

УДК 621.314

В.Ф. Стрелков, А.Б. Дарьенков, Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, И.А. Липужин

**КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке квазирезонансного преобразователя (КРП) для вторичных источников питания в системах электроснабжения ограниченной мощности. Для увеличения диапазон регулирования напряжения и снижения уровня его пульсаций, в конструкцию КРП введен шунтирующий транзистор. Описана математическая модель предложенного КРП, с помощью которой определены количественные соотношения между параметрами элементов силовых цепей преобразователя. Разработана Simulink-модель, позволяющая исследовать электромагнитные процессы в КРП в режиме реального времени. Получены внешние характеристики КРП и определены рациональные параметры компонентов преобразователя.

*Ключевые слова:* квазирезонансный преобразователь, регулирование напряжения, рекуперация энергии, система электроснабжения, широтно-импульсная модуляция.

**Введение**

Развитие автономных систем ограниченной мощности имеет большое значение для экономики государства. К автономным объектам могут относиться: удаленные населенные пункты, объекты добывающей промышленности и сельского хозяйства, больницы, передвижные и мобильные объекты малой мощности (маяки, метеостанции и т.д.) Для электроснабжения потребителей в таких системах применяются дизельные или гибридные (комбинированные) источники энергии на основе возобновляемых энергоресурсов. Надежность и качество электроснабжения потребителей зависит от многих факторов, в том числе, от работы вторичных источников питания, необходимых для функционирования ответственных узлов электростанций (блоков системы управления, электроприводов и др.) Важным функциональным узлом вторичных источников питания являются преобразователи электроэнергии. Перспективным видом являются квазирезонансные преобразователи (КРП) [1]. Токи в цепях КРП имеют колебательный характер, в результате чего включение и выключение транзисторов всегда происходит при нулевых значениях тока [2, 3]. КРП обладают высоким уровнем электромагнитной совместимости, широким диапазоном регулирования выходного напряжения, малыми массой и габаритами [4, 5].

Традиционным способом регулирования выходного напряжения в КРП является частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) [6]. Однако ЧИМ обладает рядом серьезным недостатком – увеличение пульсаций выходного напряжения и тока при широком диапазоне регулирования. Следствием этого является узкий диапазон регулирования выходного напряжения (70-100 %), возрастание пульсаций выходного напряжения [7]. Для решения этой проблемы в КРП с ЧИМ могут быть использованы фильтры, настроенные на подавление пульсаций. Однако такой подход приводит к увеличению габаритов КРП или уменьшению динамического диапазона регулирования. Проблема непостоянства рабочей частоты может быть решена путем использования в КРП другого способа регулирования выходного напряжения – широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [8]. Однако для работы КРП в режиме ШИМ необходимо решение задачи оперативного изменения параметров колебательного контура [9].

Для изменения параметров колебательного контура могут быть использованы механические и электрические способы. Механический способ заключается в применении кон-

денсаторов переменной емкости, вариометров, электромеханических реле. Однако данный способ неэффективен из-за низкого быстродействия. Электрический способ заключается в применении элемента с изменяющейся под действием электрического сигнала индуктивностью (катушка индуктивности) или емкостью (варикап). Недостаток использования катушки индуктивности связан со снижением КПД преобразователя. Варикапы не рассчитаны на большую реактивную мощность и их использование в КРП ограничено.

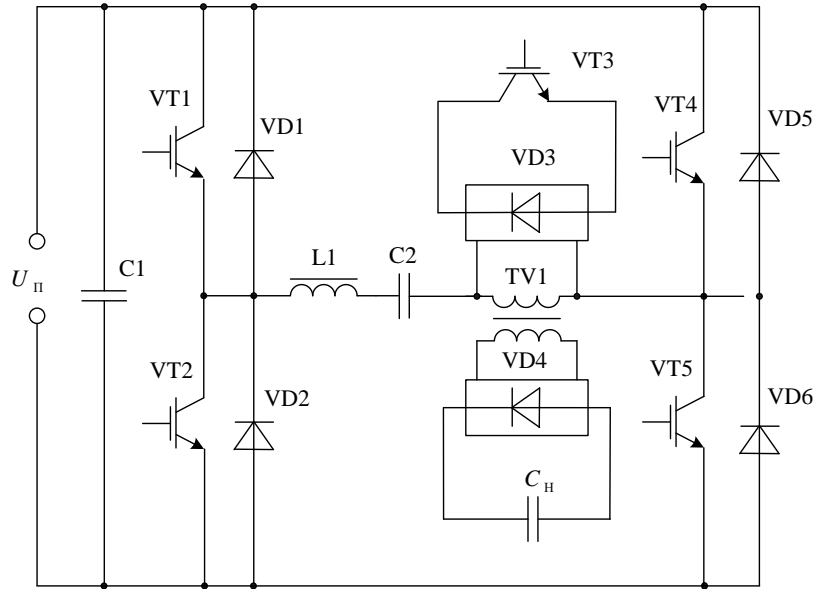
Альтернативными способами управления выходным напряжением КРП являются использование комбинированных схем (ЧИМ с несколькими фиксированными частотами резонансного контура), регулирование выходного напряжения с помощью фазоимпульсного управления (ФИУ) [10]. В [11] для расширения диапазона регулирования напряжения предложено подавлять паразитные колебания путем подключения дополнительного диода. Однако данные способы также обладают рядом недостатков. Поэтому актуальной задачей является разработка и исследование способов регулирования выходного напряжения КРП с фиксированной частотой, широким диапазоном регулирования выходного напряжения и естественным ограничением тока нагрузки.

В настоящей статье представлено исследование и разработка способа регулирования выходного напряжения КРП с переключением при нуле тока в режиме ШИМ путем рекуперации избытка энергии с выхода КРП на его входной конденсатор [12]. Для этого в схеме КРП используется регулирующий транзистор, шунтирующий первичную обмотку высоковольтного трансформатора. Предложенное решение позволяет расширить диапазон регулирования выходного напряжения КРП в пределах от 0 до 100 % номинального значения, ограничить токи нагрузки, снизить уровень пульсаций выходного напряжения, минимизировать массогабаритные параметры трансформатора и выходного фильтра.

### Математическая модель КРП

Принципиальная схема предлагаемого КРП представлена на рис. 1. В отличие от существующих КРП, здесь введены диодный мост VD3 и регулирующий транзистор VT3. Назначение VT3 – шунтирование первичной обмотки трансформатора TV, для рекуперации энергии обратно в сеть (в конденсатор C1). Изображен преобразователь, выполненный по мостовой схеме, однако он может быть построен и на полумостовой схеме. В преобразователе с полумостовой схемой входной конденсатор C1 состоит из двух последовательно соединенных конденсаторов. При постоянном уровне напряжений каждого из них процессы в полумостовой схеме не отличаются от представленной. В схемах замещения и в расчетных формулах в этом случае следует значение напряжения источника питания  $U_{\Pi}$  заменить на  $U_{\Pi}/2$ . С целью упрощения анализа электромагнитных процессов в КРП приняты, следующие допущения: вентильные элементы обладают свойствами идеальных ключей; трансформатор TV1 идеален (магнитная цепь линейна, индуктивные и активные сопротивления обмоток, потери в магнитопроводе равны нулю), коэффициент трансформации равен единице; потери в C2, а также конденсаторе фильтра C1 равны нулю; потери мощности КРП сосредоточены в сопротивлении R1, включенном последовательно с элементами резонансного контура

При сделанных допущениях по принципиальной схеме КРП (рис. 1):  $U_H$  – напряжение емкостного накопителя C<sub>H</sub>;  $L_1$ , C<sub>2</sub>, – индуктивность, емкость дросселя L1 и конденсатора C2; R<sub>1</sub> – активное сопротивление элементов резонансного контура;  $L_k$  – индуктивность рассеяния трансформатора TV1.



**Рис. 1. Принципиальная схема КРП:**

VT1, VT2, VT4, VT5 – транзисторы инвертора, VT3 – регулирующий транзистор, VD1, VD2, VD5, VD6 – шунтирующие диоды, VD3, VD4 – выпрямительные мосты,  $U_{\text{п}}$  – напряжение питания, C1 – конденсатор входного фильтра, L1, C2 – дроссель и конденсатор резонансного контура, TV1 – трансформатор;  $C_{\text{н}}$  – емкостный накопитель

В каждом полупериоде работы зарядного преобразователя можно выделить интервалы, порядок и наличие которых, в свою очередь, может различаться, в зависимости от режима работы преобразователя (момента включения транзисторов: VT1, VT2, VT3, VT4, VT5) [13]. Происходит циклическое переключение транзисторов и смена их интервалов проводимости. Каждому интервалу проводимости соответствует система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы. Определенные интервалы проводимости и их системы дифференциальных уравнений образуют математическую модель КРП.

Дифференциальные уравнения, приведены к относительным единицам.

Относительные значения переменных и параметров модели преобразователя определяются выражениями (1):

$$U_{\text{н}}^* = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{баз}}}; U_{ij}^* = \frac{U_{ij}}{U_{\text{баз}}}; u_{ij}^* = \frac{u_{ij}}{U_{\text{баз}}}; I_{\text{Hi}}^{**} = \frac{I_{\text{Hi}}^*}{I_{\text{баз1}}}, \quad (1)$$

где  $i = 1 \dots 4$  – номер режима;  $j = 0 \dots 5$  – номер интервала (нулевой интервал соответствует промежутку времени перед первым интервалом).

В качестве базисных приняты следующие величины (2):

$$U_{\text{баз}} = U_{\text{п}}; I_{\text{баз1}} = \frac{U_{\text{баз}}}{\omega_1 \cdot L}; I_{\text{баз2}} = \frac{U_{\text{баз}}}{\omega_2 \cdot L_1}, \quad (2)$$

где  $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC_2} - \left[\frac{R}{2L}\right]^2} = \omega_{01} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_1^2}}$  и  $\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_2} - \left[\frac{R}{2L_1}\right]^2} = \omega_{02} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_1^2}}$  – круговые

частоты собственных колебаний резонансного контура на интервале с выключенным и включенным транзистором VT3 соответственно;  $L = L_1 + L_k$  – индуктивность резонансного

контура;  $\omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{LC_2}}$  и  $\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{L_1C_2}}$  – круговые частоты собственных колебаний контура на 1-м интервале без учета потерь с выключенным и включенным транзистором VT3 соответственно;  $Q_1 = \frac{\omega_{01} \cdot L}{R}$  и  $Q_2 = \frac{\omega_{02} \cdot L_1}{R}$  – добротности силового контура на первом интервале работы с выключенным и включенным транзистором VT3 соответственно.

При этом следует учитывать следующие зависимости:

$\theta_1 = \omega_1 \cdot t$  и  $\theta_2 = \omega_2 \cdot t$  – циклическая частота собственных колебаний контура с выключенным и с включенным транзистором VT3;

$\vartheta_j^1 = \omega_1 \cdot t_j$  и  $\vartheta_j^{11} = \omega_2 \cdot t_j$  – угловые длительности  $j$ -го интервала работы контура с выключенным и с включенным транзистором VT3.

Соотношение добротностей контура с выключенным и с включенным транзистором VT3 (3):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} = \sqrt{\frac{L_k}{L_1} + 1}. \quad (3)$$

Соотношение собственных частот колебания контура с выключенным и с включенным транзистором VT3 (4):

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}{\sqrt{4Q_2^2 - 1}}. \quad (4)$$

Соотношение базисных токов контура с выключенным и с включенным транзистором VT3 (5):

$$\frac{I_{\text{баз1}}}{I_{\text{баз2}}} = \frac{Q_2^2 \cdot \sqrt{4Q_2^2 - 1}}{Q_1^2 \cdot \sqrt{4Q_1^2 - 1}}. \quad (5)$$

Учитывая вышеизложенное, представлены выражения в относительных единицах для I-го режима работы КРП, когда включены транзисторы VT1, VT5 (6-8).

$$\begin{cases} i_{11}^* = (1 + U_{10}^* - U_H^*) \cdot e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \cdot \sin \theta_1; \\ u_{11}^* = (1 - U_H^* + U_{10}^*) \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot Q_1}{\sqrt{4 \cdot Q_1^2 - 1}} \cdot e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \cdot \sin(\theta_1 - \xi_1) \right] - U_{10}^*; \\ U_{11}^* = (1 + U_{10}^* - U_H^*) \cdot \left( 1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \right) - U_{10}^*; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} i_{12}^* = (U_{11}^* - U_H^* - 1) \cdot e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \cdot \theta_1} \sin \theta_1; \\ u_{12}^* = (U_{11}^* - U_H^* - 1) \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot Q_1}{\sqrt{4 \cdot Q_1^2 - 1}} \sin(\theta_1 + \xi_1) \cdot e^{\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \cdot \theta_1} \right) - U_{11}^*; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U_{12}^* = (U_{11}^* - U_H^* - 1) \cdot \left( 1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_2^2 - 1}}} \right) - U_{11}^*; \\ I_{H1}^* = \frac{(U_{11}^* + U_{10}^*)}{2\pi} \cdot \left( 1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \right), \end{cases} \quad (8)$$

где:  $\xi_1 = \arcsin \frac{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}{2Q_1}$  – фазовый угол;  $U_{10}^*$  – относительное начальное напряжение конденсатора  $C2$  на первом интервале полупериода работы преобразователя (до первого интервала);

$U_{12}^*$  – относительное начальное напряжение на втором интервале полупериода работы преобразователя;  $U_H^*$  – относительное напряжение конденсатора  $C_H$ ;  $i_{11}^*$  – относительный мгновенный ток резонансного контура на первом интервале полупериода работы преобразователя;  $i_{12}^*$  – относительный мгновенный ток резонансного контура на втором интервале полупериода работы преобразователя;  $I_{H1}^*$  – средний ток заряда конденсатора  $C_H$  для рассматриваемого режима работы КРП;  $u_{11}^*$  – относительное мгновенное напряжение конденсатора  $C_2$ ;  $U_{11}^*$  – относительное начальное напряжение конденсатора  $C_2$ .

Аналогично получены выражения для других режимов работы КРП [14].

На основе полученной математической модели выявлены основные закономерности процессов, происходящих в преобразователе, выполнены расчёты, которые позволили установить количественные взаимосвязи между параметрами элементов силовых цепей. Результатами моделирования являются кривые изменения напряжения на конденсаторе  $C2$ , ток диагонали схемы, ток нагрузки ток транзистора и среднее значение приведенного тока  $C_H$  ( $I_H^{**}$ ) в различных режимах работы схемы для одного полупериода работы преобразователя.

### Внешние характеристики КРП

Перебирая напряжение нагрузки  $U_H^*$  с определенной дискретизацией, при некоторых фиксированных углах управления  $\beta$  транзистором VT3, можно получить семейство внешних характеристик (зависимость напряжения нагрузки  $U_H^*$  от среднего значения приведенного тока нагрузки  $I_H^{**}$  при различных углах управления  $\beta$ ). Внешние характеристики преобразователя представлены на рис. 2.

Внешняя характеристика при отсутствии импульсов управления является абсолютно жесткой при значениях тока нагрузки  $0 \leq I_H^{**} \leq 1$  и абсолютно мягкой при  $I_H^{**} = 1$ . Внешняя характеристика, соответствующая углу управления  $\beta = 2 \cdot \pi$  является абсолютно жесткой при значениях тока нагрузки,  $0 \leq I_H^{**} \leq 0,5$  с уровнем напряжения  $U_H^* = 1$ , а при значениях тока нагрузки  $0,5 \leq I_H^{**} \leq 1$  с уровнем напряжения  $U_H^* = 0,5$ .

При значении тока нагрузки  $I_H^{**} = 0,5$  и  $I_H^{**} = 1$  характеристика абсолютно мягкая. Внешняя характеристика, соответствующая углу управления,  $\beta = \pi$ , является абсолютно жесткой при значениях тока нагрузки  $0 \leq I_H^{**} \leq 0,5$  с уровнем напряжения,  $U_H^* = 1$  и абсолютно мягкой при  $I_H^{**} = 0,5$ . Характеристика при  $\beta$ , стремящейся к нулю, стремится к абсолютно мягкой с нулевым током нагрузки. Характеристики, при других углах управления  $\beta$ , занимают промежуточные значения.

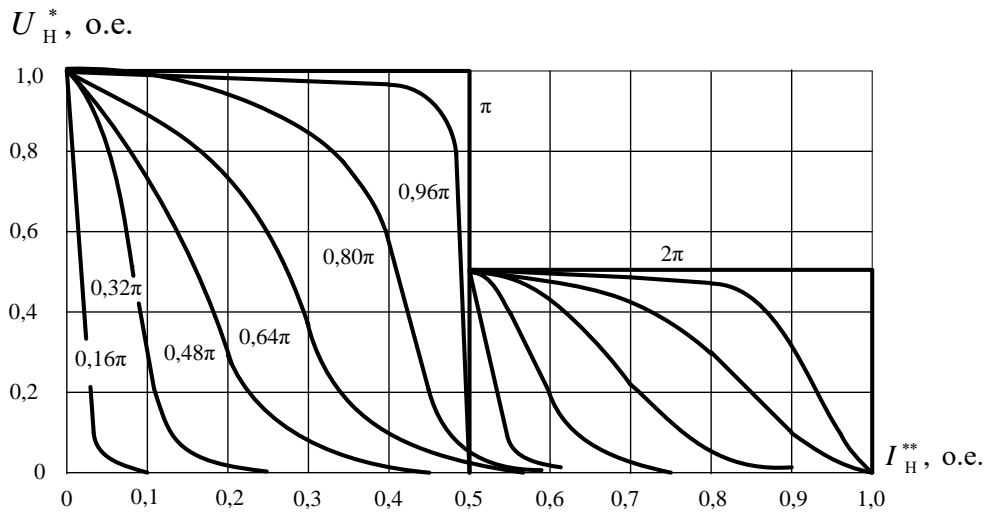


Рис. 2. Внешние характеристики КРП

**Имитационная модель КРП**

Для исследования особенностей электромагнитных процессов в КРП в среде *MATLAB Simulink* создана имитационная модель (рис. 3), реализованная в соответствии со схемой полумостового преобразователя.

Модель состоит из следующих блоков: источника постоянного напряжения *DC*, конденсаторов полумоста *C1* и *C2*, транзисторов *IGBT1* и *IGBT2* с обратными диодами *D4* и *D3*, резонансного дросселя *L1* и резонансного конденсатора *C3*, индуктивности рассеяния трансформатора *Lk*, выпрямительного моста нагрузки *Universal Bridge1*, накопительного конденсатора *Cn*, противо-ЭДС нагрузки *DC1*, а также выпрямительного моста *Universal Bridge* шунтирующего транзистора *IGBT3*, система управления которым представлена подсистемой *PWM-controller2*, на вход которой подается сигнал задания в диапазоне 0-5, меняющий скважность импульсов управления.

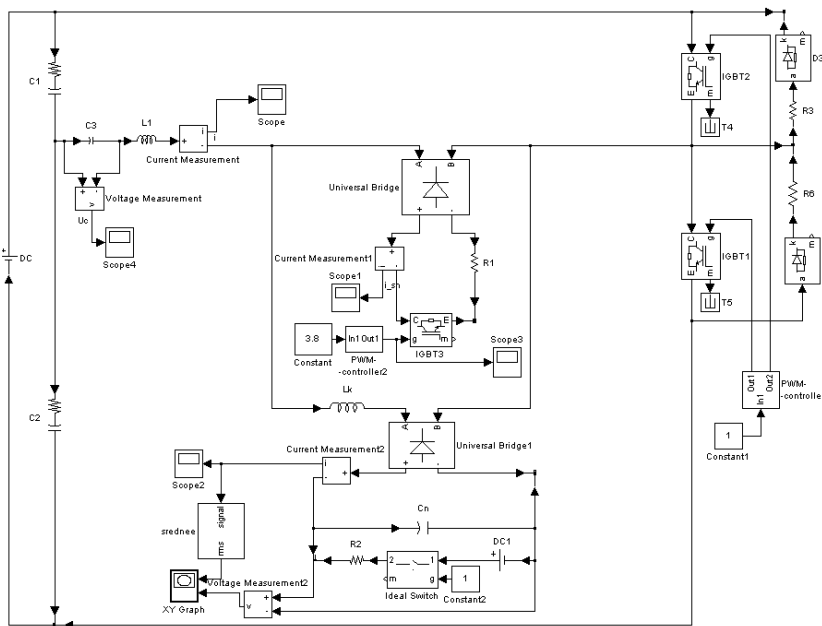
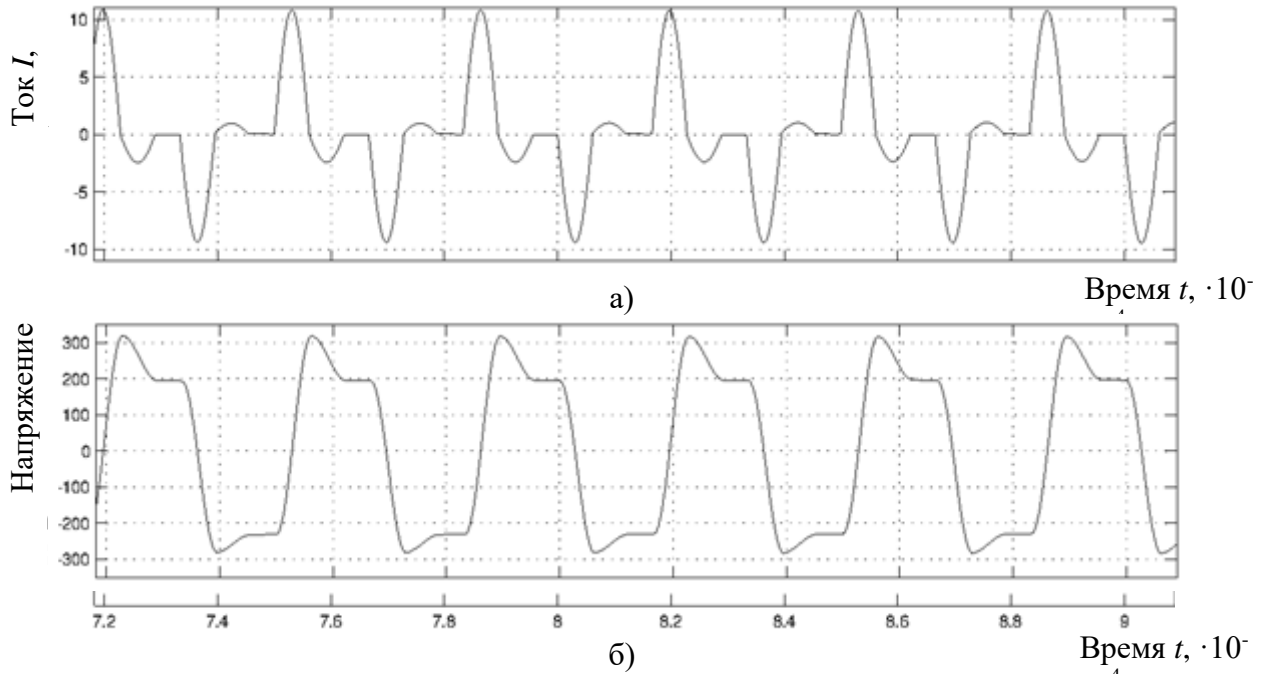


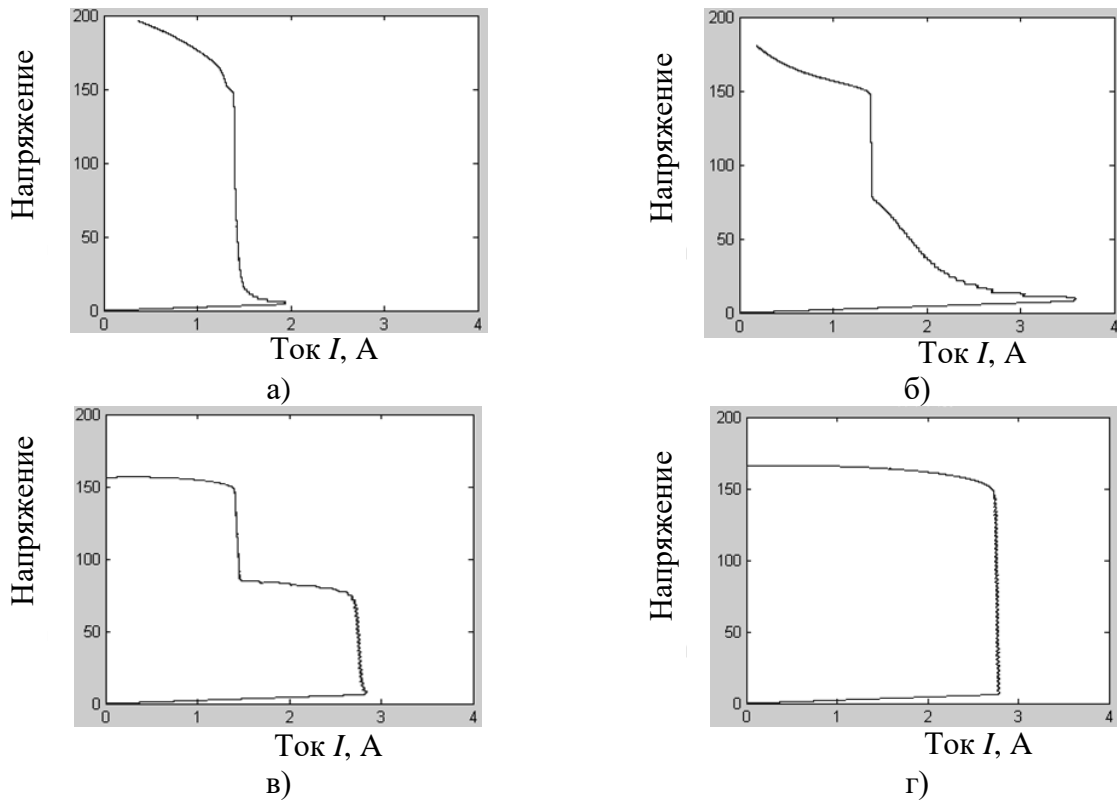
Рис. 3. Имитационная модель КРП

На рис. 4 показаны осциллограммы тока диагонали схемы, напряжения на резонансном конденсаторе, полученные в результате моделирования.



**Рис. 4. Осциллограммы работы КРП (без регулирования):**  
 а) ток диагонали схемы, б) напряжение на резонансном конденсаторе

Если вместо противо-ЭДС в цепь нагрузки включить конденсатор, и построить зависимость напряжения нагрузки от среднего тока нагрузки, то результатом моделирования будет внешняя характеристика преобразователя. Семейство внешних характеристик при различных углах управления представлены на рис. 5.



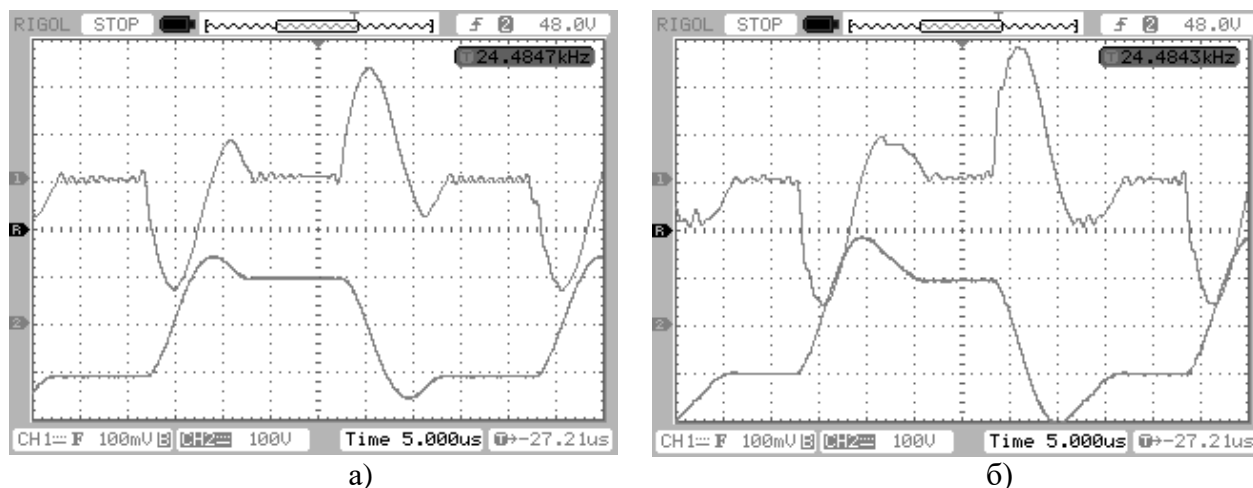
**Рис. 5. Внешние характеристики КРП при различных углах управления:**  
 а)  $\beta = 1,1 \cdot \pi$ , б)  $\beta = 1,85 \cdot \pi$ , в)  $\beta = 2 \cdot \pi$ , г) без импульсного управления VT3

Имитационная модель КРП, в отличие от аналитической, является более точной, т.к. имеет меньшее количество допущений и использует более сложное описание отдельных (в частности, полупроводниковых) элементов. При этом осциллограммы процессов, полученные при имитационном моделировании, незначительно отличаются от кривых, полученных при аналитическом моделировании, что говорит о правильности сделанных в ходе теоретического описания допущений. Другим достоинством имитационной модели является возможность, при необходимости, наблюдения работы системы в динамике – при включении КРП, при заряде емкостного накопителя и т.д.

### Экспериментальное исследование КРП

Исследования режимов работы КРП на имитационной модели позволили рассчитать параметры основных элементов преобразователя. Полученные результаты легли в основу экспериментального образца КРП, используемого в блоке системы импульсного питания емкостного накопителя.

На рис. 6 приведены осциллограммы тока диагонали схемы, напряжения на резонансном конденсаторе, полученные экспериментально. Совпадение теоретических и экспериментальных результатов составляет  $\pm 10\%$ .



**Рис. 6. Осциллограммы тока резонансного контура (кривая 1) и напряжения на резонансном конденсаторе (кривая 2):**  
а) без регулирования, б) в режиме стабилизации

Испытания экспериментального образца КРП доказали возможность регулирования выходного напряжения в широком диапазоне.

### Выводы

Для расширения диапазона регулирования выходного напряжения в пределах 0-100% номинального значения предложен КРП с ШИМ с фиксированной рабочей частотой. Для этого в схему преобразователя вводится шунтирующий транзистор. Регулирование выходного напряжения обеспечивается рекуперацией избытка энергии с выхода КРП на его входной конденсатор.

При работе с фиксированной высокой частотой не происходит уменьшения частоты и увеличения пульсаций напряжения в процессе регулирования. Благодаря этому обеспечивается низкий уровень пульсаций напряжения на нагрузке и достигаются минимальные массогабаритные показатели трансформатора и выходного фильтра.

Разработанная математическая модель зарядного преобразователя, позволила выявить основные закономерности его электромагнитных процессов, дать их количественную оцен-



ку. Имитационная модель обеспечивает расчет электромагнитных процессов в режиме реального времени, внешних характеристик для различных режимов работы КРП и дает возможность определить рациональные параметры компонентов.

Другим достоинством имитационной модели является возможность, при необходимости, наблюдения работы системы в динамике – при включении КРП, при заряде емкостного накопителя и т.д. Наблюдается достаточное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Работа на фиксированной высокой частоте, пониженные потери в транзисторах и высокий уровень электромагнитной совместимости, а также возможность широтного регулирования выходного напряжения делает перспективным применение предложенного КРП.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №13.2078.2017/4.6 от 31.05.2017 г.)*

### Библиографический список

1. **Penin, A.** Quasi-resonant voltage converter with self-limitation of load current. Similarity of load characteristics of some electronic devices // Analysis of electrical circuits with variable load regime parameters. Power Systems. Springer, Cham, 2016. – P. 389-410.
2. **Горяшин, Н.Н.** Анализ режимов работы квазирезонансного преобразователя напряжения / Н.Н. Горяшин, М.В. Лукьяненко, А.А. Соломатова, А.Ю. Хорошко // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. – Т. 54. – № 4. – С. 7-13.
3. **Баранов, А.М.** Сравнительный анализ современных стабилизаторов напряжения / А.М. Баранов // Novainfo.ru, 2016. – Т.2. – № 49. – С. 15-18.
4. **Wang, C.** A single-switched high-switching-frequency quasi-resonant flyback converter / C. Wang, S. Xu, W. Shen, S. Lu, W. Sun // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – V. 34, – №. 9. – P. 8775-8786.
5. **Федянин, В.В.** Разработка и исследование малогабаритного источника питания / В.В. Федянин, Л.Н. Нариманова, С.А. Рютикова, Е.Ю. Горбаченко // Современная наука и практика. – 2016. – № 5 (10). – С. 8-12.
6. **Городний, А.Н.** Особенности управления электронными ключами в квазирезонансных импульсных преобразователях / А.Н. Городний // Праці інституту електродинаміки національної академії наук України. – 2018. – № 51. – С. 94-98.
7. **Маморцев, С.В.** Технология мягкой коммутации транзисторов в преобразователе постоянного напряжения в постоянное / С.В. Маморцев, Г.Я. Михальченко // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. – 2013. – № 1 (27). – С. 24-27.
8. **Wu, H.** Families of forward converters suitable for wide input voltage range applications / H. Wu, Y. Xing // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – V. 29. – № 11. – P. 6006-6017.
9. **Поляков, В.Д.** Квазирезонансные преобразователи с дозированной передачей энергии / В.Д. Поляков // Силовая электроника. 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 92-98.
10. **Быков, К.В.** Выпрямительное устройство на основе LLC-конвертора с фазоимпульсным управлением / К.В. Быков, Н.М. Лазарева, Д.Г. Малышев, Ю.В. Павлов, В.М. Яров // Цифровая электротехника: Проблемы и достижения. Сб. науч. тр. НПП «ЭКРА», 2016. – С. 98-112.
11. **Денисов, Ю.А.** Энергетические показатели параллельного импульсного квазирезонансного преобразователя с расширенным диапазоном регулирования для источников питания радиоэлектронной аппаратуры / Ю.А. Денисов, А.Н. Городний, В.В. Гордиенко, С.Н. Бойко, С.А. Степенко // Електроніка та зв'язок. – 2016. – Т. 21, – № 5 (94). – С. 50-56.
12. **Стрелков, В.Ф.** Электротехнические комплексы радиолокационных станций / Стрелков В.Ф. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03, Н. Новгород, НГТУ, 2016. – 40 с.
13. **Долов, В.Н.** Квазирезонансный преобразователь системы импульсного питания радиолокационной станции / В.Н. Долов, В.Ф. Стрелков, В.В. Ваняев, А.А. Кочнев // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». – 2015. – № 2. – С. 27-32.

14. **Стрелков, В.Ф.** Математическая модель квазирезонансного преобразователя / В.Ф. Стрелков, И.Н. Филатов, Е.А. Ершова // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей, 2018. – С. 20-30.

*Дата поступления  
в редакцию: 01.08.2019*

**V.F. Strelkov, A.B. Dar'enkov, E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin**

**QUASI-RESONANT CONVERTER WITH A WIDE RANGE OF OUTPUT VOLTAGE  
REGULATION FOR LIMITED POWER SUPPLY SYSTEMS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The article is devoted to the development of a quasi-resonant converter (QRC) for power supplies in limited power energy systems. A shunt transistor is introduced into the QRC design to increase the voltage regulation range and reduce its ripple. A mathematical model of the proposed quasi-resonant converter has been described, and quantitative relationships between the parameters of the power circuit elements of this converter have been determined. The Simulink model has been created, which has allowed a real-time study of electromagnetic processes in QRC. The characteristics of QRC have been investigated and the rational parameters of its components have been determined.

*Keywords:* quasi-resonant converter, voltage regulation, energy recovery, power supply system, pulse width modulation