

УДК 621.314

В.Ф. Стрелков, А.Б. Дарьенков, В.В. Ваняев**КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработан квазирезонансный преобразователь (КРП) напряжения с переключением при нулевом токе, преимуществами которого является естественное ограничение тока нагрузки и широкий диапазон регулирования и низкий уровень пульсаций выходного напряжения. Регулирование выходного напряжения осуществляется за счет рекуперации избытка энергии введением транзистора, шунтирующего первичную обмотку трансформатора. Описан принцип действия и рассмотрены режимы работы рассматриваемого КРП. С использованием математического и компьютерного моделирования проведены исследования внешних и регулировочных характеристик КРП для различных режимов его работы, что позволило определить рациональные параметры компонентов преобразователя. Результаты исследований легли в основу изготовления экспериментального образца КРП для блока системы импульсного питания емкостного накопителя. Испытания экспериментального образца показали перспективность применения предложенного КРП в автономных системах электроснабжения.

Ключевые слова: зарядное устройство, импульсный источник питания, квазирезонансный преобразователь, переключение при нулевом токе, регулирование напряжения, шунтирующий транзистор.

1. Введение

Квазирезонансные преобразователи (КРП) широко применяются в системах питания различных электротехнических комплексов. Их основное назначение – питание нагрузки стабилизированным напряжением.

КРП представляют собой резонансные преобразователи с квазипрямоугольными импульсами. Они используют резонансный L-C контур для «мягкого» переключения полупроводниковых ключей при нулевом токе [1] или напряжении. По сравнению с импульсными и резонансными преобразователями, КРП обладают меньшими габаритами, пониженным уровнем электромагнитных помех и большим КПД, за счет малых потерь при переключениях [2]. Благодаря этому, они нашли применение в автономных системах генерирования на основе возобновляемых источников энергии, электрических транспортных средствах, устройствах заряда емкостных накопителей [3, 4].

Для эффективной работы КРП с переменной нагрузкой (устройства заряда накопителей энергии, спутниковые системы) необходим широкий диапазон регулирования выходного напряжения КРП (от 0 до 100 %).

Рекуперация энергии с выхода преобразователя на его вход является перспективным подходом для регулирования выходного напряжения. Авторами предлагается КРП с широким диапазоном регулирования выходного напряжения. Он относится к КРП с переключением при нулевом токе. Выходное напряжение регулируется с помощью рекуперации избытка энергии с выхода преобразователя на вход схемы. Это достигается за счет установки регулирующего транзистора, шунтирующего 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.

II. Принцип действия и режимы работы КРП

Принципиальная схема предложенного КРП [5, 6] представлена на рис. 1.

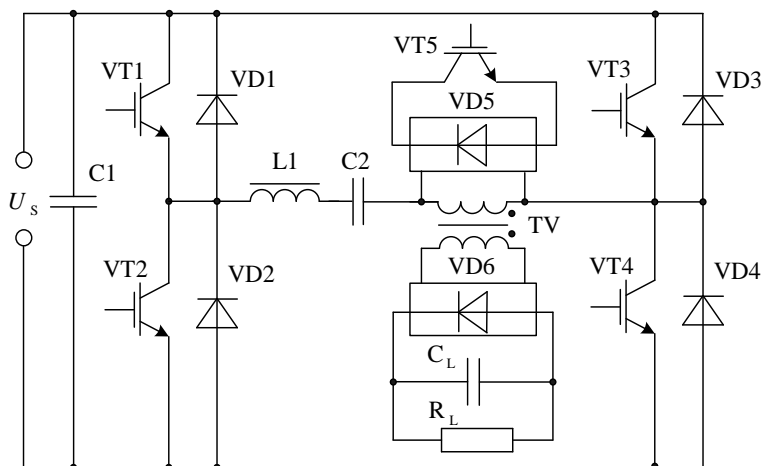


Рис. 1. Принципиальная схема КРП:

$VT1-VT4$ – транзисторы инвертора, $VT5$ – регулирующий (шунтирующий) транзистор, $VD1-VD4$ – шунтирующие диоды, $VD5, VD6$ – выпрямительные мосты, U_{II} – напряжение питания, $C1$ – конденсатор входного фильтра, $L1, C2$ – дроссель и конденсатор резонансного контура (РК), TV – трансформатор; C_{II} – емкостный накопитель (ЕН); R_L – сопротивление нагрузки

В отличие от существующих КРП, в схеме на рис. 1 введены диодный мост $VD6$ и регулирующий транзистор $VT5$. Назначение $VT5$ – шунтирование первичной обмотки трансформатора TV , для рекуперации энергии обратно в сеть (в конденсатор $C1$). На рис. 1 изображен преобразователь, выполненный по мостовой схеме, однако он может быть построен и на полумостовой схеме.

Рассмотрим принцип работы предложенного преобразователя.

При работе КРП происходит циклическое переключение транзисторов $VT1$ - $VT5$ и смена их интервалов проводимости. Таким образом, в каждом полупериоде работы преобразователя можно выделить интервалы проводимости ключей, порядок и наличие которых может различаться, в зависимости от режима работы КРП (момента включения транзисторов: $VT1$ - $VT5$). Интервалы проводимости для всех режимов работы КРП представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Режимы работы КРП

Режим	Интервал	Состояние ключей			Направление передачи энергии
		$VT1, VT4$ ($VT2, VT3$)	$VD1, VD4$ ($VD2, VD3$)	$VT5$	
1	1 ($t_1..t_2$)	+	-	-	нагрузка
	2 ($t_2..t_3$)	-	+	-	нагрузка
	3 ($t_3..t_4$)	Интервал бестоковой паузы			
2	1 ($t_1..t_2$)	+	-	-	нагрузка
	2 ($t_2..t_3$)	+	-	+	нагрузка
	3 ($t_3..t_4$)	+	-	+	сеть (C1)
	4 ($t_4..t_5$)	-	+	+	сеть (C1)
	5 ($t_5..t_6$)	Интервал бестоковой паузы			
3	1 ($t_1..t_2$)	+	-	-	нагрузка
	2 ($t_2..t_3$)	-	+	-	нагрузка
	3 ($t_3..t_4$)	-	+	+	нагрузка
	4 ($t_4..t_5$)	-	+	+	сеть (C1)
	5 ($t_5..t_6$)	Интервал бестоковой паузы			
4	1 ($t_1..t_2$)	+	-	-	load
	2 ($t_2..t_3$)	Интервал бестоковой паузы			
	3 ($t_3..t_4$)	-	+	+	сеть (C1)
	4 ($t_4..t_5$)	Интервал бестоковой паузы			

Примечание: «+» – ключ в проводящем состоянии; «-» – импульсы управления на ключ отсутствуют

Режим 1 характеризуется отсутствием импульсов управления на регулирующем транзисторе $VT5$ (рис. 2).

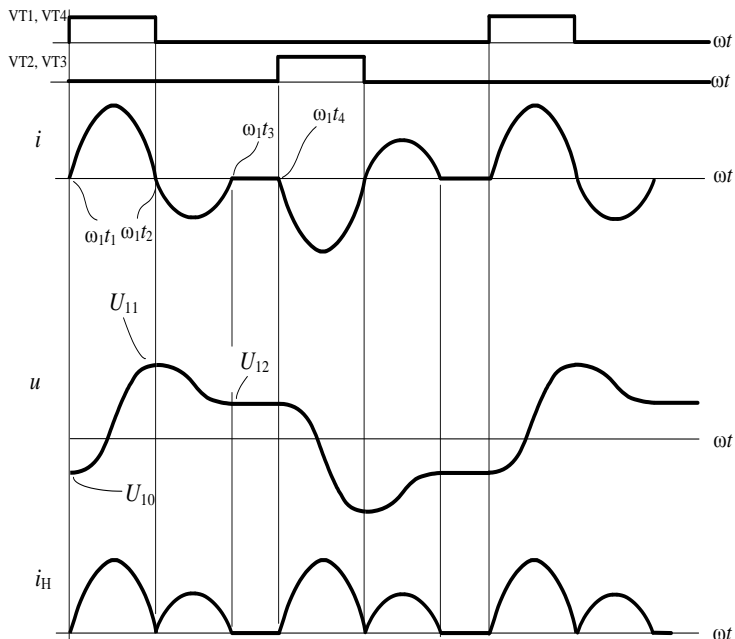


Рис. 2. Диаграммы работы КПП в режиме 1: i – ток РК; u – напряжение на конденсаторе C2; i_H – ток нагрузки; $\omega_i t_i \dots \omega_{i+1} t_{i+1}$ – i -ый интервал работы преобразователя.

На диаграмме можно выделить следующие характерные интервалы.

На интервале $\omega_1 t_1 \dots \omega_1 t_2$, который начинается с момента подачи сигнала управления на транзисторы VT1 и VT4, транзистор VT5 закрыт, поэтому происходит передача энергии в нагрузку U_H , от источника питания U_H через контур VT1–L1–C2–TV–VT4. Одновременно с этим происходит перезаряд РК C2 от напряжения U_{10} до напряжения U_{11} . При этом ток в первичной обмотке TV имеет колебательный характер и определяется параметрами последовательного РК L–C.

На интервале $\omega_1 t_2 \dots \omega_1 t_3$ ток первичной обмотки TV меняет полярность и протекает через обратные диоды VD1 и VD2 за счет энергии, накопленной в C2. При этом его напряжение несколько снижается до значения U_{12} за счет передачи части его энергии в цепь нагрузки. В конце интервала ток становится равным нулю и обратный диод запирается.

На интервале $\omega_1 t_3 \dots \omega_1 t_4$ токи в цепях КПП не протекают, и напряжение конденсатора C2 сохраняется неизменным до момента подачи управляющего сигнала на транзисторы VT2 и VT3.

В режимах 2 и 3 импульсы управления $VT3$ подаются на интервалах проводимости транзисторов диагонали и обратных диодов соответственно. В зависимости от импульсов управления, направление передачи энергии изменяется: энергия либо передается в нагрузку (ЕН), либо возвращается обратно в сеть (в конденсатор входного фильтра $C1$).

В режиме 4, в отличие от предыдущих, ток через транзисторы $VT1$ и $VT4$ успевает упасть до нуля, но энергии, накопленной в конденсаторе $C2$ не достаточно для отпириания обратных диодов $VD1$ и $VD4$. В этом случае ток через диоды пойдёт с момента подачи импульса управления на транзистор $VT5$.

Каждому интервалу проводимости соответствует система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы. Определенные интервалы проводимости и их системы дифференциальных уравнений образуют математическую модель КПП [7].

III. Исследование внешних и регулировочных характеристик

По математической модели [8] были рассчитаны и построены интегральные характеристики предложенного КПП – внешние и регулировочные характеристики. Изменяя напряжение нагрузки U_H^* с определённой дискретизацией, при фиксированных углах управления β транзистором $VT5$, можно получить семейство внешних характеристик (зависимость напряжения нагрузки от среднего значения приведенного тока нагрузки при различных углах управления). Внешние характеристики преобразователя представлены на рис. 3.

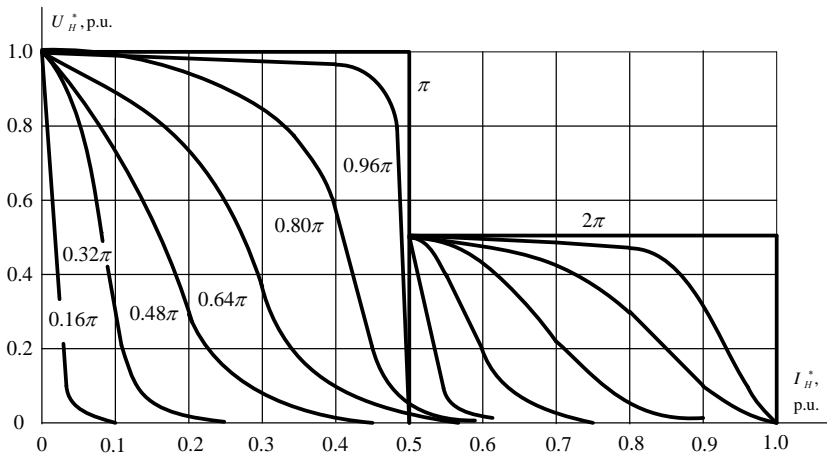


Рис. 3. Зависимость напряжения нагрузки от среднего значения приведенного тока нагрузки при различных углах управления β

Рис. 3 показывает, что внешняя характеристика КРП при отсутствии импульсов управления является абсолютно жёсткой при значениях тока нагрузки $0 \leq I_H^* \leq 1$ и абсолютно мягкой при $I_H^* = 1$. Внешняя характеристика, соответствующая углу управления $\beta = 2\pi$, 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 β стремящейся к нулю стремится к абсолютно мягкой к нулевым током нагрузки. Характеристики при других углах управления β занимают промежуточные значения.

Регулировочные характеристики предлагаемого КРП (рис. 4) также могут быть получены из полученные из аналитической модели. Следует отметить, что регулировочные характеристики могут быть получены из внешних, и наоборот.

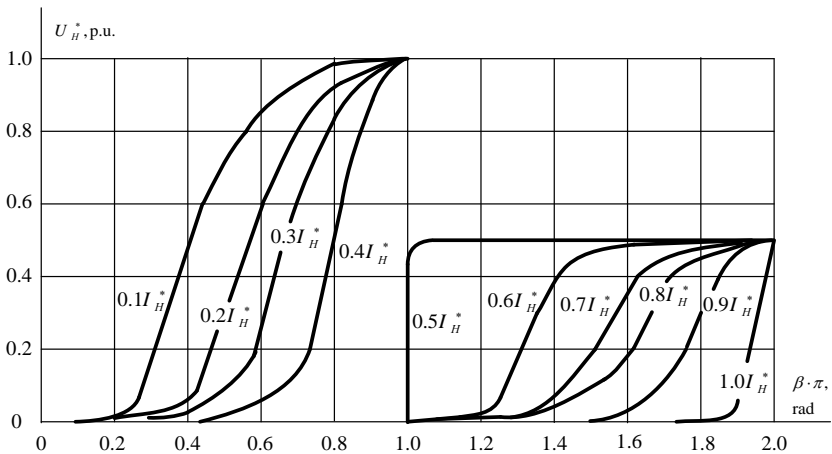


Рис. 4. Регулировочные характеристики КРП при различных значениях тока нагрузки

Из регулировочных характеристик видно, что при токе нагрузки $0 \leq I_H^* \leq 0,5$ регулирование выходного напряжения осуществляется при углах управления $0 \leq \beta \leq \pi$, в пределах $0 \leq U_H^* < 1$, а при токе нагрузки $0,5 \leq I_H^* < 1$ при углах $\pi \leq \beta \leq 2\pi$, в пределах $0 \leq U_H^* < 0,5$.

Помимо этого, с помощью аналитической модели были построены кривые изменения напряжения на конденсаторе C_2 ; 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. На базе полученной математической модели выявлены основные закономерности электромагнитных процессов, происходящих в преобразователе, выполнены расчеты, которые позволили установить количественные взаимосвязи между параметрами элементов силовых цепей.

IV. Экспериментальный образец

Исследования режимов работы КРП на имитационной модели [5, 7] позволили рассчитать параметры основных элементов преобразователя. Полученные результаты легли в основу экспериментального образца КРП для блока системы импульсного питания ЕН (рис. 5).

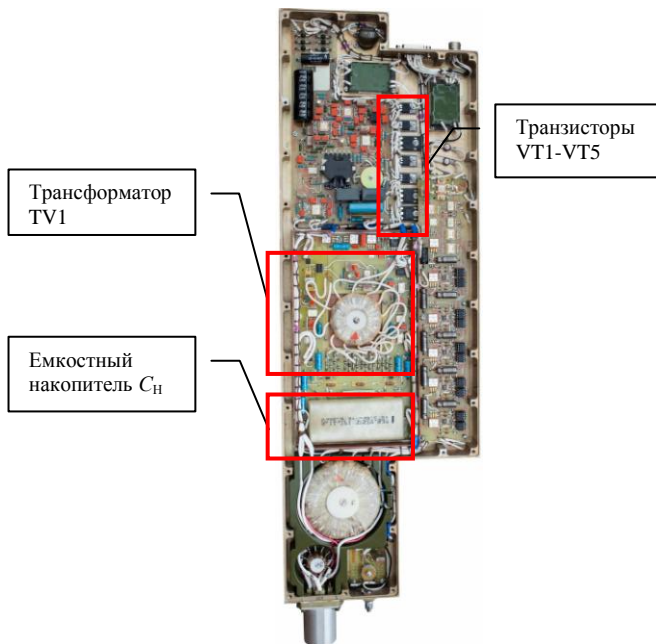


Рис. 5. Блок системы импульсного питания ЕН

На вход КРП (дополнительно к схеме на рис. 1) установлен трехфазный выпрямитель, обеспечивающий питание преобразователя от трехфазной сети переменного тока. Технические характеристики экспериментального образца КРП приведены в табл. 2.

Таблица 2.
Технические характеристики экспериментального образца КРП

Параметр	Значение
Напряжения сети, В	220, трехфазное
Частота тока сети, Гц	400
Входное напряжение, В	300
Диапазон регулирования выходного напряжения, В	0-3000
Рабочая частота, кГц	33
Средний потребляемый зарядный ток от КРП, мА	60
Емкость ЕН, мкФ	2
Стабильность напряжения на ЕН, %	±2.5

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

У. Заключение

Предложен КРП с широтно-импульсной модуляцией с фиксированной рабочей частотой, обеспечивающий регулирование выходного напряжения в широком диапазоне (от 0 до 100 % номинального значения). С этой целью 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. В силу этого обеспечивается низкий уровень пульсаций напряжения на ЕН и достигаются минимальные массогабаритные показатели трансформатора и выходного фильтра. Испытания экспериментального образца КРП доказали возможность регулирования выходного напряжения в широком диапазоне.

Работа на фиксированной высокой частоте, пониженные потери в транзисторах и высокий уровень электромагнитной совместимости, а также возможность широтного регулирования выходного напряжения делают перспективным применение предложенного КРП.

© Стрелков В.Ф., 2020

© Дарьенков А.Б., 2020

© Ваняев В.В., 2020

Библиографический список

- [1] Горяшин Н.Н., Лукьяненко М.В., Соломатова А.А., Хорошко А.Ю. Моделирование режимов параллельной работы квазирезонансных преобразователей напряжения с коммутацией ключевых элементов при нулевых значениях тока // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2009. № 4 (25). С. 53-58.
- [2] Горяшин Н.Н., Соломатова А.А. Оценка статических потерь мощности в квазирезонансном преобразователе напряжения // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 4 (37). С. 13-19.
- [3] Пенин А.А. Квазирезонансный преобразователь напряжения с улучшенными параметрами // Электричество. 2009. № 2. С. 58-64.
- [4] Поляков В. Квазирезонансные преобразователи с дозированной передачей энергии для заряда емкостных накопителей // Силовая электроника. 2015. Т. 1. № 52. С. 52-56.
- [5] Стрелков В.Ф. Электротехнические комплексы радиолокационных станций: автореф. дис. докт. техн. наук, НГТУ, Н. Новгород, 2016. – 40 с.
- [6] Долов В.Н., Стрелков В.Ф., Ваняев В.В., Кочнев А.А. Квазирезонансный преобразователь системы импульсного питания РЛС // Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. 2015. № 2 (14). С. 27-32.
- [7] Стрелков В.Ф., Дарьенков А.Б., Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А. Квазирезонансный преобразователь с широким диапазоном регулирования выходного напряжения для систем электроснабжения ограниченной мощности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (126). С. 91-100.
- [8] Стрелков В.Ф., Филатов И.Н., Ершова Е.А. Математическая модель квазирезонансного преобразователя // IV Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч. «Актуальные проблемы энергетики», Декабрь 21, 2018, Н.Новгород, Россия. С. 20-30.

V.F. Strelkov, A.B. Dar'enkov, V.V. Vanyaev

QUASI-RESONANT CONVERTER WITH IMPROVED CHARACTERISTICS

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

Abstract. The article is devoted to the development of a zero-current switching quasi-resonant converter (QRC). Its advantages are the natural limitation of the load current, a wide control range and a low level of output voltage ripple. The regulation of the output voltage is carried out due to the recovery of excess energy by the introduction of a transistor shunting the primary winding of the transformer. The principle of operation is described and the operating modes of the QRC are considered. Studies of the external

and adjustment characteristics of the QRC for various modes of its operation were carried out, which allowed one to determine the rational parameters of the converter components. The results of the research formed the basis for the manufacture of the prototype of switch-mode power supply of a storage capacitor. Tests of the prototype showed the promise of using the proposed QRC in autonomous power supply systems.

Keywords: charger, quasi-resonant converter, shunt transistor, switched-mode power supply, voltage regulation, zero-current switching.

References

- [1] N.N. Goryashin, M.V. Lukyanenko, A.A. Solomatova and A.Y. Khoroshko, “Modeling of parallel operation of zero-current switching quasi-resonant converters”, *Vestnik of SibGAU*, no. 4 (25), pp. 53-58, 2009.
- [2] N.N. Goryashin and A.A. Solomatova, “Estimation of aggregated losses of power in a quasi-resonant converter”, *Vestnik of SibGAU*, no. 4 (37), pp. 13-19, 2011.
- [3] A.A. Penin, “A quasi-resonance voltage converter with improved parameters”, *Elektrichestvo*, no. 2, pp. 58-64, 2009.
- [4] V. Polyakov, “Kvazirezonsnyye preobrazovateli s dozirovannoy peredachej energii dlya zaryada emkostnyh nakopitelej [Quasi-resonant dosed energy converters for charging capacitive storage]”, *Silovaya elektronika [Power Electronics]*, vol. 1, no. 52, pp. 52-56, 2015 (in Russian).
- [5] V.F. Strelkov, “*Elektrotekhnicheskie komplekсы radiolokacionnyh stancij [Electrical complexes of radar stations]*”, Doct. of Tech. S. thesis, Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia, 2016 (in Russian).
- [6] V.N. Dolov, V.F. Strelkov, V.V. Vanyaev and A.A. Kochnev, “Quasi-resonant inverter power pulsed radar system”, *Bulletin of Concern PVO Almaz-Antey*, vol. 2 (14), pp. 27-32, 2015.
- [7] V.F. Strelkov, A.B. Dar’enkov, E.N. Sosnina, A.V. Shalukho and I.A. Lipuzhin, “Quasi-resonant converter with a wide range of output voltage regulation for limited power supply systems”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, vol. 3 (126), pp. 91-100, 2019.
- [8] V.F. Strelkov, I.N. Filatov and E.A. Ershova, “Matematicheskaya model’ kvazirezonsnogo preobrazovatelya [Mathematical model of a quasi-resonant converter]”, in proc. *IV All-Russian Conf. Aktual’nye problemy energetiki [Actual problems of energy]*, Dec. 21, 2018, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 20-30 (in Russian).