

УДК 621.354.3:621.314.58

EDN OQIBFI

## МОДЕЛИРОВАНИЕ В МАТЛАВ ПРОЦЕССА ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ОТ СЕТИ И ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ В СЕТЬ (РАБОТА В РЕЖИМЕ G2V И V2G)

**Б.Н. Сидоров**ORCID: 0009-0007-0643-6373 e-mail: [nnv033@gmail.com](mailto:nnv033@gmail.com)Московский автомобильно-дорожный  
государственный технический университет  
*Москва, Россия***Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил**ORCID: 0000-0003-0583-0559 e-mail: [alijber1987@uomisani.edu.iq](mailto:alijber1987@uomisani.edu.iq)Московский автомобильно-дорожный  
государственный технический университет  
*Москва, Россия*  
Университет Майсан  
*Майсан, Ирак*

В настоящее время в области технологий преобразования энергии перспективными являются концепции  $V2G$  (*Vehicle-to-Grid*) – электромобиль – сеть и  $G2V$  (*Grid-to-Vehicle*) – сеть – электромобиль. Работа в режимах  $V2G$  и  $G2V$  предполагает двухсторонний энергетический обмен между электромобилем и электрической сетью. Так, в сценарии  $V2G$  аккумуляторные батареи электромобилей могут использоваться для частичного покрытия графиков электрических нагрузок энергосистемы, применяться в качестве резервных источников, а также использоваться для решения задач повышения качества электроэнергии. В статье представлен двухступенчатый подход к преобразованию мощности, объединяющий трехфазный активный выпрямитель и двунаправленный *BUCK-BOOST* преобразователь, обеспечивающий эффективное управление напряжением шины постоянного тока 800 В и током батареи. Функция активного выпрямителя определена для преобразования напряжения сети переменного тока в регулируемое напряжение шины постоянного тока, при этом в двунаправленном *BUCK-BOOST* конвертере ток батареи регулируется как при зарядке, так и при разрядке. Предложенные решения исследованы с помощью имитационного компьютерного моделирования в среде *Matlab/Simulink*. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность их применения для зарядного устройства 10 кВт с системой управления, позволяющей передавать мощность в режимах  $V2G$  и  $G2V$  с обеспечением качества электроэнергии.

**Ключевые слова:** управление, активный выпрямитель, двунаправленный buck-boost преобразователь, электромобиль, G2V, V2G.

**Для цитирования:** Сидоров Б.Н., Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил. Моделирование в Matlab процесса заряда аккумулятора электромобиля от сети и выдачи мощности в сеть (работа в режиме G2V и V2G) // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 93-111. EDN OQIBFI

## **MATLAB SIMULATION OF BATTERY CHARGING FROM THE GRID AND DISCHARGING TO THE GRID (G2V AND V2G OPERATION)**

**B.N. Sidorov**

ORCID: 0009-0007-0643-6373 e-mail: [nnv033@gmail.com](mailto:nnv033@gmail.com)

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University  
*Moscow, Russia*

**Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil**

ORCID: 0000-0003-0583-0559 email: [alijber1987@uomisan.edu.iq](mailto:alijber1987@uomisan.edu.iq)

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University  
*Moscow, Russia*  
University of Maysan  
*Maysan, Iraq*

**Abstract.** Currently, the concepts of V2G (Vehicle-to-Grid) – electric vehicle – network and G2V (Grid-to-Vehicle) network-electric vehicle are promising in the field of energy conversion technologies. Operation in V2G and G2V modes involves a two-way energy exchange between an electric vehicle and an electric grid. Thus, in the V2G scenario, electric vehicle batteries can be used to partially cover the electrical load schedules of the power system, used as backup sources, and also used to solve problems of improving the quality of electricity. The article presents a two-stage approach to power conversion that combines a three-phase active rectifier and a bidirectional buck-boost converter that provides efficient control of 800 V DC bus voltage and battery current. The function of the active rectifier is defined to convert the AC mains voltage into an adjustable DC bus voltage, while in a bidirectional buck-boost converter, the battery current is regulated both during charging and discharging. The proposed solutions were investigated using Matlab/Simulink environment. The results obtained confirmed the high efficiency of their use for a 10-kW charger with a control system that provides power transmission in V2G and G2V modes while ensuring the quality of the transmitted electricity.

**Keywords:** control, active rectifier, bidirectional buck-boost converter, EV, G2V, V2G.

**For citation:** B.N. Sidorov and Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil, “Matlab simulation of battery charging from the grid and discharging to the grid (G2V and V2G operation)”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 93-111, 2025. EDN OQIBFI

## 1. Введение

В настоящее время в рамках развития низкоуглеродной энергетики, активно растет производство электромобилей. Однако рост их числа имеет и негативные стороны. Например, установка зарядных станций и их подключение к существующей инфраструктуре электрических сетей может оказывать значительное влияние на качество электроэнергии в сети, особенно в часы пиковой нагрузки. В настоящее время перспективный подход к снижению влияния зарядных станций на качество электроэнергии в сети связан с использованием алгоритмов управления энергопотреблением, реализующих различные стратегии [1].

Электромобили можно рассматривать в качестве источника энергии для других потребителей. Но такой подход требует обеспечения двунаправленного преобразования энергии от сети к электромобилю и обратно (от электромобиля в сеть). Эта идея была положена в основу концепций  $V2G$  и  $G2V$  [2-5]. В концепции  $V2G$  электроэнергия подается из аккумулятора электромобиля в сеть, а в концепции  $G2V$  электромобили получают электроэнергию от сети [6]. Описываемые режимы обеспечивают возможность сглаживания пиковой мощности в период больших нагрузок [7].

Преимущества электромобилей с поддержкой  $V2G$  обуславливаются тем, что они обеспечивают возможность регулирования частоты, поддержки напряжения и стабильности работы сети [8, 9]. Режим  $V2G$  позволяет электромобилю поставлять электроэнергию от аккумулятора в энергосистему [10]. Однако он не ограничивается только выдачей активной мощности в сеть от аккумулятора. Этот режим также позволяет выдавать определенное количество реактивной мощности [11].

Для реализации режима  $G2V$  аккумуляторная батарея должна быть подключена к сети с помощью бортового или внешнего оборудования [2, 3]. Для работы системы в режиме  $G2V$  необходимо распределение зарядных станциях для электромобилей в соответствии с имеющимися мощностями энергосистемы [12]. В зависимости от способа заряда и емкости аккумулятора заряд может осуществляться с разной скоростью [13]. Использование аккумуляторов электромобилей для хранения и выдачи энергии является перспективным направлением в переходе к более гибкой и адаптивной энергетической системе.

В [14] исследованы топологии двунаправленного преобразователя  $V2G$  для передачи энергии. На основе преобразователя с односторонним первичным индукторным модулем с улучшенными характеристиками было показано, что двунаправленное зарядное устройство для аккумуляторов обеспечивает эффективную зарядку транспортных средств с аккумуляторами напряжением 48 В и 120 В. В [15] приведены экспериментальные результаты, касающиеся двунаправленной работы и более легкого переключе-

чения для повышения производительности системы. В [16] исследуются вопросы коррекции коэффициента мощности, регулирования напряжения и динамического регулирования с помощью интегрированного зарядного устройства вместе с адаптивным контроллером скользящего режима. Предложенные алгоритмы позволяют уменьшить провалы напряжения и обеспечить адаптивность работы. Результаты имитационного моделирования, полученные с помощью *Matlab/Simulink*, показали, что для высокоуровневого управления на основе состояния заряда интеллектуальных операций  $V2G$  и  $G2V$  применение контроллера скользящего режима более эффективно, чем контроллера конечного времени.

В [17] представлен подход к быстрому переключению между прямым и обратным направлением потока мощности для двойных активных мостов, которые улучшают переходный отклик во время скачков мощности для  $DC-DC$ -преобразователей. В этой статье представлено трехфазное двунаправленное зарядное устройство, которое может работать как в режимах  $G2V$ , так и  $V2G$ . Описываемое исследование направлено на решение задачи улучшения двунаправленной бортовой зарядки электромобилей с акцентом на оптимизацию функций управления  $V2G$  и  $G2V$ . Оно заключается в разработке стратегии оптимальной зарядки на основе активного выпрямителя, обеспечивающей максимальную эффективность, надежность, а также интеграцию электромобилей с сетью.

## II. Режимы работы

### Работа в режиме $G2V$

Режим  $G2V$  предполагает заряд аккумулятора электромобиля. В этом режиме выпрямители с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) обеспечивают преобразование переменного тока в постоянный.

Аккумулятор может заряжаться в режиме постоянного тока, постоянного напряжения или импульсном режиме. Глубина заряда или скорость, с которой заряжается аккумулятор, фактически зависят от состояния аккумулятора. Следовательно, важным является определение метода заряда: постоянным током или постоянным напряжением. В случае существенного разряда аккумулятора используется метод постоянного тока. Но как только напряжение аккумулятора достигает порогового значения, установленного зарядным устройством, заряд осуществляется при режиме постоянного напряжения [18]. Структурная схема преобразователя для реализации режима  $G2V$  приведена на рис. 1.

В режиме заряда (рис. 1) аккумулятор получает энергию от сети. При заряде постоянным током выходное напряжение преобразователя постоянного тока можно регулировать в соответствии с уровнем заряда аккумулятора. С другой стороны, в режиме заряда постоянным током преобразователь постоянного тока регулирует выходной ток в соответствии с установленной скоростью, с которой аккумулятор должен заряжаться. В

выпрямителе с ШИМ напряжение звена постоянного тока больше максимального значения напряжения линейной сети. Следовательно, преобразователь постоянного тока должен понижать напряжение, а также обеспечивать синусоидальный ток с единичным коэффициентом мощности.

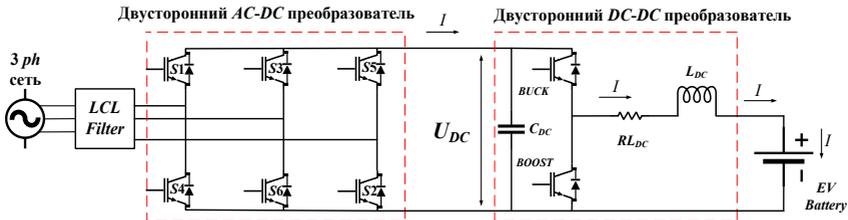


Рис. 1. Структурная схема работы в режиме G2V

Fig. 1. Structural circuit of operation in G2V mode

### Работа в режиме V2G

Процесс V2G способствует сглаживанию пиков нагрузки в энергосистеме, обеспечивает возможность компенсации реактивной мощности. В этом режиме в сеть может выдаваться как активная, так и реактивная мощность. Для реализации такого режима работы необходим инвертор. Кроме того, в этом режиме для каждого распределенного источника необходимо согласовать фазу, частоту и напряжение источника с сетью.

Протокол V2G, в котором инвертор является основной частью, модулирует мощность и фазу в соответствии с частотой в инверторе. При этом напряжение в звене постоянного тока должно непрерывно контролироваться. Обычно, его значение ниже максимального напряжения полностью заряженной аккумуляторной батареи. Следовательно, напряжение батареи должно быть повышено. Кроме того, разряд аккумуляторной батареи не должен быть ниже допустимого значения.

Таким образом, в режиме работы V2G преобразователь постоянного тока является связующим звеном между инвертором и батареями [19] (рис. 2).

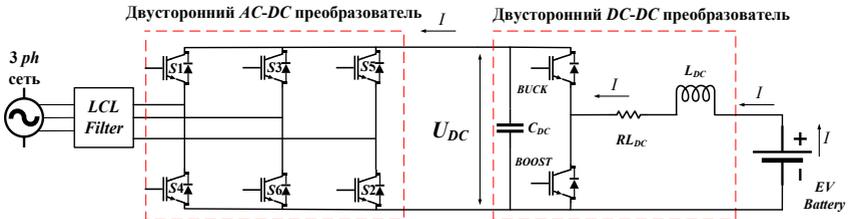


Рис. 2. Структурная схема работы в работе V2G

Fig. 2. Structural diagram of work in V2G work

### Переходные процессы в рассматриваемых режимах

Реализация режима V2G осуществляется путем подачи постоянного тока от батареи на инвертор, который преобразует его в переменный, после чего мощность подается в сеть. Инвертор отслеживает состояние сети и минимизирует колебания электроэнергии. Напротив, в режиме G2V поток мощности идет от сети к электромобилю. При этом аккумуляторная батарея электромобиля заряжается от трехфазной сети. Мощность передается от сети к инвертору, который работает как выпрямитель. Общая структурная схема системы сопряжения электромобиля с сетью приведена на рис. 3.

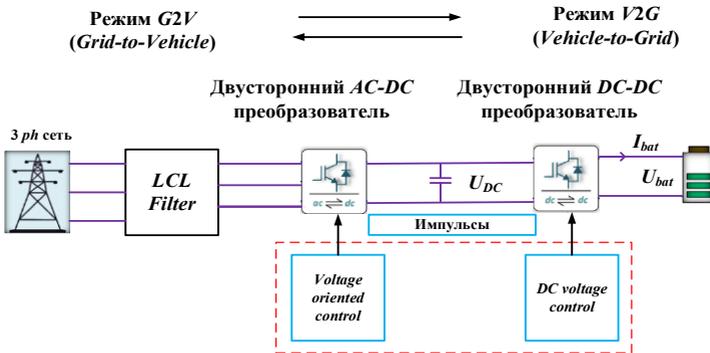


Рис. 3. Общая структурная схема системы сопряжения электромобиля с сетью

Fig. 3. General structural diagram of the vehicle-network interface system

Переход от режима V2G к режиму G2V и обратно является сложным процессом, требующим контроля многих параметров. Для сети: последовательность фаз, частота и амплитуда линейного напряжения. Для батареи: напряжение, ток, температура, а также состояние заряда [7, 11, 18, 20, 21]. Результатом управления будет являться выдача мощности в зависимости от уровня заряда батареи.

### III. Разработка решений

Инвертор моделируется как трехфазный инвертор с двумя силовыми электронными переключателями (обычно *IGBT*) для обеспечения плавного перехода между режимами. Состав инвертора остается неизменным в обоих режимах работы (рис. 1 и 2). Изменения, внесенные в силовые электронные переключатели, обеспечивают управление потоком мощности в любом направлении. В процессе необходимо постоянно контролировать напряжения сети с целью обеспечения синхронизации работы инвертора с сетью. При этом инвертор функционирует как выпрямитель в режиме *G2V* и как инвертор в режиме *V2G*.

Методология управления включает получение значений напряжения и тока сети и их учет при преобразовании в опорную систему *dq* из *abc* для регулирования потребностей системы в активной и реактивной мощности. Процедура регулирования заключается в изменении значений  $I_d$  и  $I_q$  для обеспечения передачи активной и реактивной мощности.

В режиме *V2G* система управления поддерживает активную мощность, и обеспечивает ее изменение, поддерживая постоянное напряжение звена постоянного тока на стороне инвертора. В режиме *G2V* выпрямитель преобразовывает напряжение переменного тока в напряжение постоянного тока. Правила интеграции сети требуют, чтобы гармоники тока и разность фаз между током и напряжением поддерживались как можно ниже. Стратегия управления напряжением может быть иллюстрирована при помощи рис. 4.

Система синхронизируется путем управления напряжением оси *q* таким образом, чтобы оно было равно нулю [8, 9]. При этом мощность может передаваться в обоих направлениях, либо от трехфазного преобразователя мощности к батарее, либо от батареи к трехфазному преобразователю мощности.

Преобразователь постоянного тока в переменный, используемый для двунаправленного потока мощности от аккумулятора электромобиля к сети, должен на выходе поддерживать постоянное напряжение и ток.

Фильтрующий индуктор и конденсатор выбираются в зависимости от допустимых значений пульсации тока и напряжения в системе.

Параметры коммутационного индуктора  $L_{DC}$  и конденсатора  $C_{DC}$  на этапе преобразования постоянного тока рассчитывается как:

$$L_{DC} = \frac{U_{DC} \cdot (U_B - U_{DC})}{3 \cdot f_{sw} \cdot U_B}; \quad (1)$$

$$C_{DC} = \frac{I_{ripple}}{8 \cdot f_{sw} \cdot U_B}. \quad (2)$$

где  $U_{DC}$  – это выходное напряжение на звене постоянного тока на выводах инвертора;  $U_B$  – входное напряжение на выводах аккумуляторной батареи электромобиля;  $f_{sw}$  – частота переключений;  $I_{ripple}$  – пульсация тока.

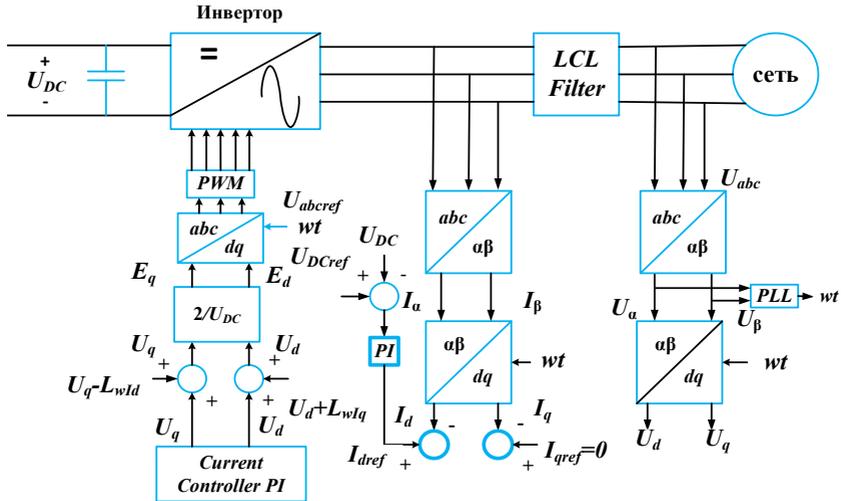


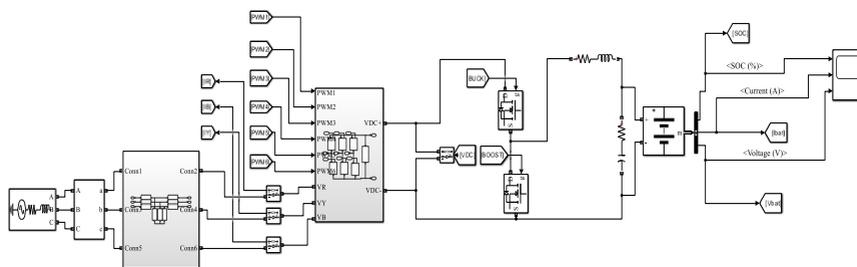
Рис. 4. Структурная схема управления трехфазным входным преобразователем

Fig. 4. Structural control diagram of a three-phase input converter

#### IV. Имитационное компьютерное моделирование

Для исследования работы двунаправленной зарядной станции электромобилей мощностью 10 кВт разработана имитационная модель с использованием *Matlab/Simulink*.

Функциональная блок-схема имитационной модели приведена на рис. 5. Имитационная модель создана с использованием стандартных блоков из библиотек *Simscape Electrical* и *SimPowerSystems* в среде *Matlab/Simulink*.



**Рис 5. Функциональная блок-схема имитационной компьютерной модели в *Matlab/Simulink***

**Fig. 5. Functional block diagram for the study in *Matlab/Simulink***

Модель состоит из следующих основных блоков:

- трехфазного источника;
- двунаправленного трехфазного входного преобразователя, предназначенного для преобразования переменного тока в постоянный;
- управляемого источника напряжения;
- блока литий-ионного аккумулятора;
- блоков датчика тока и датчика напряжения, необходимых для измерения тока и напряжения во всей системе;
- блока, оценивающего уровень заряда аккумулятора (*SoC*).

Параметры системы и параметры литий-ионной батареи приведены в табл. 1.

Преобразователь переменного тока в постоянный / постоянного тока в переменный (двунаправленный ШИМ-инвертор) работает с использованием метода управления, ориентированного на напряжение. При этом контролируется активная мощность, поступающая от преобразователя в сеть. Обеспечивается плавный переход из режима *V2G* в режим *G2V* и обратно. Для такого режима получены значения коэффициентов пропорционального усиления  $K_p$  и интегрального усиления  $K_i$  для всех преобразователей, работающих в замкнутом контуре с режимами *V2G* и *G2V* (табл. 2).

### V. Результаты моделирования

С помощью имитационной модели проведены исследования работы в режимах *G2V* и *V2G*. В режиме *G2V* опорный ток аккумулятора должен иметь отрицательное значение. В этом режиме инвертор работает как выпрямитель с ШИМ и поддерживает напряжение звена постоянного тока на опорном значении.

**Таблица 1.**  
**Конфигурация системы**  
**Table 1.**  
**System configuration**

| Параметр                                     | Значение |
|--|----------|
| <b>Система</b>                               |          |
| Напряжение в линии питания                   | 415 В    |
| Частота в линии питания $f_c$                | 50 Гц    |
| Индуктивность фильтра $L$                    | 5 мГн    |
| Емкость фильтра $C$                          | 30 мкФ   |
| Частота переключения $f_{sw}$                | 10 кГц   |
| Напряжение на шине постоянного тока $U_{dc}$ | 800 В    |
| <b>Батарея</b>                               |          |
| Номинальное напряжение                       | 360 В    |
| Напряжение при полном заряде                 | 419 В    |
| Напряжение отключения                        | 270 В    |
| Начальное состояние заряда                   | 50 %     |
| Внутреннее сопротивление                     | 0,012 Ом |
| Номинальная мощность                         | 300 Ач   |
| Время отклика батареи                        | 1 с      |
| Номинальный ток разряда                      | 130,4 А  |

**Таблица 2.**  
**Значения ПИ-регулятора**  
**Table 2.**  
**PI-controller values**

| Конвертер                                   | <i>AC – DC</i> | <i>DC – AC</i> |
|---|----------------|----------------|
| Пропорциональный коэффициент усиления $K_p$ | 0,5            | 0,005          |
| Интегральный коэффициент усиления $K_i$     | 5              | 10             |

Поскольку напряжение звена постоянного тока выше максимального напряжения аккумулятора, преобразователь постоянного тока должен работать как понижающий преобразователь (рис. 6).

Из рис. 6 следует, что напряжение сети синусоидальное с пиком, равным 338,8 В. Гармоники со стороны инвертора блокируются *LCL*-фильтром и не передаются в сеть. Искажения в сети отсутствуют. На рис. 6 также приведена диаграмма тока, который выдается в сеть. Значение тока составляет 23,4 А с общим коэффициентом гармонических искажений (*THD*) менее 5 %.

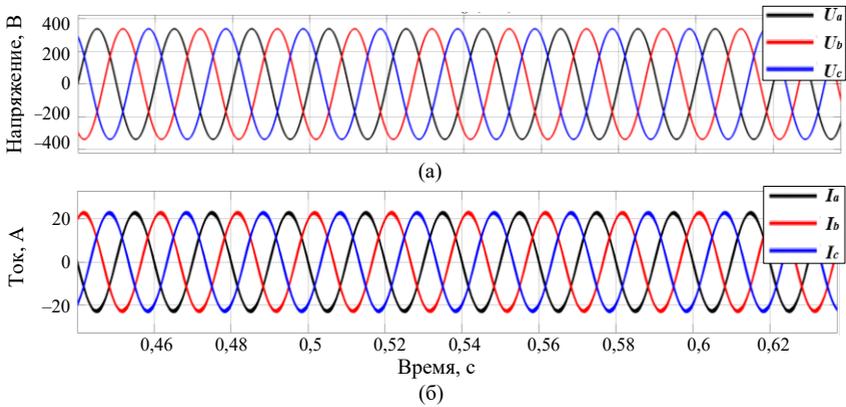


Рис. 6. Сетевое напряжение  $U_{abc}$  (а) и ток  $I_{abc}$  (б) в режиме  $G2V$

Fig. 6. Mains voltage  $U_{abc}$  (a) and current  $I_{abc}$  (b) in  $G2V$  mode

На рис. 7 а показаны уровень заряда аккумулятора ( $SoC$ ), напряжение на клеммах и ток аккумулятора в режиме  $G2V$ . Для снижения потерь и поддержания температурного режима, максимальный ток заряда аккумулятора ограничивается 30 А. Из рис. 7 а видно, что пульсации постоянного напряжения на клеммах аккумулятора минимальна.

ПИ-регулятор поддерживает значение тока заряда аккумулятора электромобиля постоянным. Как показано на рис. 7 а, двунаправленный преобразователь постоянного тока в переменный работает как повышающий преобразователь, увеличивая входное напряжение батареи на примерно с 387 до 800 В. Уровень заряда батареи поддерживается на значении 50 %, что обеспечивает заряд аккумулятора. Ток для периода разряда поддерживается на уровне 30 А.

Диаграммы уровня заряда аккумулятора, напряжения и тока в режиме  $V2G$  представлены на рис. 7 б. Анализ результатов показывает, что схема управления работой преобразователя обеспечивает требуемые характеристики.

Из рис. 8 видно, что трехфазные напряжение и ток сдвинуты по фазе на  $120^\circ$  относительно друг друга.

Максимальные амплитуды тока для всех трех фаз составляют 23,4 А. Двунаправленное преобразование постоянного тока в переменный ток обеспечивает повышения входного напряжения инвертора.

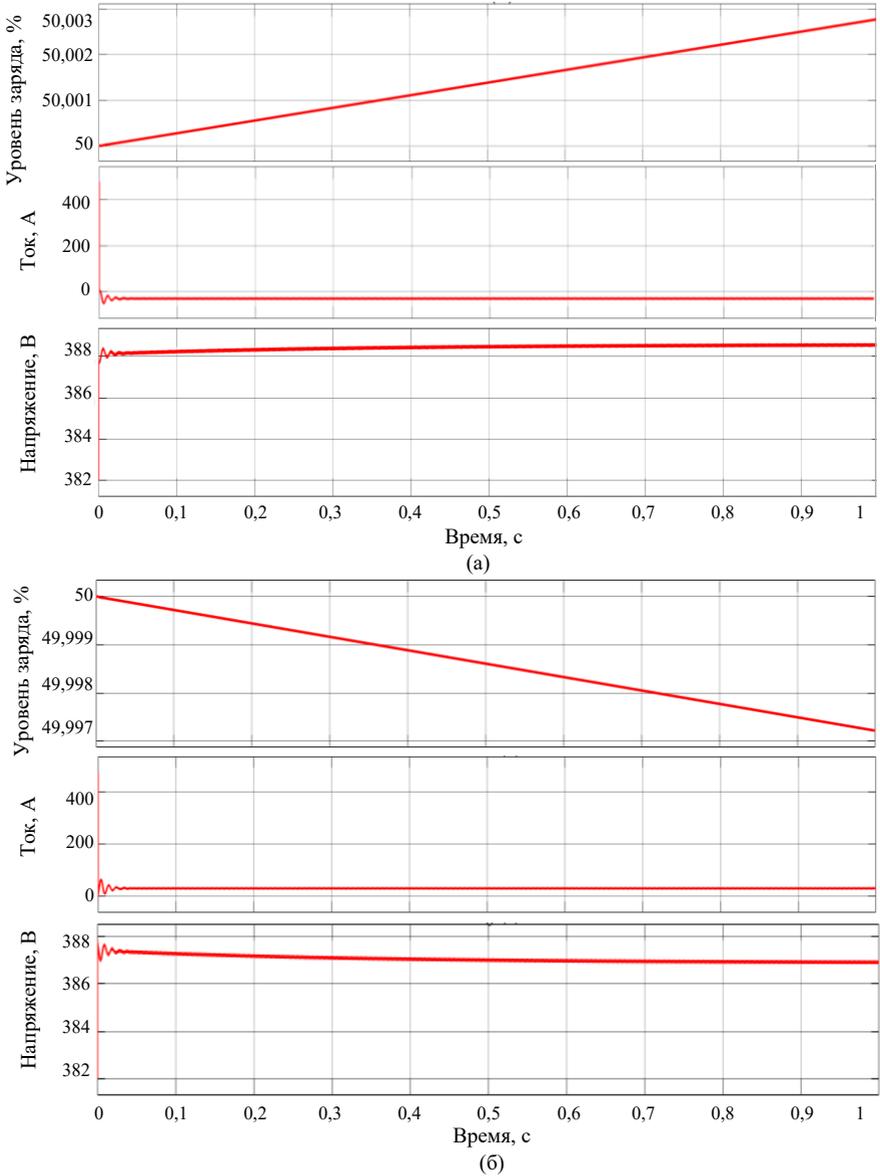
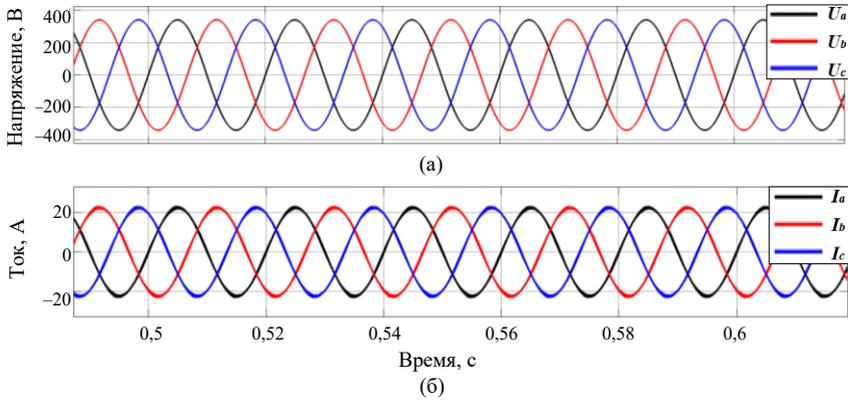


Рис. 7. Уровень заряда, ток аккумулятора и напряжение в режиме G2V (а) и V2G (б)

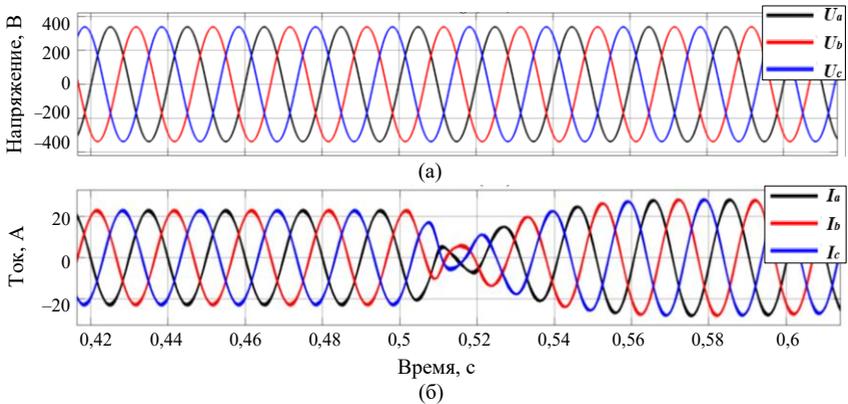
Fig. 7. Battery SoC, current and voltage in G2V mode (a) and V2G mode (b)



**Рис. 8. Сетевое напряжение  $U_{abc}$  (а) и ток  $I_{abc}$  (б) в режиме V2G**

**Fig. 8. Mains voltage  $U_{abc}$  (a) and current  $I_{abc}$  (b) in V2G mode**

На рис. 9 показаны диаграммы тока и напряжения при переходе из режима G2V в V2G.



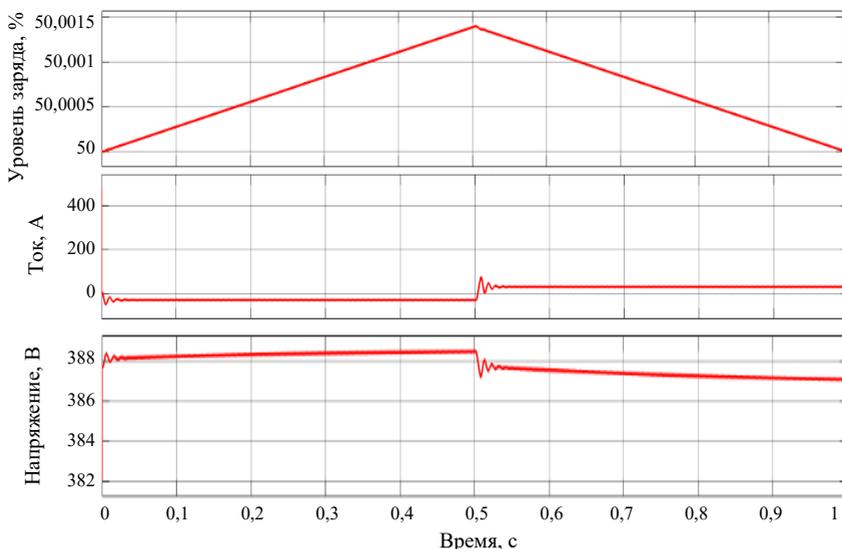
**Рис. 9. Сетевое напряжение и сетевой ток при переходе из режима G2V в режим V2G**

**Fig. 9. Mains voltage and mains current when switching from G2V to V2G mode**

Из результатов моделирования видно, что при использовании принятой схемы управления переходы между режимами осуществляются плавно. Анализ результатов показывает, что существует минимальное изменение

выходных линейных напряжений со стороны сети, при этом схема управления позволяет обеспечить выходное напряжение на уровне напряжения сети большую часть времени. Более того, разность фаз линейного тока в сети проявляется в сдвиге фаз относительно напряжения: в режиме  $G2V$  в противофазе, а в режиме  $V2G$  синхронно (рис. 9).

На рис. 10 изображены переходные процессы в зарядной сети в момент перехода из режима  $G2V$  в режим  $V2G$ .

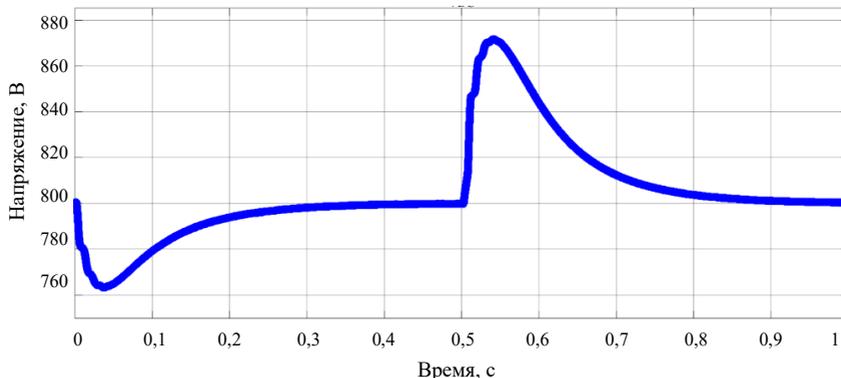


**Рис. 10. Уровень заряда, ток аккумулятора и напряжение при переходе из режима  $G2V$  в режим  $V2G$**

**Fig. 10. Battery SoC, current and voltage when switching from  $G2V$  to  $V2G$  mode**

В начале заряда, при подаче мощности, напряжение и ток стабилизируются. В момент перехода из режима заряда в режим передачи мощности в сеть наблюдаются колебательные процессы, которые подавляются ПИ-регулятором. При этом значение тока аккумулятора остается на уровне 30 А в обоих режимах. Таким образом ПИ-регулятор поддерживает постоянный ток заряда-разряда аккумулятора при постепенном изменении состояния заряда аккумулятора.

На рис. 11 приведен график изменения напряжения от времени перехода из режима  $G2V$  в режим  $V2G$ . При переходе из режима  $G2V$  в режим  $V2G$  наблюдаются характерные изменения напряжения постоянного тока.



**Рис. 11. Напряжение постоянного тока при переходе из режима  $G2V$  в режим  $V2G$**

**Fig. 11. DC voltage when switching from  $G2V$  to  $V2G$  mode**

В момент переключения ( $t = 0,025 \dots 0,075$  с) напряжение падает с 800 В до 765 В ( $\Delta V = 4,35$  %). На интервале  $t = 0,5 \dots 0,65$  с наблюдается повышение напряжения до 872 В ( $\Delta V = +9,0$  %). В течение времени  $t = 0,9$  с напряжение возвращается к номинальному значению (800 В).

Динамические искажения напряжения при переходе  $G2V-V2G$  обусловлены инерционностью системы и одновременным обеспечением быстрого действия и устойчивости управления. Резкое изменение направления мощности вызывает задержку в переключении ключей инвертора ( $\sim 20 \dots 25$  мс). Компенсаторная реакция ПИ-регулятора на провал заключается в увеличении коэффициента усиления ( $K_p = 0,8$ ;  $K_i = 100$ ).

При этом длительность сигнала во время перехода режимов достаточно мала, что свидетельствует о правильной настройке ПИ-регулятора.

## **VI. Выводы**

В статье представлен двухступенчатый подход к преобразованию мощности, объединяющий трехфазный активный выпрямитель и двунаправленный *buck-boost* преобразователь, обеспечивающий эффективное управления напряжением шины постоянного тока 800 В и током батареи. Упрощенная стратегия управления в системе координат  $dq$  обеспечивает регулирование параметров как в режимах заряда ( $G2V$ ), так и разряда ( $V2G$ ), демонстрируя гибкость и надежность системы. Результаты моделирования в *Matlab/Simulink* подтвердили работоспособность предложенного решения для зарядного устройства мощностью 10 кВт, включая стабильность напряжения шины, точность управления током батареи и сохранение качества электроэнергии при передаче.

По результатам моделирования доказано, что при использовании принятой схемы управления переходы между режимами  $G2V$  и  $V2G$  происходят без образования импульсов. Метод управления, ориентированный на напряжение, обеспечивает двунаправленное преобразование переменного тока в постоянный. Динамические искажения напряжения при переходе  $G2V$ - $V2G$  обусловлены инерционностью системы и одновременным обеспечением быстродействия и устойчивости управления. Результаты подтверждают актуальность применения адаптивных алгоритмов для снижения длительности переходных процессов в интеллектуальных сетях.

© Сидоров Б.Н., 2025

© Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил, 2025

*Поступила в редакцию 04.04.2025*

*Принята к публикации 10.06.2025*

*Received 04.04.2025*

*Accepted 10.06.2025*

### Библиографический список

- [1] Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил, Юшкевич У.К. Сравнительный анализ односторонних и двусторонних зарядных станций для электромобилей: особенности функционирования, инфраструктура, проблемы и пути их решения // Международный технический журнал. 2024. № 3 (90). С. 16-31. DOI: 10.34286/2949-4176-2024-90-3-15-27
- [2] Monteiro V., Pinto J.G., Afonso J.L. Improved vehicle-for-grid (iV4G) mode: Novel operation mode for EVs battery chargers in smart grids // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. № 110 (5). P. 579-587. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.03.049
- [3] Awad M., Ibrahim A.M., Alaas Z.M., El-Shahat A., Omar A.I. Design and analysis of an efficient photovoltaic energy-powered electric vehicle charging station using perturb and observe MPPT algorithm // Frontiers in Energy Research. 2022. № 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.969482
- [4] Jiang J., Bao Y., Wang L.Y. Topology of a bidirectional converter for energy interaction between electric vehicles and the grid // Energies. 2014. № 7 (8). P. 4858-4894. DOI: 10.3390/en7084858
- [5] N.V. V.K., T. GM. A comprehensive survey on reduced switch count multilevel inverter topologies and modulation techniques // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2023. № 10 (1). DOI: 10.1186/s43067-023-00071-8
- [6] Gurugubelli V., Ghosh A., Panda A.K. Parallel inverter control using different conventional control methods and an improved virtual oscillator control method in a standalone microgrid // Protection and Control of Modern Power Systems. 2022. № 7 (1). P. 1-13. DOI: 10.1186/s41601-022-00248-9
- [7] Sivapriyan R., Umashankar S. Comparative analysis of PWM controlling techniques of single phase Z-source inverter // Indian Journal of Science and Technology. 2016. № 9 (26). P. 1-5. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i26/92210

- [8] Jia Z., Chen L. Design of a bidirectional power interface for V2G technology with smaller DC-link capacitance // *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2014. № 3 (1). P. 104-110. DOI: 10.12720/sgce.3.1.104-110
- [9] Han J., Zhou X., Lu S., Zhao P. A three-phase bidirectional grid-connected AC/DC converter for V2G applications // *Journal of Control Science and Engineering*. 2020. № 2020 (2). P. 1-12. DOI: 10.1155/2020/8844073
- [10] Liu S., Xie X., Yang L. Analysis, modeling and implementation of a switching bi-directional buck-boost converter based on electric vehicle hybrid energy storage for V2G system // *IEEE ACCESS*. 2020. № 8. P. 65868-65879. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2985772
- [11] Raheerimihaja H.J., Zhang Q., Xu G., Zhang X. Integration of battery charging process for EVs into segmented three-phase motor drive with V2G-mode capability // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. № 68 (4). P. 2834-2844. DOI: 10.1109/TIE.2020.2978684
- [12] Pany P., Singh R.K., Tripathi R.K. Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2011. № 3 (3). DOI:10.4314/ijest.v3i3.68426
- [13] Rashid M.H. *Power electronics handbook*. New York: Butterworth-Heinemann, 2017. – 1522 p.
- [14] Panchanathan S., Vishnuram P., Rajamanickam N., Bajaj M., Blazek V., Prokop L., Misak S. A comprehensive review of the bidirectional converter topologies for the vehicle-to-grid system // *Energies*. 2023. № 16 (5). DOI: 10.3390/en16052503
- [15] Yuan J., Dorn-Gomba L., Callegaro A.D., Reimers J., Emadi A. A review of bidirectional on-board chargers for electric vehicles // *IEEE ACCESS*. 2021. № 9. P. 51501-51518. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069448
- [16] Lu Z., Zhang X. Composite non-linear control of hybrid energy-storage system in electric vehicle // *Energies*. 2022. № 15 (4). DOI: 10.3390/en15041567
- [17] Boya A.K., Batchalakura J. A novel quadruple active bridge DC converter with reduced inductor current for EV battery charging // *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2023. № 21 (2). P. 92-106. DOI: 10.15598/aeec.v21i2.4646
- [18] Rachid A., El Fadil H., Giri F. Dual stage CC-CV charge method for controlling DC-DC power converter in BEV charger // 2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), May 02-07, 2018, Marrakech, Morocco: IEEE, 2018. P. 74-79. DOI: 10.1109/MELCON.2018.8379071
- [19] Upputuri R.P., Subudhi B. A comprehensive review and performance evaluation of bidirectional charger topologies for V2G/G2V operations in EV applications // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024. № 10 (1). P. 583-595. DOI: 10.1109/TTE.2023.3289965
- [20] Wang Z., Zhang Y., You S., Xiao H., Cheng M. An integrated power conversion system for electric traction and V2G operation in electric vehicles with a small film capacitor // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. № 35 (5). P. 5066-5077. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2944276
- [21] Khalid H.M., Peng J.C.H. Bidirectional charging in V2G systems: An in-cell variation analysis of vehicle batteries // *IEEE Systems Journal*. 2020. № 14 (3). P. 3665-3675. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2958967

## References

- [1] Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil and U.K. Yushkevich, "Comparative analysis of one-way and two-way charging stations for electric vehicles: infrastructure, challenges and opportunities", *International Technical Journal*, vol. 3, no. 90, pp. 16-31, 2024. DOI: 10.34286/2949-4176-2024-90-3-15-27
- [2] V. Monteiro, J.G. Pinto and J.L. Afonso, "Improved vehicle-for-grid (iV4G) mode: Novel operation mode for EVs battery chargers in smart grids", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 110, no. 5, pp. 579-587, Sep. 2019. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.03.049
- [3] M. Awad, A.M. Ibrahim, Z.M. Alaas, A. El-Shahat and A.I. Omar, "Design and analysis of an efficient photovoltaic energy-powered electric vehicle charging station using perturb and observe MPPT algorithm", *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Aug. 2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.969482
- [4] J. Jiang, Y. Bao and L.Y. Wang, "Topology of a bidirectional converter for energy interaction between electric vehicles and the grid", *Energies*, vol. 7, no. 8, pp. 4858-4894, Jul. 2014. DOI: 10.3390/en7084858
- [5] V.K. N.V. and GM. T., "A comprehensive survey on reduced switch count multilevel inverter topologies and modulation techniques", *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 10, no. 1, Jan. 2023. DOI: 10.1186/s43067-023-00071-8
- [6] V. Gurugubelli, A. Ghosh and A.K. Panda, "Parallel inverter control using different conventional control methods and an improved virtual oscillator control method in a standalone microgrid", *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, Dec. 2022. DOI: 10.1186/s41601-022-00248-9
- [7] R. Sivapriyan and S. Umashankar, "Comparative analysis of PWM controlling techniques of single phase Z-source inverter", *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 26, pp. 1-5, Jul. 2016. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i26/92210
- [8] Z. Jia and L. Chen, "Design of a bidirectional power interface for V2G technology with smaller DC-link capacitance", *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 104-110, Jan. 2014. DOI: 10.12720/sgce.3.1.104-110
- [9] J. Han, X. Zhou, S. Lu and P. Zhao, "A Three-Phase Bidirectional Grid-Connected AC/DC Converter for V2G Applications", *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2020, no. 2, pp. 1-12, Sep. 2020. DOI: 10.1155/2020/8844073
- [10] S. Liu, X. Xie and L. Yang, "Analysis, modeling and implementation of a switching bi-directional buck-boost converter based on electric vehicle hybrid energy storage for V2G system", *IEEE ACCESS*, vol. 8, pp. 65868-65879, Apr. 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2985772
- [11] H.J. Raheerimihaja, Q. Zhang, G. Xu and X. Zhang, "Integration of battery charging process for EVs into segmented three-phase motor drive with V2G-mode capability", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 4, pp. 2834-2844, Mar. 2020. DOI: 10.1109/TIE.2020.2978684
- [12] P. Pany, R.K. Singh and R.K. Tripathi, "Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 3, Jul. 2011. DOI: 10.4314/ijest.v3i3.68426
- [13] M.H. Rashid, *Power electronics handbook*. New York: Butterworth-Heinemann, 2017.

- [14] S. Panchanathan, P. Vishnuram, N. Rajamanickam, M. Bajaj, V. Blazek, L. Prokop and S. Misak, "A comprehensive review of the bidirectional converter topologies for the vehicle-to-grid system", *Energies*, vol. 16, no. 5, Mar. 2023. DOI: 10.3390/en16052503
- [15] J. Yuan, L. Dorn-Gomba, A.D. Callegaro, J. Reimers and A. Emadi, "A review of bidirectional on-board chargers for electric vehicles", *IEEE ACCESS*, vol. 9, pp. 51501-51518, Mar. 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069448
- [16] Z. Lu and X. Zhang, "Composite non-linear control of hybrid energy-storage system in electric vehicle", *Energies*, vol. 15, no. 4, 2022. DOI: 10.3390/en15041567
- [17] A.K. Boya and J. Batchalakura, "A novel quadruple active bridge DC converter with reduced inductor current for EV battery charging", *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 92-106, Mar. 2023. DOI: 10.15598/aeee.v21i2.4646
- [18] A. Rachid, H. El Fadil and F. Giri, "Dual stage CC-CV charge method for controlling DC-DC power converter in BEV charger", in proc. *2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, May 02-07, 2018, Marrakech, Morocco, pp. 74-79. DOI: 10.1109/MELCON.2018.8379071
- [19] R.P. Upputuri and B. Subudhi, "A comprehensive review and performance evaluation of bidirectional charger topologies for V2G/G2V operations in EV applications", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 1, pp. 583-595, Mar. 2024. DOI: 10.1109/TTE.2023.3289965
- [20] Z. Wang, Y. Zhang, S. You, H. Xiao and M. Cheng, "An integrated power conversion system for electric traction and V2G operation in electric vehicles with a small film capacitor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 5, pp. 5066-5077, Sep. 2019. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2944276
- [21] H.M. Khalid and J.C.H. Peng, "Bidirectional charging in V2G systems: An in-cell variation analysis of vehicle batteries", *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3665-3675, Sep. 2020. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2958967

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сидоров Борис Николаевич**, доктор технических наук, профессор Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, Москва, Российская Федерация.  
**Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил**, аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, Москва, Российская Федерация; ассистент преподавателя Университета Майсан, Майсан, Ирак.

**Boris N. Sidorov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation.  
**Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil**, postgraduate student of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation; assistant of the University of Maysan, Maysan, Iraq.