

DOI: 10.18721/JEST.26203  
УДК 621.311.6

*Е.А. Орел*

Акционерное общество "Научно-исследовательский институт "Вектор",  
Санкт-Петербург, Россия

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ВТОРИЧНОГО ПИТАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ИМПУЛЬСНУЮ НАГРУЗКУ**

Рассматриваются особенности разработки высоковольтного источника питания постоянного тока, предназначенного для импульсной нагрузки с временем работы единицы-десятки микросекунд при периоде повторения в десятки-сотни микросекунд. Описаны основные сложности, возникающие в изделиях, где основной задачей источника является заряд выходного ёмкостного накопителя в перерывах между импульсами включения нагрузки. Показаны сдерживающие факторы и ограничения, влияющие на длительность переходного процесса заряда накопителя. Перечислены пути их преодоления и предложен новый способ, заключающийся в разделении исходного источника на два взаимодополняющих, каждый из которых реализует свой, строго определённый набор функций, позволяя оптимизировать размеры всего устройства, уменьшить стоимость и вес разработки. Приведены осциллограммы выходного напряжения и переходных процессов, вызванных изменением нагрузки, описаны особенности построения системы управления, отвечающей предложенному способу построения высоковольтного источника питания. Приведён физический макет и показаны результаты его работы.

*Ключевые слова:* высоковольтный источник питания постоянного тока, импульсная нагрузка, холостой ход, обратная связь, переходный процесс, обратногоходовой преобразователь, мощность, управление.

*Ссылка при цитировании:*

Орел Е.А. Совершенствование высоковольтного источника вторичного питания, работающего на импульсную нагрузку // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 31–40. DOI: 10.18721/JEST.26203

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*Е.А. Орел*

NII Vector, St. Petersburg, Russia

## **IMPROVEMENT OF A HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLY OPERATING ON A PULSE LOAD**

The paper considers the features of developing high-voltage power supplies that operate on a pulse load with operating time of tens of microseconds and repetition period of tens to hundreds of microseconds. We describe the main difficulties that arise in products where the basic task of the power supply source is to charge the output storage capacitor during the intervals between the load switching pulses. We show constraints and restrictions that affect the duration of the transient process of the storage device charge. After listing the ways to overcome them, we propose a new method, which consists in dividing the initial power supply into two complementary ones. Each of the supplies implements its own strictly defined functions, allowing to optimize the efficiency and size of the entire device, reduce the cost and weight of development. We present waveforms of output voltage and transient processes

caused by load changes. We describe construction features of a control system that meets the proposed method for building a high-voltage power supply, its physical layout and the results of its operation.

**Keywords:** DC-DC high-voltage power supply, pulse load, open-circuit voltage, voltage feedback, transient response time, flyback converter, power, control.

**Citation:**

E.A. Orel, Improvement of a high-voltage power supply operating on a pulse load, Materials Science. Power Engineering, 26 (02) (2020) 31–40, DOI: 10.18721/JEST.26203

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** Высоковольтные источники вторичного питания находят применение во многих областях специальной радиоэлектронной техники. Нередко работа источников ведётся в условиях импульсного характера изменения нагрузки (рис. 1), причем время её работы может составлять единицы-десятки микросекунд при периоде повторения в десятки-сотни микросекунд, налагая дополнительные требования на обеспечиваемую источниками мгновенную выходную мощность, стабильность выходного напряжения, размах пульсаций, электрическую прочность и целый ряд других параметров. Примером таких условий работы является электропитание усилителей мощности (УМ) на базе ламп бегущей волны (ЛБВ) [1], используемых в специальной радиоаппаратуре отечественной военной техники. В последнее время наблюдается тенденция к увеличению мощности источников при сохранении или уменьшении их габаритных размеров [2, 3], способствующая постоянному поиску новых решений в процессе разработки высоковольтных схем.

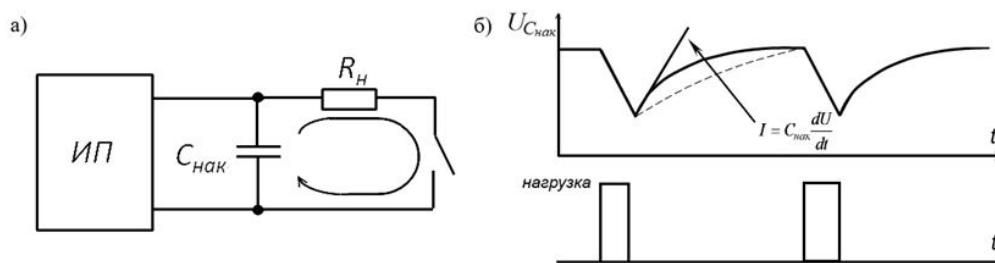


Рис. 1. Принцип работы источника питания на импульсную нагрузку (а) и форма напряжения на выходном ёмкостном накопителе (б)

Fig. 1. а – Principle of operation of the power supply on a pulse load, б – voltage waveform on the output capacitive storage

Распространённым вариантом схемы, используемой в качестве основы высоковольтных источников питания (ИП), является обратноходовой преобразователь напряжения (англ. Flyback converter) [4–7], обладающий такими преимуществами как отсутствие накопительного дросселя во вторичной цепи трансформатора, усиление защитных качеств за счёт разнесения во времени процессов отбора мощности от первичного источника и передачи её в нагрузку, возможность снижения коэффициента трансформации, осуществляемая уменьшением скважности управляющих импульсов силового транзистора, минимальные размеры и стоимость схемы, простота её реализации [8]. Однако, предельная мощность, на которой обратноходовой преобразователь за счёт своих качеств превосходит другие схемы, ограничена величиной 65-130 Вт [9, 10], поэтому для достижения более высоких её значений используют параллельное по входу и последовательное по выходу включение нескольких обратноходовых преобразователей [11, 12]. Сигнал обратной связи (ОС) из-за высокого напряжения на нагрузке и особенностей формы

кривой напряжения на обмотках трансформатора обратногоходовой схемы [13] часто снимают введением дополнительной трансформаторной обмотки в противовес использованию делителя на выходе источника. Для этого необходимо обеспечить достаточную электроизоляцию между обмотками с целью исключения пробоя, а для получения высоких значений КПД – максимально уменьшать индуктивность рассеяния силовых трансформаторов [14–16].

### Существующие проблемы

Для обеспечения нормальной работы ИП в условиях часто меняющейся импульсной нагрузки переходные процессы при её переключении должны происходить максимально быстро, чтобы гарантировать возможность накопления энергии при заряде выходного ёмкостного накопителя в промежутке между интервалами его разряда на потребителя. Нередко с целью обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) на время работы нагрузки ИП отключается. Основная работа ИП в таких случаях сводится к обеспечению заряда накопителя в перерывах между импульсами нагрузки. Скорость нарастания напряжения на ёмкостном накопителе пропорциональна выходному току источника. Для идеального ИП, работающего на импульсную нагрузку, во время переходного процесса, вызванного её изменением, должны выполняться следующие условия: коэффициент усиления в цепи обратной связи  $K_{yc} \rightarrow \max$ , ток заряда выходного ёмкостного накопителя  $I = \max = \text{const}$ , длительность переходного процесса  $t_{\text{пт}} \rightarrow 0$ . При незначительном «провале» выходного напряжения в момент скачкообразного изменения нагрузки кривая выходного тока источника по форме повторяет кривую отбираемой из источника мощности:  $P \equiv I$ . За время переходного процесса ток должен зарядить выходной ёмкостный накопитель, компенсируя спад напряжения и нём. Для идеального случая, при котором длительность «провала» минимальна, отбираемая из источника мощность должна быть максимально возможной и не уменьшаться на протяжении всего времени восстановления выходного напряжения ИП.

Реальный источник не может обеспечить такой характеристики. Выдаваемая им мощность в момент наброса нагрузки не сохраняет максимального значения и снижается по экспоненциальному закону. При необходимости увеличения отбираемой от источника мощности схема претерпевает ряд существенных изменений. «Броски» мощности потребуют введения дополнительных требований к входному фильтру источника ввиду образования больших импульсов тока в моменты переключения нагрузки. Возрастут наводки на схему управления и потребителей, что требует обеспечения более качественной конструкции ИП и, скорее всего, повлечёт за собой принятие специальных мер по экранировке отдельных узлов изделия. Силовые транзисторы и диоды должны выбираться, исходя из работы ИП на максимальную, а не среднюю мощность, при этом ужесточатся требования к напряжению сток-исток  $U_{\text{си}}$  силовых транзисторов из-за характерных «выбросов» в моменты их переключения. Выходной накопитель должен заряжаться большим током ИП. Схема управления должна максимально быстро открывать силовые транзисторы.

Таким образом, подход, связанный с сокращением времени выхода на режим между импульсами нагрузки за счёт оптимальной настройки контура обратной связи и увеличения мощности ИП, приводит к необходимости проектирования источника, исходя не средней её величины  $P_{\text{ср}}$ , а с учётом пиковых «бросков»  $P_{\text{max}}$ , создаваемых ИП в момент начала заряда ёмкостного накопителя, и способствует увеличению размеров и стоимости всего изделия.

Другой подход, вызывающий увеличение выходного тока источника на время переходного процесса, заключается в искусственном поднятии уровня холостого хода (ХХ) выходного напряжения. Время, за которое напряжение на ёмкостном накопителе достигнет своего первоначального уровня, сократится за счёт большей величины тока, однако полный выход на режим до нового уровня ХХ потребует дополнительного промежутка  $t_{\text{дон}}$ . Подъём выходного напряже-

ния осложнит работу схемы управления источника и потребует дополнительной проработки силовых высоковольтных трансформаторов.

### Предлагаемый метод

Цель настоящей работы – показать, что желаемого результата – обеспечения нормальной, согласованной работы ИП и высокочастотной импульсной нагрузки – можно добиться качественно иным методом: исключением работы цепи ОС источника на интервале сброса нагрузки. В этом случае при сохранении длительности переходного процесса и постоянстве уровня холостого хода выходного напряжения мощность источника можно значительно сократить (рис. 2, а). Все проблемы при работе ИП на импульсную нагрузку связаны с корректирующим звеном в цепи ОС. Даже при удачной его настройке изменение выходного напряжения источника будет определяться экспоненциальным законом, где каждому значению выходного напряжения соответствует своё значение выходного тока. Экспоненциальная зависимость определяется логикой работы схемы управления ИП – реакцией на изменение  $\Delta U_{\text{вых}}$  петли ОС источника.

При исключении ОС в момент сброса нагрузки работа ИП осуществляется с неизменным током, ограничиваемым лишь мощностью имеющегося источника, однако при этом необходимо, чтобы в момент достижения выходным напряжением своего номинального уровня происходило обратное «включение» схемы ОС с целью защиты нагрузки от перенапряжения. Ток заряда выходного ёмкостного накопителя будет ограничиваться только номинальной мощностью ИП  $P_{\text{ип}}$ , которая меньше «броска» мощности, вызываемого работой петли ОС. Вместе с тем, пропадает и экспоненциальная зависимость заряда выходного накопителя, характерная для типовых структур ИП (рис. 2, б).

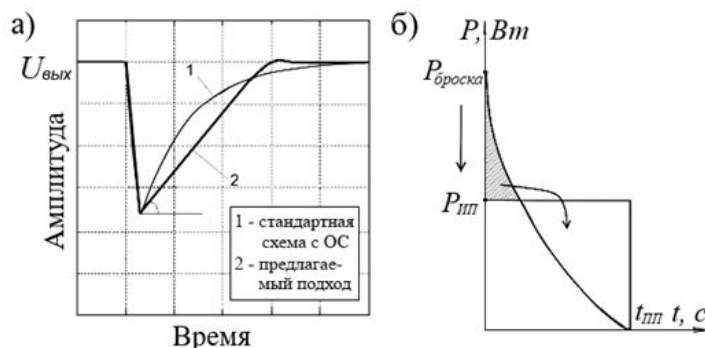


Рис. 2. Экспоненциальный и линейный законы нарастания напряжения на выходном ёмкостном накопителе (а) и отбираемая при этом от источника мощность (б)

Fig. 2. а – Exponential and linear increase of voltage on the output capacitive storage, б – output power taken from the power supply device

### Реализация метода

Для реализации предлагаемого принципа необходимо использовать разницу между текущим значением выходного напряжения ИП и пороговым напряжением переключения. Если  $U_{\text{вых}} < U_{\text{порог}}$ , ОС не работает. Схема управления следит за уровнем выходного напряжения, и в момент достижения  $U_{\text{вых}} = U_{\text{порог}}$  срабатывает переключатель, который производит включение цепи ОС. Для разных уровней  $U_{\text{порог}}$  момент включения будет отличаться, но отбираемый от источника ток – всегда имеет одно и то же значение. На время работы нагрузки с целью обеспечения ЭМС работа ИП при помощи соответствующего синхроимпульса управления прекращается, обеспечивая задержку.

Реализация такой структуры управления на одном высоковольтном ИП возможна, однако, влечёт определённые трудности с точки зрения более тщательной проработки конструкции трансформаторов (для уменьшения «выбросов» напряжения на силовых транзисторах) и обеспечения минимальной задержки в момент переключения между режимами. В схеме могут возникнуть проблемы в режиме малых импульсных токов. Также к недостаткам можно отнести необходимость строгого отслеживания порогового уровня переключения и напряжения нагрузки. Сложность реализации предлагаемого варианта упрощается введением второго, маломощного источника, отвечающего за работу на холостом ходу. Примем следующее обозначение источников питания.

ИП1 (МИП) – мощный источник питания, отвечающий за заряд выходного накопителя  $C_{нак}$  после наброса импульсной нагрузки и работающий на максимальном токе для обеспечения минимальной длительности переходного процесса,  $P_{ИП1} = P_{max}$ .

ИП2 (ММИП) – маломощный источник питания, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения в режиме холостого хода.

Силовую схему МИП следует разбить на несколько одинаковых частей ( $N$  трансформаторов,  $N$  транзисторов) с первичными обмотками, включенными параллельно и вторичными обмотками, включенными последовательно (рис. 3, а). В результате такого включения, помимо увеличения мощности, сокращаются потери на силовых транзисторах, уменьшается предельное напряжение пробоя для выходных высоковольтных выпрямительных диодов, что позволяет упростить их выбор, а также поднять КПД источника. Для маломощного источника следует воспользоваться тем же преимуществом и, если одного силового транзистора для ИП вполне достаточно, то вторичная обмотка разбивается на несколько обмоток, включенных последовательно (рис. 3, б). Выходные части источников включаются параллельно друг относительно друга и соединяются с выходным накопителем.

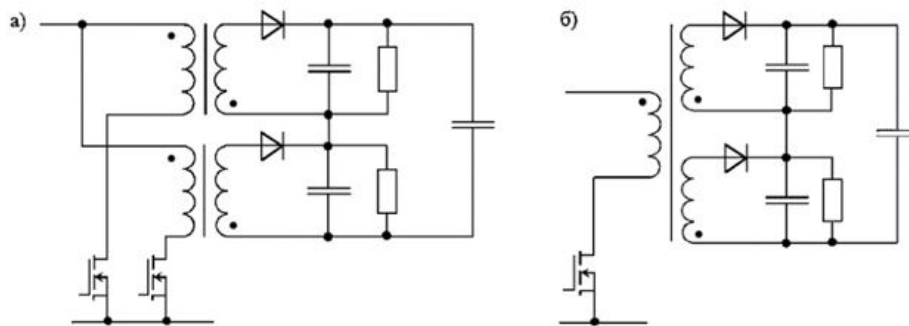


Рис. 3. Силовая схема МИП (а) и ММИП (б)

Fig. 3. Power circuit of high-power (a) and low-power (b) supply device

Использование двух источников не приводит к увеличению размеров всего устройства, поскольку даже увеличение количествамоточных изделий компенсируется уменьшением их размеров. Функции, реализуемые источниками, приведены в табл. 1. Помимо сокращения длительности переходного процесса, такое их распределение позволяет оптимизировать КПД, размеры, уменьшить стоимость и вес разработки. Основное преимущество получается из возможности использования максимума мощности ИП (МИП) при заряде ёмкостного накопителя и последующего переключения по достижению определенного порогового уровня  $U_{вых}$  в маломощный режим с работой с ОС по напряжению (ММИП).

Таблица 1

Параметр	МИП		ММИП	
	Основное назнач.	Доп. сервис	Основное назнач.	Доп. сервис
Работа на макс. мощность	+			
Стабилизация вых. напряж.			+	
Ограничение превышения вых. напряж.		+		
Защита по превышению тока		+		+

Для обеспечения переключения между источниками необходимо сформировать соответствующий управляющий сигнал. Следить за уровнем  $U_{вых}$  при помощи трансформаторной обмотки нельзя, т.к. сигнал с неё не всегда будет соответствовать напряжению на выходном ёмкостном накопителе устройства. При импульсной нагрузке, где принцип работы высоковольтного ИП заключается в заряде выходного накопителя на коротком промежутке между импульсами нагрузки, фиксация этого уровня с обмоток трансформатора труднореализуема. Для организации сигнала переключения можно воспользоваться напряжением  $U_H n$ , снимаемым со стока силового транзистора МИП, где  $U_H$  – напряжение нагрузки,  $n$  – коэффициент трансформации, которое после масштабирования на коэффициент  $K$  сравнивается с помощью компаратора с некоторым опорным напряжением, ответственным за порог переключения с МИП на ММИП. Для исключения из сигнала составляющей входного напряжения питания источника  $E_{П}$ , на инверсном входе компаратора к опорному сигналу введена соответствующая поправка. Схема формирования сигнала переключения между МИП и ММИП приведена на рис. 4.

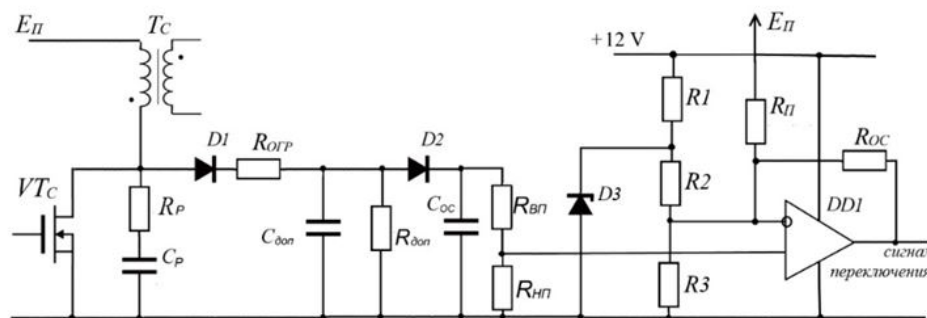


Рис. 4. Схема переключения с МИП на ММИП

Fig. 4. Switching scheme from high-power to low-power supply device

Сигнал на выходе компаратора  $DD1$  инициирует переключение между преобразователями МИП и ММИП за счёт включения (выключения) драйверов их силовых транзисторов. Из-за паразитных параметров высоковольтного трансформатора в напряжении на стоке силового транзистора присутствует высокочастотный (в/ч) выброс, препятствующий достижению высокой стабильности работы схемы. Исключить его поможет введение вместо резистора  $R_{доп}$  разрядной цепочки  $R_d$  и  $VT_p$  (рис. 5, а), работа которой осуществляется в момент открытия силового транзистора  $VT_c$  (рис. 5, б). Разрядный резистор  $R_d$ , определяет скорость разряда конденсатора  $C_{доп}$ , обеспечивая уменьшение выброса напряжения в двух режимах работы ИП: холостого хода и нагрузки.



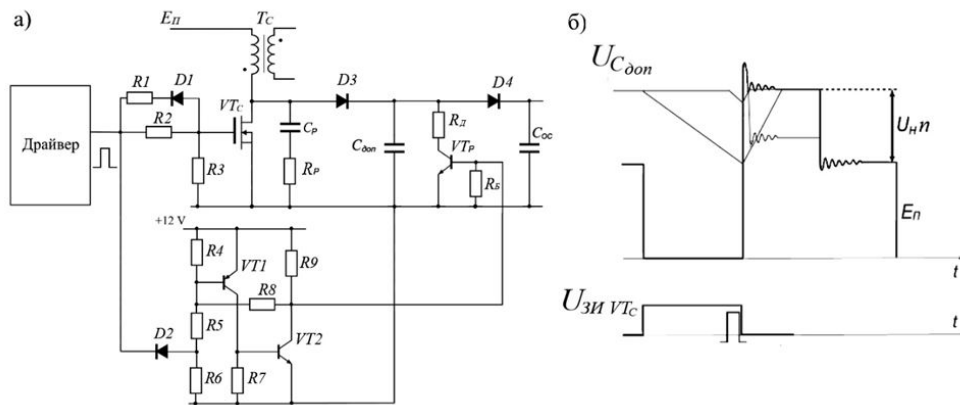


Рис. 5. Схема исключения высокочастотного выброса из сигнала переключения (а) и принцип её работы (б)  
 Fig. 5. а – Schematic diagram of high-frequency voltage peak elimination in switching signal, б – principle of its operation

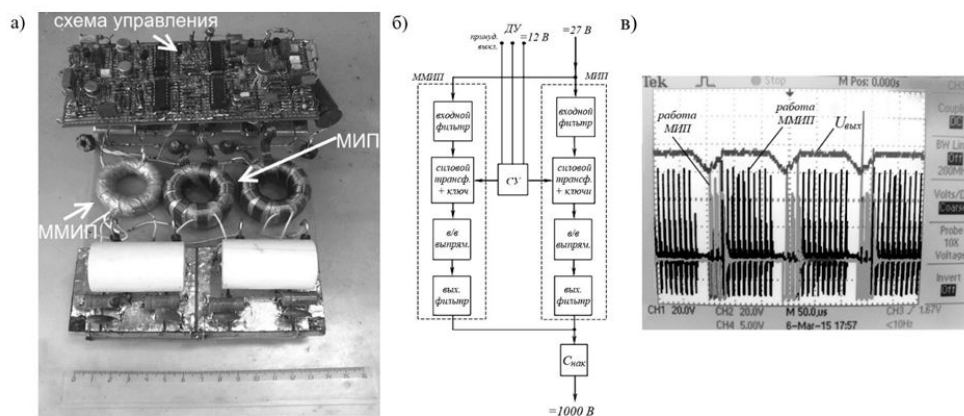


Рис. 6. Макет источника, габаритные размеры: 200мм x 140мм x 30мм (а), структурная схема источника (б), осциллограмма напряжения на выходном ёмкостном накопителе и напряжения сток-исток силовых транзисторов МИП и ММИП при работе ИП на импульсную нагрузку (в)  
 Fig. 6. Model of the power supply, а – overall dimensions: 200mm x 140mm x 30mm, б – block diagram of the power supply, в – oscillogram of the voltage on the output capacitive storage and the drain-source voltage of power transistors in high-power and low-power supply devices

### Результаты

Для проверки всех предложенных принципов был создан физический макет с выходным напряжением 1 кВ (рис. 6, а). Длительности импульсов нагрузки составляет 20мкс с периодом повторения 100мкс. МИП работает в режиме преобразователя с отсутствием регулировки выходного напряжения на требуемом для нагрузки уровне. Обратная связь по напряжению МИП используется лишь для организации дополнительной защиты по превышению выходного напряжения и выставлена на уровне 1,3...1,4 кВ. С помощью МИП происходит заряд выходного накопителя  $C_{нак}$  до заданного уровня ( $\approx 1$ кВ) максимальным током преобразователя. При достижении этого уровня МИП выключается и включается ММИП, который поддерживает выходное напряжение на уровне 1кВ. Оба преобразователя работают на частоте  $f = 100$  кГц. Структурная схема макета представлена на рис. 6, б.

По результатам эксперимента время включения МИП после окончания импульса нагрузки составило не более 10 мкс, время переключения между МИП и ММИП составило единицы микросекунд (рис 6, в). При входном токе 9 А, входном напряжении 27 В и выходном токе 0,2 А, выходном напряжении 1 кВ КПД источника составил 82%.

### Заключение

Представленный принцип построения источника электропитания предназначен для использования в изделиях с импульсной нагрузкой, время работы которой лежит в диапазоне единиц-десятков микросекунд при периоде повторения в десятки-сотни микросекунд. Основная задача источника в таких условиях заключается в заряде выходного ёмкостного накопителя в промежутках между импульсами нагрузки. Принцип разделения источника на два взаимодополняющих: мощного и маломощного, не требуя значительных затрат, позволяет уменьшить суммарную мощность ИП по сравнению с другими преобразователями, работающими в аналогичном режиме. Мощность источника исходит из средней мощности потребления нагрузки с учётом выключения ИП в момент импульса нагрузки. Всё это позволяет оптимизировать КПД и размеры всего устройства, уменьшить стоимость и вес разработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Белов Л.** Мощные усилители сверхвысоких частот, *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, 6 (2006) 66–70.
- [2] **Kitamura T., Yamada M., Harada S., Koyama M.** Development of High-Power Density Interleaved DC/DC Converter with SiC Devices, 196. (2016) 22–29.
- [3] **Butler S.** Enabling a Powerful Decade of Changes [Flyback]. *IEEE Power Electronics Magazine*, 6 (2019) 18–26.
- [4] **Pesce C., Riedemann J., Pena R., Jara W., Maury C., Villalobos R.** A Modified Step-Up DC-DC Flyback Converter with Active Snubber for Improved, *Energies*, 12 (2066) (2019) 1–17.
- [5] **Ravi V., Lakshminarasamma N.** Steady state voltage gain of flyback converters for high voltage low power applications, 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), (2016) 1–6.
- [6] **Barsoum N., Stanley G.** Design of High Voltage Low Power Supply Device, *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 3 (1) (2015) 6–12.
- [7] **Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О.** Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора. Часть 2, *Современная электроника*, 1 (2008) 42–47.
- [8] **Chen W., Ruan X., Yan H., Tse C.K.** DC/DC Conversion Systems Consisting of Multiple Converter Modules: Stability, Control, and Experimental Verifications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6 (24) (2009) 1463–1474.
- [9] **Keogh B., Long B., Leisten J.** Design improvements for Primary-Side-Regulated high-power flyback converters in Continuous-Conduction-Mode, 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), (2015) 492–497.
- [10] **Ravi V., Lakshminarasamma N.** Modeling, Analysis and Implementation of High Voltage Low Power Flyback Converter Feeding Resistive Loads, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 5 (54) (2018) 4682–4695.
- [11] **Hyeok-Jin Y.** High-Voltage Input and Low-Voltage Output Power Supply for Modular Multi-Level Converter, 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), (2016) 157–162.



[12] **Davari P., Zare F., Ghosh A.** Parallel and Series Configurations of Flyback Converter for Pulsed Power Applications, 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), (2012) 1517–1522.

[13] **Zelnik R., Prazenica M.** Multiple Output Flyback Converter Design, Transactions on Electrical Engineering, 8 (3) (2019) 32–39.

[14] **Leuenberger D., Biela J.** Accurate and Computationally Efficient Modeling of Flyback Transformer Parasitics and their Influence on Converter Losses, 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), (2015) 1–10.

[15] **Bielskis E., Baskys A., Sapurov M.** Impact of Transformer Design on Flyback Converter Voltage Spikes, Elektronika ir Elektrotechnika, 22(5) (2016) 58–61.

[16] **Bielskis E., Šapurov M., Platakis A.** Investigation of Flyback Transformer Flux Leakage Reduction Ways, Mokslas – Lietuvos ateitis, 9(3) (2017) 312–317.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ОРЕЛ Евгений Александрович** – инженер, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт "Вектор", без степени.

E-mail: orel.geny@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 16.05.2020

### REFERENCES

[1] **L. Belov**, Moshchnyye usiliteli sverkhvysokikh chastot, Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes, 6 (2006) 66–70.

[2] **T. Kitamura, M. Yamada, S. Harada, M. Koyama**, Development of High-Power Density Interleaved DC/DC Converter with SiC Devices, 196. (2016) 22–29.

[3] **S. Butler**, Enabling a Powerful Decade of Changes [Flyback]. IEEE Power Electronics Magazine, 6 (2019) 18–26.

[4] **C. Pesce, J. Riedemann, R. Pena, W. Jara, C. Maury, R. Villalobos**, A Modified Step-Up DC-DC Flyback Converter with Active Snubber for Improved, Energies, 12 (2066) (2019) 1–17.

[5] **V. Ravi, N. Lakshminarasamma**, Steady state voltage gain of flyback converters for high voltage low power applications, 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), (2016) 1–6.

[6] **N. Barsoum, G. Stanley**, Design of High Voltage Low Power Supply Device, Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering, 3 (1) (2015) 6–12.

[7] **Ye. Vladimirov, V. Lantsov, O. Lebedeva**, Vysokovoltnyy impulsnyy istochnik pitaniya bolshoy moshchnosti s upravleniyem ot mikroprotsessora. Chast 2, Sovremennaya elektronika, 1 (2008) 42–47.

[8] **W. Chen, X. Ruan, H. Yan, C.K. Tse**, DC/DC Conversion Systems Consisting of Multiple Converter Modules: Stability, Control, and Experimental Verifications, IEEE Transactions on Power Electronics, 6 (24) (2009) 1463–1474.

[9] **B. Keogh, B. Long, J. Leisten**, Design improvements for Primary-Side-Regulated high-power flyback converters in Continuous-Conduction-Mode, 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), (2015) 492–497.

[10] **V. Ravi, N. Lakshminarasamma**, Modeling, Analysis and Implementation of High Voltage Low Power Flyback Converter Feeding Resistive Loads, IEEE Transactions on Industry Applications, 5 (54) (2018) 4682–4695.

[11] **Y. Hyeok-Jin**, High-Voltage Input and Low-Voltage Output Power Supply for Modular Multi-Level Converter, 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), (2016) 157–162.

[12] **P. Davari, F. Zare, A. Ghosh**, Parallel and Series Configurations of Flyback Converter for Pulsed Power Applications, 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), (2012) 1517–1522.

[13] **R. Zelnik, M. Prazenica**, Multiple Output Flyback Converter Design, Transactions on Electrical Engineering, 8 (3) (2019) 32–39.

[14] **D. Leuenberger, J. Biela**, Accurate and Computationally Efficient Modeling of Flyback Transformer Parasitics and their Influence on Converter Losses, 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), (2015) 1–10.

[15] **E. Bielskis, A. Baskys, M. Sapurov**, Impact of Transformer Design on Flyback Converter Voltage Spikes, Elektronika ir Elektrotechnika, 22(5) (2016) 58–61.

[16] **E. Bielskis, M. Šapurov, A. Platakis**, Investigation of Flyback Transformer Flux Leakage Reduction Ways, Mokslas – Lietuvos ateitis, 9(3) (2017) 312–317.

### THE AUTHORS

**OREL Evgeniy A.** – *NII Vector*.

E-mail: orel.geny@yandex.ru

**Received: 16.05.2020**