Рис. 2. Структурная схема системы преобразования

Подсистема резервной генерации предназначена для работы в период одновременного превышения потребляемой нагрузки предприятия над генерируемой мощностью ЭУ и полного разряда АБ. Источником энергии системы является газовый электрогенератор отечественного производства мощностью 10 кВт [17].

Однолинейная схема электроснабжения энергоудаленного СХП с ЭУ на ТОТЭ приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Однолинейная схема электроснабжения энергоудаленного предприятия с ЭУ на ТОТЭ:**  
ЩО – щит освещения; ЩР – щит распределительный



**Рис. 4. Блок-схема алгоритма функционирования СЭС исследуемого СХП**

### Компьютерное моделирование СЭС с ЭУ на ТОТЭ

Для определения порядка взаимодействия элементов исследуемой СЭС разработан алгоритм, позволяющий исключить дефицит электроэнергии и превышение генерации над электропотреблением предприятия. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 4.

Начальными параметрами работы ЭУ являются номинальная электрическая мощность ( $P_{sofc} = 140$  кВт) и тепловая мощность ЭУ. Необходимым условием для запуска ЭУ является наличие нагрузки СХП. Питание собственных нужд энергосистемы осуществляется от ЭУ на ТОТЭ.

Разработанный алгоритм состоит из двух основных контуров (кругов), разделенных условием (4)

$$P_{LOAD} < P_{SOFC} \tag{4}$$

При электрической мощности нагрузки ( $P_{load}$ ) меньшей мощности ЭУ на ТОТЭ ( $P_{sofc}$ ) происходит проверка состояния резервного источника питания и, в случае его работы подача сигнала на отключение выключателя  $Q_3$ . Аналогично подается сигнал на отключение АБ от цепи нагрузки (выключатель  $Q_2$ ).

Следующий шаг – проверка емкости АБ. При фактической емкости АБ меньшей номинальной ( $C_{аб.ф} < C_{аб.ном}$ ), подается сигнал на отключение аварийного разрядника (выключатель  $Q_e$ ), и начинается процесс заряда АБ. Аварийный разрядник (чисто активная нагрузка) предусмотрен на случай превышения мощности генерации основного источника энергии над мощностью нагрузки при 100% заряда АБ. При  $C_{аб.ф} = C_{аб.ном}$  (100% заряда) подается сигнал на включение выключателя  $Q_e$ .

При мощности нагрузки, меньшей мощности ЭУ на ТОТЭ, происходит отключение выключателя  $Q_e$  с последующей проверкой состояния АБ. Если фактическая емкость АБ  $C_{аб.ф} > 0$ , подается сигнал на включение в цепь нагрузки системы накопления (выключатель  $Q_2$ ). При полном разряде АБ ( $C_{аб.ф} = 0$ ) подается сигнал на подключение резервного источника энергии (включение выключателя  $Q_3$ ).

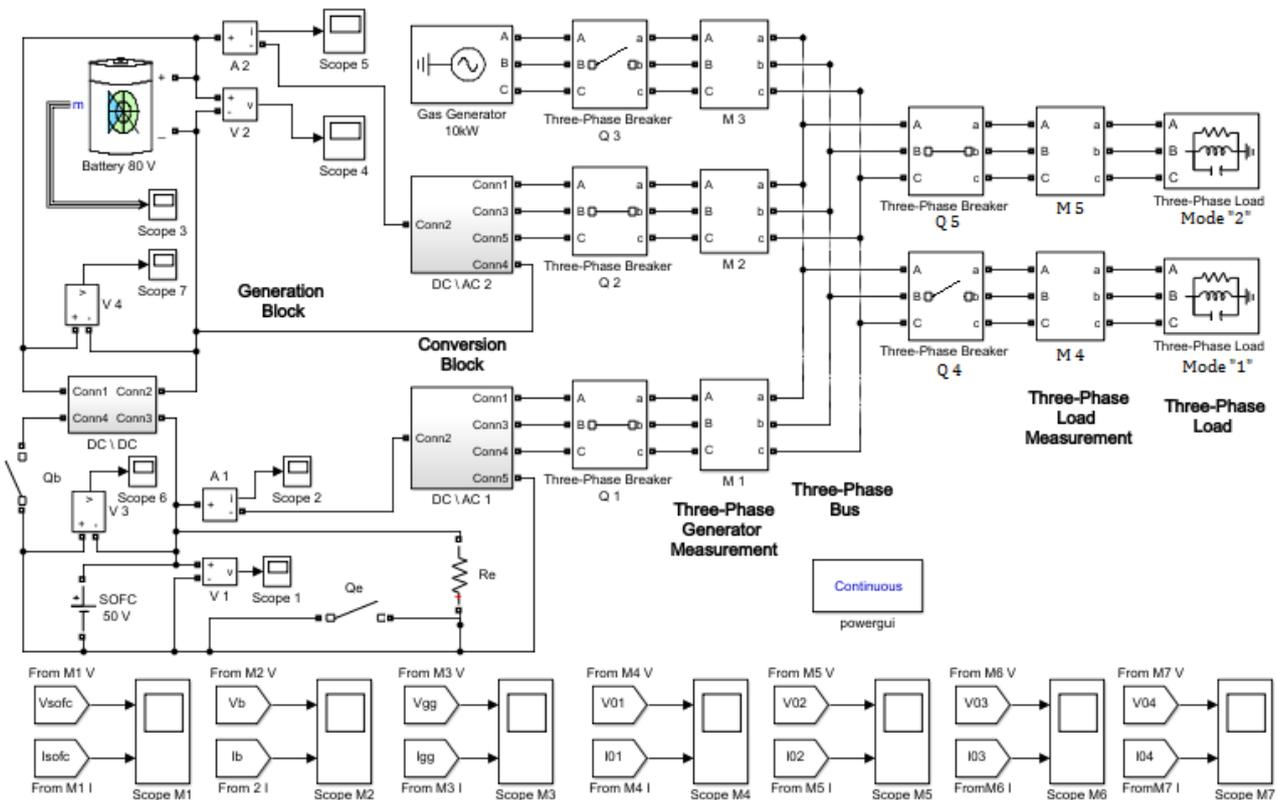


Рис. 5. Simulink-модель системы электроснабжения с ЭУ

Мониторинг соотношения мощностей генерации и нагрузки происходит непрерывно.

Для отработки алгоритма и отладки механизмов его управления в программном комплексе Matlab-Simulink разработана имитационная компьютерная модель системы электрообеспечения СХП на основе ТОТЭ. Разработанная модель представляет собой комбинированное соединение типовых и программируемых блоков в программном комплексе Matlab-Simulink в единую систему. На рис. 5 представлена первая итерация модели согласованного функционирования четырех подсистем, позволяющая имитировать ряд теоретических измерений (осциллограммы токов и напряжений, а также их действующие значения) для двух режимов функционирования СЭС исследуемого СХП:

- режим 1: мощность генерации ( $P_{ГЕН1}$ ) равна номинальной мощности ЭУ на ТОТЭ;
- режим 2: мощность генерации ( $P_{ГЕН2}$ ) равна сумме номинальных мощностей ЭУ и системы накопления, рассчитанной на работу в пиковый период.

Следует отметить, что первичная итерация модели требует доработки и продолжения исследований с целью приближения моделируемой системы к реальным условиям.

Действующее значение напряжения на зажимах нагрузки с увеличением мощности генерации (пропорциональным увеличению мощности нагрузки) незначительно уменьшается (в пределах 1%), что находится в рамках действующего стандарта на качество электроэнергии [18]. При этом действующее значение тока при увеличении нагрузки и мощности генерации увеличивается примерно на 4,1%.

### Заключение

На основе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана методика выбора мощности энергоустановки на ТОТЭ, работающей на биогазе. Методика позволяет осуществить подбор оптимальной мощности источника питания с учетом объема биогаза на предприятии и его суммарной установленной мощности.
2. Разработаны технические решения по интеграции энергоустановки на ТОТЭ в систему электроснабжения энергоудаленного СХП.

Рассмотренная СЭС с ЭУ на ТОТЭ включает в себя четыре подсистемы: основной и резервной генерации, преобразования и накопления. Наличие подсистем накопления и преобразования позволяет решить проблемы низкой маневренности ЭУ на ТОТЭ и интеграции ЭУ в СЭС потребителей. Система резервной генерации обеспечивает работу предприятия в критическом случае – превышении мощности нагрузки над генерацией и полном разряде АКБ.

3. На основе предложенного алгоритма в программном комплексе Matlab-Simulink разработана имитационная компьютерная модель СЭС с ЭУ на ТОТЭ.

Представленная модель позволяет проводить исследования основных электрических характеристик системы (осциллограммы токов и напряжений) на источниках питания и нагрузке, позволяющих сделать вывод о согласованной работе системы генерации и потребителей СХП.

### Библиографический список

1. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 09.06.2017 № 1209-р. М., 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71599734/#1000>.
2. Григорьев, С.В. Энергоснабжение обособленных и удаленных потребителей на основе использования петротермальных источников энергии: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.01 / С.В. Григорьев. – М.: Нац. исслед. ун-т МЭИ, 2014. – 220 с.
3. Проект «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» (редакция от 01.02.2017). М., 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920>.
4. Энергоэффективность и развитие энергетики: гос. программа Российской Федерации. Утверждено постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 года № 321 (с изменениями на 30 декабря 2017 года) (редакция, действующая с 12 января 2018 года). — М., 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091759>.
5. Об основах государственной политики Российской Федерации в районах Севера: доклад на

- заседании Президиума Госсовета №36. [Электронный ресурс]. URL: <http://archive.kremlin.ru/text/appears2/2004/04/28/97302.shtml>.
6. **Попель, О.С.** Перспективные применения возобновляемых источников энергии – в мировой практике и в России: научная конференция фонда Сколково. [Электронный ресурс]. URL: [gosbook.ru/node/36164](http://gosbook.ru/node/36164).
  7. **Томаров, Г.В.** Мини-ТЭЦ на основе когенерационных технологий / Г.В. Томаров, В.С. Рабенко, В.А. Буданов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – № 2. – С. 27–35.
  8. **Вершинский, В.П.** Какой привод выбрать [Электронный ресурс]. URL: [turbine-diesel.ru](http://turbine-diesel.ru)
  9. **Маркеев, Д.С.** Электрохимические генераторы на топливных элементах последние разработки / Д.С. Маркеев, Д.В. Ростовщикова, Л.Г. Перминова // Молодёжь и наука: сб. материалов VI Всерос. научно-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. – 270 с.
  10. Официальный интернет-сайт компании BloomEnergy. 2014 [Электронный ресурс]. URL: [bloomenergy.com/fuel-cell/solid-oxide](http://bloomenergy.com/fuel-cell/solid-oxide).
  11. Новые разработки в сфере мини-ТЭЦ // Электропанорама. – 2000. – №5. – С. 43–50.
  12. **Соснина, Е.Н.** Автоматизированная информационная база данных по энергоустановкам на возобновляемых источниках энергии / Е.Н. Соснина, Д.А. Филатов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 1 (103). – С. 194–199.
  13. **Соснина, Е.Н.** Разработка методики сравнительного анализа энергоустановок на возобновляемых источниках энергии / Е.Н. Соснина, Д.А. Филатов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – С. 87–91.
  14. **Вагин, Г.Я.** Системы электроснабжения: комплекс учебно-метод. материалов / Г.Я. Вагин, Е.Н. Соснина. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012. – 143 с.
  15. Компания «Биокомплекс». Информационный портал. [Электронный ресурс]. URL: [biogaz-russia.ru/proekt-biogazovojj-ustanovki](http://biogaz-russia.ru/proekt-biogazovojj-ustanovki).
  16. **Веднев, А.Г.** ОФ «Флюид». Биогазовые технологии в Кыргызской Республике / А.Г. Веднев, Т.А. Веденева. – Астана: Евро, 2006. – 90 с.
  17. Официальный интернет ресурс компании ООО «Фасэнергомаш» [Электронный ресурс]. URL: [fasenergo.ru](http://fasenergo.ru).
  18. ГОСТ № 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 2014.

*Дата поступления  
в редакцию 05.02.2018*

**E.N. Sosnina, L.E. Veselov**

## **SOFC-BASED POWER PLANTS FOR REMOTE CONSUMERS POWER SUPPLY**

Nizhny novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** The article considers the problem how to supply remote consumer's offline by employing SOFC-based power plant, which run on biogas. Issues concerning the integration of SOFC-based power plant into agricultural enterprises power supply system are also considered here.

**Design/methodology/approach:** The authors have developed the method of SOFC-based power plant's selection for small factories, which have ability to generate biogas. The method of computer simulation modeling in the software package "MatLab" (appendix "Simulink"), as well as well-known methods of electrical loads calculation are applied.

**Findings:** The paper determines the most promising types of power plants and fuel cells. The authors have developed the algorithm and Simulink-model of SOFC-based power plant power supply system which makes it possible to investigate power supply system energy characteristics.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the field of application SOFC-based power plant to power supply low-capacity remote consumers. For instance, one of the necessary needs is to develop a computer simulation model in more detail.

**Originality/value:** The study first tested the computer Simulink-model of SOFC-based power plant to power supply system for agricultural enterprises power supply. The paper also provides the method of SOFC-based power plant's selection, which can be further used to power supply low-capacity agricultural enterprises.

*Key words:* SOFC-based power plant, solid oxide fuel cell, power supply system, remote consumer, biogas, agricultural enterprise, Simulink model.