

Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 51-74, 621.3

doi:10.30987/2658-6436-2022-1-73-79

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ LC-РЕЗОНАНСНЫМ КОНТУРОМ

Павел Станиславович Татуйко

ОАО «Авангард» г. Санкт-Петербург, Россия

tatuyko-ps@mail.ru

Аннотация. Цель работы заключалась в определении перспективных преобразователей для питания требуемым уровнем напряжения устройств потребителя. В рамках реализации поставленной задачи было произведено математическое описание резонансного преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром. Приведена эквивалентная схема замещения преобразователя, в результате анализа работы которой были определены аналитические выражения, описывающие основные зависимости данного преобразователя от величины нагрузки и частоты коммутации ключей. В процессе проведения анализа работы резонансного преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром использовались методы математического моделирования. Результатом работы являются полученные аналитические выражения, позволяющие определить параметры колебательного контура для работы резонансного преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром в режиме с наибольшей эффективностью. Представленные графики демонстрируют зависимость ключевых параметров колебательного контура от величины нагрузки и частоты коммутации полупроводниковых ключей, а соответственно и от частоты колебательного контура. Применение резонансного преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром возможно в тех областях, где используется статичная нагрузка, слабо меняющаяся со временем. Для динамической нагрузки использование данного преобразователя является неоптимальным, т.к. для поддержания выходного напряжения на требуемом уровне потребуются усложнение системы управления и введение в дополнение к частотно-импульсной модуляции широтно-импульсной модуляции и управление преобразователем посредством пропусков импульсов управления в случае режима работы, близкого к режиму холостого хода.

Ключевые слова: электрический транспорт, резонансный преобразователь, резонансный контур, резонансная частота, добротность колебательного контура

Для цитирования: Татуйко П. И. Математическое описание режимов работы резонансного преобразователя напряжения с последовательным LC-резонансным контуром / Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №1 (15). С. 73-79. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-73-79.

Original article

Open Access Article

MODEL OF MANAGING PROCESSES OF ENGINEERING CHANGES IN PRODUCTS AT AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

Pavel S. Tatuiko

OJSC «Avangard», St. Petersburg, Russia

tatuyko-ps@mail.ru

Abstract. The aim of the work is to determine promising converters for supplying consumer devices with the required voltage level. As part of the task implementation, a mathematical description of the resonant converter with a

series LC resonant circuit is made. The equivalent replacement circuit of the converter is given, as a result of its analysis analytical expressions are determined that describe the main dependences of this converter on the load and switching frequency of the keys. In the process of analyzing the resonant converter operation with a series LC resonant circuit, mathematical modelling methods are used. The result of the work is the obtained analytical expressions that allow determining the oscillatory circuit parameters for the resonant converter operation with a series LC resonant circuit in the mode with the highest efficiency. The presented graphs demonstrate the key parameter dependence of the oscillatory circuit on the load magnitude and on the switching frequency of semiconductor keys, and, accordingly, on the oscillatory circuit frequency. Applying a resonant converter with a series LC resonant circuit is possible in those areas where a static load is used that changes little over time. Applying this converter is not optimal for a dynamic load, because to maintain the output voltage at the required level, it will be necessary to complicate the control system and introduce pulse-width modulation in addition to pulse-frequency one and to control the converter by means of skipping control pulses in the case when an operating mode is close to the idle one.

Keywords: electric transport, resonant converter, resonant circuit, resonant frequency, quality factor of the oscillatory circuit

For citation: Tatuiko P. S. Model of managing processes of engineering changes in products at an industrial enterprise. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 1 (15). pp. 73-79. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-73-79.

Введение

В связи с прогнозируемым дефицитом углеводородов, а также ввиду усугубляющихся проблем, связанных с изменением климата на планете, вызванных парниковым эффектом, наблюдается глобальная электрификация транспортных средств как наземного транспорта [1], так морского [2 – 5] и воздушного [6]. Ожидается, что ввиду существенных технических, экономических и экологических преимуществ электрического транспорта по сравнению с традиционными технологиями движения транспортных средств, данное направление в ближайшие десятилетия вытеснит системы, принцип работы которых построен на основе работы двигателей внутреннего сгорания [7].

В свою очередь, развитие направления электродвижения напрямую зависит от развития систем накопления и преобразования электрической энергии. К устройствам, применяемым в составе систем электрооборудования транспорта, предъявляются особые требования как в части высокой надёжности, безотказности работы, так и в части высокой эффективности преобразования электроэнергии. В идеале, вся мощность, содержащаяся в накопителе электрической энергии на борту транспортного средства, должна передаваться в нагрузку без потерь на преобразование. Однако в реальности ситуация обстоит несколько иначе. Помимо потерь на транспортировку электрической энергии, определяемых омическим сопротивлением токопроводящих шин и проводов, существуют также потери на преобразование энергии в составе функциональных блоков, к которым относятся источники питания, инверторы, зарядные устройства. Крайне важно в проектировании изделий преобразовательной техники учитывать условия и особенности их применения в составе конечного устройства.

Источники питания. Основные типы резонансных преобразователей

Задачей источника питания является преобразование напряжения одного уровня в напряжение другого уровня, требуемое для питания оборудования в составе транспортного средства. Вариантов схемотехнической реализации данных устройств большое множество. Конкретный выбор варианта исполнения источника питания зависит от особенностей его использования.

Наибольшее распространение для применения в качестве источников питания в составе транспортных средств получили изделия, построенные по топологии резонансных преобразователей напряжения. Ключевой особенностью данного типа устройств являются высокие энергетические характеристики, а также достаточно низкий уровень электромагнитных помех, излучаемых источником питания в процессе работы [8].

В общем случае импульсный источник вторичного электропитания, функционирующий

по принципу резонансного переключения транзисторов, имеет структуру, представленную на рис. 1.

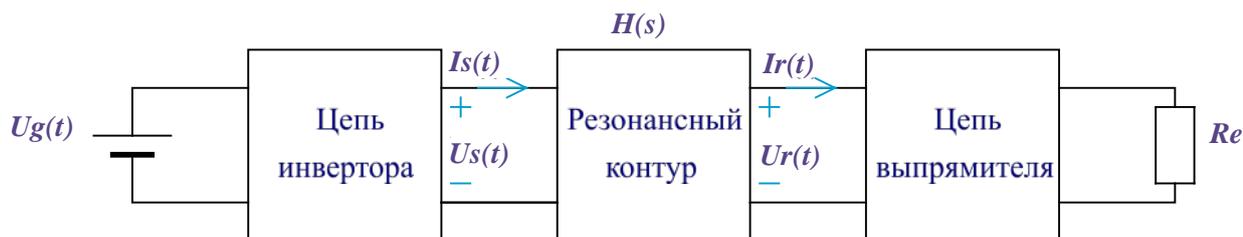


Рис. 1. Структурная схема резонансного преобразователя напряжения
Fig. 1. Structural diagram of resonant voltage converter

Напряжение от первичного источника питания $U_g(t)$ поступает на вход инвертора, где модулируется при помощи коммутации силовых полупроводниковых ключей и с заданной частотой и скважностью подаётся на вход резонансного контура. Токи $I_r(t)$ и напряжения $U_r(t)$, сформированные в процессе работы преобразователя в резонансном контуре, передаются через цепь выпрямителя в нагрузку, Re .

Тип резонансного контура определяется схемой включения резонансного конденсатора и резонансной индуктивности. Несмотря на всё многообразие существующих резонансных преобразователей [9], наибольшее распространение получили следующие [10]:

- резонансный преобразователь с последовательным резонансным контуром;
- резонансный преобразователь с параллельным резонансным контуром;
- резонансный преобразователь с последовательно-параллельным резонансным контуром.

В настоящей статье наиболее подробно будет рассмотрена схема, принцип и режимы работы резонансного преобразователя с последовательным LC -резонансным контуром.

Резонансный преобразователь с последовательным LC -резонансным контуром

Ввиду того, что основной задачей источника питания является преобразование напряжения одного уровня в напряжение другого уровня, параметром, характеризующим его работу, является передаточная функция $H(s)$, которая определяется как:

$$H(s) = \frac{U_r(s)}{U_g(s)}, \quad (1)$$

где $U_r(s)$ – напряжение на нагрузке; $U_g(s)$ – входное напряжение.

В импульсных преобразователях напряжения, построенных по схеме резонансного преобразователя с последовательным LC -резонансным контуром, цепь инвертора и цепь нагрузки включены последовательно с резонансным контуром. Эквивалентная схема резонансного преобразователя с последовательным LC -резонансным контуром приведена на рис. 2.

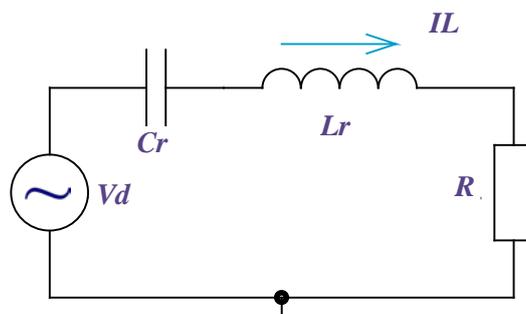


Рис. 2. Эквивалентная схема преобразователя с последовательным LC -резонансным контуром
Fig. 2. Equivalent circuit of converter with serial LC -resonant circuit

В импульсных преобразователях напряжения, функционирующих по принципу резонансного переключения силовых полупроводниковых ключей, основным способом стабилизации и регулировки выходного напряжения является частотное управление – изменение частоты коммутации силовых полупроводниковых ключей в зависимости от величины нагрузки на выходе преобразователя без изменения скважности управляющих импульсов. При изменении частоты переключения транзисторных ключей величина индуктивного сопротивления изменяется прямо пропорционально частоте коммутации полупроводниковых элементов, в то время как ёмкостное реактивное сопротивление имеет обратно пропорциональную зависимость от изменения рабочей частоты. В момент времени, когда величина индуктивного сопротивления равна величине ёмкостного сопротивления (а фаза смещена на 180°), возникает эффект резонанса. Резонансная частота ω_0 для резонансных преобразователей с последовательным LC -резонансным контуром определяется следующим выражением:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}, \quad (2)$$

где f_0 – частота коммутации ключей; L_r – величина индуктивности резонансного дросселя; C_r – величина ёмкости резонансного конденсатора.

Одним из параметров, определяющим характер работы резонансного контура, являются его добротность Q и волновое сопротивление Z_0 .

Волновым сопротивлением колебательного контура называется величина реактивного сопротивления резонансного дросселя и резонансного конденсатора на резонансной частоте. Волновое сопротивление вычисляется по формуле:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (3)$$

Добротность контура – это параметр, определяющий амплитуду и ширину амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в момент резонанса и показывающий во сколько раз запасы энергии в контуре больше, чем потери за один период колебаний. Добротность обратно пропорциональна скорости затухания собственных колебаний в системе. Чем выше добротность колебательного контура, тем меньше потери энергии за каждый период колебаний и тем медленнее колебания будут затухать. Добротность колебательного контура учитывает наличие активного сопротивления нагрузки R_H , а также сопротивление открытого канала МОП-транзистора $r_{ds(on)}$, активное сопротивление резонансной ёмкости r_C и резонансной индуктивности r_L и определяется выражением:

$$Q = \frac{\omega_0 L_r}{R} = \frac{1}{\omega_0 C_r R} = \frac{Z_0}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{R} \quad (4)$$

$$R = R_H + r_{ds(on)} + r_C + r_L \quad (5)$$

Используя выражения (2) и (3), определим входной импеданс последовательного резонансного контура:

$$\begin{aligned} Z &= R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] = \\ &= Z_0 \left[\frac{R}{Z_0} + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] = |Z| e^{j\psi} = R + jX, \end{aligned} \quad (6)$$

$$|Z| = R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} = Z_0 \sqrt{\frac{1}{Q^2} + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} = Z_0 \sqrt{\left(\frac{R}{Z_0}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \quad (7)$$

$$\psi = \arctg \left[Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right] \quad (8)$$

где ψ – угол между током и напряжением в резонансном контуре.

$$R = |Z| \cos \psi \quad (9)$$

$$X = |Z| \sin \psi \quad (10)$$

Выражение (8) показывает, что при стремлении частоты коммутации ключей к резонансной ($\omega \rightarrow \omega_0$) импеданс резонансного преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром стремится к нулю. На рис. 3 приведена зависимость импеданса резонансного контура от величины нагрузки и частоты коммутации ключей.

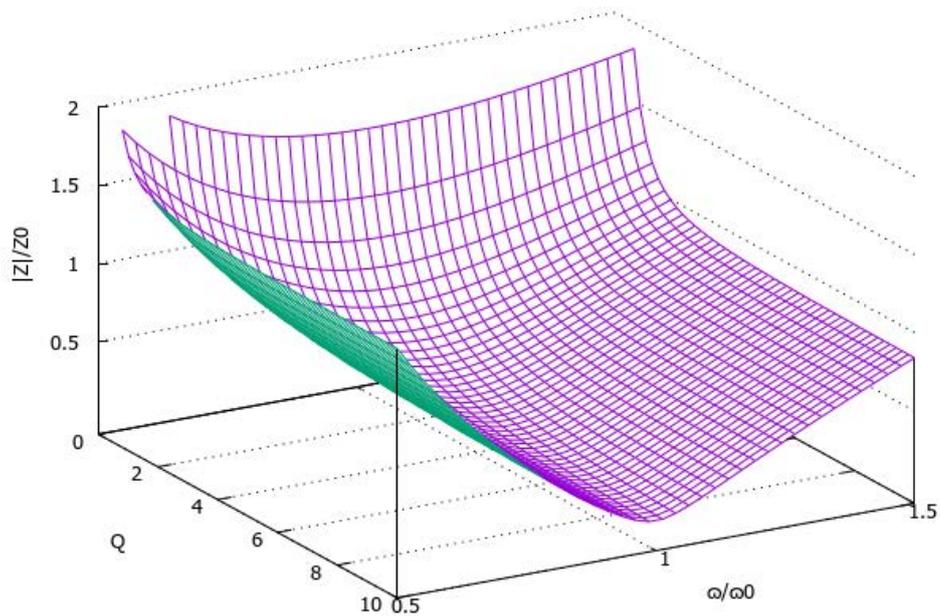


Рис. 3. Зависимость импеданса преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром от величины нагрузки и частоты коммутации ключей

Fig. 3. Dependence of impedance of converter with serial LC-resonance circuit on load value and switch switching frequency

На рис. 4 приведена зависимость угла между током и напряжением в резонансном контуре от величины нагрузки.

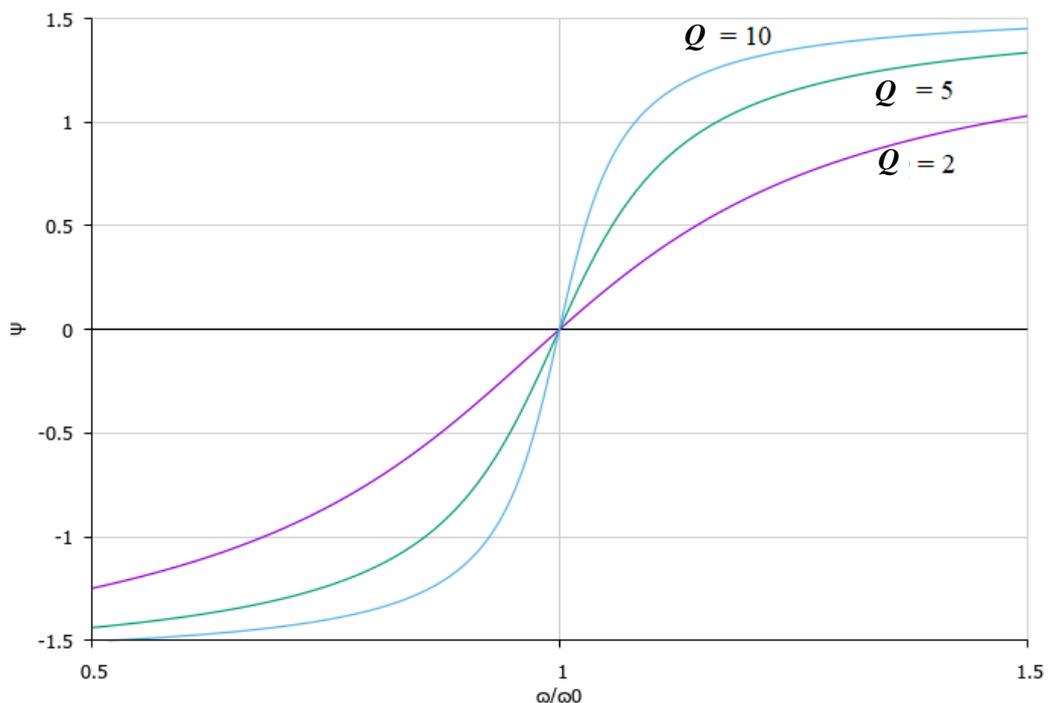


Рис. 4. Зависимость угла между током и напряжением в преобразователе с последовательным LC-резонансным контуром от величины нагрузки

Fig. 4. Relation of angle between current and voltage in converter with serial LC-resonance circuit to load value

При частоте коммутации ($\omega < \omega_0$) угол ψ имеет отрицательные значения, что означает, что резонансный преобразователь работает на ёмкостную нагрузку. При частоте коммутации ($\omega > \omega_0$) угол ψ имеет положительные значения, что означает, что резонансный преобразователь работает на индуктивную нагрузку.

На рис. 5 представлен график зависимости величины передаточной функции $H(s)$ от частоты коммутации при различных значениях нагрузки.

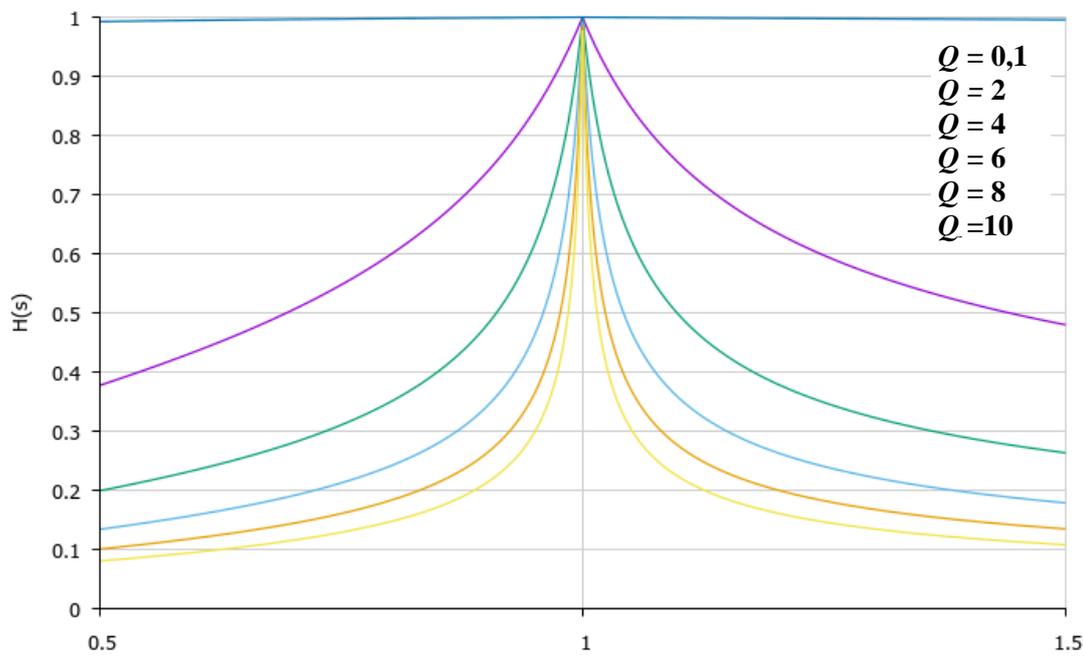


Рис. 5. Зависимость передаточной функции преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром от частоты коммутации

Fig. 5. Dependence of transfer function of converter with serial LC-resonant circuit on switching frequency

Так как индуктивное и ёмкостное сопротивления в момент резонанса взаимно компенсируют друг друга, суммарное сопротивление резонансного контура близко к нулю. Входное напряжение делится между сопротивлением резонансного контура и сопротивлением нагрузки. Ввиду того, что получившаяся схема работает как делитель напряжения, коэффициент передачи постоянного напряжения резонансного преобразователя с последовательным резонансным контуром всегда меньше 1. Величина выходного напряжения определяется величиной частоты коммутации ключей, однако при малых нагрузках сопротивление на выходе резонансного преобразователя очень велико по сравнению с сопротивлением резонансной цепи, из-за чего всё входное напряжение переходит в нагрузку. Это делает практически невозможным регулировку выходного напряжения. Теоретически, частота должна быть бесконечной, чтобы регулировать выходное напряжение преобразователя при работе на холостом ходу.

Заключение

В процессе проведённого анализа работы резонансного преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром определены аналитические выражения, описывающие работу преобразователя в диапазоне нагрузок и частот коммутации. Приведенные в статье графики демонстрируют зависимость импеданса резонансного преобразователя с последовательным LC-резонансным контуром от величины нагрузки и частоты коммутации ключей, зависимость угла между током и напряжением в преобразователе от величины нагрузки, зависимость передаточной функции от частоты коммутации.

Несмотря на то, что для получения высокой эффективности работы резонансный

преобразователь с последовательным LC-резонансным контуром требует специальных условий, данный тип устройств находит применение в составе импульсных преобразователей напряжения, в том числе предназначенных для обеспечения питанием требуемого уровня напряжения статических нагрузок, слабо изменяющихся во времени.

Список источников:

1. Татуйко, П.С., Федяева, Г.А., Беззубенко, А.И. Повышение энергоэффективности электрических транспортных средств // САПР и моделирование в современной электронике: сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 303-306.
2. «**Полное электродвижение**»: концепция боевых кораблей будущего [Электронный ресурс] – URL: <https://topwar.ru/122819-polnoe-elektrodvizhenie-koncepciya-boevyh-korabley-buduschego.html> (дата обращения 06.11.2021).
3. Губанов, Ю. Электротехнические системы кораблей и судов: этапы развития, автоматизация. Концепция электрического корабля. Control Engineering Россия. – 2014. – №3 (51). – С. 24-27.
4. Романовский, В.В. Перспективы развития систем электродвижения / В.В. Романовский, Б.В. Никифоров, А.М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2018. – Т. 10. – № 3. – С. 586-596.
5. Дядик, А.Н. Корабельные энергетические системы / А.Н. Дядик, Б.В. Никифоров. – Новочеркасск: Колорит, 2012. – 680 с.
6. Стратегия развития авиационной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. Правительство Российской Федерации. Москва, 2017. – 47 с.
7. European Automobile Manufacturers Association. Press Release: Fuel types of new cars: petrol +6,1 %, diesel -14,1 %, electric +51,8 % in third quarter of 2019, 07/11/2019.
8. Tatuiko, P.S., Fedyayeva, G.A., Kobishanov, V.V., Fedorov, V.P. Energy-efficient Half-bridge Voltage Converter for Vehicle Electrical Systems. 2019 1-st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2019. – p. 461-464.
9. Batarseh, I. Resonant converter topologies with three and four energy storage elements, Power Electronics, IEEE Transactions. – 1994. – vol. 9. – p. 64-73.
10. Yang, B. Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System, Ph.D dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng. Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA, Sep. 2003.

Информация об авторах

Павел Станиславович Татуйко

Тел.: +7 (920) 603-12-98, начальник отдела «Силовая электроника» ОАО «Авангард» г. Санкт-Петербург, Россия

References:

1. Tatuiko P.S., Fedyayeva G.A., Bezubenko A.I. Improving the Energy Efficiency of Electric Vehicles. Proceedings of Scientific Papers of the 3d International Scientific and Practical Conference «CAD and Modelling in Modern Electronics». Bryansk: BSTU, 2019, pp. 303-306.
2. Full Electric Propulsion: the Concept of Warships of the Future. Available at: <https://topwar.ru/122819-polnoe-elektrodvizhenie-koncepciya-boevyh-korabley-buduschego.html> (Accessed: the 06th of November 2021).
3. Gubanov Yu. Electrical Systems of Ships and Vessels: Stages of Development, Automation. Kontseptsiya elektricheskogo korablya. Control Engineering Russia, 2014, no. 3 (51), pp. 24-27.
4. Romanovsky V.V., Nikiforov B.V., Makarov A.M. Prospects for the Development of Electromotive Systems. Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 586-596.
5. Dyadik A.N., Nikiforov B.V. Ship Energy Systems. Novocherkassk: Kolorit, 2012. 680 p.
6. Strategy for Developing the Aviation Industry of the Russian Federation for the Period up to 2030. Government of the Russian Federation. Moscow, 2017. 47 p.
7. European Automobile Manufacturers Association. Press Release: Fuel types of new cars: petrol +6,1 %, diesel -14,1 %, electric +51,8 % in third quarter of 2019, dated on the 7th of November 2019.
8. Tatuiko P.S., Fedyayeva G.A., Kobishanov V.V., Fedorov V.P. Energy-efficient Half-bridge Voltage Converter for Vehicle Electrical Systems. Proceedings of the 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2019. pp. 461-464.
9. Batarseh I. Resonant Converter Topologies with Three and Four Energy Storage Elements, Power Electronics, IEEE Transactions, 1994, vol. 9, pp. 64-73.
10. Yang B. Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System. Cand. Diss, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA, Sep. 2003.

Information about authors:

Pavel Stanislavovich Tatuiko

Tel.: +7 (920) 603-12-98, Head of the Department «Power Electronics», OJSC «Avangard», St. Petersburg, Russia

Статья поступила в редакцию 26.11.2021; одобрена после рецензирования 06.12.2022; принята к публикации 10.12.2021.

The article was submitted 26.11.2021; approved after reviewing 06.12.2022; accepted for publication 10.12.2021.

Рецензент – Федяева Г.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет, член редакционного совета журнала «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении».

Reviewer – Fedyayeva G.A., Doctor of Technical Sciences, Associate professor, Bryansk State Technical University, Member of the Editorial Board Journal «Automation and modeling in design and management».