

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК 621.314

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_3\_107

### ИСТОЧНИК РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОДОРОДНЫМ ТОПЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ И ЛИТИЙ-ЖЕЛЕЗО-ФОСФАТНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕЕЙ

**А.Л. Куликов**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru)

**В.В. Ваняев**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: [vanyaev.w@mail.ru](mailto:vanyaev.w@mail.ru)

**А.Б. Дарьенков**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: [darenkov@nntu.ru](mailto:darenkov@nntu.ru)

**А.В. Шахов**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: [andshahov@gmail.com](mailto:andshahov@gmail.com)

Разработан источник резервного электропитания ответственных потребителей в условиях нестабильности первичной питающей сети, построенный на основе перспективных водородных топливных элементов и современных литий-железо-фосфатной аккумуляторных батарей, позволяющая уменьшить расчетную мощность, массу и габариты разрабатываемого устройства. Выполнен расчет фильтровых конденсаторов преобразовательной части источника, обеспечивающих требуемое качество выходного напряжения. Приведены результаты имитационного моделирования источника резервного электропитания.

**Ключевые слова:** система бесперебойного электропитания, источник резервного электропитания, водородный топливный элемент, аккумуляторная батарея, автономный инвертор напряжения, синусоидальная ШИМ, фильтровый конденсатор, имитационная модель.

**Для цитирования:** Куликов, А.Л. Источник резервного электропитания с водородным топливным элементом и литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареей / А.Л. Куликов, В.В. Ваняев, А.Б. Дарьенков, А.В. Шахов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 107-124. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_3\_107

## **BACKUP POWER SUPPLY SOURCE WITH HYDROGEN FUEL CELL AND LITHIUM IRON PHOSPHATE BATTERY**

**A.L. Kulikov**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru)

**V.V. Vanyaev**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: [vanyaev.w@mail.ru](mailto:vanyaev.w@mail.ru)

**A.B. Dar'enkov**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: [darenkov@nntu.ru](mailto:darenkov@nntu.ru)

**A.V. Shahov**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: [andshahov@gmail.com](mailto:andshahov@gmail.com)

The article is devoted to the development of a backup power supply source for responsible consumers in conditions of instability of the primary supply network, built on the basis of promising hydrogen fuel cells and modern lithium-iron-phosphate storage batteries. A rational arrangement of storage batteries is proposed, which makes it possible to reduce the design power, weight and dimensions of the device being developed. The calculation of filter capacitors of the converter part of the source, providing the required quality of the output voltage, has been performed. The results of simulation of the backup power source are presented.

**Ключевые слова:** autonomous voltage inverter, backup power supply source, filter capacitor, hydrogen fuel cell, uninterruptible power supply system, simulation model, sinusoidal PWM, storage battery.

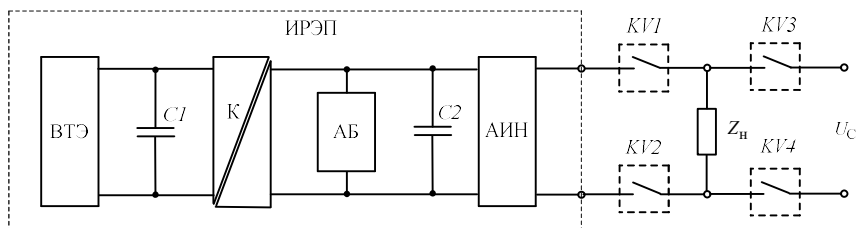
**For citation:** A.L. Kulikov, V.V. Vanyaev, A.B. Dar'enkov and A.V. Shahov, "Backup power supply source with hydrogen fuel cell and lithium iron phosphate battery", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 107-124, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_3\_107

## I. Введение

Системы бесперебойного электропитания обеспечивают подачу энергии к ответственным потребителям в условиях их работы от первичной сети с нестабильным режимом функционирования. Они включают в себя первичную сеть как основной канал электропитания потребителей и источник резервного электропитания (ИРЭП), в качестве которого весьма перспективно применение водородных топливных элементов (ВТЭ) в совокупности с литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареей (АБ), обеспечивающих резервный канал электропитания нагрузки при отсутствии (или низком уровне) напряжения первичной сети.

Функциональная схема силовых цепей системы бесперебойного электропитания представлена на рис. 1. Она содержит первичную сеть переменного напряжения  $U_c$ , ИРЭП, быстродействующие твердотельные реле  $KV1-KV4$ , управляемыми микроконтроллером, которые подключают в общем случае активно-индуктивную нагрузку  $Z_n$  к сети, или ИРЭП при отсутствии напряжения сети.



**Рис. 1. Функциональная схема силовых цепей системы бесперебойного электропитания**

**Fig. 1. Functional diagram of power circuits of the uninterruptible power supply system**

В свою очередь, функциональная схема силовых цепей ИРЭП содержит ВТЭ в качестве резервного источника энергии, АБ на базе  $LiFePO_4$  аккумуляторов, которая выполняет функцию электрического буфера,

обеспечивающего совместно с ВТЭ необходимый уровень выходной мощности в течение заданного времени при отсутствии или низком уровне напряжения  $U_c$ . Силовая цепь ИРЭП содержит также конвертор (К) и выходной автономный инвертор напряжения (АИН) с ШИМ. Конвертор согласует относительно низкое напряжение ВТЭ с повышенным напряжением питания АИН, а также гальваническую развязку топливного элемента от остальной силовой цепи. Он выполнен на базе АИН с широтным регулированием выходного напряжения и трансформаторным выходом [1-4].

Выходной АИН выполнен по однофазной мостовой схеме и работает в режиме однополярной синусоидальной ШИМ, позволяющей уменьшить требуемую энергоемкость его выходного фильтра (на схеме рис. 1 этот фильтр, а также фильтр ЭМС, включены в структуру АИН). Преобразовательная часть ИРП выполнена на силовых *MOSFET* и *IGBT* [5]. В разработанном устройстве *LiFePO4* аккумуляторы АБ соединены последовательно для получения напряжения, обеспечивающего требуемый уровень напряжения питания АИН и, соответственно, заданного (220 В) выходного напряжения ИРЭП. Такое решение исключает необходимость установки дополнительного преобразователя для согласования напряжений АБ и АИН, что упрощает ИРЭП, стабилизирует его работу и улучшает его массогабаритные показатели.

С целью наиболее эффективного использования ВТЭ на интервале резервного питания нагрузки он функционирует в режиме источника постоянной номинальной мощности. Участок силовой цепи «конвертор – топливный элемент» охвачен обратной связью по выходной мощности ВТЭ. Кроме рассмотренных устройств, силовая цепь ИРЭП содержит также фильтровые конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  которые блокируют переменные составляющие токов, генерируемых преобразовательными устройствами.

С целью проверки работоспособности рассмотренной структуры ИРЭП необходимо выполнить имитационное моделирование происходящих в ней электромагнитных процессов. В качестве среды моделирования выбран пакет *MATLAB Simulink* [6].

## II. Имитационное моделирование процессов в ИРЭП

Имитационное моделирование процессов в силовых цепях (рис. 1) предполагает разработку моделей на базе заданных исходных данных к проекту, к которым относятся технические данные ТЭ и АБ, а также требования к выходным параметрам ИРЭП.

Если на начальном этапе паспортные параметры ВТЭ и АБ известны, то значения емкостей фильтровые конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  требуют определения.

**Определение величин емкостей фильтровых конденсаторов**

Получим расчетные выражения для решения этой задачи, воспользовавшись формулой, описывающей зависимость от времени усредненного тока, потребляемого однофазным мостовым АИН с синусоидальной ШИМ [4]:

$$\tilde{i}_1 = \frac{1}{2} \mu \cdot I_m \cdot [\cos \varphi_n - \cos(2\omega t - \varphi_n)], \quad (1)$$

где  $I_m$  – амплитуда усредненного выходного тока однофазного мостового АИН;  $\mu$  – глубина модуляции выходного напряжения;  $\varphi_n$  – фазовый угол тока нагрузки;  $\omega$  – круговая частота сетевого напряжения.

Наибольшее значение амплитуды переменной составляющей усредненного потребляемого тока, имеющего круговую частоту  $2\omega$  ( $f = 100$  Гц), будет:

$$I_{m \max} = \frac{1}{2} \mu_{\max} I_m. \quad (2)$$

Переменная составляющая усредненного потребляемого тока, по сути – тока, генерируемого АИН в цепь питания, замыкается через АБ, ВТЭ и фильтровые конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ , что вызывает появление пульсаций напряжения питания АИН и, как следствие, искажение выходного напряжения ИРЭП.

Наибольшую амплитуду пульсаций напряжения питания АИН можно определить по формуле:

$$U_{m \max} = \frac{1}{2} \mu_{\max} I_m \cdot \frac{r_{\text{ВТЭ}}'' \parallel r_{\text{АБ}}}{\sqrt{1 + 4(r_{\text{ВТЭ}}'' \parallel r_{\text{АБ}} \cdot C_1'' \parallel C_2 \cdot \omega)^2}}. \quad (3)$$

где  $r_{\text{ВТЭ}}''$  – внутреннее сопротивление ВТЭ, приведенное к напряжению питания АИН;  $r_{\text{АБ}}$  – внутреннее сопротивление АБ;  $C_1''$  – величина емкости конденсатора  $C_1$  приведенная к напряжению питания АИН;  $C_2$  – емкость конденсатора  $C_2$ ;  $r_{\text{ВТЭ}}'' \parallel r_{\text{АБ}}$ ,  $C_1'' \parallel C_2$  – соответственно, общее сопротивление и емкость параллельно соединенных элементов.

При реальных значениях параметров ВТЭ и АБ справедливы соотношения:

$$r_{\text{ВТЭ}}'' \gg r_{\text{АБ}}; C_1'' \ll C_2, \quad (4)$$

и расчетное выражение  $U_{m \max}$  примет вид:

$$U_{m \max} \approx \frac{1}{2} \mu_{\max} I_m \cdot \frac{r_{\text{АБ max}}}{\sqrt{1 + 4(r_{\text{АБ max}} C_2 \omega)^2}}. \quad (5)$$

Коэффициент пульсаций напряжения питания АИН на частоте 100 Гц определяется по формуле:

$$k_U = \frac{U_{m \max}}{U_{\text{АБ min}}}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получаем формулу для расчета требуемой величины емкости конденсатора  $C_2$ , обеспечивающей заданное значение коэффициента пульсаций:

$$C_2 = \frac{1}{2r_{\text{АБ max}} \omega} \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\mu_{\max} I_m r_{\text{АБ max}}}{k_U U_{\text{АБ min}}} \right)^2 - 1}. \quad (7)$$

Незначительная, согласно соотношениям (4), часть переменной составляющей тока, генерируемого АИН в цепь питания, замыкается через ВТЭ и фильтровый алюминиевый электролитический конденсатор  $C_1$  [7], и ее величина не оказывает существенного влияния на выходное напряжение ИРЭП. Необходимое значение емкости конденсатора  $C_1$  можно выбрать из следующего приближенного соотношения:

$$C_1 \approx \frac{r_{\text{ТЭ}}}{r_{\text{АБ max}}} \cdot C_2. \quad (8)$$

### **Определение глубины модуляции выходного напряжения АИН с ШИМ**

Глубина модуляции  $\mu$  выходного напряжения мостового АИН с ШИМ определяется:

$$\mu = \frac{U_{\text{mвых}}}{U_{\text{АБ}}}, \quad (9)$$

где  $U_{\text{mвых}}$  – амплитуда выходного напряжения устройства.

При заданном значении выходного напряжения наибольшее требуемое расчетное значение  $\mu_{\max}$  глубины модуляции будет:

$$\mu_{\max} = \frac{U_{\text{твых}}}{U_{\text{АБmin}} - r_{\text{АБmax}} \cdot \frac{P_{\text{вых}}}{U_{\text{АБmin}}}}, \quad (10)$$

где  $P_{\text{вых}}$  – мощность, отдаваемая ИРП в нагрузку.

### **Определение коэффициента повышения выходного напряжения конвертора**

Данный преобразователь выполнен на базе АИН с трансформаторным звеном повышенной частоты [3] и согласует относительно небольшое выходное напряжение топливного элемента с напряжением АБ. Коэффициент  $k_{\text{п}}$  повышения выходного напряжения рассчитывается в соответствии с выражением:

$$k_{\text{п}} = D_{\max} \cdot k_{21} = \frac{U_{\text{АБmax}}}{U_{\text{ТЭmin}}}, \quad (11)$$

где  $D_{\max}$  – наибольшая относительная длительность включения транзисторов К;  $k_{21}$  – коэффициент трансформации согласующего трансформатора К. Задавая значение  $D_{\max}$ , находим требуемый коэффициент трансформации  $k_{21}$  для мостовой схемы АИН:

$$k_{21} = \frac{k_{\text{п}}}{D_{\max}}. \quad (12)$$

При использовании в К полумостового АИН значение коэффициента трансформации рассчитывается по формуле:

$$k_{21} = \frac{2k_{\text{п}}}{D_{\max}}. \quad (13)$$

### **Расчет параметров имитационной модели ИРЭП**

На базе паспортных данных ВТЭ и АБ, а также приведенных выше соотношений выполним расчет параметров моделируемых устройств.

#### *Расчет внутреннего сопротивления ВТЭ*

Внешняя характеристика ВТЭ, используемого в проекте, приведена на рис. 2.

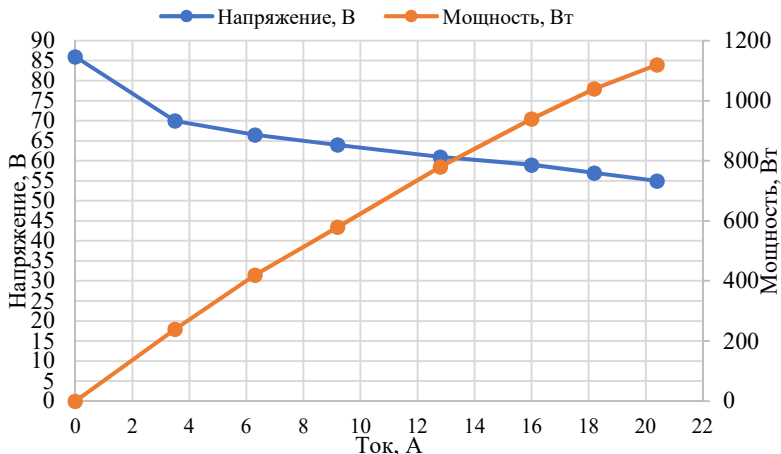


Рис. 2. Внешняя характеристика ВТЭ

Fig. 2. External characteristic of hydrogen fuel cell

Внутреннее сопротивление  $r_{ТЭ}$  ВТЭ, согласно его внешней характеристике (рис. 2), будет:

$$r_{ТЭ} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{69 - 56}{18,2 - 3,5} = \frac{13}{14,7} = 0,88 \text{ Ом.}$$

#### Расчет внутреннего сопротивления АБ

Принимаем следующие значения параметров аккумуляторов IFR26650-35A, применяемых в проекте:

- номинальное напряжение  $U_{Аном} = 3,2 \text{ В}$ ;
- минимальное напряжение  $U_{Амин} = 2,5 \text{ В}$ ;
- максимальное напряжение  $U_{Аmax} = 3,6 \text{ В}$ ;
- максимальное внутреннее сопротивление  $r_{Аmax} = 18 \text{ мОм}$ .

Значения напряжений всей АБ может быть рассчитано по формуле:

$$U_{АБ} = N \cdot M \cdot U_{А},$$

где  $N$ ,  $M$  – соответственно число аккумуляторов в одном субблоке АБ и число субблоков в батарее.

В проектируемом устройстве  $N = 12$ ,  $M = 12$  и соответствующие параметры всей батареи будут иметь значения

- номинальное напряжение  $U_{АБном} = 3,2 \cdot 144 = 460,8 \text{ В}$ ;



- минимальное напряжение  $U_{\text{АБmin}} = 2,5 \cdot 144 = 360 \text{ В}$ ;
- максимальное напряжение  $U_{\text{АБmax}} = 3,6 \cdot 144 = 518,4 \text{ В}$ ;
- максимальное внутреннее сопротивление  $r_{\text{АБmax}} = 18 \cdot 10^{-3} \cdot 144 = 2,6 \text{ Ом}$ .

*Расчет глубины модуляции выходного напряжения АИН*

При действующем значении выходного напряжения  $U_{\text{вых}} = 220 \text{ В}$  и выходной мощности  $P_{\text{вых}} = 3,0 \text{ кВт}$  наибольшее требуемое расчетное значение  $\mu_{\text{max}}$ , согласно (10), будет:

$$\mu_{\text{max}} = \frac{U_{\text{мвых}}}{U_{\text{АБmin}} - r_{\text{АБmax}} \cdot \frac{P_{\text{вых}}}{U_{\text{АБmin}}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{360 - 2,6 \cdot \frac{3 \cdot 10^3}{360}} = 0,92.$$

С учетом падения напряжения на открытых транзисторах и мертвого времени при переключениях транзисторов АИН принимаем значение  $\mu_{\text{max}} = 0,95$ .

*Расчет коэффициента повышения выходного напряжения конвертора*

Коэффициент  $k_{\text{п}}$  согласно (11) будет:

$$k_{\text{п}} = D_{\text{max}} \cdot k_{21} = \frac{U_{\text{АБmax}}}{U_{\text{ТЭmin}}} = \frac{518,4}{57} = 9,1.$$

Задаваясь значением  $D_{\text{max}} = 0,8$ , находим требуемый коэффициент трансформации  $k_{21}$  для полумостовой схемы АИН:

$$k_{21} = \frac{2k_{\text{п}}}{D_{\text{max}}} = \frac{2 \cdot 9,1}{0,8} = 22,8.$$

*Расчет величин емкостей фильтровых конденсаторов*

Задаваясь значением коэффициента  $k_U$  пульсаций напряжения питания АИН, равным  $k_U = 0,045$ , на основании полученных ранее данных по (7) рассчитываем емкость конденсатора  $C_2$ :

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{1}{2r_{\text{АБmax}} \omega} \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\mu_{\text{max}} I_m r_{\text{АБmax}}}{k_U U_{\text{АБmin}}} \right)^2 - 1} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 2,6 \cdot 314} \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{0,95 \cdot 24 \cdot 2,6}{0,045 \cdot 360} \right)^2 - 1} = 940 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

Принимаем модельное значение емкости  $C_2 = 1000$  мкФ.  
Находим величину емкости конденсатора  $C_1$  из (8):

$$C_1 \approx \frac{r_{ТЭ}}{r_{АБ\max}} \cdot C_2 = \frac{0,88}{2,6} \cdot 1000 = 318 \text{ мкФ.}$$

Принимаем модельные значения емкостей полумостового АИН в составе К несколько меньшими рассчитанных и равными  $C = 2 \cdot C_1 = 470$  мкФ.

### III. Результаты

Имитационное моделирование на ПК электромагнитных процессов в полной структуре ИРЭП, содержащей два преобразовательных устройства с автономными системами управления, не представляется целесообразным в силу ограниченности его вычислительных возможностей. При этом следует заметить, что на работу каждого из них значимое влияние оказывает лишь низкочастотная (100 Гц) составляющая тока, генерируемого выходным АИН. По этой причине моделирование процессов выполнено отдельно в каждом устройстве с учетом влияния на каждый из них этой составляющей.

Моделирование выполнено при условиях:

- нагрузка ИРП имеет номинальное значение  $P \approx 3$  кВт;
- действующее значение напряжения на выходе ИРЭП  $U_{\text{вых}} = 220$  В;
- частота выходного напряжения  $f_{\text{вых}} = 50$  Гц;
- нагрузка ИРП активно-индуктивная  $\cos\varphi_n = 0,8$ ;
- ВТЭ работает в режиме номинальной выходной мощности  $P_{ТЭ} = 1,0$  кВт;
- тактовая частота преобразователей ИРЭП  $f_t = 20$  кГц;
- напряжение АБ  $U_{АБ} = 360$  В и  $U_{АБ} = 500$  В.

Схемы набора имитационных моделей АИН и К приведены на рис. 3, 4. Результаты моделирования представлены временными диаграммами на рис. 5-10.

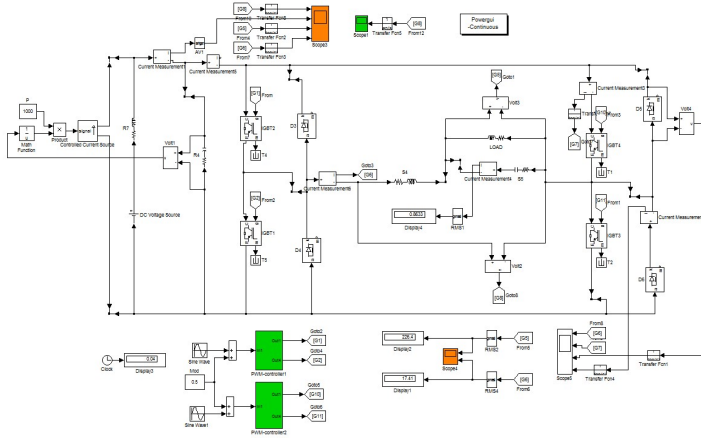


Рис. 3. Схема набора имитационной модели АИН

Fig. 3. Scheme of the set of the autonomous voltage inverter simulation model

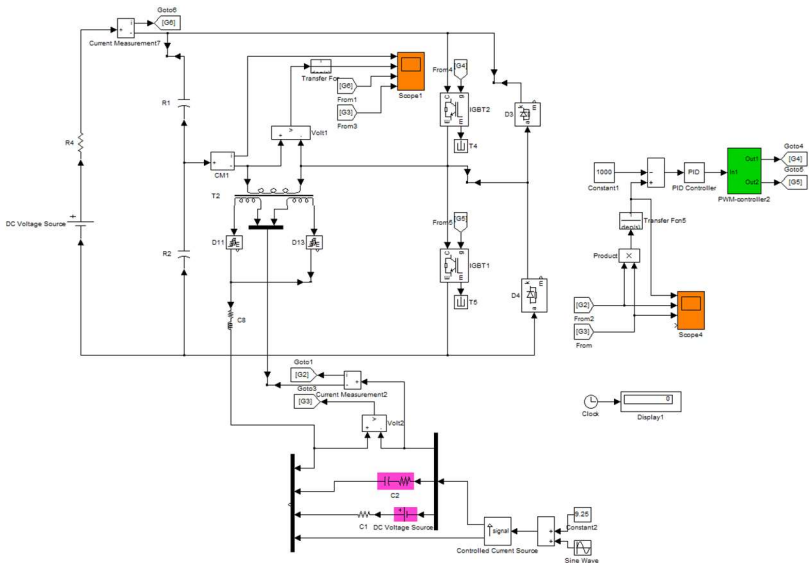
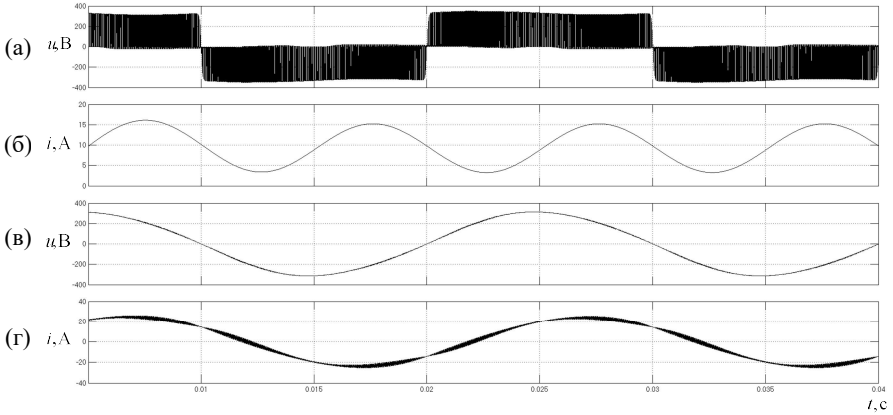


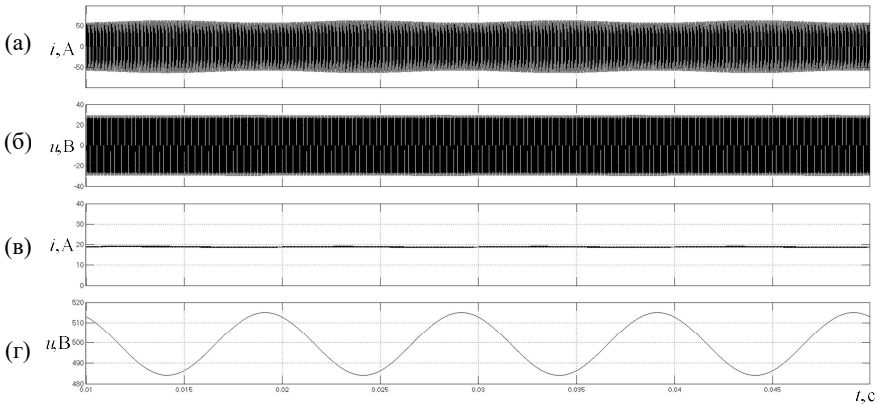
Рис. 4. Схема набора имитационной модели конвертора

Fig. 4. Scheme of a set of a simulation model of the converter



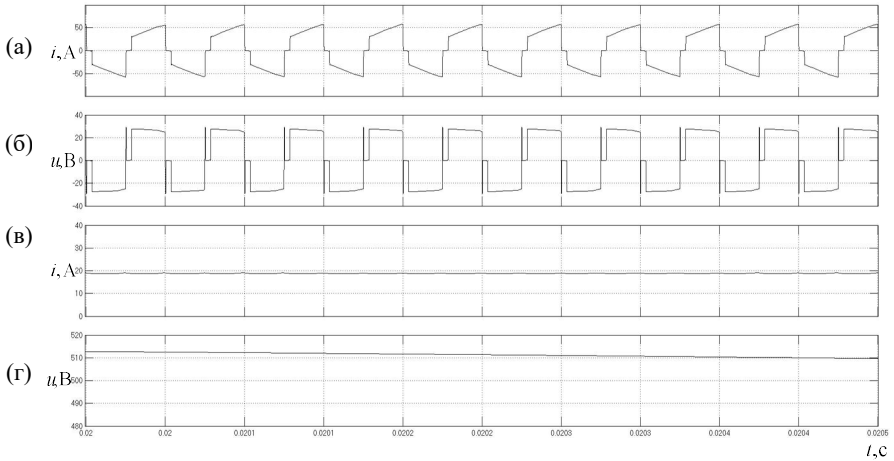
**Рис. 5. Диаграммы работы выходного АИН:**  
**выходное напряжение АИН (а); ток АБ (б); выходное напряжение ИРЭП (в);**  
**выходной ток АИН (г)**

**Fig. 5. Diagrams of output autonomous voltage inverter operation:**  
**output voltage (a); battery current (b); output voltage**  
**of uninterruptible power supply system (v); output current (r)**



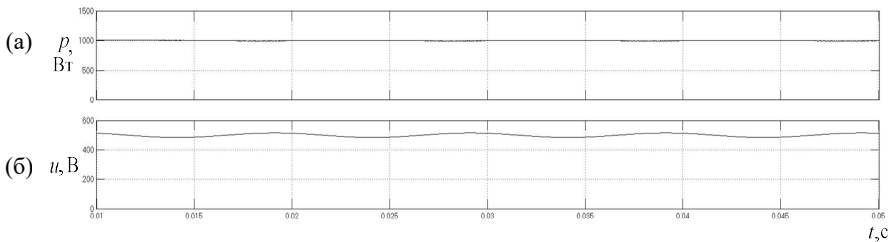
**Рис. 6. Диаграммы работы конвертора:**  
**выходной ток и напряжение АИН конвертора (а, б); выходной ток ВТЭ (в);**  
**напряжение АБ (г)**

**Fig. 6. Diagrams of converter operation:**  
**output current and voltage of the autonomous voltage inverter converter (a, б);**  
**output current of fuel cell (в); battery voltage (r)**



**Рис. 7. Диаграммы работы конвертора  
выходной ток и напряжение АИН конвертора (а, б);  
выходной ток ВТЭ (в); напряжение АБ (г)**

**Fig. 7. Diagrams of converter operation:  
output current and voltage of the autonomous voltage inverter converter (а, б);  
output current of fuel cell (в); battery voltage (г)**



**Рис. 8. Диаграммы работы конвертора  
выходная мощность конвертора (а); напряжение АБ (б)**

**Fig. 8. Diagrams of converter operation:  
converter output power (а); battery voltage (б)**

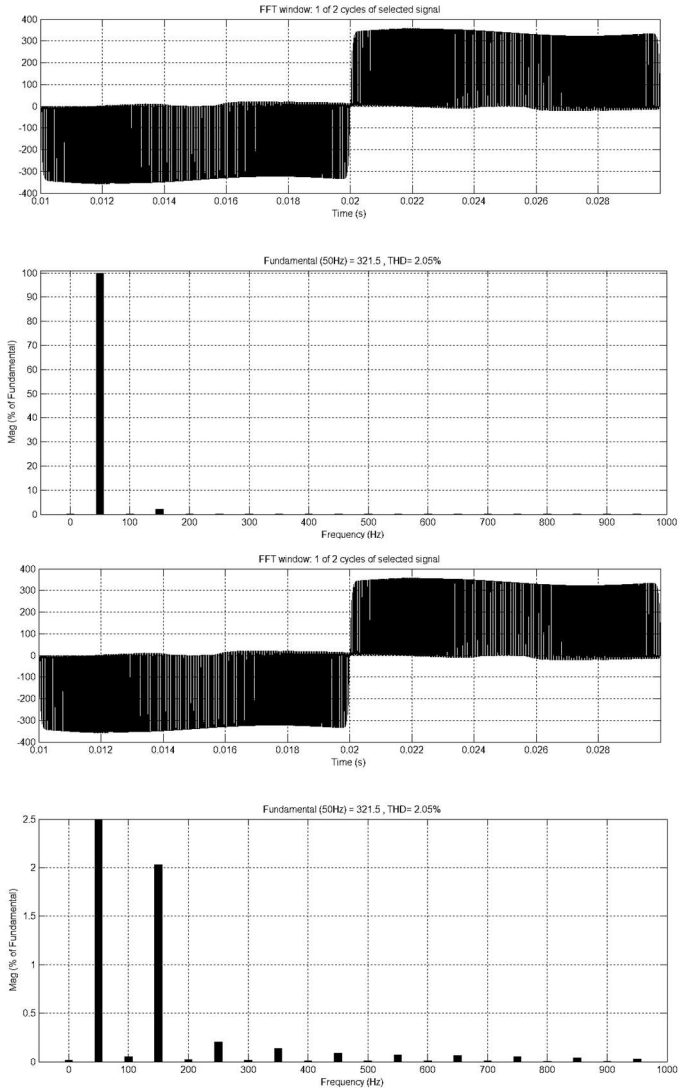


Рис. 9. Спектральный анализ кривой выходного напряжения ИРЭП ( $C_2 = 1000$  мкФ)

Fig. 9. Spectral analysis of the output voltage curve of the uninterruptible power supply system ( $C_2 = 1000$   $\mu$ F)

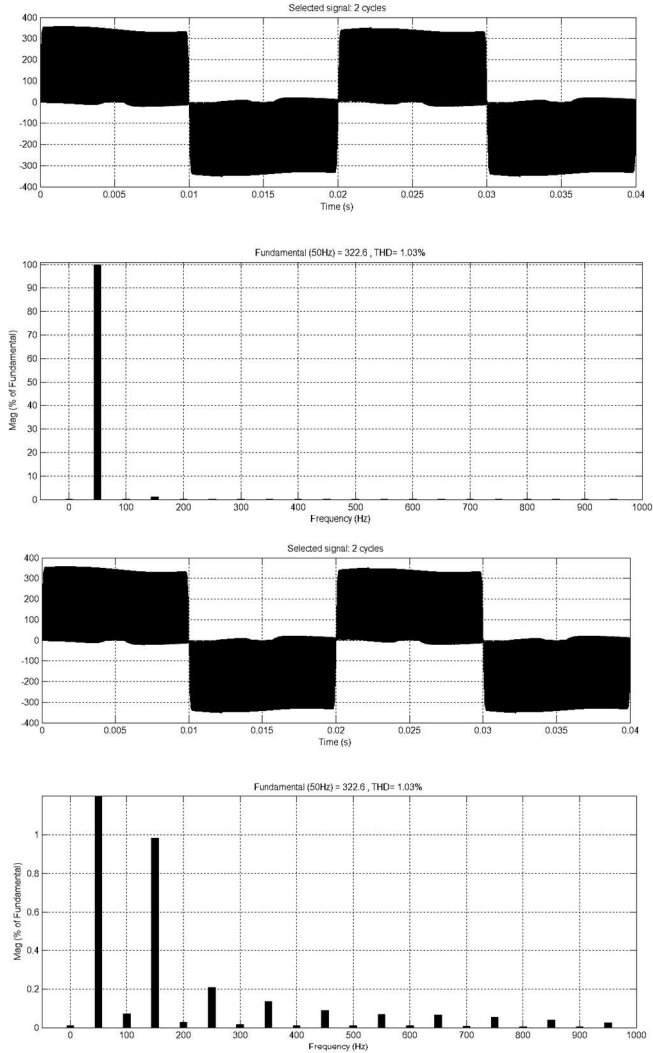


Рис. 10. Спектральный анализ кривой выходного напряжения ИРЭП ( $C_2 = 2000 \text{ мкФ}$ )

Fig. 10. Spectral analysis of the output voltage curve of the uninterruptible power supply system ( $C_2 = 2000 \text{ }\mu\text{F}$ )

Из рис. 9 и 10 следует, что выходное напряжение ИРЭП, кроме основной гармоники с частотой 50 Гц, содержит составляющую тройной частоты 150 Гц, обусловленную амплитудной модуляцией напряжения питания АИН, при этом амплитуда 3-й гармоники при выбранных значениях емкостей фильтров  $C1$ ,  $C2$  не превышает 1...2 % от амплитуды основной гармоники.

#### IV. Выводы

1. Предложенная функциональная схема и реализация силовых цепей ИРЭП с АБ, содержащей ряд последовательно соединенных  $LiFePO_4$  аккумуляторов, обеспечивает требуемый уровень напряжения питания АИН и выходного напряжения ИРЭП и исключает необходимость установки дополнительного преобразователя для согласования напряжений АБ и первичной сети, что существенно упрощает ИРЭП, стабилизирует его работу и улучшает массогабаритные показатели.

2. Реализация режима постоянства выходной мощности ВТЭ, равной номинальному ее значению на интервале резервного питания нагрузки, а также в пределах интервала зарядки АБ позволяет наиболее полно и эффективно использовать потенциал ВТЭ и ИРЭП в целом.

3. Результаты имитационного моделирования подтвердили работоспособность рассмотренной структуры ИРЭП, достоверность расчета ее параметров, обеспечивающих высокое качество выходного напряжения (генерируемой электроэнергии).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51016.*

© Куликов А.Л., 2021

© Ваняев В.В., 2021

© Дарьенков А.Б., 2021

© Шахов А.В., 2021

Поступила в редакцию 10.09.2021

Received 10.09.2021

#### Библиографический список

- [1] Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. М.: Изд. Дом МЭИ, 2007. – 632 с.
- [2] Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники. 4-е изд. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 671 с.
- [3] Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. – 632 с.



- [4] Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. – 576 с.
- [5] Транзисторы, микросхемы и модули для управления питанием International Rectifier // ЗАО «Платан Компонентс». [Электронный ресурс]. URL: www.irf.ru (дата обращения 01.06.2021).
- [6] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
- [7] Aluminium Electrolytic Capacitors. EPCOS Data Book, 2018.

### References

- [1] Yu.K. Rozanov, M.V. Ryabchitsky and A.A. Kvasnyuk, *Silovaya Elektronika [Power Electronics]*. Moscow: MPEI, 2007 (in Russian).
- [2] G.S. Zinoviev, *Osnovy silovoj elektroniki [Power Electronics Fundamentals]*. 4th ed. Novosibirsk: NSTU, 2009 (in Russian).
- [3] V.I. Meleshin, *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor converter technology]*. Moscow: Technosphere, 2006 (in Russian).
- [4] V.I. Meleshin and D.A. Ovchinnikov, *Upravlenie tranzistornymi preobrazovatelyami elektroenergii [Control of transistor power converters]*. Moscow: Technosphere, 2011 (in Russian).
- [5] Tranzistory, mikroskhemu i moduli dlya upravleniya pitaniem International Rectifier [Power Management Transistors, ICs & Modules International Rectifier]. [Online]. Available at: www.irf.ru [Accessed: June 1, 2021] (in Russian).
- [6] I.V. Chernykh, *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]*. Moscow: DMK Press; SPb: Piter, 2008 (in Russian).
- [7] Aluminium Electrolytic Capacitors. EPCOS Data Book, 2018.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Куликов Александр Леонидович**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Aleksandr L. Kulikov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Ваняев Валерий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Valery V. Vanyaev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Дарьенков Андрей Борисович**, доктор технических наук, директор института электроэнергетики, заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Andrey B. Dar'enkov**, D. Sci. (Eng.), director of the Institute of Electric Power Industry, head of the department of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Шахов Андрей Валентинович**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Andrey V. Shahov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation