

УДК 621.314.1

DC/DC-преобразователь в тяговой системе электромобиля

М. Д. Иванов, Р. Т. Хазиева*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия;
e-mail: khazieva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
04.09.2023;

получена
после доработки
02.10.2023;

принята к публикации
17.10.2023

Ключевые слова:

DC/DC-преобразователь,
электрическое
транспортное средство,
многоканальный
преобразователь
постоянного напряжения,
LC-фильтр,
многофункциональный
интегрированный
электромагнитный
компонент

Преобразователи постоянного напряжения в постоянное напряжение (DC/DC-преобразователи) применяются в различных электротехнических устройствах, в том числе в тяговой системе электрических транспортных средств. В качестве привода в электромобилях используют синхронные двигатели с постоянными магнитами. Их отличительная черта – нелинейная зависимость электромагнитного момента двигателя от его входного напряжения. Одним из способов улучшения энергетических характеристик электромобиля является включение преобразователя постоянного напряжения в схему питания двигателя. В ходе исследования рассмотрены основные типы преобразователей постоянного напряжения, изучены их преимущества и недостатки; определен способ увеличения энергоэффективности электромобиля за счет использования в составе его силовой схемы многоканального преобразователя постоянного напряжения. Подобная структура позволяет снизить требования к отдельным силовым ключам и элементам преобразователя, а также является оптимальной с точки зрения массогабаритных показателей, так как в преобразователях данного типа отсутствует трансформатор. На основе произведенного обзора была выбрана схема многоканального преобразователя постоянного напряжения для интеграции в систему тягового электропривода. В качестве базового транспортного средства выбрана модель Tesla Model S. На основе рассчитанных динамических характеристик электромобиля определены основные параметры преобразователя постоянного напряжения; произведено компьютерное моделирование силовой установки электрического транспортного средства с преобразователем постоянного напряжения в программной среде Matlab Simulink. Применение преобразователя позволяет улучшить энергоэффективность транспортных средств, а также является лучшим решением по сравнению с установкой батареи с повышенным напряжением.

Для цитирования

Иванов М. Д. и др. DC/DC-преобразователь в тяговой системе электромобиля. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 361–373. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-361-373>.

DC/DC converter in the electric vehicle traction system

Maksim D. Ivanov, Regina T. Khazieva*

*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia;
e-mail: khazieva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

Article info

Received
04.09.2023;

received
in revised
02.10.2023;

accepted
17.10.2023

Key words:

DC/DC converter,
electric vehicle,
multi-channel DC/DC
converter, LC filter,
multifunctional
integrated
electromagnetic
component

Abstract

DC-DC converters are used in various electrical devices including the traction system of electric vehicles. Electric vehicles use synchronous motors with permanent magnets as drives. Their distinctive feature is the nonlinear dependence of the electromagnetic torque of the motor on its input voltage. One of the ways to improve the energy characteristics of an electric vehicle is to include a DC-DC converter in the engine power supply circuit. The study has examined the main types of DC-DC converters, studied their advantages and disadvantages; a method has been determined to increase the energy efficiency of an electric vehicle by using a multi-channel DC-DC converter as part of its power circuit. This structure makes it possible to reduce the requirements for individual power switches and converter elements, and is also optimal from the point of view of weight and size indicators, since converters of this type do not have a transformer. Based on the review, a multichannel DC-DC converter circuit has been selected for integration into the traction electric drive system. The Tesla Model S has been chosen as the base vehicle. Based on the calculated dynamic characteristics of the electric vehicle, main parameters of the DC-DC converter have been determined, computer simulation of the power plant of an electric vehicle with a DC-DC converter has been carried out in the Matlab Simulink software environment. The use of the converter improves the energy efficiency of vehicles, and is also a better solution compared to installing a battery with a higher voltage.

For citation

Ivanov, M. D. et al. 2023. DC/DC converter in the electric vehicle traction system. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 361–373. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-361-373>.

Введение

Преобразователи постоянного напряжения в постоянное напряжение (DC/DC-преобразователи) используются в электронных приборах, устройствах телекоммуникации, автоматизированных системах управления (АСУ), транспортных системах. DC/DC-преобразователи классифицируются по назначению (понижающие, повышающие, инвертирующие), наличию гальванической развязки (изолированные, неизолированные), направлению потока мощности (однонаправленные, двунаправленные), источнику питания (питаемые от источника тока, питаемые от источника напряжения), типу переключений (на жестких или мягких переключениях) (Forouzesht et al., 2017; Вершинин и др., 2022). Общая черта всех DC/DC-преобразователей – наличие в их схеме LC-фильтра – узла, предназначенного для сглаживания пиков токов, напряжений и корректной работы нагрузки (Sattarov et al, 2023). В качестве LC-фильтра применяются гибридные электромагнитные элементы.

Основным преимуществом гибридных электромагнитных элементов являются их улучшенные массогабаритные показатели (Конесев, 1992; Конесев и др., 2005). В области микроэлектроники современные технологии позволяют создавать дискретные электромагнитные элементы (катушки индуктивности и конденсаторы), площадь которых не превышает нескольких десятков квадратных миллиметров (Тюменцев и др., 2011). Конструкция многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) не позволяет конкурировать с дискретными катушками индуктивности и конденсаторами в слаботочных системах по массогабаритным показателям. Поэтому целесообразно использовать МИЭК в электротехнических системах и устройствах, мощность которых измеряется десятками и сотнями киловатт. На данный момент достаточно актуальной сферой использования преобразователей постоянного напряжения являются тяговые системы электрических транспортных средств (ЭТС) (Нго и др., 2017). В качестве двигателя в ЭТС наиболее часто применяют синхронные двигатели с постоянными магнитами. Например, в современных моделях электромобилей компании Tesla (США) устанавливаются именно такие электродвигатели (Sieklicki, 2018).

Отличительная особенность указанных двигателей – нелинейная зависимость электромагнитного момента двигателя от входного постоянного напряжения U_d (Евстратов, 2016). На рис. 1 в качестве примера приведена такая зависимость для синхронного двигателя с постоянными магнитами HVH250-115S.

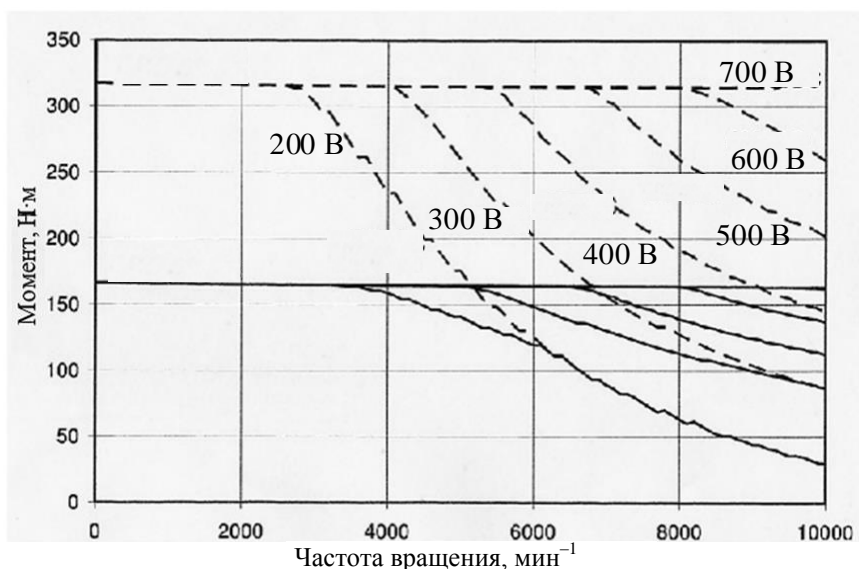


Рис. 1. Механические характеристики двигателя HVH250-115S в зависимости от входного напряжения (Источник: <https://www.cascadiamotion.com/images/catalog/remy-pds---hvh250-115-sheet-euro-pr-3-16.pdf>)

Fig. 1. HVH250-115S motor mechanical characteristics depending on the input voltage.

Source: <https://www.cascadiamotion.com/images/catalog/remy-pds---hvh250-115-sheet-euro-pr-3-16.pdf>

Рассмотрим эффект от увеличения входного напряжения на частоте вращения двигателя 8 000 мин⁻¹. Максимальный электромагнитный момент при входном напряжении $U_d = 200$ В составляет 60 Н·м, а при напряжении $U_d = 400$ В момент равен 180 Н·м. Таким образом, увеличение входного напряжения в два раза позволяет увеличить максимальный электромагнитный момент в три раза.

Повысить рабочее напряжение двигателя можно двумя основными способами:

- 1) увеличение количества последовательно включенных аккумуляторов в батарее;
- 2) установка DC/DC-преобразователя в состав тяговой системы ЭТС.

Увеличение количества аккумуляторов в батарее является не самым лучшим решением с точки зрения массогабаритных показателей. Например, аккумуляторная батарея автомобиля Tesla Model S имеет массу, превышающую 500 кг (Thomas et al., 2020). В данной статье рассматривается улучшение

энергетических характеристик электромобиля за счет включения преобразователя постоянного напряжения в схему питания двигателя ЭТС. На рис. 2 изображена функциональная схема силовой установки ЭТС.

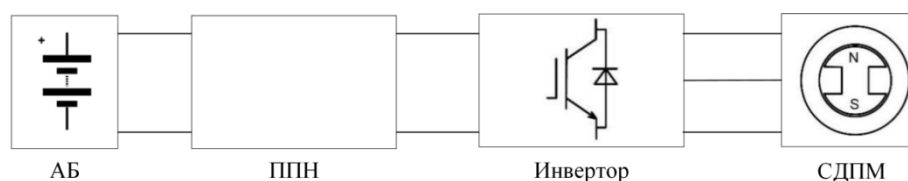


Рис. 2. Функциональная схема силовой установки электрического транспортного средства
 Fig. 2. Electric vehicle power plant functional diagram

На первом этапе проектирования преобразователя постоянного напряжения необходимо определить его структуру на основе данных, полученных в результате аналитического обзора, представленного в настоящей статье.

Теоретические основы

Как было показано во введении, существуют различные подходы к классификации преобразователей постоянного напряжения (ППН) (Лукин, 1998). В основе приведенной нами классификации лежит наличие гальванической развязки.

В изолированных преобразователях в схеме устройства устанавливается трансформатор (Gerstner et al., 2021; Kanaparthi et al., 2022). За счет изменения коэффициента трансформации появляется возможность изменять уровень выходного напряжения, не изменяя топологию схемы, поэтому изолированные ППН не подразделяются на повышающие и понижающие.

В неизолированных преобразователях гальваническая развязка отсутствует, поэтому уровень выходного напряжения зависит не только от длительности управляющих импульсов, подаваемых на ключи преобразователя, но и от топологии его схемы (Al-Obaidi et al., 2022).

Результаты классификации преобразователей по данной методике (Alhurayyis et al., 2021) приведены на рис. 3. Необходимо отметить, что регулярно появляются новые типы преобразователей, поэтому данная классификация не включает в себя все варианты исполнения преобразователей постоянного напряжения, а рассматривает только наиболее распространенные.

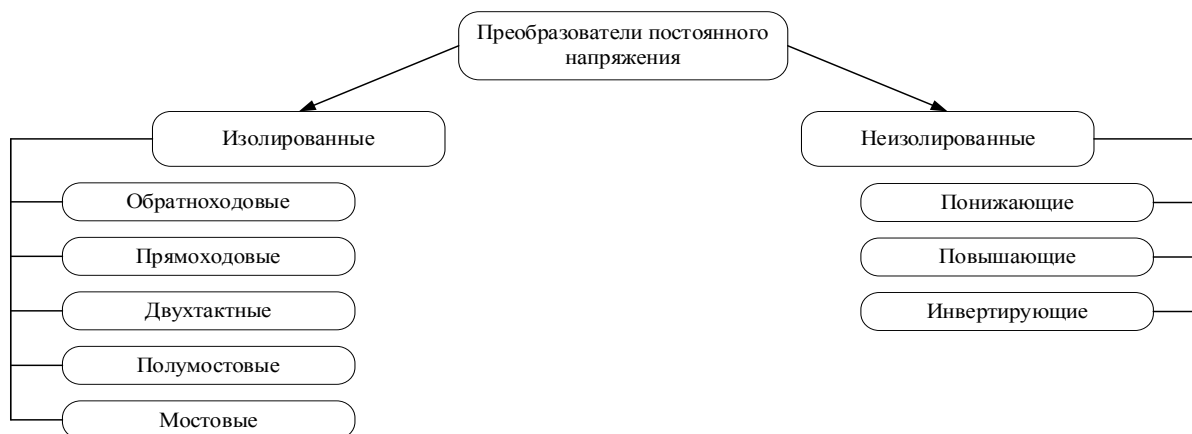


Рис. 3. Классификация преобразователей постоянного напряжения
 Fig. 3. DC/DC converters classification

Рекомендуемые диапазоны мощностей для изолированных преобразователей не превышают 2 кВт (табл. 1). За пределами данных диапазонов эффективность применения преобразователей снижается (Сукер, 2019; Хасиев и др., 2008).

Таблица 1. Рекомендуемые диапазоны мощностей изолированных ППН
 Table 1. Isolated DC/DC converters recommended power ranges

Схема	Диапазон мощностей, Вт
обратноходовая	1–100
прямоходовая	1–200
двухтактная	200–500
полумостовая	200–500
мостовая	500–2 000

К основным преимуществам неизолированных ППН по сравнению с изолированными относят улучшенные массогабаритные показатели, которые объясняются отсутствием в их схеме трансформатора (Тительмаер и др., 2018). Такие преобразователи будут более легкими и компактными при передаче той же мощности. Основная область их использования – высокотехнологическое оборудование, электрические транспортные средства, летательные и космические аппараты, т. е. те области электротехники и электроэнергетики, где масса и габариты ограничены.

Отсутствие трансформатора в схеме преобразователя приводит к тому, что величина выходного напряжения полностью определяется схемой преобразователя, величиной входного напряжения, а также скважностью импульсов, подаваемых на ключевые элементы. Поэтому основной классификацией для неизолированных преобразователей является их разделение по уровню выходного напряжения: понижающие, повышающие, а также инвертирующие (такие, в которых величина выходного напряжения может быть как выше, так и ниже входного напряжения).

В настоящее время в электроприводах различных электроустановок применяются многоканальные преобразователи постоянного напряжения (МППН) с высокой удельной мощностью (Гулямов, 2020; Ютт и др., 2015). Многоканальные преобразователи постоянного напряжения имеют преимущество по сравнению с одноканальными, так как состоят из нескольких ППН, параллельно работающих на общую нагрузку. Такая схема преобразования позволяет распределить мощность нагрузки на несколько отдельных, параллельно работающих преобразователей, что в конечном счете увеличивает плотность мощности преобразователя. При этом пульсация тока на общей шине станет относительно низкой, и небольшой емкости конденсатора фильтра будет достаточно для сглаживания пульсации напряжения (Aggeler et al., 2007).

Электрическая принципиальная схема преобразователя постоянного напряжения с трехканальной структурой приведена на рис. 4. Такой преобразователь представляет собой каскад из нескольких преобразователей (соединенных между собой параллельно), образующий один преобразователь большей мощности с общим входом и выходом (Ютт и др., 2016). Преобразователь с трехканальной структурой можно использовать в устройствах и приводах, где мощность нагрузки достигает от десятков до сотен киловатт.

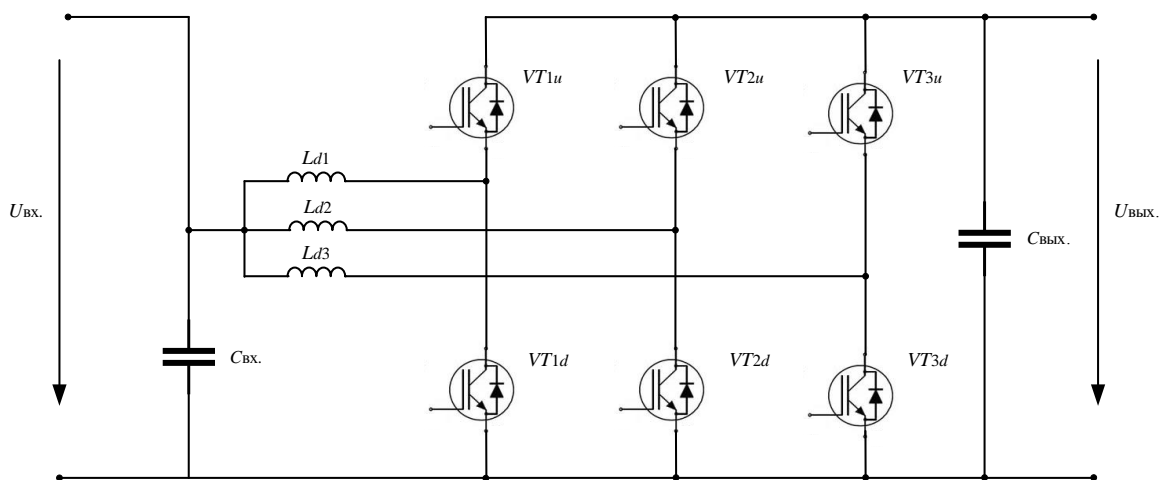


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема силовой части преобразователя постоянного напряжения с трехканальной структурой
Fig. 4. Three-channel structure DC/DC converter electrical circuit power diagram

Преобразователь состоит из трех параллельно включенных составных преобразователей с одинаковыми входными и выходными параметрами. Режимы работы этих преобразователей, работающих на одинаковых частотах, отличаются сдвигом по фазе управляющих импульсов.

Таким образом, обратимый преобразователь постоянного напряжения (ОППН) трехканальной структуры работает по принципу чередования каналов, т. е. переключение катушек индуктивностей L_{d1} – L_{d3} происходит поочередно.

Фазовый сдвиг импульсов управления многоканальным преобразователем находится как

$$\varphi = \frac{2\pi}{n}, \quad (1)$$

где n – число параллельно работающих преобразователей.

Для трехканального преобразователя в соответствии с формулой (1) количество параллельно включенных преобразователей равно трем и, соответственно, фазовый сдвиг импульсов управления составляет 120° .

Несмотря на сложность управления многоканальным преобразователем, совместная работа нескольких составных преобразователей обеспечивает значительное снижение токовых нагрузок на силовые ключи, так как общая нагрузка равномерно распределяется на количество совместно работающих преобразователей. Соответственно, для отдельного преобразователя в трехканальной схеме требуются ключевые элементы меньшей мощности по сравнению с преобразователем с одноканальной схемой (Зиновьев, 1999). Таким образом, оптимальным вариантом DC/DC-преобразователя для установки в электрическое транспортное средство является трехканальный преобразователь постоянного напряжения.

Результаты и обсуждение

Перед проектированием преобразователя постоянного напряжения необходимо оценить параметры системы, в которой он будет установлен. Для этого производится тяговый расчет параметров электромобиля, результаты которого позволят оценить мощность преобразователя, его входное и выходное напряжение, а также другие электротехнические параметры.

Для расчетных исследований в качестве базового транспортного средства (ТС) использованы параметры легкового электромобиля Tesla Model S полной массой 2 069 кг (табл. 2).

Таблица 2. Исходные данные ТС
 Table 2. EV initial data

Параметр	Значение
Масса ТС m , кг	2 069,0
Площадь поперечного сечения ТС S , м ²	2,82
Коэффициент аэродинамического сопротивления C , о. е.	0,208
Радиус колеса автомобиля r , м	0,267
КПД механической трансмиссии η , о. е.	0,99
Передаточное число i , о. е.	7,56
Заявленное ускорение a , м/с ²	8,65

На рис. 5 изображены силы, действующие на электромобиль при движении по ровной поверхности: сила тяжести G , сила реакции опоры N , сила сопротивления воздуха F_c , сила трения качения F_T , а также приведенный к ведущим колесам электромагнитный момент M .

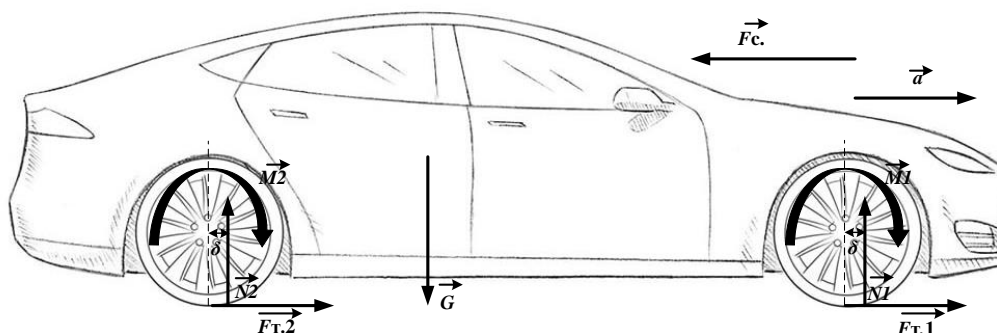


Рис. 5. Силы, действующие на электромобиль
 Fig. 5. Forces acting on an electric vehicle

Для расчета параметров электромобиля можно записать следующие уравнения:

$$ma = \sum_{i=1}^4 F_T - F_c, \quad (2)$$

$$N_1 = \frac{G}{4}.$$

Для расчета параметров колеса верна следующая запись:

$$J\varepsilon = M_1 - F_T r - N_1 \delta, \quad (3)$$

где J – приведенный к колесу момент инерции системы "двигатель – трансмиссия – колесо", примерно равный 15,4 кг·м²; δ – коэффициент трения качения, приблизительно равный 0,01; ε – угловое ускорение колеса, связанное с ускорением автомобиля, определяемого по формуле

$$\varepsilon = \frac{a}{r}.$$

Силу сопротивления воздуха можно определить так:

$$F_c = \frac{C_p}{2} \rho v^2 S, \quad (4)$$

где $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; v – скорость электромобиля.

Поскольку разгон электромобиля осуществляется от 0 до 97 км/ч за 3,1 с согласно технической спецификации, то ускорение выбрано средним за данный промежуток и определено по формуле

$$a = \frac{v_{\max}}{t}.$$

Скорость, при которой достигается данное ускорение, равна 68 км/ч. Тогда сила сопротивления воздуха согласно формуле (4) будет равна

$$F_c = \frac{0,208 \cdot 1,225}{2} \cdot 18,67^2 \cdot 2,82 = 125,18 \text{ Н}.$$

На каждое колесо для обеспечения заданного ускорения должна быть приложена сила трения, согласно формуле (2), равная

$$F_T = \frac{2 \cdot 069 \cdot 8,65 + 125,18}{4} = 4 \cdot 505,51 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Используя значения сил трения и сопротивления воздуха, а также выражение (3), определим крутящий момент на валу колеса

$$M_1 = 15,4 \cdot 32,55 + 4 \cdot 505,5 \cdot 0,267 + 5 \cdot 074,2 \cdot 0,01 = 1 \cdot 751,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тогда на валу электродвигателя должен обеспечиваться момент, который можно определить по формуле

$$M = \frac{4M_1}{i\eta}, \quad M \approx 720 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5)$$

Значение, полученное согласно выражению (5), совпадает с данными технической спецификации автомобиля.

Угловую скорость ротора электродвигателя определим как

$$\omega = \frac{vi}{r}.$$

При скорости 68 км/ч угловая скорость электродвигателя составит

$$\omega = \frac{18,67 \cdot 9,73}{0,267} = 680,37 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Мощность на валу электродвигателя найдем следующим образом:

$$P_{\text{Эд}} = M_{\max} \omega, \quad P_{\text{Эд}} \approx 490 \text{ кВт}.$$

Это значение совпадает с данными технической спецификации автомобиля, что свидетельствует о правильности выполненных расчетов.

Мощность преобразователя постоянного напряжения можно оценить исходя из мощности электродвигателя с учетом потерь энергии на нем и инверторе (*Новаковски и др., 2012*):

$$P_{\text{ППН}} = \frac{P_{\text{ин}}}{\eta_{\text{ин}}},$$

$$P_{\text{ин}} = \frac{P_{\text{Эд}}}{\eta_{\text{Эд}}},$$

где $P_{\text{ППН}}$ – мощность преобразователя постоянного напряжения; $P_{\text{ин}}$ – мощность инвертора; $P_{\text{Эд}}$ – мощность электродвигателя; $\eta_{\text{ин}}$ – КПД инвертора; $\eta_{\text{Эд}}$ – КПД электродвигателя.

Входное напряжение преобразователя постоянного напряжения равно напряжению аккумуляторной батареи и составляет $U_{\text{вх}} = 400 \text{ В}$. Выходное напряжение в первую очередь определяется параметрами двигателя и максимально возможным значением напряжения, приложенного к его обмоткам. В рамках данной статьи значение выходного напряжения преобразователя принимается равным $U_{\text{вых}} = 650 \text{ В}$.

Параметры ППН можно определить согласно следующей методике (*Капустин и др., 2013*).

Номинальный входной ток обратимого преобразователя постоянного напряжения найдем по формуле

$$I_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}},$$

где $P_{\text{вх}}$ – входная мощность преобразователя при номинальной нагрузке; $U_{\text{вх}} = 400 \text{ В}$ – напряжение аккумуляторной батареи.

Номинальный ток одного канала ОППН меньше входного тока в n раз, где $n = 3$ – количество каналов. Минимальное и максимальное входное напряжение преобразователя варьируется в диапазоне от 80 до 115 % его номинального напряжения. Максимально допустимая величина пульсации выходного напряжения равна 3 % от выходного напряжения (Pany *et al.*, 2011).

Номинальный ток нагрузки можно определить как

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{U_{\text{вых. ном}}}$$

Для расчета индуктивности катушек ОППН трехканальной структуры необходимо определить величину пульсации тока катушки индуктивности. Для корректной работы преобразователя пульсация тока катушки индуктивности не должна превышать 0,1 от номинального входного тока, тогда

$$\Delta I_L = 0,1 I_{\text{вых. max}} \frac{U_{\text{вых. ном}}}{U_{\text{вх. ном}}}$$

Сквозность импульсов определяется следующим образом:

$$D = 1 - \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}}$$

Суммарная индуктивность катушек преобразователя может быть найдена согласно (Гулямов, 2018):

$$L_{\Sigma} = \frac{U_{\text{вых}}}{4\Delta I_L f_S}$$

где f_S – частота переключений транзисторов.

Тогда индуктивность первой катушки трехканального преобразователя будет равна

$$L = \frac{L_{\Sigma}}{3}$$

Минимальное значение емкости выходного конденсатора определяется как

$$C = \frac{I_{\text{вых. max}} (1 - D)}{f_S \Delta U_{\text{вых}}}$$

Результаты расчета параметров преобразователя постоянного напряжения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры преобразователя постоянного напряжения
Table 3. DC/DC converter parameters

Параметр	Значение
Номинальная мощность преобразователя $P_{\text{ном}}$, кВт	505,0
Номинальный входной ток $I_{\text{вх}}$, А	1 263,0
Приблизительная пульсация тока катушки ΔI_L , А	126,3
Номинальный ток одного канала $I_{\text{ном}}$, А	421,0
Минимальное входное напряжение U_{min} , В	320,0
Максимальное входное напряжение U_{max} , В	470,0
Номинальное выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В	650,0
Максимальная величина пульсации выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых. max}}$, В	19,5
Частота переключений транзисторов f_S , кГц	5,0
Минимальная индуктивность одной катушки L , мкГн	85,8
Минимальная емкость конденсатора C , мФ	2,95

Выше было приведено обоснование повышения напряжения, подаваемого на трехфазный инвертор, питающий синхронный двигатель с постоянными магнитами, который приводит электрическое транспортное средство в движение. Теоретически это обоснование заключается в следующем: при повышении напряжения, подводимого к обмоткам двигателя, при тех же параметрах движения и той же потребляемой мощности снижается ток в обмотках статора. В результате снижаются потери, а двигатель становится более энергоэффективным.

Наилучшим подтверждением эффективности установки трехканального DC/DC-преобразователя является компьютерное моделирование тяговой системы электрического транспортного средства.

На данный момент существует множество программ, позволяющих эффективно моделировать сложные технические системы. Самой распространенной и наиболее удобной в использовании является MatLab Simulink. Особенность указанной программы – наличие готовых блоков для двигателя, инвертора и системы управления инвертором, основанной на векторном управлении скоростью двигателя.

Для оценки эффективности работы преобразователя напряжения были проведены три эксперимента:

1) работа без ППН, выходное напряжение АБ составляет 400 В;

- 2) работа без ППН, выходное напряжение АБ составляет 650 В;
 - 3) работа с ППН, напряжение АБ составляет 400 В, входное напряжение инвертора равно 650 В.
- В каждом эксперименте автомобиль проезжает один и тот же цикл движения.

После моделирования сравнивается степень заряженности АБ, которая и определяет энергоэффективность повышения напряжения. Во всех случаях используется аккумуляторная батарея одной и той же емкости; блоки задания скорости автомобиля, а также момента сопротивления на валу двигателя не изменяются.

Имитационная модель тяговой системы ЭТС, построенная в Simulink (рис. 6), состоит из следующих элементов:

- аккумуляторной батареи;
- DC/DC-преобразователя;
- инвертора;
- тягового электродвигателя;
- системы управления инвертором, основанной на векторном управлении;
- блоков для вывода основных параметров двигателя и батареи по ходу экспериментов.

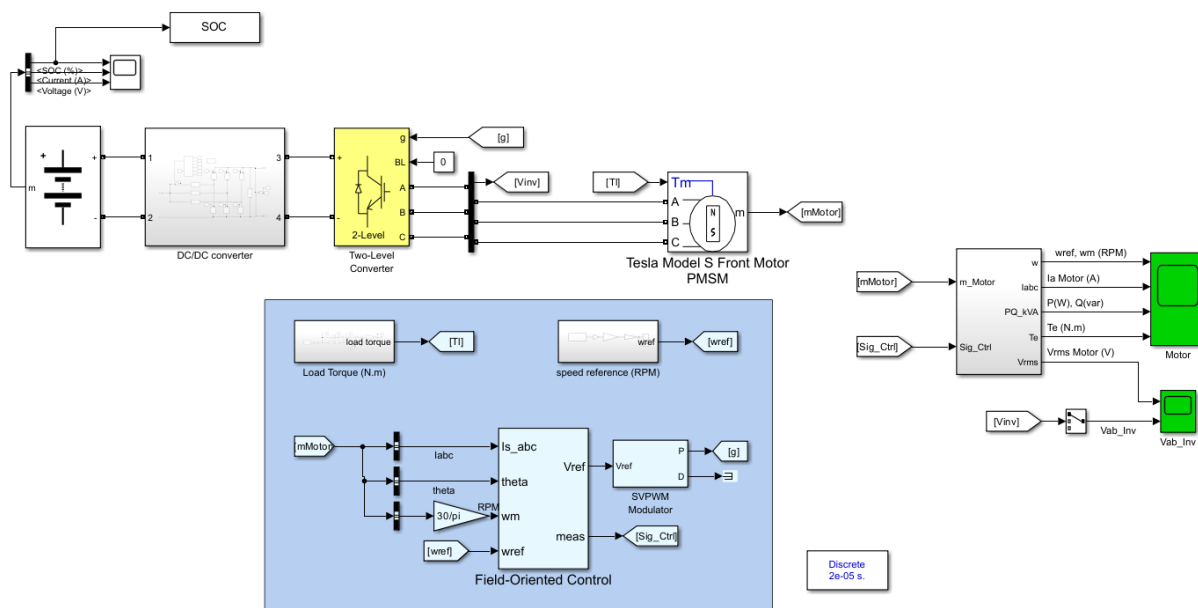


Рис. 6. Общий вид имитационной модели тяговой системы ЭТС
 Fig. 6. General view of the EV traction system simulation model

В качестве аккумуляторной батареи взят стандартный блок из библиотеки Specialized Power Systems. Расчет характеристик режима разряда батареи производится автоматически. Блок измерения параметров на выходе АБ показывает текущее значение тока, напряжение и степень заряженности (SOC), на основе которых производится оценка эффективности работы преобразователя.

Имитационная модель трехканального DC/DC-преобразователя, разработанная в программной среде Matlab Simulink, приведена на рис. 7. В данной схеме в качестве входного LC-фильтра использован многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент. Включение этого компонента в состав DC/DC-преобразователя позволяет значительно улучшить его массогабаритные показатели (МГП). Авторами статьи запланированы исследования, включающие разработку алгоритма расчета компонента и сравнение его МГП с параметрами классического фильтра.

Для приближения результатов моделирования к реальным параметрам движения электромобиля испытания проведены в стандартизированном ездовом цикле движения ECE-15, характеризующем движение в городских условиях (Lintern et al., 2013). На рис. 8 приведена зависимость скорости движения от времени в данном цикле. График изменения остаточного заряда АБ при движении (это изменение установлено в ходе трех различных экспериментов) демонстрирует, что наиболее энергоэффективным способом является применение высоковольтной батареи с выходным напряжением 650 В (рис. 9). Данный способ существенно увеличивает массу электромобиля, а значит, увеличивается и расход энергии, что в компьютерной модели не учитывалось. Сравнение результатов экспериментов 1 (при питании электромобиля от батареи напряжением 400 В) и 2 (при питании от АБ напряжением 650 В) показывает, что гипотеза подтвердилась, и повышение входного напряжения инвертора действительно улучшает энергетические показатели движения электромобиля.

Данное явление можно объяснить следующими соображениями: при эксплуатации электропривода в одинаковых городских условиях полезная мощность практически не изменяется, а при увеличении напряжения до 650 В значительно падает ток, потребляемый двигателем. Потери электрической энергии в обмотках статора СДПМ пропорциональны квадрату тока. Повышение напряжения ведет к снижению потерь электрической энергии и, как следствие, большей степени заряженности аккумуляторной батареи в конце эксперимента. Особенно это проявляется в переходных режимах работы электропривода, т. е. при движении в городском цикле, что и демонстрируется на рис. 9.

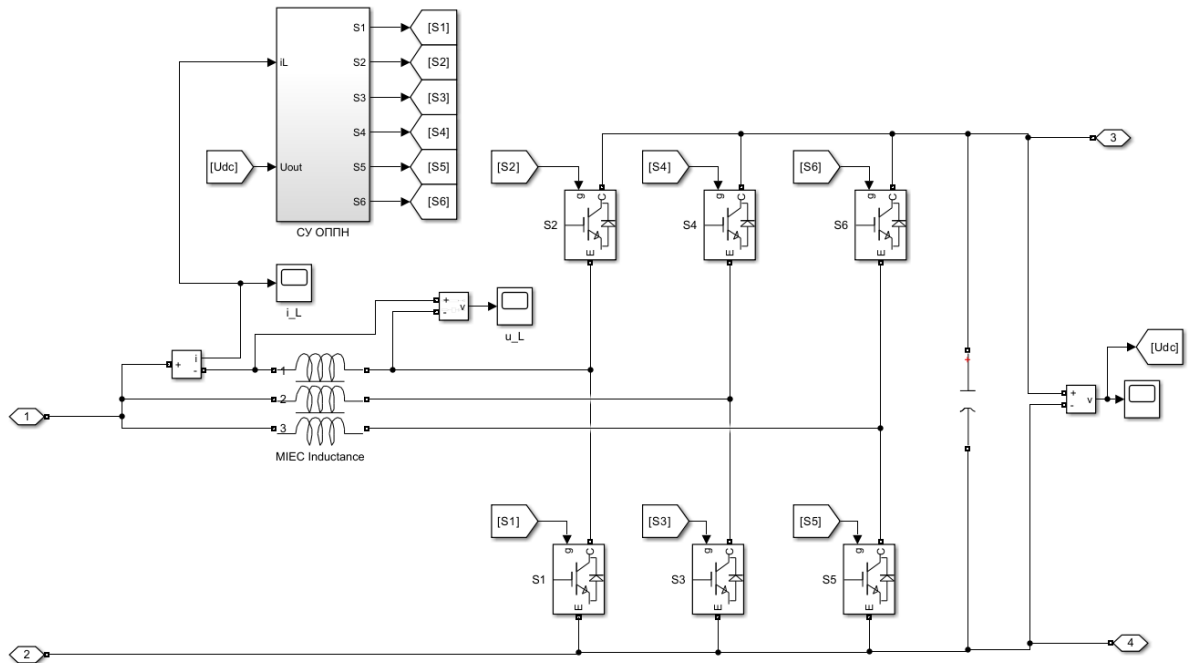


Рис. 7. Реализация модели повышающего DC/DC-преобразователя в программной среде Matlab Simulink
 Fig. 7. Matlab Simulink software boost DC/DC converter model implementation

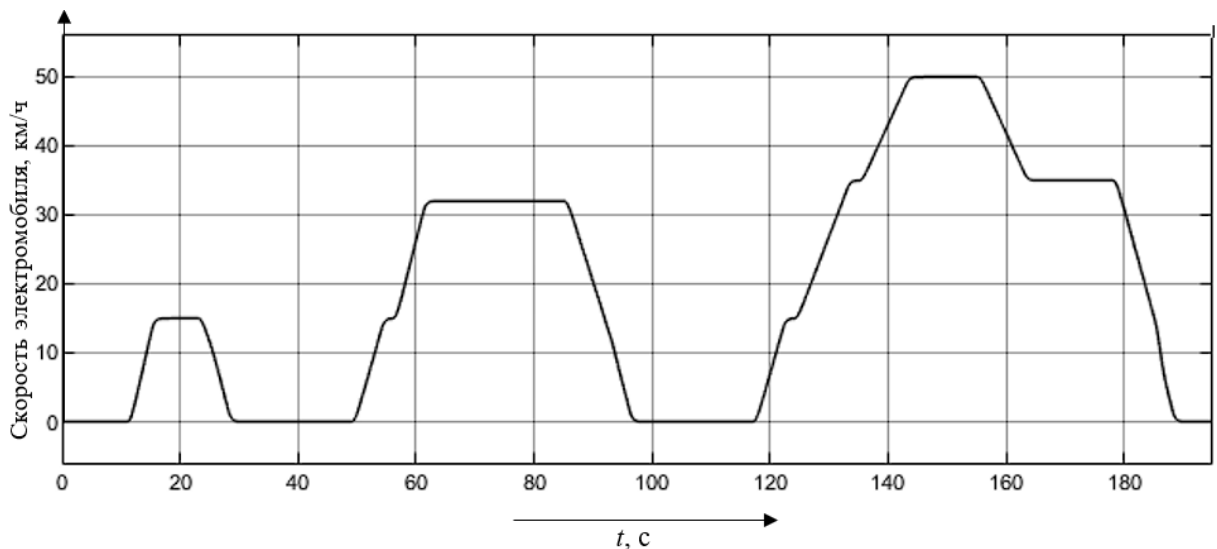


Рис. 8. Стандартизированный ездовой цикл движения в городских условиях
 Fig. 8. Standardized urban driving cycle

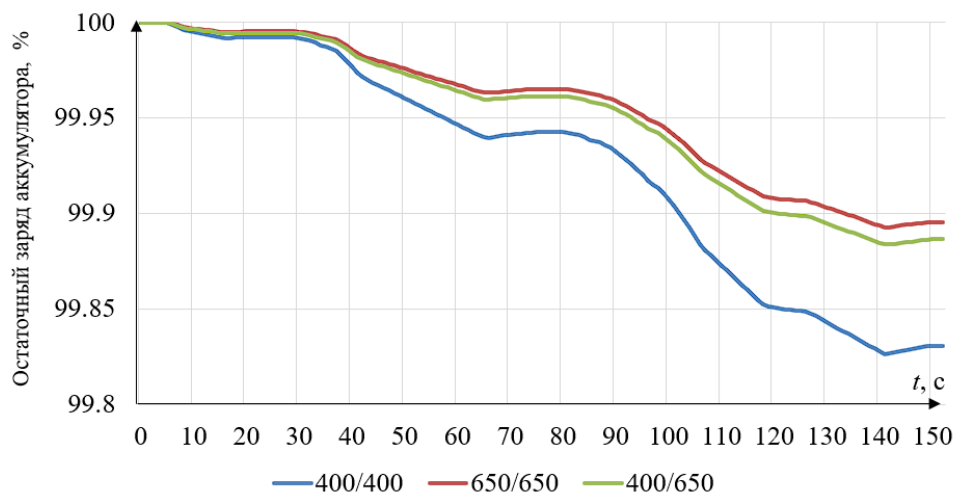


Рис. 9. Сравнение остаточного заряда при разных способах питания двигателя
 Fig. 9. Comparison of residual charge with different types of motor power supply

Заключение

Оптимальным вариантом для использования в качестве источника питания для мощных силовых электроприводов являются многоканальные преобразователи постоянного напряжения. Подобная структура позволяет снизить требования к отдельным силовым ключам и элементам преобразователя и является оптимальной с точки зрения массогабаритных показателей, так как в преобразователях данного типа отсутствует трансформатор. Кроме того, снижение массогабаритных показателей DC/DC-преобразователя возможно за счет применения функциональной интеграции элементов. Коллективом авторов запланированы исследования, включающие разработку алгоритма расчета многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, а также сравнение его массогабаритных показателей с параметрами классического фильтра.

В качестве электромобиля, для которого проектируется преобразователь постоянного напряжения, выбран Tesla Model S. В результате проведенного исследования:

- рассчитаны динамические характеристики электромобиля; определены силы трения и моменты сопротивлений; эти параметры учтены при создании компьютерной модели разработанной системы;
- определены основные параметры преобразователя постоянного напряжения, используемого в тяговой системе выбранного электрического транспортного средства;
- произведено компьютерное моделирование силовой установки электрического транспортного средства с преобразователем постоянного напряжения.

Применение преобразователя постоянного напряжения является лучшим решением проблемы повышения энергоэффективности автомобиля по сравнению с установкой батареи с увеличенным напряжением.

Благодарности

Исследования выполнены на средства, предусмотренные постановлением Правительства РФ "О назначении и выплате стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2022–2024 гг."; грантополучатель Хазиева Регина Тагировна; приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента РФ) "Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива"; тема исследований "Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Вершинин Н. Ф., Карпов А. М., Кузнецов С. В. DC/DC-преобразователь с гальванической развязкой на SiC-MOSFET для гибридного автотранспортного средства // Электричество. 2022. № 9. С. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-9-53-65>. EDN: UVCBUI.
- Гулямов К. Х. Моделирование режимов работы импульсных многоканальных преобразователей постоянного напряжения // Политехнический вестник. Сер. Инженерные исследования. 2020. № 1(49). С. 29–33. EDN: LIGCSA.

- Гулямов К. Х. Энергетическая установка электромобиля с системой многоканального преобразования постоянного напряжения : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03. М., 2018. 156 с.
- Евстратов А. Э. Управление электромагнитным моментом электропривода горных машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03. Томск, 2016. 127 с.
- Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники : в 2 т. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1999. Ч. 1. 199 с.
- Капустин И. В., Лукашенко А. В. Математическое моделирование и анализ импульсного повышающего преобразователя напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 2. С. 126–135. EDN: QBWGQX.
- Конесев С. Г. Многофункциональные интегрированные элементы для управляемых систем питания устройств специального назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05. Уфа, 1992. 19 с.
- Конесев С. Г. Многофункциональные интегрированные электромагнитные компоненты в системах преобразования электрической энергии. Обзор // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий : межвуз. сб. науч. ст. Уфа : Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2005. С. 25–44.
- Лукин А. Высокочастотные преобразователи постоянного напряжения и их классификация // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 1998. № 1(13). С. 33–36. EDN: WTKABR.
- Новаковски Р., Кинг Б. Вопросы проектирования высокочастотных DC/DC-преобразователей с высоким входным напряжением // Компоненты и Технологии. 2012. № 5(130). С. 137–140. EDN: NKZSKB.
- Нго Ф., Гульков Г. И. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромобиля // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53>.
- Сукер К. Силовая электроника. Руководство разработчика. М. : ДМК Пресс, 2019. 252 с. (Сер. Силовая электроника).
- Тительмаер К. А., Гусев А. А., Велигорский А. А. Обзор неизолированных двунаправленных топологий преобразователей для портативных применений на базе возобновляемых источников электроэнергии // Технічні науки та технології. 2018. № 2(12). С. 176–188. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-176-188](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-176-188). EDN: YLMPNZ.
- Тюменцев А. И., Ясинский И. М., Яковлев А. Н. Электрические фильтры для современной радиоэлектронной аппаратуры // Радиотехника, электроника и связь : РЭС-2011 : междунар. науч.-техн. конф., 5–8 июля 2011 г. Омск : Радиотехника, 2011. С. 515–521.
- Хасиев В., Кулаков А. Расчет и схемотехника повышающих DC/DC-преобразователей высокой мощности // Силовая электроника. 2008. № 4. С. 36–40.
- Ютт В. Е., Голубчик Т. В., Гулямов К. Х. Экспериментальное исследование режимов работы импульсных преобразователей постоянного напряжения трехфазной структуры при активной и активно-индуктивной нагрузках // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 5. С. 11–14. EDN: XBHYQN.
- Ютт В. Е., Лохнин В. В., Сидоров К. М., Гулямов К. Х. Применение преобразователей постоянного напряжения в составе энергетической установки электрического транспортного средства // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2015. № 4(43). С. 34–40. EDN: UYSEBH.
- Aggeler D., Biela J., Inoue S., Akagi H. [et al.]. Bi-Directional isolated DC-DC converter for next-generation power distribution – comparison of converters using Si and SiC devices // Power Conversion Conference, Nagoya, Japan, 2007. P. 510–517. DOI: <https://doi.org/10.1109/pccon.2007.373015>.
- Alhurayyis I., Elkhateb A., Morrow J. Isolated and nonisolated DC-to-DC converters for medium-voltage DC networks: A review // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2021. Vol. 9, Iss. 6. P. 7486–7500. DOI: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2020.3028057>.
- Al-Obaidi N. A., Abbas R. A., Khazaal H. F. A review of non-isolated bidirectional DC-DC converters for hybrid energy storage system // 5th International Conference on Engineering Technology and its Applications (ICETA), Al-Najaf, Iraq, 2022. P. 248–253. DOI: <https://doi.org/10.1109/iiceta54559.2022.9888704>.
- Forouzesh M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A., Blaabjerg F. [et al.]. Step-up DC–DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32, Iss. 12. P. 9143–9178. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2652318>.
- Gerstner M., Maerz M., Dietz A. Review-based selection recommendation for galvanically isolated DC/DC converters designed for a wide input voltage range // IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Gliwice, Poland, 2021. P. 167–172. DOI: <https://doi.org/10.1109/pemc48073.2021.9432537>.
- Kanaparthi R. K., Singh J. P., Ballal M. S. A review on multi-port bidirectional isolated and non-isolated DC-DC converters for renewable applications // IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/pedes56012.2022.10080049>.

- Lintern M. A., Walsh C., Carroll S., Chen R. Simulation study on the measured difference in fuel consumption between real-world driving and ECE-15 of a hybrid electric vehicle // IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013), London, 2013. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1918>.
- Pany P., Singh R., Tripathi R. Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2011. Vol. 3, Iss. 3. P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijest.v3i3.68426>.
- Sattarov R. R., Khazieva R. T., Ivanov M. D. Research of a multifunctional integrated electromagnetic component as an LC filter in DC/DC converters // 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/reepe57272.2023.10086824>.
- Sieklucki G. An investigation into the induction motor of Tesla Model S vehicle // International Symposium on Electrical Machines (SME), Andrychow, Poland, 2018. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/isem.2018.8442648>.
- Thomas R., Garbuio L., Gerbaud L., Chazal H. Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor // International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 2020. P. 495–501. DOI: <https://doi.org/10.1109/icem49940.2020.9270646>.

References

- Vershinin, N. F., Karpov, A. M., Kuznetsov, S. V. 2022. A SiC MOSFET isolated DC/DC converter for a hybrid vehicle. *Elektrichestvo*, 9, pp. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-9-53-65>. EDN: UVCBUI. (In Russ.)
- Gulyamov, K. H. 2020. Simulation of operating modes of pulsed multichannel DC voltage converters. *Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies*, 1(49), pp. 29–33. EDN: LIGCSA. (In Russ.)
- Gulyamov, K. H. 2018. Power plant of an electric vehicle with a multi-channel DC/DC conversion system. Ph.D. dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Evstratov, A. E. 2016. Control of electromagnetic torque of electric drive of mining machines. Ph.D. dissertation. Tomsk. (In Russ.)
- Zinov'ev, G. S. 1999. Power electronics fundamentals. In 2 vol. Novosibirsk, Vol. 1. (In Russ.)
- Kapustin, I. V., Lukashenov, A. V. 2013. Mathematical modeling and analysis of a pulsed boost voltage converter. *Izvestiya Tula State University*, 2, pp. 126–135. EDN: QBWGQX. (In Russ.)
- Konesev, S. G. 1992. Multifunctional integrated elements for controlled power supply systems for special purpose devices. Ph.D. dissertation. Ufa. (In Russ.)
- Konesev, S. G. 2005. Multifunctional integrated electromagnetic components in electrical energy conversion systems. Review. In coll. articles *Electrical technologies, electric drive and electrical equipment of enterprises*, Ufa, pp. 25–44. (In Russ.)
- Lukin, A. 1998. High frequency DC/DC converters and their classification. *Electronics: Science, Technology, Business*, 1(13), pp. 33–36. EDN: WTKABR. (In Russ.)
- Novakovski, R., King, B. 2012. Design issues for high-frequency DC/DC converters with high input voltage. *Komponenty i Tekhnologii*, 5(130), pp. 137–140. EDN: NKZSKB. (In Russ.)
- Ngo, F., Gul'kov, G. I. 2017. Calculation of the mechanical characteristics of the traction motor of an electric vehicle. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG*, 60(1), pp. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53>. (In Russ.)
- Suker, K. 2022. Power electronics. Developer Guide. Moscow. (In Russ.)
- Titel'maer, K. A., Gusev, A. A., Veligorskij, A. A. 2018. An overview of non-isolated bidirectional converter topologies for portable renewable power applications. *Technical Sciences and Technologies*, 2(12), pp. 176–188. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-176-188](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-176-188). EDN: YLMPNZ. (In Russ.)
- Tyumencev, A. I., Yasinskij, I. M., Yakovlev, A. N. 2011. Electric filters for modern radio-electronic equipment. Proceedings of Intern. conf. *Radio Engineering, Electronics and Communication*, 5–8 July, 2011. Omsk, pp. 515–521. (In Russ.)
- Hasiev, V., Kulakov, A. 2008. Calculation and circuitry of high-power DC/DC boost converters. *Silovaya Elektronika*, 4, pp. 36–40. (In Russ.)
- Yutt, V. E., Golubchik, T. V., Gulyamov, K. H. 2016. Experimental study of the operating modes of pulsed DC/DC converters of a three-phase structure with active and active-inductive loads. *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, 5, pp. 11–14. EDN: XBHYQN. (In Russ.)
- Yutt, V. E., Lohnin, V. V., Sidorov, K. M., Gulyamov, K. H. 2015. The use of DC/DC converters as part of the power plant of an electric vehicle. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta)*, 4(43), pp. 34–40. EDN: UYSEBH. (In Russ.)
- Aggeler, D., Biela, J., Inoue, S., Akagi, H. et al. 2007. Bi-Directional isolated DC-DC converter for next-generation power distribution – comparison of converters using Si and SiC devices. Power Conversion Conference, Nagoya, Japan, pp. 510–517. DOI: <https://doi.org/10.1109/pccn.2007.373015>.

- Alhurayyis, I., Elkhateb, A., Morrow, J. 2021. Isolated and nonisolated DC-to-DC converters for medium-voltage DC networks: A review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(6), pp. 7486–7500. DOI: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2020.3028057>.
- Al-Obaidi, N. A., Abbas, R. A., Khazaaal, H. F. 2022. A review of non-isolated bidirectional DC-DC converters for hybrid energy storage system. *5th International Conference on Engineering Technology and its Applications (ICETA)*, Al-Najaf, Iraq, pp. 248–253. DOI: <https://doi.org/10.1109/iiceta54559.2022.9888704>.
- Forouzesh, M., Siwakoti, Y. P., Gorji, S. A., Blaabjerg, F. et al. 2017. Step-up DC-DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(12), pp. 9143–9178. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2652318>.
- Gerstner, M., Maerz, M., Dietz, A. 2021. Review-based selection recommendation for galvanically isolated DC/DC converters designed for a wide input voltage range. *IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Gliwice, Poland, pp. 167–172. DOI: <https://doi.org/10.1109/pemc48073.2021.9432537>.
- Kanaparthi, R. K., Singh, J. P., Ballal, M. S. 2022. A review on multi-port bidirectional isolated and non-isolated DC-DC converters for renewable applications. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/pedes56012.2022.10080049>.
- Lintern, M. A., Walsh, C., Carroll, S., Chen, R. 2013. Simulation study on the measured difference in fuel consumption between real-world driving and ECE-15 of a hybrid electric vehicle. *IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013)*, London, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1918>.
- Pany, P., Singh, R., Tripathi, R. 2011. Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(3), pp. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijest.v3i3.68426>.
- Sattarov, R. R., Khazieva, R. T., Ivanov, M. D. 2023. Research of a multifunctional integrated electromagnetic component as an LC filter in DC/DC converters. *5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, Moscow, Russian Federation, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/reepe57272.2023.10086824>.
- Sieklucki, G. 2018. An investigation into the induction motor of Tesla Model S vehicle. *International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Andrychow, Poland, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/isem.2018.8442648>.
- Thomas, R., Garbuio, L., Gerbaud, L., Chazal, H. 2020. Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden, pp. 495–501. DOI: <https://doi.org/10.1109/icem49940.2020.9270646>.

Сведения об авторах

Иванов Максим Дмитриевич – ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Россия, 450064;
Уфимский государственный нефтяной технический университет, ассистент;
e-mail: maxivanovd@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3316-2140>

Maksim D. Ivanov – 1 Kosmonavtov Str., Ufa, Russia, 450064;
Ufa State Petroleum Technological University, Assistant;
e-mail: maxivanovd@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3316-2140>

Хазиева Регина Тагировна – ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Россия, 450064;
Уфимский государственный нефтяной технический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: khazieva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

Regina T. Khazieva – 1 Kosmonavtov Str., Ufa, Russia, 450064;
Ufa State Petroleum Technological University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: khazieva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>