

# АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ОДНОФАЗНОГО ВИЕННА-ВЫПРЯМИТЕЛЯ

## CHARGER CONTROL ALGORITHM BASED ON A SINGLE-PHASE VIENNA RECTIFIER

**D. Melnikov  
M. Petrovichev**

*Summary.* The application of a single-phase single-key PFC rectifier for use in electric vehicle chargers was studied in the article. The rectifier has a simple design and compact dimensions. It was derived from a three-phase Vienna rectifier, which has the advantages of low voltage per switch and high power factor. For the proposed rectifier, a control algorithm based on the equations of system dynamics has been developed. Computational experiments confirmed the acceptable performance of the proposed rectifier and control algorithm as an electric vehicle charger.

*Keywords:* rectifier, power factor, control algorithm, simulation, cascade controller, computational experiment, matrix operator.

**Мельников Дмитрий Владимирович**  
Калужский филиал МГТУ имени Н.Э. Баумана  
Калуга  
melnikov-dv@eandex.ru

**Петровичев Максим Александрович**  
Калужский филиал МГТУ имени Н.Э. Баумана  
Калуга  
tabblif@yandex.ru

*Аннотация.* В статье было изучено применение однофазного выпрямителя с корректором коэффициента мощности с одним ключом для применения в зарядных устройствах электромобилей. Выпрямитель отличается простой конструкцией и компактными размерами. Он был получен из трехфазного выпрямителя Виенна, который имеет такие преимущества, как низкое напряжение на каждом ключе и высокий коэффициент мощности. Для предлагаемого выпрямителя разработан алгоритм управления, основанный на уравнениях динамики системы. Вычислительные эксперименты подтвердили приемлемую производительность предложенного выпрямителя и алгоритма управления в качестве зарядного устройства электромобиля.

*Ключевые слова:* выпрямитель, коэффициента мощности, алгоритм управления, моделирование, каскадный регулятор, вычислительный эксперимент, матричный оператор.

**В** настоящее время электромобили производятся и разрабатываются многими компаниями по всему миру. Это позволяет сократить потребление ископаемого топлива и уменьшить загрязнение окружающей среды. В электромобилях важную роль играют преобразователи AC/DC, DC/DC, DC/AC, построенные на современной силовой электронике. Одной из основных частей электромобиля является аккумулятор, который обеспечивает энергией всю систему. Аккумуляторы электромобиля должны быть заряжены до определенного уровня. Для электромобилей были представлены различные зарядные устройства для быстрой или медленной зарядки в зависимости от номинальной мощности и места зарядки. Например, трехфазные выпрямители большой мощности могут зарядить аккумуляторную батарею электромобиля менее чем за 30 минут, но их нельзя поставить на борт. С другой стороны, однофазные выпрямители могут быть размещены в автомобиле из-за меньшего размера и более низкой номинальной мощности, однако время зарядки составляет пару часов, поэтому зарядку можно осуществлять ночью или во время парковки [1, 2].

Зарядное устройство для аккумуляторов электромобилей может быть простым диодным мостовым выпрямителем. Но известно, что для таких схем выпрямления коэффициент мощности является низким. В связи с развитием силовой электроники целесообразно использовать выпрямители с активной коррекцией коэффициента мощности. Эти активные повышающие выпрямители генерируют на выходе напряжение постоянного тока, превышающее амплитудное входное напряжение переменного тока, чтобы обеспечить работу преобразователя с коэффициентом мощности, близким к единице. Это осуществляется за счет синхронизированных форм напряжения и тока на стороне переменного тока. Известны различные топологии выпрямителей, в которых используются многочисленные активные переключатели и пассивные компоненты [3, 4] с одним или несколькими выходами в качестве двухуровневого или многоуровневого преобразователя. На таких выпрямителях используются различные контроллеры, обеспечивающие хорошую работу в различных неблагоприятных условиях [5, 6].

Таблица 1. Состояние переключений выпрямителя

Состояние переключ-я	Знак $i$	Состояние ключа К	Напряжение $U_{ab}$	Состояние $C_1$	Состояние $C_2$
1	$i > 0$	0	$U_{dc} / 2$	зарядка	разрядка
2	$i \geq 0$ или $i \leq 0$	1	0	разрядка	разрядка
3	$i < 0$	0	$-U_{dc} / 2$	разрядка	зарядка

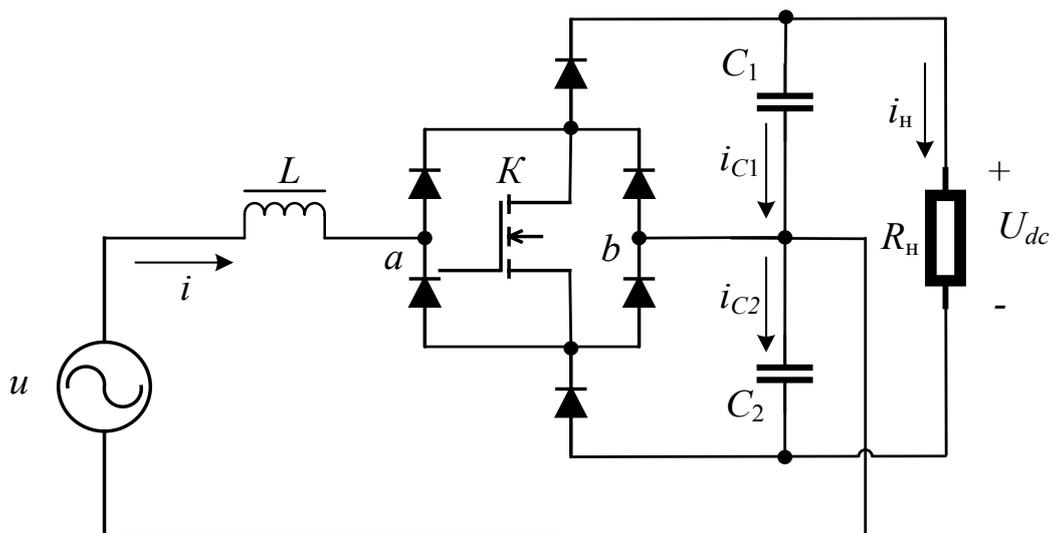


Рис. 1. Однофазный повышающий выпрямитель с ККМ

Одной из топологий с наименьшим количеством переключателей является выпрямитель Виенна — трехфазный повышающий выпрямитель, отличающийся высокой эффективностью и низким напряжением на компонентах. В работе, на базе трехфазного выпрямителя Виенна, предлагается построить однофазную структуру преобразователя (рисунок 1) с коррекцией коэффициента мощности, а также разработать алгоритм управления, поддерживающий постоянным выходное напряжение.

Благодаря использованию только одного активного переключателя и шести диодов его можно изготовить небольшого размера с малым весом, подходящим для бортовых зарядных устройств электромобилей. В качестве решения для однофазной топологии, моделирование и конструкция контроллера выполняются на основе одиночной нагрузки без использования подключения к нейтральной точке, что делает его полезным для практических зарядных устройств. Важным преимуществом этой топологии является низкое напряжение на каждом компоненте, которое будет испытывать половину общего напряжения шины постоянного тока на каждом интервале. В результате в этом выпрямителе могут быть использованы элементы с одинаковым номинальным

напряжением, а потери мощности будут практически одинаковыми на каждой части. Рассматривая последовательности переключений, приведенные в таблице 1, можно отметить, что основной проблемой этого преобразователя являются высокие пульсации напряжения на выходе постоянного тока из-за отсутствия состояний резервирования для постоянной балансировки напряжений конденсаторов.

Из таблицы 1 следует, что конденсаторы заряжаются только в одном коммутационном состоянии, что является причиной высоких пульсаций напряжения. Кроме того, благодаря трехуровневой форме сигнала  $U_{ab}$ , это зарядное устройство может иметь более низкие гармонические эффекты, чем другие двухуровневые зарядные устройства. Следует отметить, что в каждом полупериоде максимальное напряжение  $U_{ab}$  равно  $U_{dc} / 2$ , поэтому амплитудное значение напряжения переменного тока должно быть меньше  $U_{dc} / 2$ . Поскольку зарядным устройствам для аккумуляторов электромобилей требуется 400 В постоянного тока, то напряжение каждого конденсатора будет составлять 200 В, что подходит для этой топологии для работы в качестве повышающего выпрямителя с наименьшим количеством компонентов. Следует отметить, что

каждый компонент должен выдерживать напряжение  $U_{dc} / 2$ , что составляет 200 В в зарядном устройстве электромобиля. Чем ниже номинальное напряжение устройств, тем ниже потери мощности, ниже себестоимость изготовления.

Для моделирования выпрямителя Виенна опишем динамику его функционирования математической моделью. Введем следующую функцию переключения:

$$K = \begin{cases} 0, & \text{если транзистор закрыт,} \\ 1, & \text{если транзистор открыт.} \end{cases}$$

Математическая модель выпрямителя является существенно нелинейной и можно описать в зависимости от направления того и функции переключения следующим образом:

I.  $K = 1$ , положительное или отрицательное направление тока  $i$  (все параметры представлены на рисунке 1),

$$\begin{aligned} u &= L \frac{di}{dt}, \\ C_1 \frac{du_{c_1}}{dt} + \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{R} &= 0, \\ C_2 \frac{du_{c_2}}{dt} + \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{R} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

II.  $K = 0, \text{sign}(i) > 0$  (транзистор закрыт и положительный полупериод входного тока). В этом случае верхний конденсатор заряжается, а нижний разряжается:

$$\begin{aligned} u &= L \frac{di}{dt} + u_{c_1}, \\ i &= C_1 \frac{du_{c_1}}{dt} + \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{R}, \\ C_2 \frac{du_{c_2}}{dt} + \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{R} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

III.  $K = 0, \text{sign}(i) < 0$  (транзистор закрыт и отрицательный полупериод входного тока). Верхний конденсатор разряжается, а нижний заряжается:

$$\begin{aligned} u &= L \frac{di}{dt} - u_{c_2}, \\ i &= -C_2 \frac{du_{c_2}}{dt} - \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{R}, \\ C_1 \frac{du_{c_1}}{dt} + \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{R} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Используя функцию переключения и знак входного тока, уравнения (1–3) можно преобразовать в следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left[ u + (K - 1) \left( \frac{1 + \text{sign}(i)}{2} u_{c_1} - \frac{1 - \text{sign}(i)}{2} u_{c_2} \right) \right] \\ \frac{du_{c_1}}{dt} = \frac{1}{C_1} \left[ \frac{1 + \text{sign}(i)}{2} (1 - K) i - \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{R} \right] \\ \frac{du_{c_2}}{dt} = \frac{1}{C_2} \left[ \frac{1 - \text{sign}(i)}{2} (1 - K) i - \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{R} \right] \end{cases} \quad (4)$$

В силу того, что интерес представляет выходное напряжение, которое определяется как сумма напряжений конденсаторов и предположив, что  $C_1 = C_2$ , можно уменьшить порядок системы (4). Тогда нелинейную модель однофазного Виенна-выпрямителя можно представить следующим образом:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}(\mathbf{X}, t) \mathbf{X} + \mathbf{B}(\mathbf{X}, t) u + \mathbf{D}, \quad (5)$$

где

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{du_{c_1} + du_{c_2}}{dt} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} i \\ u_{c_1} + u_{c_2} \end{bmatrix}, \quad u = [K],$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1 - \text{sign}(i)}{2} \\ \frac{\text{sign}(i)}{\tilde{N}} & -\frac{2}{RC} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (1 + \text{sign}(i)) \left( \frac{u_{c_1} + u_{c_2}}{2} \right) - u_{c_2} \\ -\frac{\text{sign}(i)}{C} i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{u - u_{c_2}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Схема управления выпрямителя представлена на рисунке 2. Здесь реализован каскадный ПИ регулятор для управления напряжением постоянного тока на уровне  $U_3$  и подавления гармоник тока на входе в режиме работы с коэффициентом мощности равным единице. Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) используется для вычисления угла входного напряжения и генерирования синхронизированного

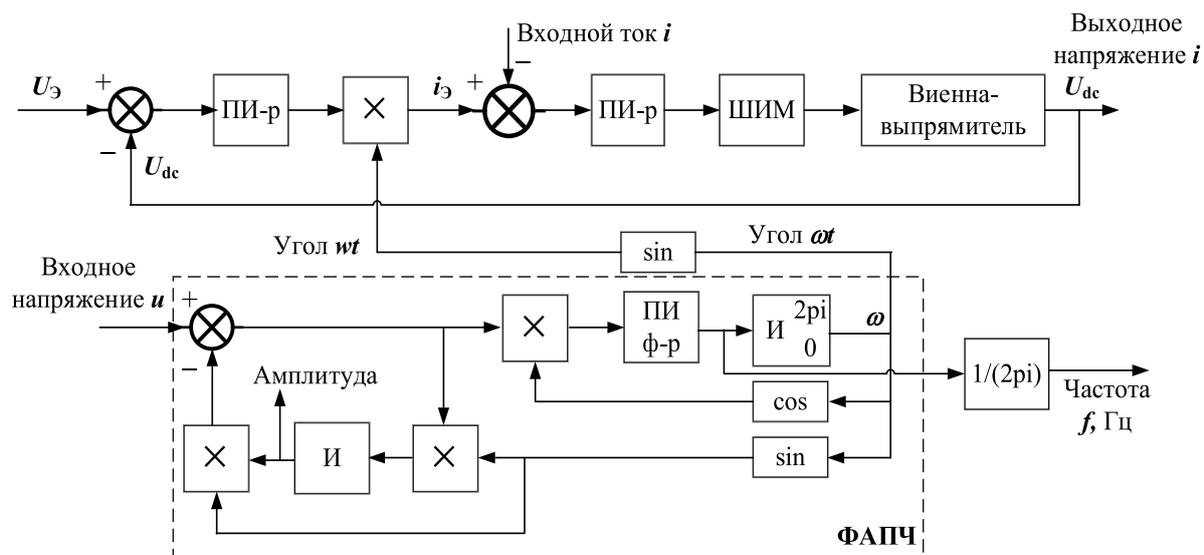


Рис. 2. Структурная схема управления

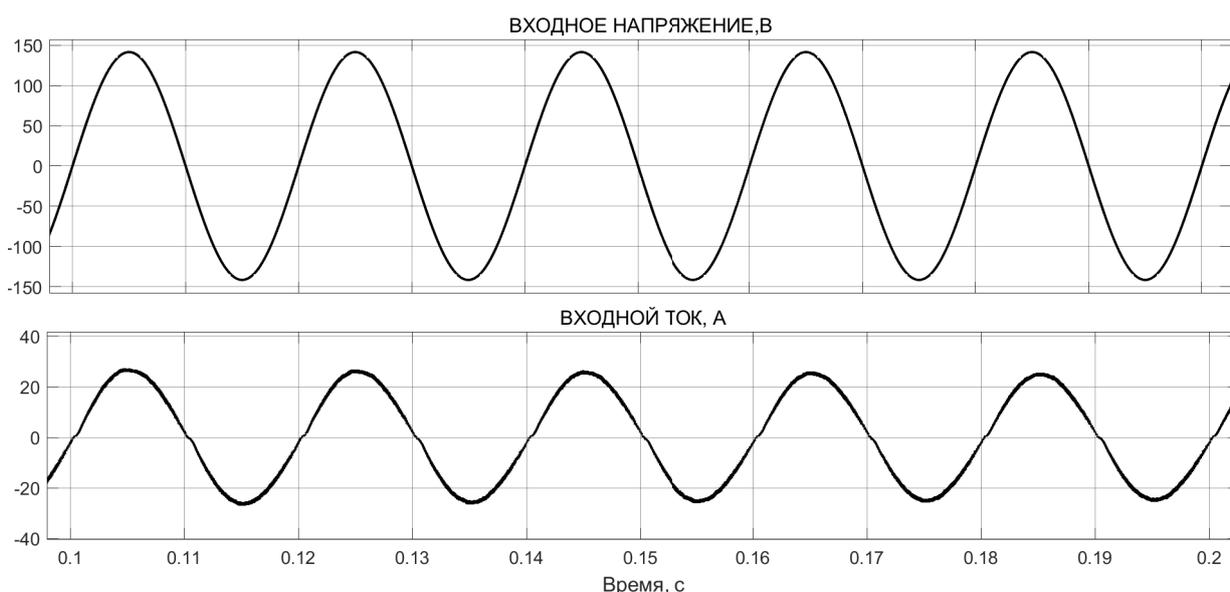


Рис. 3. Входное напряжение и входной ток

опорного (эталонного) тока  $i_{э}$ , который должен потребляться выпрямителем, чтобы обеспечить коррекцию коэффициента мощности.

Внешний контур каскадного регулятора содержит регулятор напряжения, выход которого поступает на регулятор тока (внутренний контур) в качестве амплитуды опорного сигнала. ШИМ с несколькими несущими используется для генерации необходимых импульсов, которые отправляются на соответствующие коммутаторы. ПИ-регуляторы имеют хорошие характеристики при низкой частоте входного сигнала (напри-

мер, внешний контур), но при этом имеет некоторую установившуюся ошибку, когда на вход подается изменяющийся во времени сигнал, например синусоидальный ток, что приводит к ошибке слежения за линейным током. Чтобы уменьшить указанный эффект, для регулятора внутреннего контура следует выбрать небольшой интегральный коэффициент усиления, обеспечивающий его более высокую скорость по сравнению с внешним контуром.

В работе проведен вычислительный эксперимент в среде Matlab, подтверждающий принципиальную

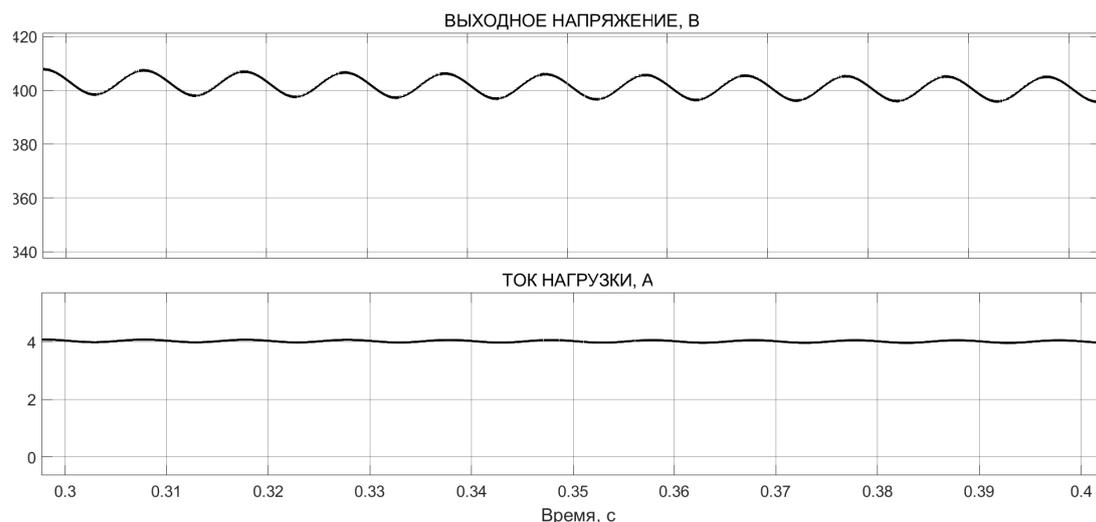


Рис. 4. Выходное напряжение и выходной ток

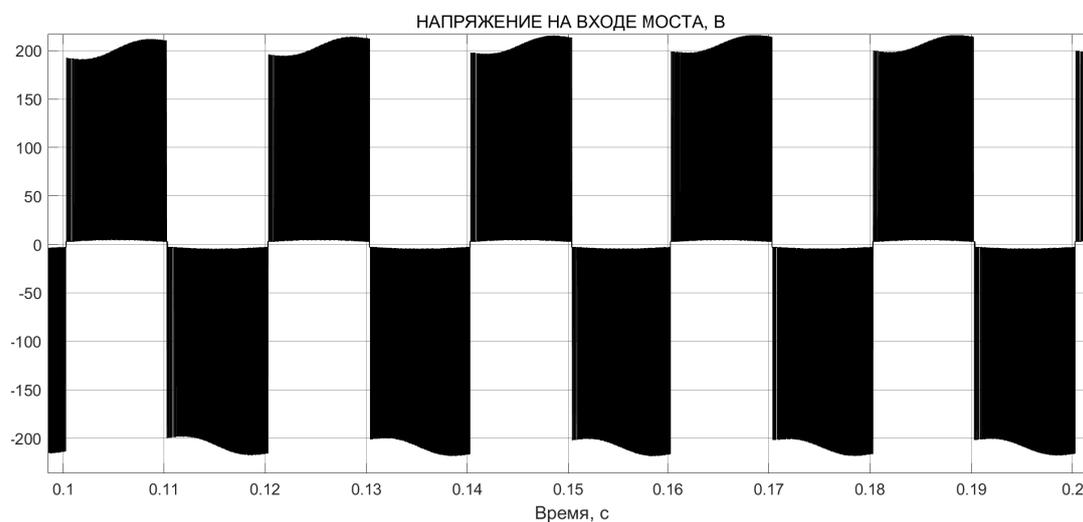


Рис. 5. Трехуровневая форма напряжения выпрямителя

возможность создания однофазного зарядного устройства и системы управления на базе микроконтроллера. При моделировании параметры выпрямителя принимали следующие значения: входное напряжение — 100 В, 50 Гц, индуктивность  $L = 3$  мГн, выходные емкости  $C_1 = C_2 = 2500$  мкФ, нагрузка  $R = 100$  Ом, частота ШИМ — 10 кГц. Коэффициенты ПИ-регуляторов были рассчитаны проекционно-матричными методами [7–9]. Для контура напряжения коэффициенты принимали следующие значения —  $KП = 1$ ,  $KИ = 30$ , для контура тока  $KП = 1,2$ ,  $KИ = 0,1$ .

На рисунках 3, 4 показаны результаты, когда выпрямитель генерирует на выходе 400 В и 4 А постоянного тока. Пульсации выходного напряжения менее

3% от номинального значения. Входное напряжение и входной ток являются синфазными. Результаты подтверждают хорошие динамические характеристики предложенного однофазного выпрямителя Виенна и реализованного контроллера при регулировании выходного постоянного напряжения, которое используется для зарядки аккумуляторов электромобиля.

Трехуровневая форма напряжения выпрямителя показана на рисунке 5, которая формируется правильным переключением и сбалансированными напряжениями конденсаторов постоянного тока. На рисунке 6 представлен частотный спектр входного тока. Очевидно, что коэффициент нелинейных искажений тока ниже стандартных

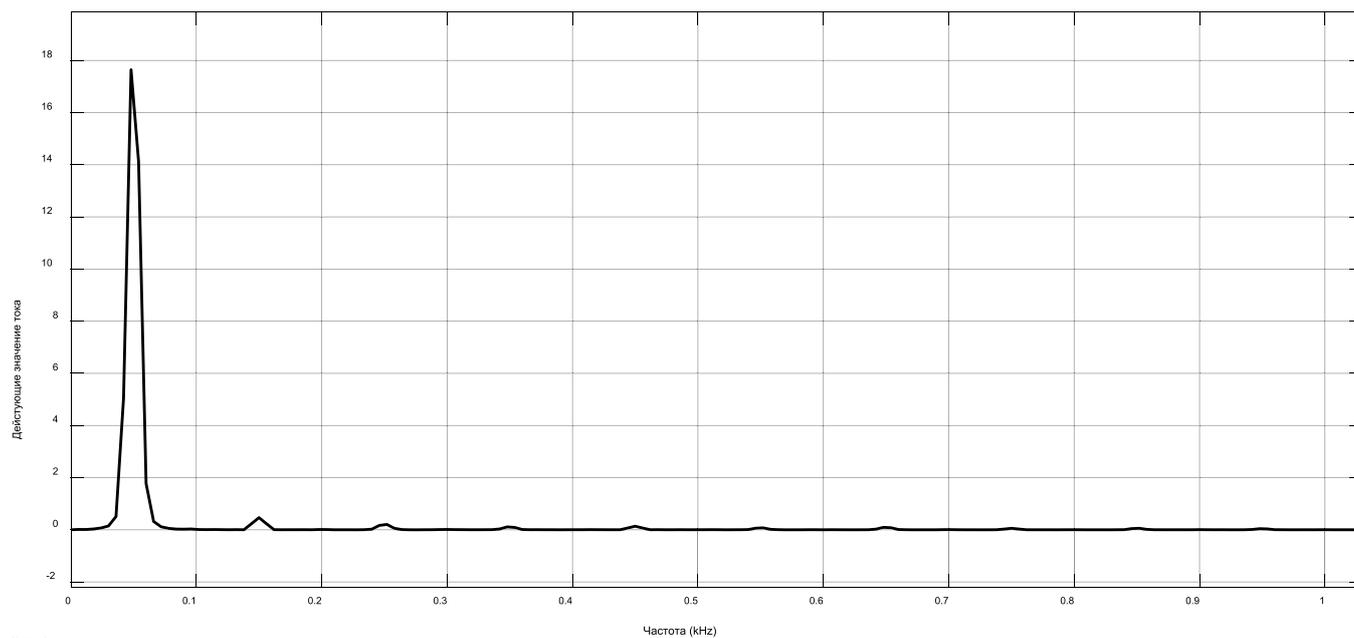


Рис. 6. Частотный спектр входного тока

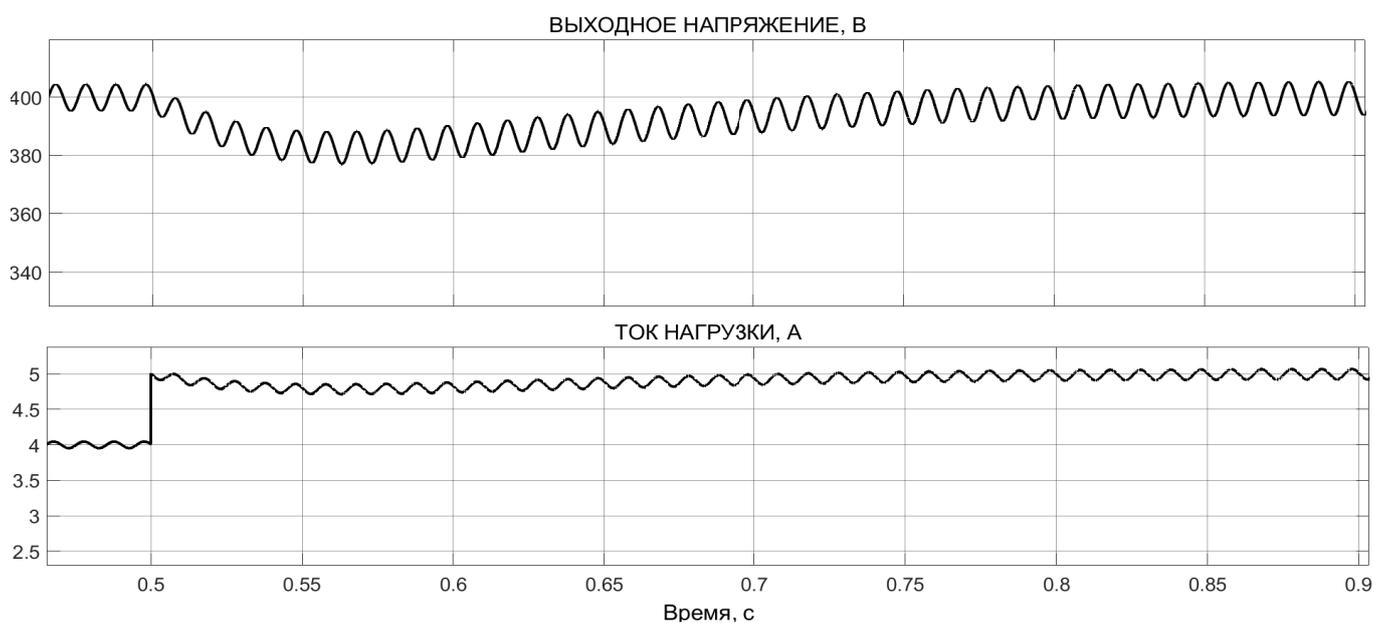


Рис. 7. Выходное напряжение и выходной ток при увеличении нагрузки на 20%

уровней из-за формирования 3-уровневого квазисинусоидального напряжения, генерируемого выпрямителем, что естественным образом снижает гармоники без использования дополнительных громоздких фильтров.

В следующем вычислительном эксперименте нагрузка резко увеличивается на 20%. Как показано на рисунке 7, выходное постоянное напряжение по-прежнему

успешно регулируется на уровне 400 В, в то время как ток нагрузки увеличивается.

Результаты вычислительных экспериментов подтверждают приемлемую работу и хорошие динамические характеристики однофазного выпрямителя Виенна при питании нагрузки постоянного тока в качестве зарядного устройства электромобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Yilmaz and P.T. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plugin plugin in electric and hybrid vehicles," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, pp. 2151–2169, 2013.
2. J. Metri, C.T. Saadeh, and H. Kanaan, "Design, control and simulation of a fuel-cell-fed power conversion system for electric vehicles," in Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), 2014 International Conference on, 2014, pp. 199–204.
3. J. W. Kolar, T. Friedli The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems — Part I. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 1, pp. 176–198, January 2013.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч. 1. — 199 с.
5. B. Kedjar, H.Y. Kanaan, and K. Al-Haddad, "Vienna rectifier with power quality added function," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, pp. 3847–3856, 2014.
6. H.Y. Kanaan, C. Somers, and K. Al-Haddad, "Power Factor Correction with a Modified Sheppard-Taylor Topology Operating in Discontinuous Capacitor Voltage Mode and Low Output Voltage," IEEE Journal Emerg. and Select. Topics in Power Electron., vol. 3, pp. 430–439, 2014.
7. Окар М., Мельников Д.В. Алгоритм расчета нелинейных систем управления проекционно-матричным методом. Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 12 (36). С. 17.
8. Мельников Д.В., Корнюшин П.Ю., Мин Ч. Ту., Чжо Ту.А., Окар М. Проекционно-матричный подход к анализу и синтезу систем управления электроэнергетических систем. Научное обозрение. 2015. № 2. С. 88–97.
9. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Лукашенко Ю.Л., Мельников Д.В., Рыбин В.М., Трофимов А.И. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 664 с.

© Мельников Дмитрий Владимирович ( melnikov-dv@eandex.ru), Петровичев Максим Александрович ( tabblif@yandex.ru ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана