



УДК 621.314

© В. Н. Долов, В. Ф. Стрелков, В. В. Ваняев, А. А. Кочнев, 2015

## Квазирезонансный преобразователь системы импульсного питания РЛС

Представлен квазирезонансный преобразователь системы импульсного питания сверхвысокочастотной лампы передающего устройства радиолокационной станции с широтным регулированием выходного напряжения. Рассмотрены особенности его работы, приведены математическая модель, внешние характеристики и некоторые результаты имитационного моделирования в разомкнутой и замкнутой по выходному напряжению системе.

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, транзисторный модуль, система импульсного электропитания, накопительный конденсатор.

Необходимость разработки активной фазированной антенной решётки радиолокационной станции (РЛС) с шириной спектра частот радиоимпульса  $1 \div 10$  ГГц инициировала создание передающих модулей на базе сверхвысокочастотных (СВЧ) ламп, которые по сравнению с СВЧ транзисторными модулями имеют более широкую полосу, более высокий (до  $60 \div 80$  %) КПД, большую скважность и почти вдвое меньшую стоимость. Это обстоятельство потребовало разработки для такого рода нагрузок соответствующих систем импульсного электропитания (СИП) повышенного напряжения, которые, как правило, функционируют по принципу накопления и импульсного выделения энергии, запаасаемой в электрическом поле накопительного конденсатора (НК) [1–3].

Одним из основных звеньев СИП является зарядный преобразователь (ЗП), который осуществляет зарядку НК путём преобразования потока электрической энергии, потребляемой из питающей сети. По мнению авторов, среди многообразия разработанных к настоящему времени схем решений ЗП наиболее полно условиям применения в системах электропитания РЛС отвечают ЗП на базе квазирезонансного преобразователя (КРП) с фиксированной рабочей частотой.

Колебательный характер тока в силовых цепях КРП существенно снижает коммутационные потери в транзисторах и упрощает решение задачи электромагнитной совместимости [2, 3]. Сопутствующее этому сокращение ширины спектра и уровня радиопомех приводит к снижению шумов, распространяющихся в цепях РЛС кондуктивным и индуктивным путём, а также улучшает тактико-технические характеристики РЛС: дальность действия, чув-

ствительность и точность определения координат цели. Кроме того, построение КРП по схеме последовательного резонансного инвертора с обратными диодами повышает надёжность СИП в аварийных режимах КЗ в цепи нагрузки за счёт естественного ограничения тока инвертора в этом режиме.

Применение КРП в СИП, а также во вторичных источниках электропитания иного назначения, используемых в РЛС, требует регулирования их выходного напряжения. Традиционно эта задача решается методом частотного регулирования [2, 3]. Недостаток метода в том, что доза энергии, передаваемой в нагрузку на периоде рабочей частоты КРП, не может быть изменена, что увеличивает нестабильность предразрядного напряжения НК в СИП при относительно небольших значениях его ёмкости.

Авторами разработаны схемы решения КРП на основе последовательного резонансного инвертора с обратными диодами и широтным регулированием выходного напряжения [4–6], лишённые отмеченного недостатка.

В КРП, выполненном по мостовой схеме (рис. 1), широтное регулирование напряжений на обмотках трансформатора  $TV$  и выходного напряжения КРП реализуется за счёт изменения фазы отпираания шунтирующего транзистора  $VT_{III}$  относительно моментов отпираания диагональных транзисторов  $VT_1$ ,  $VT_4$  и  $VT_3$ ,  $VT_2$ . При отпираании транзистора  $VT_{III}$  в требуемый момент передача энергии в нагрузку прекращается, что обеспечивает повышенную точность поддержания предразрядного напряжения НК. При этом часть энергии, накопленной в реактивных элементах силового контура, возвращается в источник питания или в кон-

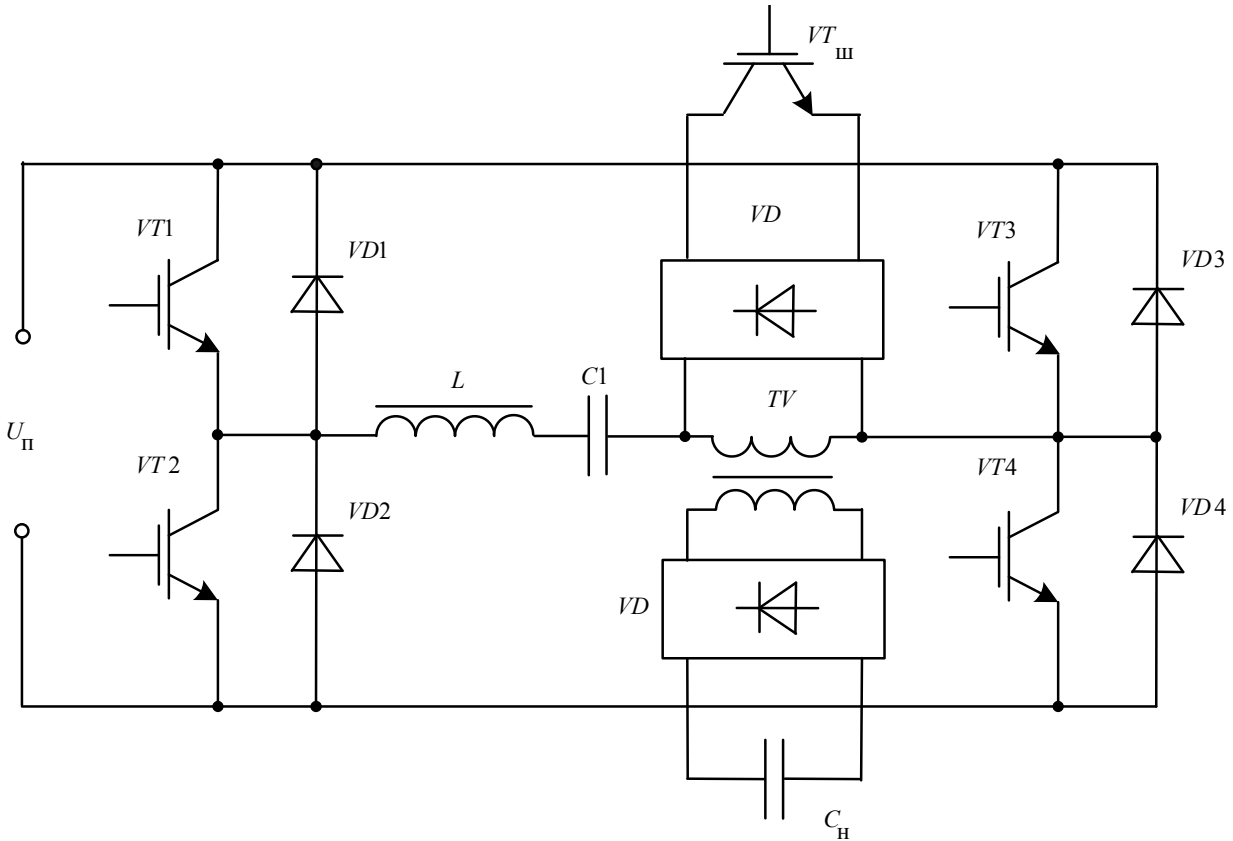


Рис. 1. Электрическая схема КРП

денсатор входного фильтра.

Для установления особенностей работы и определения основных характеристик этого устройства приняты следующие допущения:

вентильные элементы обладают свойствами идеальных ключей;

ток намагничивания и активные сопротивления обмоток трансформатора  $TV$  равны нулю, а коэффициент трансформации – единице;

потери мощности КРП сосредоточены в активном сопротивлении последовательного резонансного контура;

пульсации напряжения НК равны нулю.

Как показывает анализ процессов при сделанных допущениях, для работы рассматриваемого устройства в самом общем случае характерны шесть различных временных интервалов, соответствующих различным углам отпирания транзистора  $VT_{ш}$  и сочетаниям состояний ключевых элементов  $S1 \div S4$ ,  $S_{ш}$  и диодного моста  $VD$  эквивалентной схемы (рис. 2).

При снятых импульсах управления с ключа  $S_{ш}$  в каждом полупериоде работы преобразователя чередуются интервалы «1» и «2» про-

водящего состояния ключей  $S1$ ,  $S4$  или  $S2$ ,  $S3$ . На интервале «1» происходит подзарядка конденсатора  $C1$  от источника питания  $U_n$  (приращение его энергии  $\Delta W_{C1} > 0$ ) через транзисторы одной из диагоналей, а на интервале «2» – частичная разрядка через обратные диоды этой диагонали. На обоих интервалах происходит передача энергии в цепь нагрузки (приращение выделяемой в ней энергии  $\Delta W_n > 0$ ).

При отпирании ключа  $S_{ш}$  с фазовым сдвигом  $\beta \leq \pi / \sqrt{LC_1}$  относительно момента включения транзисторов одной диагонали и поддержания его в открытом состоянии до момента отпирания транзисторов другой диагонали поочередно следуют интервал «1», затем интервал «3», на котором происходит «мягкая» коммутация тока резонансного контура с цепи « $L_k - VD$  – нагрузка» на ключ  $S_{ш}$ . При снижении тока нагрузки  $i_n$  до нуля процесс коммутации заканчивается и начинается интервал «4», на котором продолжают проводить транзисторы одной диагонали и ключ  $S_{ш}$ . Интервал «5» начинается с момента, когда ток в контуре имеет обратное направление, протекая через обратные диоды этой же диагонали.



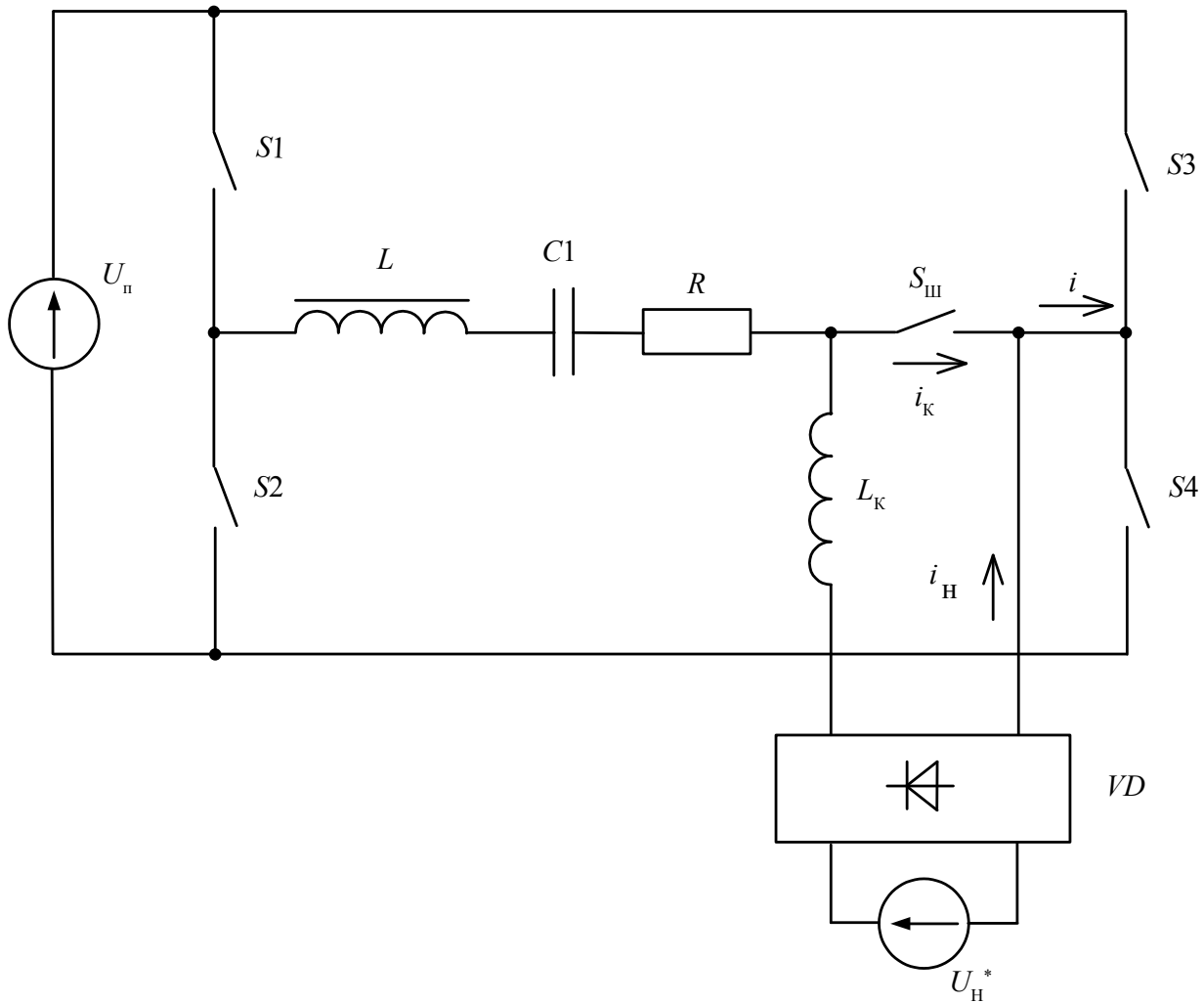


Рис. 2. Эквивалентная схема КРП

При отпирании ключа  $S_{III}$  с фазовым сдвигом  $\beta > \pi / \sqrt{LC_1}$  начинается интервал «б», на котором, как и на интервале «з», происходит процесс коммутации тока резонансного контура на ключ  $S_{III}$ . По окончании интервала «б» в работе остаются обратные диоды и ключ  $S_{III}$ .

Система уравнений, описывающих электромагнитные процессы в КРП на интервалах непрерывности, может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} (L + k_2 L_k) \frac{di}{dt} + Ri + u_C &= k_1 U_n - k_2 U_n^*; \\ L_k \frac{di_k}{dt} + U_n^* &= 0; \\ i &= k_3 i_k + i_n; \\ u_C &= \frac{1}{C_1} \int_0^t i dt - U_{0j}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $k_1 \div k_3$  – коэффициенты, значения которых

определяются текущей конфигурацией эквивалентной схемы КРП;

$U_{0j}$  – начальное значение напряжения конденсатора  $C_1$  на  $j$ -м интервале непрерывности;

$U_n^*$  – напряжение нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора.

Состояния ключей  $S1 \div S4$ ,  $S_{III}$  и диодного моста  $VD$  эквивалентной схемы КРП, соответствующие одному полупериоду выходного напряжения инвертора, представлены в таблице (цифра 1 соответствует замкнутому состоянию ключа, 0 – разомкнутому).

Кроме того, в таблице приведены значения коэффициентов  $k_1 \div k_3$  уравнений системы (1), а также показан характер изменения энергии  $\Delta W_{C1}$  и  $\Delta W_n$  конденсатора  $C_1$  и нагрузки (+ - увеличение энергии; - - уменьшение энергии; 0 - энергия не изменяется).

В результате решения системы уравнений (1) на интервалах непрерывности с уче-

том данных таблицы выведены аналитические рекуррентные соотношения для определения токов и напряжений на элементах силового контура КРП при различных углах отпирания шунтирующего ключа  $S_{Ш}$ . Полученная математическая модель позволила выявить основные закономерности процессов, происходящих в преобразователе на интервалах непрерывности, определить количественную взаимосвязь между параметрами элементов силового контура и режимами работы КРП, рассчитать внешние и другие интегральные характеристики, необходимые для его инженерного расчёта.

Состояния ключей, значения коэффициентов уравнений на интервалах непрерывности, изменения энергии конденсатора  $C1$  и нагрузки

Ключи и коэффициенты	Интервалы					
	1	2	3	4	5	6
$S1, S4$	1	1	1	1	1	1
$S2, S3$	0	0	0	0	0	0
$VD$	1	1	1	0	0	1
$S_{Ш}$	0	0	1	1	1	1
$k_1$	1	-1	1	1	-1	-1
$k_2$	1	1	0	0	0	0
$k_3$	0	0	1	0	0	1
$\Delta W_{C1}$	+	-	+	+	-	-
$\Delta W_{н}$	+	+	+	0	0	0

На рис. 3 приведены статические внешние характеристики рассматриваемого устройства в относительных единицах и соответствующие им кривые тока  $i$  резонансного контура, построенные при различных значениях угла  $\beta$  и малых значениях  $R$ .

Внешние характеристики нелинейные и имеют характерные участки, соответствующие работе КРП в режимах, близких к режимам источника напряжения и тока. Из приведённых зависимостей следует, что КРП с шунтирующим транзистором обеспечивает глубокое регулирование выходного напряжения при постоянной рабочей частоте, что обеспечивает в замкнутой системе автоматического регулирования (САР) поддержание предзарядного напряжения НК с заданной точностью.

На рис. 4 представлены траектории движения рабочей точки в плоскости приведённых к первичной обмотки трансформатора значений напряжения  $u_{Cн}$  и тока  $i_{Cн}$  НК, полученные на имитационной модели полумостового КРП при его зарядке в разомкнутой и замкнутой по выходному напряжению САР. Траектория на рис. 4б соответствует периодическому режиму работы ВИП с замкнутой САР в режиме частичной разрядки НК.

Из рис. 4б следует, что в замкнутой САР

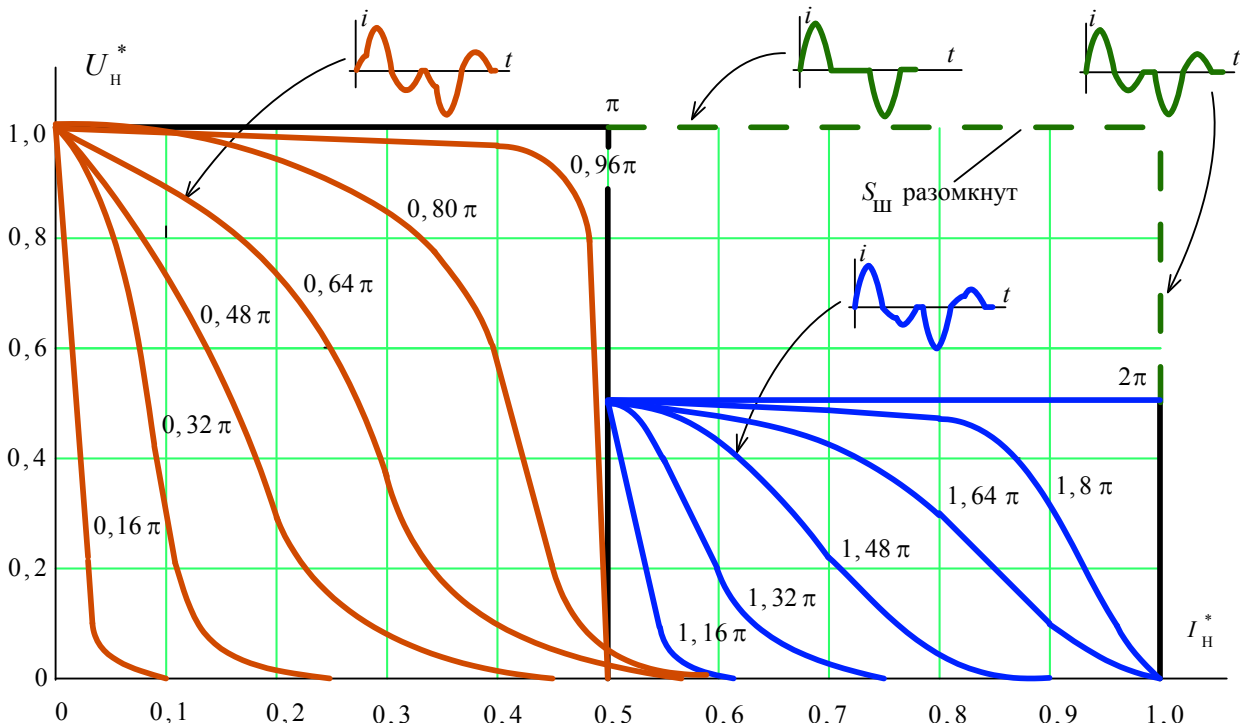
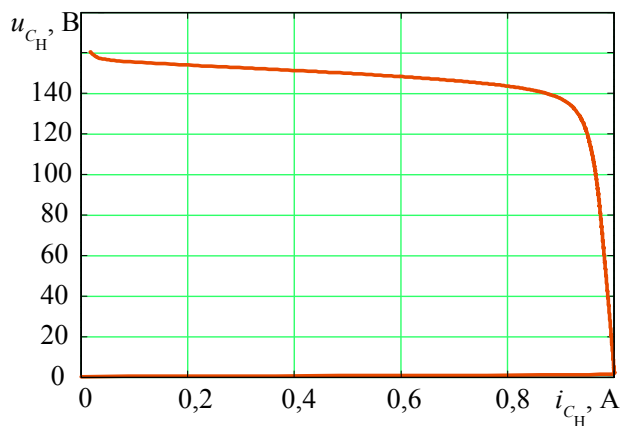
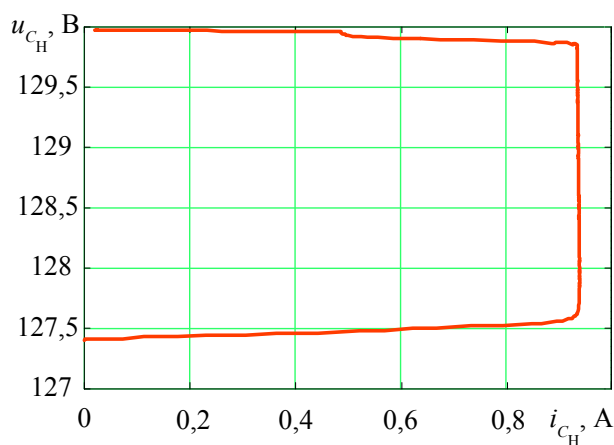


Рис. 3. Статические внешние характеристики КРП





а – разомкнутая САР



б – замкнутая САР

**Рис. 4.** Траектории процесса зарядки НК

подзарядка НК происходит при разомкнутом ключе  $S_{III}$  и максимальном выходном токе. При этом КРП в течение практически всего интервала паузы между зондирующими импульсами РЛС работает в режиме источника тока, и только в течение короткого предразрядного интервала, когда в работу вступает отрицательная обратная связь, рабочая точка последовательно, в порядке уменьшения, быстро проходит различные значения угла  $\beta$  от  $2\pi$  или иного меньшего установленного значения до некоторого минимального, соответствующего требуемому выходному напряжению.

Таким образом, при использовании описываемого КРП в составе СИП длительность работы  $S_{III}$  невелика и его введение в схему практически не изменяет энергетические и иные показатели КРП, которые соответствуют показателям известных преобразователей на базе последовательных резонансных инверторов с частотным регулированием выходного напряжения.

## Выводы

1. Предложенный зарядный преобразователь НК на базе КРП с широтным регулированием напряжения позволяет повысить точность поддержания предразрядного напряжения НК.

2. Разработанная математическая модель зарядного преобразователя позволила выявить основные закономерности происходящих в нём электромагнитных процессов, дать их количественную оценку и получить его важнейшие интегральные характеристики.

3. Пониженные потери в ключевых элементах с «мягкой» коммутацией и уровень радиопомех, свойственные КРП, естественное ограничение тока в аварийных режимах КЗ в цепи нагрузки, а также возможность широтно-регулируемого выходного напряжения делает перспективным применение рассматриваемого устройства в СИП передающих модулей РЛС с НК относительно небольшой ёмкости.

## Список литературы

1. Долов В. Н., Стрелков В. Ф., Ваняев В. В., Колелович Е. А. Электропитание клистрона передающего модуля РЛС // Состояние и перспективы развития электротехнических средств межвидового назначения : материалы науч.-практ. конф. М.: Федеральное государственное казенное учреждение «3 ЦНИИ Минобороны России», 2013. С. 56–60.
2. Полищук А. Г. Высокоэффективные источники вторичного электропитания высокого напряжения для радиопередающих устройств СВЧ. // Силовая электроника. 2004. № 2. С. 66–70.
3. Калистратов Н. П., Коган В. Л., Сорокин Ю. К. Высоковольтный источник питания ЛБВ // Электрическое питание. 2007. № 7. С. 59–64.
4. Стабилизированный квазирезонансный преобразователь: Пат. 2 417 510 Россия, МПК Н 02 М 7/ 53846; Оpubл. 27.04.2011, Бюл. № 12. Рус.
5. Стабилизированный квазирезонансный преобразователь: Пат. 2 418 355 Россия, МПК Н 02 М 7/ 53846; Оpubл. 10.05.2011, Бюл. № 13. Рус.
6. Стабилизированный квазирезонансный преобразователь: Пат. 2 510 862 Россия, МПК Н 02 М 3/ 335, Н 02 М 7/ 53846; Оpubл. 10.04.2014, Бюл. № 10. Рус.

Поступила 15.01.15

**Долов Василий Николаевич** – начальник отдела ОАО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород.  
Область научных интересов: разработка источников вторичного электропитания специального назначения.

**Стрелков Владимир Федорович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород.  
Область научных интересов: разработка источников вторичного электропитания специального назначения.

**Ваняев Валерий Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» НГТУ им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.  
Область научных интересов: разработка источников вторичного электропитания специального назначения.

**Кочнев Алексей Александрович** – магистрант кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика», НГТУ им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.  
Область научных интересов: разработка источников вторичного электропитания специального назначения.

