

УДК 621.314

Н.Н. Вихорев<sup>1</sup>, А.И. Чивенков<sup>1</sup>, И.С. Панфилов<sup>2</sup>, С.Ю. Панфилов<sup>1</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ  
В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород<sup>2</sup>

Разработана и исследована модель гибридной энергосистемы, позволяющая сформировать требования к параметрам аккумуляторной батареи и емкостного накопителя для обеспечения бесперебойности электропитания потребителя. Рассмотрена работа энергосистемы при различных соотношениях генерируемой и потребляемой мощностей. Показано, что за счет сочетания режимов работы буферного накопителя электроэнергии возможно обеспечить постоянный уровень потребляемой мощности от первичного источника, что позволяет эксплуатировать твердооксидный топливный элемент при максимальном коэффициенте использования (расход энергоносителя на единицу генерируемой мощности) независимо от девиаций нагрузки.

*Ключевые слова:* стабилизатор мощности, NiCd, DC/DC преобразователь.

В системах электропитания автономных объектов (СЭАО) перспективным направлением является применение твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), обладающих рядом преимуществ перед другими (дизель-генераторными, солнечными и т.п.) источниками электроэнергии [1]. В качестве буферных накопителей в таких системах электропитания используются никель-кадмиевые аккумуляторы (рис. 1). Этот тип аккумуляторных элементов допускает глубокий разряд аккумуляторных батарей, длительное время хранения в полностью разряженном состоянии с сохранением номинальной емкости, большое число перезарядов

Кроме того, СЭАО включает в себя три повышающих преобразователя постоянного напряжения в постоянное (DC/DC) без гальванической развязки (рис. 2), работающие в режиме непрерывных токов. Преобразователь DC/DC-2 осуществляет преобразование напряжения 50 В, формируемым ТОТЭ, в напряжение 100 В, являющееся рабочим для аккумуляторной батареи, преобразователь DC/DC-1 - в напряжение 400 В, которое является номинальным для нагрузки и емкостного накопителя. Преобразователь DC/DC-3 служит для согласования напряжения аккумуляторной батареи и емкостного накопителя.

Для исследования работы СЭАО, согласно структурной схеме (рис. 1), в среде MATLAB 2014b/Simulink разработана его имитационная модель (рис. 3).

В качестве первичного источника электропитания (ТОТЭ) применен блок Fuel Cell Stack (Simulink/Simscape/electricdrivelib/Extra Sources/), с вольт-амперной характеристикой и зависимостью выходной мощности от тока нагрузки, приведенными на рис. 4.

Модели преобразователей DC/DC-1, DC/DC-2 и DC/DC-3 (рис. 5) выполнены, согласно рис. 2, с параметрами, приведенными в табл. 1.

Емкостный накопитель представлен блоком C (Series RLC Branch) с заданным начальным напряжением 400 В и емкостью 0,1 Ф.

NiCd аккумуляторная батарея моделируется блоком Battery (Specialized Technology/Electrical Sources), емкостью - 5 А\*ч, уровнем заряда - 50%, номинальным напряжением 100 В.

Для сокращения времени моделирования преобразователь DC/AC и потребитель за-

менены на модель нагрузки, которая обеспечивает постоянство потребляемой мощности в энергосистеме с ТОТЭ и представлена блоком Load (SubSystem) (рис. 6) и его составной частью – блоком SubSystem (рис. 7).

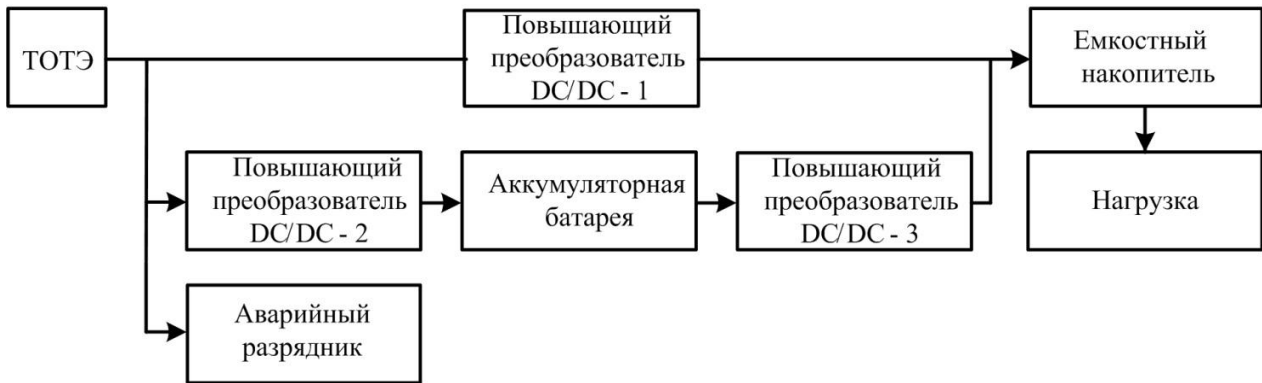


Рис. 1. Структурная схема СЭАО с ТОТЭ

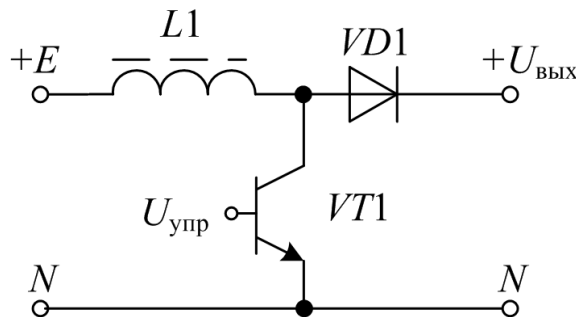


Рис. 2. Принципиальная схема силовой части преобразователей DC/DC

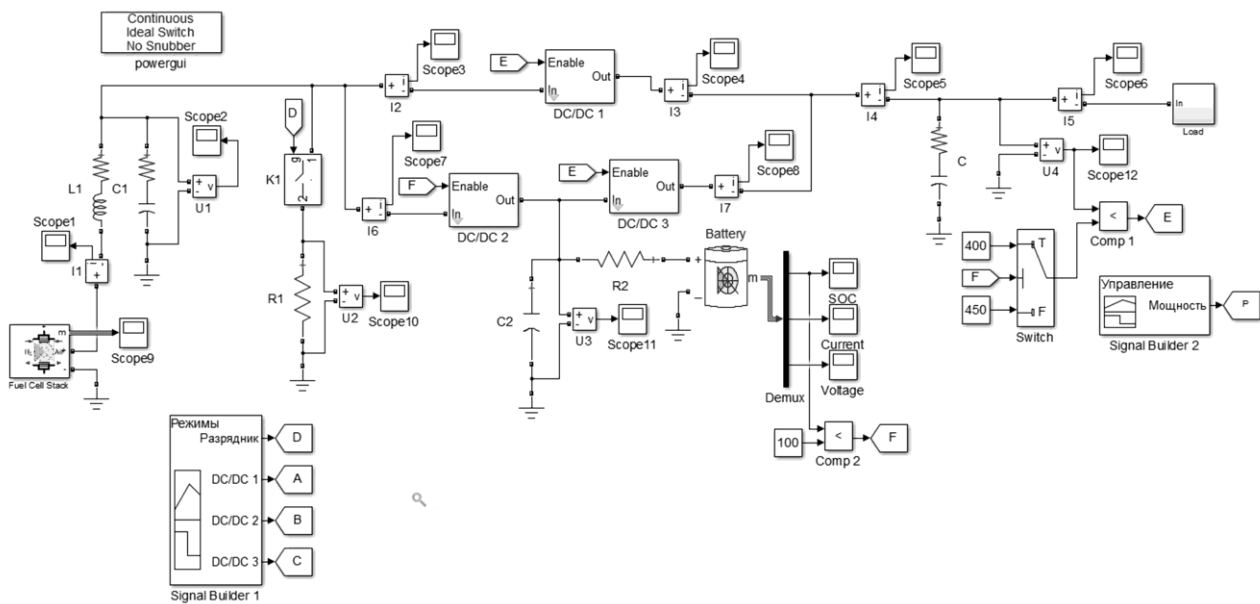


Рис. 3. Имитационная модель СЭАО с ТОТЭ

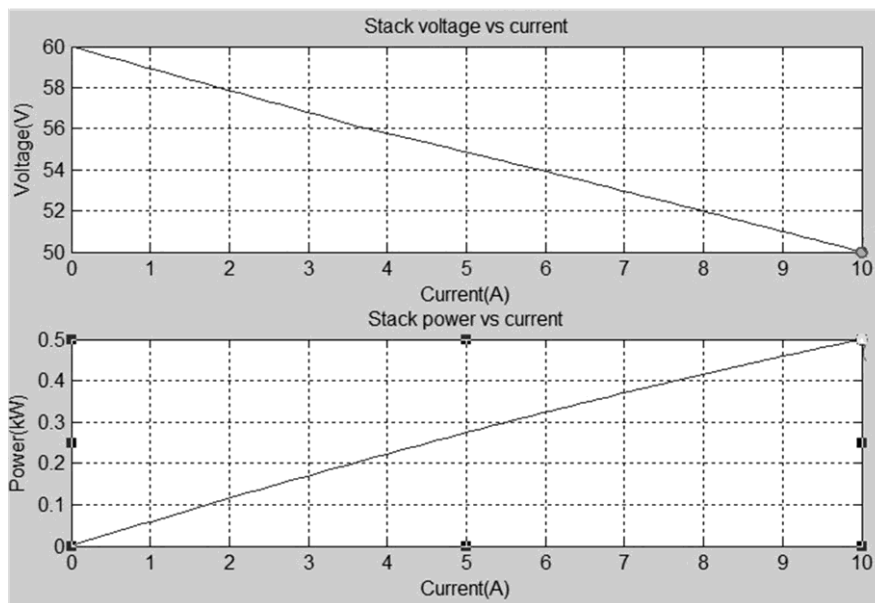


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика и зависимость выходной мощности ТОТЭ от тока нагрузки

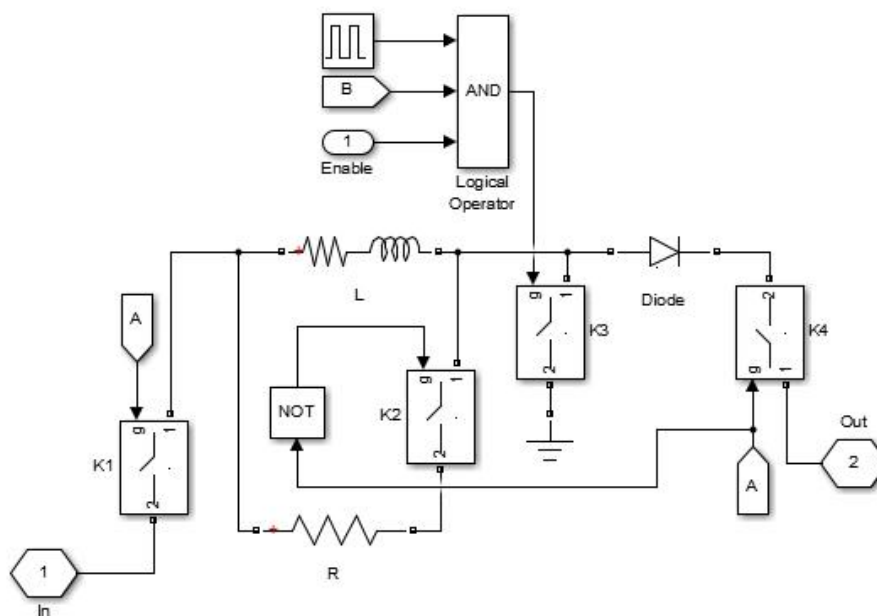


Рис. 5. Модель повышающих преобразователей DC/DC

Таблица 1

Параметры преобразователей

Наименование преобразователя	Относительная длительность управляющих импульсов	Индуктивность дросселя, мГн	Частота преобразования, кГц
DC/DC-1	0,88	3,828	1,0
DC/DC-2	0,3	1,74	
DC/DC-3	0,76	3,828	

Блок Load включает в себя вольтметр  $U$ , показания которого являются входными данными для блока Subsystem, и управляемый источник тока (Controlled Current Source) [2]. Источник тока обеспечивает протекание значения тока в соответствии с управляющим сигналом, формируемым блоком Subsystem.

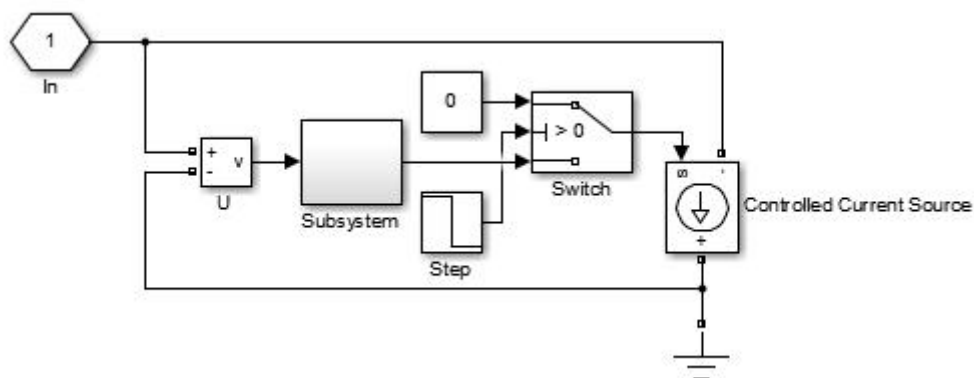


Рис. 6. Блок Load

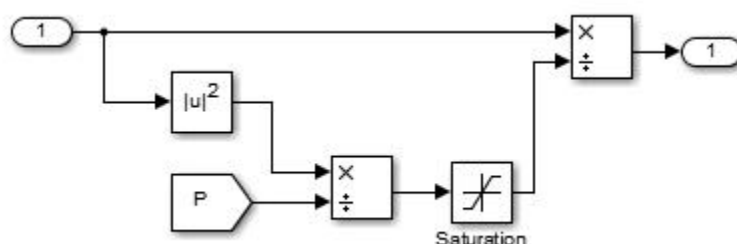


Рис. 7. Блок Subsystem

На начальном этапе моделирования (с 0 по 0,5 с) задается нулевой ток, что соответствует отключенной нагрузке. Это обеспечивается блоками Step, Switch и Constant. В дальнейшем ток нагрузки задается выходными сигналами блока Subsystem.

Блок Subsystem выполнен на базе математических блоков библиотеки Simulink/Math Operations, с применением блоков пересылки данных (In, Out) из библиотеки Simulink/Signal Routing.

Блок реализует следующие функции:

$$I = U / R, \quad (1)$$

$$R = U^2 / P. \quad (2)$$

Блок Saturation необходим для устранения неопределенности при делении на ноль в начальный момент моделирования.

В модели СЭАО с ТОТЭ компаратор Comp 1 (Relation Operator) обеспечивает ограничение заряда емкостного накопителя С. Максимальное напряжение конденсатора С задается блоком Constant. При достижении максимального уровня напряжения сигнал Enable (на входе логического элемента AND) принимает нулевое значение. Компаратор Comp 2 выполняет аналогичную функцию – контроль уровня заряженности аккумуляторной батареи (SOC). При достижении 100% заряда формируется сигнал F, отключающий преобразователь DC/DC 2 и изменяющий уставку компаратора Comp 1 (400 на 450 В).

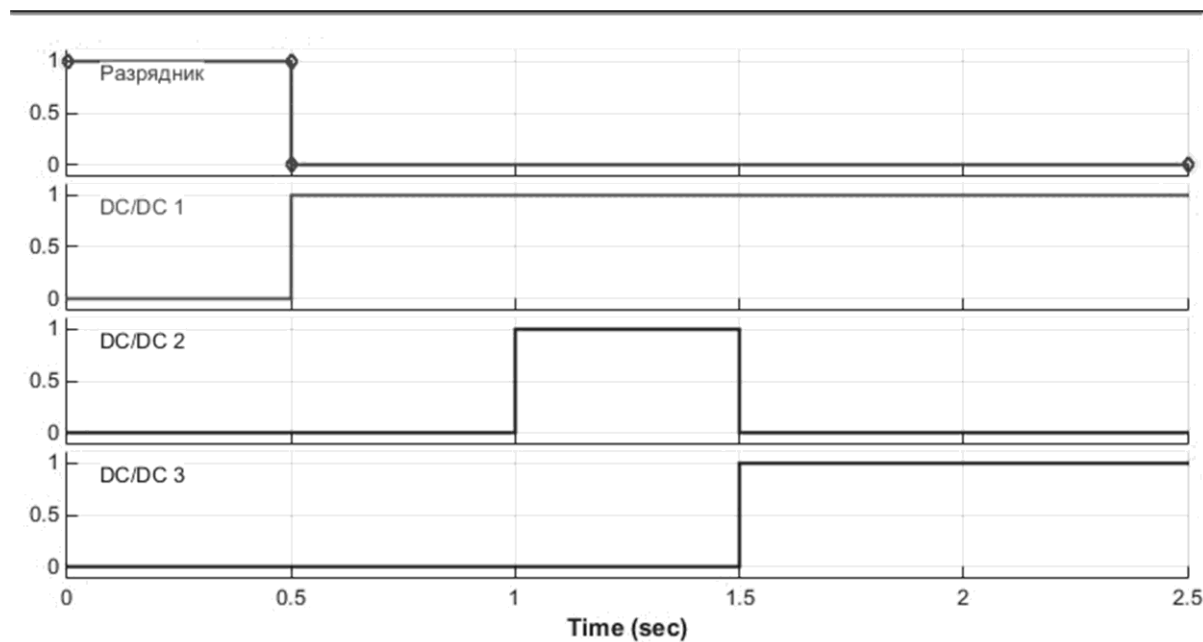
При моделировании работы СЭАО с ТОТЭ использовались различные сочетания одновременной и раздельной работы преобразователей DC/DC и аварийного разрядника при различной мощности нагрузки.

Алгоритм (режимы) работы модели СЭАО с ТОТЭ определяются управляющими сигналами, формируемыми блоками Signal Builder 1 (рис. 8, а) и Signal Builder 2 (рис. 8, б). Блок Signal Builder 1 осуществляет управление работой преобразователей DC/DC и аварийного разрядника R1, а блок Signal Builder 2 – изменение мощности нагрузки.

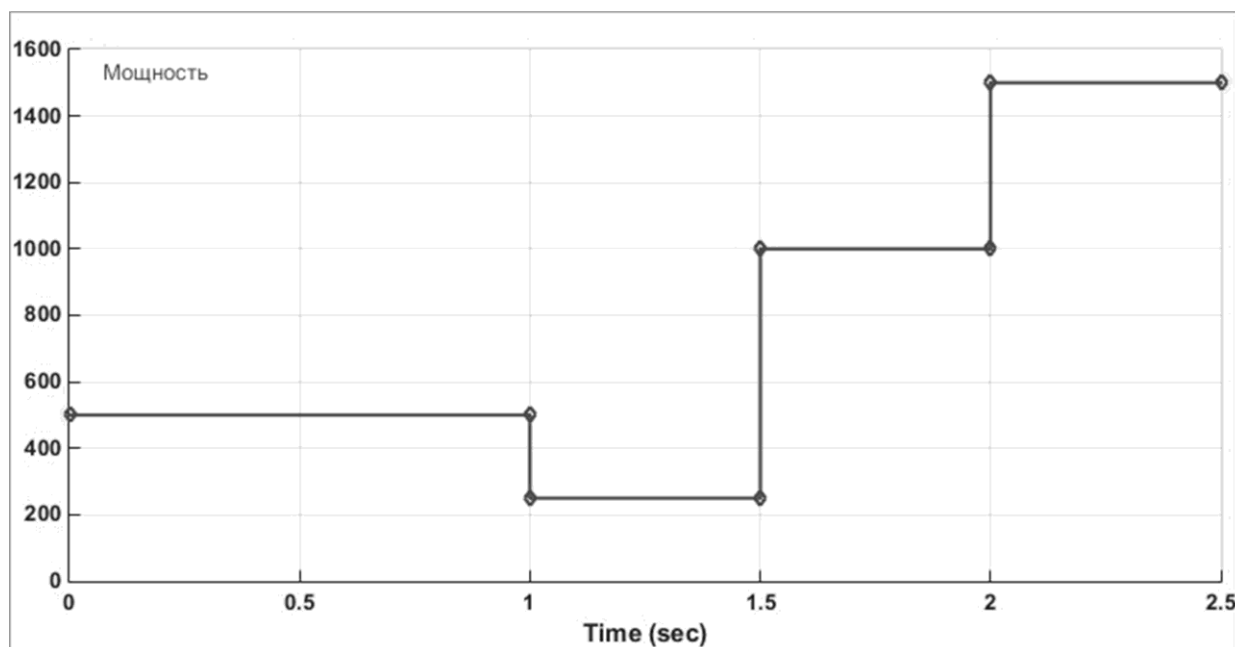
Работа источника разделена на несколько интервалов времени:

- с 0 по 0,5 с – работа ТОТЭ на аварийный разрядник;
- с 0,5 по 1 с – работа ТОТЭ на номинальную нагрузку;

- с 1 по 1,5 с – работа ТОТЭ на 0,5 номинальной нагрузки и заряд аккумуляторной батареи (степень заряженности аккумуляторной батареи контролируется компаратором Comp 2);
- с 1,5 по 2 с – работа ТОТЭ и аккумуляторной батареи на удвоенную номинальную нагрузку (разряд аккумуляторной батареи);
- с 2 по 2,5 с и более – работа ТОТЭ и аккумуляторной батареи на утроенную нагрузку (разряд аккумуляторной батареи емкостного накопителя).



а)



б)

Рис. 8. Диаграммы управляющих сигналов, формируемых блоками Signal Builder 1 (а) и Signal Builder 2 (б)

Результаты моделирования на временном промежутке с 0 по 2,5 с приведены на рис. 9–11, на интервале времени с 0 по 20 при разных значениях емкости накопителя С – на рис. 12–13.

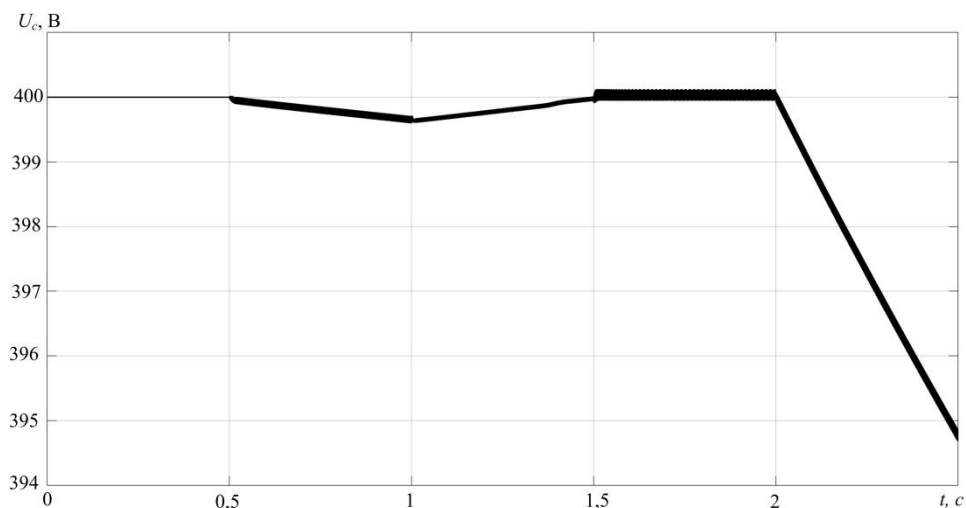


Рис. 9. Напряжение на емкостном накопителе С

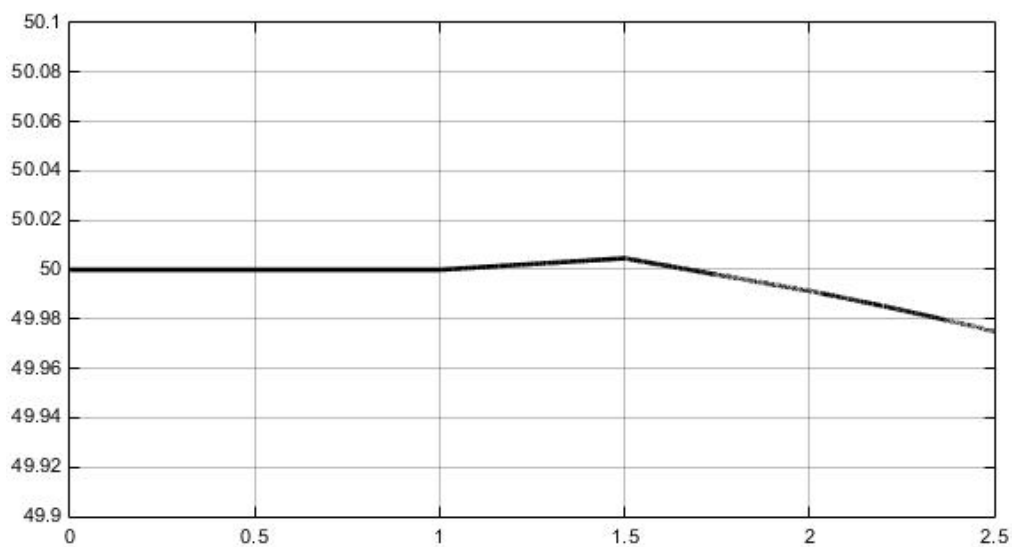


Рис. 10. Уровень заряженности аккумуляторной батареи/ State of charge (SOC) в процентах от номинального

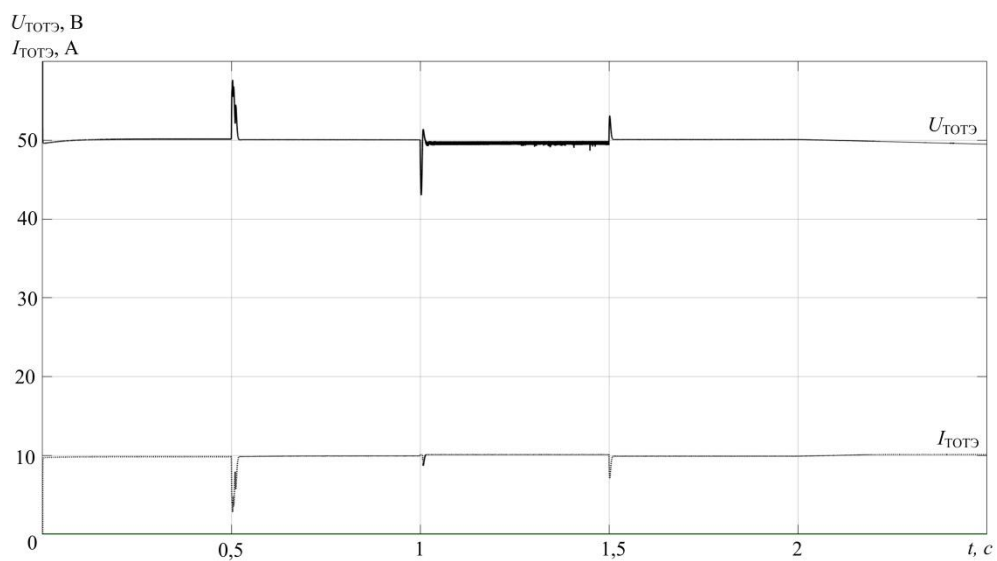
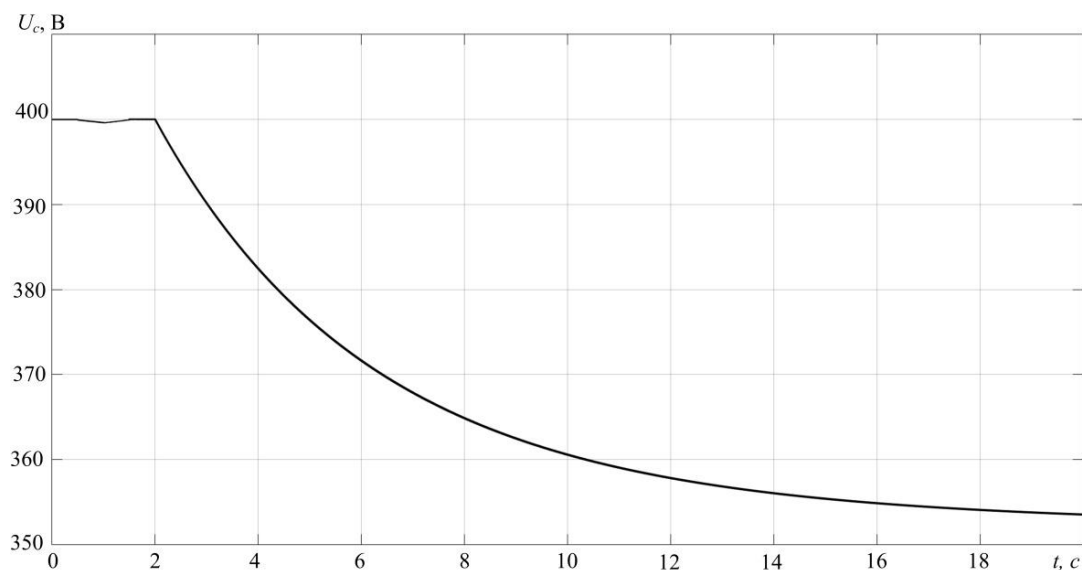
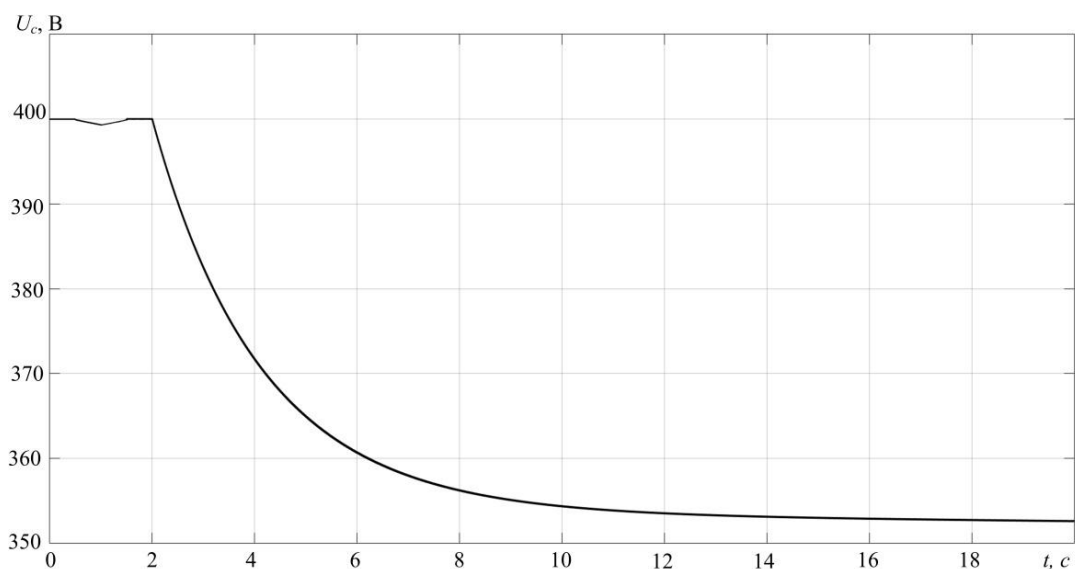


Рис. 11. Ток (пунктир) и напряжение (сплошная) TOTЭ

Рис. 12. Напряжение на емкостном накопителе при  $C=0,1 \text{ Ф}$ Рис. 13. Напряжение на емкостном накопителе при  $C=0,05 \text{ Ф}$ 

### Выводы

В результате моделирования было установлено, что принципиально возможно:

- обеспечить постоянство уровня потребляемой от первичного источника электроэнергии мощности, что позволяет эксплуатировать ТОГЭ при максимальном коэффициенте использования (расход энергоносителя на единицу генерируемой мощности) при различных режимах работы нагрузки (рис. 12);
- поддерживать заданный уровень напряжения на выходе гибридного источника электропитания при набросе нагрузки выше номинальной (рис. 9);
- сформировать требования к параметрам аккумуляторной батареи (рис. 11) и емкостного накопителя (рис. 13, 14) для обеспечения бесперебойности электропитания потребителя.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0073 о предоставлении субсидии от 05.06.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0073).*

## Библиографический список

1. **Вихорев, Н.Н.** Система автономного электропитания с топливным элементом и буферным накопителем / Н.Н. Вихорев [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. – 2014.
2. **Алтунин, Б.Ю.** Электротехнические расчеты в системе компьютерной математики MATLAB SIMULINK: учеб. пособие / Б.Ю. Алтунин [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2005.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2015*

**N.N. Vikhorev<sup>1</sup>, A.I. Chivenkov<sup>1</sup>, I.S.Panfilov<sup>2</sup>, S.J.Panfilov<sup>1</sup>**

**MODELING WORK OF AN AUTONOMOUS POWER  
SOURCE IN MATLAB / SIMULINK**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC «SIE «POLET»<sup>2</sup>

**Purpose:** To ensure optimal operating conditions of the fuel cell hybrid power source.

**Design/methodology/approach:** To study the methods used to accomplish the task a number of simulation models in an interactive system.

**Findings:** It is shown that is possible in principle to provide a consistent level of consumed power from a primary power source that allows SOFCs operate at the maximum duty cycle (consumption of energy per unit of generated power) under different operating loads to maintain a predetermined voltage level at the output of the hybrid power supply lashed out at above rated load and shape requirements to the parameters of the battery and the storage capacitor to provide uninterrupted power consumer.

**Research limitations/implications:** Defining the parameters of the hybrid system of autonomous power.

**Originality/value:** Urgency is to ensure the constancy of the power consumption of the fuel cell during the changing load.

*Key words:* power stabilizer, NiCd, DC / DC converter.