

Улучшение технических характеристик АФАР импульсных РЛС за счет снижения неравномерности энергопотребления передающих модулей

Н. А. Кушнерев¹, М. В. Родин^{2✉}, Д. О. Попов²

¹АО «Концерн "Вега"», Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

✉ mvrodin@bmstu.ru

Аннотация

Введение. В передающих трактах импульсных радиолокационных систем (РЛС) с активными фазированными антенными решетками (АФАР) при формировании зондирующих радиоимпульсов часто используют периодический заряд/разряд емкостных накопителей электроэнергии. При этом оконечный усилитель мощности передающего модуля потребляет электроэнергию в течение малых интервалов времени. Однако импульсный характер работы усилителя обуславливает неравномерность энергопотребления зарядного устройства накопителя. Это приводит к ухудшению электромагнитной совместимости аппаратуры РЛС и снижению надежности функционирования из-за дополнительной нагрузки на систему электроснабжения. Для уменьшения неравномерности энергопотребления совместно с накопителями используют сглаживающие дроссели, ухудшающие массогабаритные характеристики и даже информативность РЛС. Таким образом, актуальной является задача снижения неравномерности энергопотребления передающих модулей без ухудшения их массогабаритных характеристик.

Цель работы. Показать возможность построения устройства заряда емкостного накопителя, обеспечивающего равномерное энергопотребление передающего модуля за счет неизменной мощности заряда, для улучшения ряда технических характеристик АФАР.

Материалы и методы. Анализ методов заряда емкостных накопителей электроэнергии и исследование возможности построения устройства заряда накопителя неизменной мощностью основываются на теории электрических цепей. Анализ работы устройства заряда накопителя неизменной мощностью проводится в программе Micro-Cap и на экспериментальном макете с учетом реальных длительностей и скважностей зондирующих радиоимпульсов, используемых в РЛС.

Результаты. Предложено новое устройство заряда емкостного накопителя неизменной мощностью, рассмотрен принцип его функционирования, разработаны имитационная модель и экспериментальный макет, подтвердившие возможность равномерного энергопотребления передающего модуля АФАР без использования громоздких сглаживающих дросселей. Представлены направления дальнейшего совершенствования зарядного устройства.

Заключение. Предложенное устройство заряда емкостного накопителя мощностью 120 Вт для передающего модуля радиолокационной АФАР отличается простотой реализации и высокой энергоэффективностью заряда. Оно может быть рекомендовано для применения в перспективных РЛС с АФАР для улучшения ряда технических характеристик.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, радиолокационная система, передающий модуль, усилитель мощности, зарядное устройство накопителя

Для цитирования: Кушнерев Н. А., Родин М. В., Попов Д. О. Улучшение технических характеристик АФАР импульсных РЛС за счет снижения неравномерности энергопотребления передающих модулей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 1. С. 88–101. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-88-101

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.06.2024; принята к публикации после рецензирования 10.09.2024; опубликована онлайн 28.02.2025

Improving the Technical Characteristics of AESA Pulse Radars by Reducing the Power Consumption Droop of Transmitting Modules

Nikolay A. Kushnerev¹, Mikhail V. Rodin^{2✉}, Dmitriy O. Popov²

¹JSC "Vega", Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

✉ mvrodin@bmstu.ru

Abstract

Introduction. When shaping radar signals, the transmission paths of pulsed radars with active electronically scanned arrays (AESA) frequently use a periodic charge/discharge of capacitive energy storage devices. In such cases, the power amplifier of the transmitting module consumes electricity over short time intervals. However, the pulsed nature of the amplifier operation causes uneven power consumption of the storage charger. This leads to a deterioration in the electromagnetic compatibility of radar equipment and a decrease in operation reliability due to the additional load on the power supply system. To reduce the unevenness of power consumption, smoothing choke coils are used together with storage devices, which degrade the weight–size characteristics and the entire performance of the radar. Thus, the task of reducing the uneven power consumption droop of transmitting modules without compromising their weight–size characteristics appears relevant.

Aim. To demonstrate the possibility of constructing a charger for a capacitive storage device that ensures uniform power consumption of the transmitting module due to constant charge power, with the purpose of improving a number of technical characteristics of the AESA.

Materials and methods. A review of methods for charging capacitive storage devices and an analysis of the possibility of constructing a charger for a storage device with constant power using the theory of electrical circuits. The operation of a constant-power charger was analyzed in the Micro-Cap environment and using its experimental prototype, taking the actual durations and frequencies of radar signals into account.

Results. A new charger for a capacitive storage device with constant power is proposed and the principle of its operation is considered. A simulation model and an experimental prototype are developed, which confirmed the possibility of significantly reducing the power consumption droop of the AESA transmitting module without the use of bulky smoothing chokes. Directions for further improvement of the charger are outlined.

Conclusion. The proposed 120-W capacitor storage charger for the radar AESA transmitting module is characterized by simplicity of implementation and a high energy efficiency of the charge. This charger can be recommended for use in advanced radars with AESA for the purpose of improving a number of technical characteristics.

Keywords: active electronically scanned array, radar, transmitting module, power amplifier, storage charger

For citation: Kushnerev N. A., Rodin M. V., Popov D. O. Improving the Technical Characteristics of AESA Pulse Radars by Reducing the Power Consumption Droop of Transmitting Modules. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 1, pp. 88–101. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-88-101

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 07.06.2024; accepted 10.09.2024; published online 28.02.2025

Введение. Активные фазированные антенные решетки (АФАР) в настоящее время широко востребованы в комплексах дистанционного мониторинга различного базирования и назначения с импульсными радиолокационными системами (РЛС) как информационными датчиками [1, 2].

В передающих трактах импульсных РЛС с АФАР при формировании зондирующих радиоимпульсов обычно используют периодический

заряд/разряд емкостных накопителей электроэнергии (НЭ). Таким образом осуществляют электропитание оконечного усилителя мощности (УМ) передающего модуля (ПМ). В этом случае УМ потребляет электроэнергию в течение относительно малых (по сравнению с периодом повторения $T_{\text{и}}$ зондирующих радиоимпульсов) интервалов времени $t_{\text{и}}$, соответствующих длительности зондирующих радиоимпульсов (рис. 1).

Улучшение технических характеристик АФАР импульсных РЛС за счет снижения неравномерности энергопотребления передающих модулей
Improving the Technical Characteristics of AESA Pulse Radars by Reducing the Power Consumption Droop of Transmitting Modules

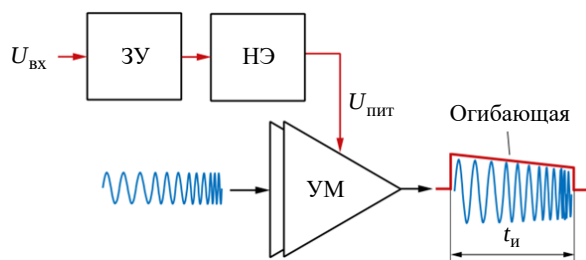


Рис. 1. Структурная схема тракта электропитания УМ

Fig. 1. Block diagram of a power supply path of the power amplifier

Емкостные НЭ в передающих трактах РЛС используют для получения импульсов тока электропитания УМ самой различной длительности [3–10]. Длительность процесса заряда НЭ может варьироваться в пределах от долей микросекунд до десятков миллисекунд и даже более в зависимости от длительности $t_{\text{и}}$ и скважности Q зондирующих радиоимпульсов, определяемых назначением и режимами работы РЛС.

Назначением зарядного устройства (ЗУ) в схеме на рис. 1 является энергетически эффективное преобразование электроэнергии входного источника $U_{\text{ВХ}}$ (аккумулятора, солнечной батареи, генератора переменного/постоянного тока, источника электропитания промежуточной шины и т. д.) и заряд НЭ в паузах между формируемыми зондирующими радиоимпульсами до необходимого напряжения $U_{\text{пит}}$.

Можно выделить следующие требования, предъявляемые обычно к ЗУ [11–16]:

1. Обеспечение равномерного потребления мощности от входного источника $U_{\text{ВХ}}$ постоянного тока (или синусоидального от источника $U_{\text{ВХ}}$ переменного тока) для повышения надежности функционирования РЛС (из-за снижения нагрузки на первичный источник электроэнергии) и улучшения электромагнитной совместимости ее аппаратуры.

2. Согласование напряжения $U_{\text{ВХ}}$ с напряжением на НЭ в конце интервала заряда (предзарядного напряжения) с учетом поддержки устойчивой работы ЗУ в условиях изменения сопротивления нагрузки от нуля (случай разряженного НЭ) до холостого хода (случай заряженного НЭ).

3. Осуществление желаемых алгоритмов заряда НЭ для достижения оптимальных энергетических и/или динамических характеристик.

Также в ряде случаев ЗУ должно обладать специфическими сервисными функциями (регулирование выходного напряжения; дистанционное включение и отключение; защита от аварийных режимов работы; контроль выходного напряжения; гальваническая развязка и т. д.). На ЗУ распространяются и традиционные требования, предъявляемые к таким устройствам: высокие показатели надежности и электромагнитной совместимости; высокий КПД; малые масса и габариты и т. д.

Практические аспекты разработки и применения ЗУ в передающих трактах РЛС с АФАР находятся в фокусе внимания профессионального сообщества. Прежде всего это обусловлено тем, что в научно-технической литературе преимущественно рассматриваются высоковольтные ЗУ [17–27], применяемые совместно с электровакуумными усилительными приборами (клинотронами, лампами бегущей волны), тогда как низковольтным ЗУ, входящим в состав ПМ АФАР, уделяется гораздо меньше внимания. По большому счету это объясняется тем, что разработчики в качестве низковольтных ЗУ часто используют модульные стабилизирующие преобразователи напряжения типа AC-DC или DC-DC (в зависимости от рода тока источника $U_{\text{ВХ}}$), выпускаемые промышленностью серийно. Однако такие преобразователи должны дополняться дросселями на выходе для снижения неравномерности энергопотребления от источника $U_{\text{ВХ}}$, что ухудшает массогабаритные характеристики ПМ, а значит, АФАР в целом. Кроме того, подключение к выходу DC-DC-преобразователя НЭ с большой емкостью зачастую приводит к некорректной работе преобразователя, что требует применения дополнительного ограничителя выходного тока или вообще исключает возможность эксплуатации выбранного типа преобразователя. Также из-за значительной модуляции выходного тока для устойчивой и надежной работы DC-DC-преобразователя, как правило, требуется не менее чем 50 %-й запас по его выходной мощности относительно средней мощности потребления УМ, что заметно увеличивает массу ЗУ. По сути, емкостный НЭ с импульсной нагрузкой является нестандартным потребителем электроэнергии, и применение для его заряда унифицированных

DC-DC-преобразователей является вынужденным решением, зачастую неудовлетворительным.

Цель данной статьи – предложить вариант нового ЗУ, обеспечивающего, в отличие от известных, более равномерное энергопотребление от источника входного напряжения в течение циклов заряда/разряда НЭ без применения сглаживающих дросселей на выходе, с одной стороны, и устойчивую и надежную работу во всем диапазоне изменения параметров нагрузки – с другой.

Постановка задачи. При разработке современных и перспективных РЛС, как правило, предъявляются довольно жесткие требования к массогабаритным, энергетическим и динамическим параметрам ЗУ при их использовании в ПМ АФАР для заряда емкостных НЭ. Поэтому импульсные преобразователи напряжения повышенной частоты часто находят применение в составе ЗУ. Это благоприятствует, во-первых, улучшению массогабаритных параметров ПМ, в том числе и за счет увеличения КПД, а во-вторых, совершенствованию процесса управления заряда НЭ.

Для заряда емкостных НЭ, обладающих, как правило, малым внутренним сопротивлением, используют ЗУ с ограничением выходного тока. Короткое замыкание в нагрузке ЗУ без этого ограничения может привести к повреждению источника входного напряжения ($U_{вх}$). Для ограничения выходного тока в состав ЗУ включают токоограничивающие элементы. Если это резистивный элемент, то КПД заряда, определяемый как отношение запасенной в НЭ электроэнергии к потребленной от входного источника $U_{вх}$ за время заряда, никогда не превысит 50 %, каким бы ни было сопротивление резистивного элемента. Как известно, это сопротивление влияет только на скорость заряда НЭ [28]. В силу этого резистивный заряд НЭ обычно не используют в ПМ.

Так, например, в ЗУ, представляющем собой источник постоянного напряжения U_0 с резистивным токоограничивающим элементом, мощность потребления максимальна в начале заряда и уменьшается к его окончанию. Ток заряда i_3 и напряжение u_c на НЭ, как известно, в этом случае будут изменяться по экспоненциальному закону [15]:

$$i_3(t) = \frac{U_0}{R_3} \exp\left(-\frac{t}{R_3 C_{НЭ}}\right);$$

$$u_c(t) = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{R_3 C_{НЭ}}\right)\right],$$

где R_3 – сопротивление токоограничивающего резистивного элемента; $C_{НЭ}$ – емкость НЭ.

Тогда выражение для потребляемой мощности будет иметь вид

$$p_0(t) = \frac{U_0^2}{R_3} \exp\left(-\frac{t}{R_3 C_{НЭ}}\right).$$

Если в роли токоограничивающего элемента выступает дроссель, то можно говорить о значительном повышении КПД заряда НЭ (рис. 2). С одной стороны, дроссель $L_{огр}$ ограничивает ток заряда НЭ $C_{НЭ}$, с другой – является элементом сглаживающего LC-фильтра совместно с НЭ, снижая амплитуду пульсации потребляемого тока $I_{вх}$ от входного источника $U_{вх}$. При этом энергия, запасаемая в дросселе, невелика по сравнению с энергией, запасаемой в НЭ.

Обеспечение допустимой амплитуды пульсации тока потребления $I_{вх}$ достигается правильным выбором индуктивности дросселя $L_{огр}$. Чем меньше индуктивность дросселя, тем выше амплитуда пульсации тока потребления (но при этом малы габаритные размеры и масса дросселя). И наоборот, для достижения малой амплитуды пульсации тока потребления индуктивность дросселя, а значит, его масса и габариты должны быть велики.

Особенно остро проблема неудовлетвори-

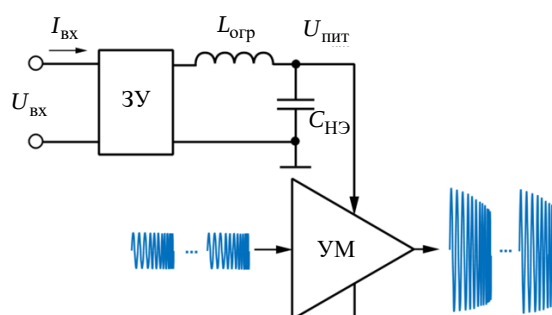


Рис. 2. Схема тракта электропитания оконечного УМ с дросселем на выходе

Fig. 2. Circuit diagram of the power supply path of the power amplifier with a smoothing choke at the output

тельных массогабаритных показателей дросселя $L_{огр}$ проявляет себя в случае больших длительностей зондирующих радиоимпульсов (100 мкс и более), низкой частоты их повторения (менее 1 кГц) и работы с большим сколом напряжения на НЭ (5 % и более). Тогда масса дросселя может быть соизмерима с суммарной массой ЗУ и НЭ или даже превышать ее.

Отметим также, что при использовании дросселя с большой индуктивностью $L_{огр}$ совместно с накопительным конденсатором $C_{НЭ}$ при формировании зондирующих радиоимпульсов (например, при смене режима излучения в многофункциональной РЛС) в начале пачки может возникать переходный процесс со значительной амплитудой напряжения, что негативно отражается на информативности РЛС (рис. 3).

В ЗУ, осуществляющих заряд емкостного НЭ неизменным током I_3 , потребляемая мощность минимальна в начале заряда и возрастает в процессе заряда. В этом случае напряжение u_c на НЭ и потребляемая мощность p_0 изменяются по линейному закону [15]:

$$u_c(t) = \frac{I_3 t}{C_{НЭ}};$$

$$p_0(t) = \frac{I_3^2 t}{C_{НЭ}}.$$

Работа ЗУ в режиме заряда НЭ неизменным током характеризуется высоким значением КПД заряда. Однако линейное изменение напряжения на НЭ приводит к тому, что мощ-

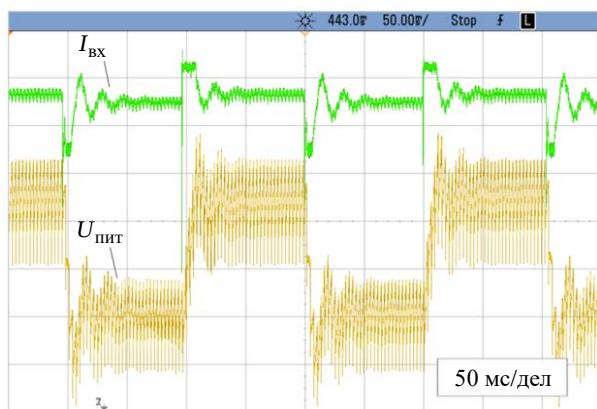


Рис. 3. Переходные отклонения напряжения и тока при смене режима излучения РЛС

Fig. 3. Transient voltage and current deviations when changing the radar operating mode

ность заряда, а значит, и потребляемая от входного источника мощность $U_{вх}$ также изменяется по линейному закону, нарастая к концу зарядного цикла. Это приводит к увеличению установленной мощности как самого ЗУ, так и источника $U_{вх}$, а также к возникновению низкочастотных пульсаций (с частотой повторения зондирующих радиоимпульсов) напряжения на выходе источника. В результате затрудняется работа как самого ЗУ, так и других потребителей электроэнергии в составе РЛС от того же источника $U_{вх}$.

При работе ЗУ в режиме заряда неизменной мощностью (а равно потребления неизменной мощности) напряжение u_c на НЭ и ток заряда i_3 могут быть представлены как [15]

$$u_c(t) = \sqrt{\frac{2P_0 t}{C_{НЭ}}};$$

$$i_3(t) = \sqrt{\frac{P_0 C_{НЭ}}{2t}},$$

где P_0 – потребляемая мощность (без учета КПД ЗУ).

Очевидно, в случае малого начального напряжения НЭ ток заряда, чтобы обеспечить неизменную мощность заряда, может превысить допустимое значение. Поэтому он должен быть ограничен в начале зарядного цикла [22]. Обычно ограничение тока заряда осуществляют за счет токоограничивающего элемента или промежуточных дозирующих конденсаторов и/или дросселей [15]. Последние способны запасать энергию и затем отдавать ее в НЭ малыми и постоянными порциями (дозами) – частота дозирования и энергия каждой дозы должны быть постоянными.

Заряд НЭ неизменной мощностью, обеспечивая практически такие же значения КПД заряда, как и при заряде от источника неизменного тока, позволяет в то же время практически устранить низкочастотные пульсации напряжения на выходе источника $U_{вх}$, обусловленные неравномерностью энергопотребления импульсной нагрузкой (т. е. окончательным УМ), которые оказывают неблагоприятное влияние на работу других потребителей электроэнергии в РЛС (приемников, вычислителей и т. д.) [15]. При этом необходимым условием равномерности

выходного тока ЗУ является баланс мощности, отдаваемой ЗУ в НЭ, и мощности, потребляемой УМ от НЭ (с учетом потерь) за период следования зондирующих радиоимпульсов.

Заряд НЭ неизменной мощностью особенно важен в бортовых импульсных РЛС, имеющих, как правило, первичные источники электроэнергии ограниченной мощности. Например, наиболее часто в качестве первичного источника электроэнергии в системах электропитания бортовых авиационных РЛС используют трехфазные генераторы переменного тока с выходным напряжением 115/200 В 400 Гц и сети постоянного тока напряжением 27 и 270 В по ГОСТ Р 54073–2017, а на космических аппаратах – солнечные батареи с аккумуляторами (наибольшее распространение получила сеть постоянного тока с номинальным напряжением 28 В, но в настоящее время разрабатываются и сети постоянного тока напряжением 100 В). Вместе с тем для бортовой сети постоянного тока космических аппаратов типовым значением допустимой амплитуды пульсации тока, потребляемого нагрузкой, является 10...20 % от среднего значения тока потребления, а для авиационной сети постоянного тока напряжением 270 В (по ГОСТ Р 54073–2017) – и вовсе не более 7 %. Для примера формы тока потребления и напряжения на НЭ в ПМ АФАР космического базирования с ЗУ на основе отечественного серийного модуля DC-DC-преобразователя представлены на рис. 4, а.

Как видно из осциллограмм, размах пульсации тока потребления ЗУ (около 1.5 А) с частотой следования зондирующих радиоимпульсов весьма высок и примерно равен среднему току потребления (что не всегда допустимо на практике). Это обусловлено недостаточной индуктивностью выходного дросселя ЗУ из-за массогабаритных ограничений, накладываемых на ПМ.

При увеличении скважности Q зондирующих радиоимпульсов неравномерность энергопотребления ЗУ ухудшается (рис. 4, б) – размах пульсации тока потребления ЗУ возрастает. В этом случае требуемые масса и габариты выходного дросселя практически не позволяют использовать его в бортовых АФАР.

В свою очередь, неравномерность энергопотребления обуславливает снижение надежности функционирования РЛС (из-за дополнительной нагрузки на первичный источник электроэнергии), ухудшение электромагнитной совместимости, энергетической эффективности и даже информативности [29]. Поэтому задача уменьшения неравномерности энергопотребления ПМ АФАР является актуальной для разработчиков РЛС.

Решение задачи. Авторами предлагается ЗУ, обеспечивающее неизменную мощность заряда емкостного НЭ. Это позволяет, с одной стороны, отказаться от сглаживающих дросселей на выходе ЗУ (а значит, улучшить массогабаритные показатели АФАР), а с другой – значительно уменьшить неравномерность энергопотребления ЗУ (а значит, улучшить электромагнитную сов-

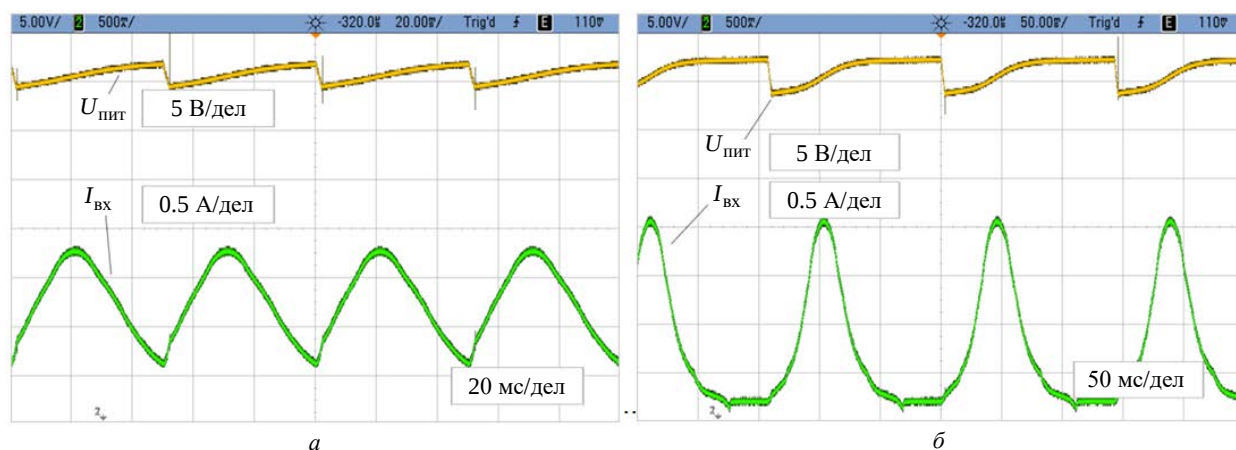


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на накопителе и тока потребления в ПМ АФАР:

а – $t_n = 2$ мс, $Q = 25$; б – $t_n = 3$ мс, $Q = 50$

Fig. 4. Voltage on the storage device and current consumption waveforms in the transmitting module:

а – $t_n = 2$ ms, $Q = 25$; б – $t_n = 3$ ms, $Q = 50$

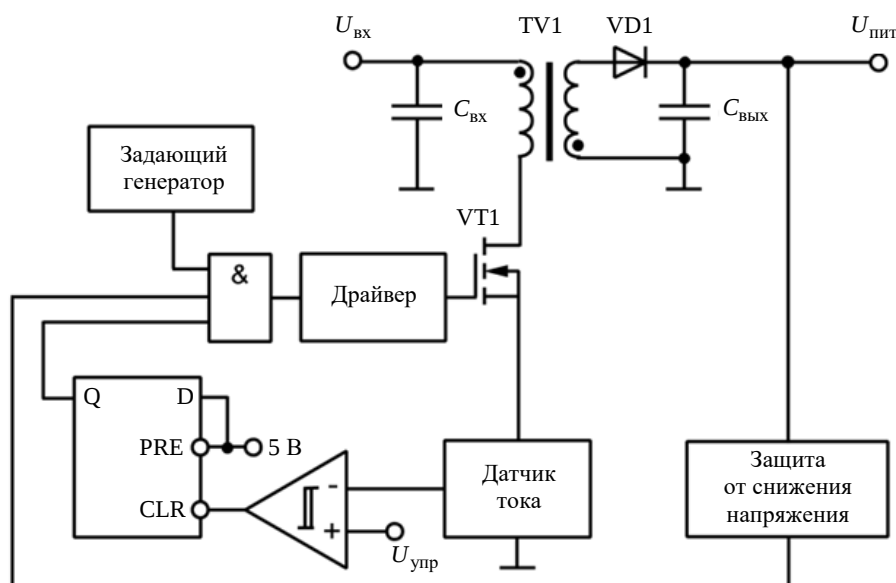


Рис. 5. Схема предлагаемого ЗУ
 Fig. 5. Circuit diagram of the proposed charger

местимость аппаратуры АФАР). На рис. 5 представлена схема разработанного ЗУ.

В основе ЗУ – обратноходовой преобразователь напряжения, к выходу которого подключен НЭ, периодически разряжаемый в цепь электропитания УМ через дополнительный регулятор напряжения для более полного использования энергии, запасенной в НЭ (на рис. 5 не показаны) [30]. В ЗУ имеет место периодическое накопление дозы энергии в магнитном поле двухобмоточного дросселя TV1 с последующей передачей ее в $C_{\text{ВЫХ}}$ и НЭ. Требуемый режим заряда НЭ получают за счет изменения дозы энергии, подводимой к дросселю TV1, которая определяется временем открытого состояния транзисторного ключа VT1.

Каждый цикл работы ЗУ характеризуется двумя этапами.

I этап – это накопление энергии в магнитном поле двухобмоточного дросселя TV1 (рис. 5). Транзисторный ключ VT1 открывается в начале каждого цикла работы задающего генератора. Ток через транзистор VT1 (совпадающий с током первичной обмотки двухобмоточного дросселя TV1) начинает нарастать практически линейно, его значение контролируется компаратором по уровню сигнала датчика тока в цепи истока транзистора (установка датчика в цепи истока транзистора значительно упрощает схему управления из-за отсутствия

необходимости гальванической развязки его сигнала). По достижении сигналом датчика тока заданного порога $U_{\text{упр}}$ схема управления закрывает транзистор VT1 до следующего цикла работы задающего генератора. Значение накопленной в двухобмоточном дросселе TV1 энергии пропорционально квадрату напряжения $U_{\text{упр}}$. Последнее задает требуемый уровень мощности заряда НЭ.

II этап – передача накопленной в магнитном поле двухобмоточного дросселя TV1 энергии в НЭ. После закрытия транзисторного ключа VT1 энергия, запасенная в магнитном поле двухобмоточного дросселя TV1, начинает поступать через вторичную обмотку и диод VD1 в НЭ. Параметры двухобмоточного дросселя TV1 и задающего генератора выбирают таким образом, чтобы вся энергия, запасенная в дросселе, успела поступить в НЭ до начала следующего цикла работы ЗУ, т. е. преобразователь всегда работает в режиме прерывистых токов, не переходя в режим непрерывных токов.

Вышеизложенное справедливо для рабочего диапазона напряжений на НЭ (в пределах скола). При напряжении на НЭ меньше минимального (например, при включении ЗУ и выходе его на рабочий режим) ЗУ переходит в режим непрерывных токов и отдает на выход меньшую мощность.

В предложенной схеме ЗУ регулировка уровня зарядной мощности возможна как за

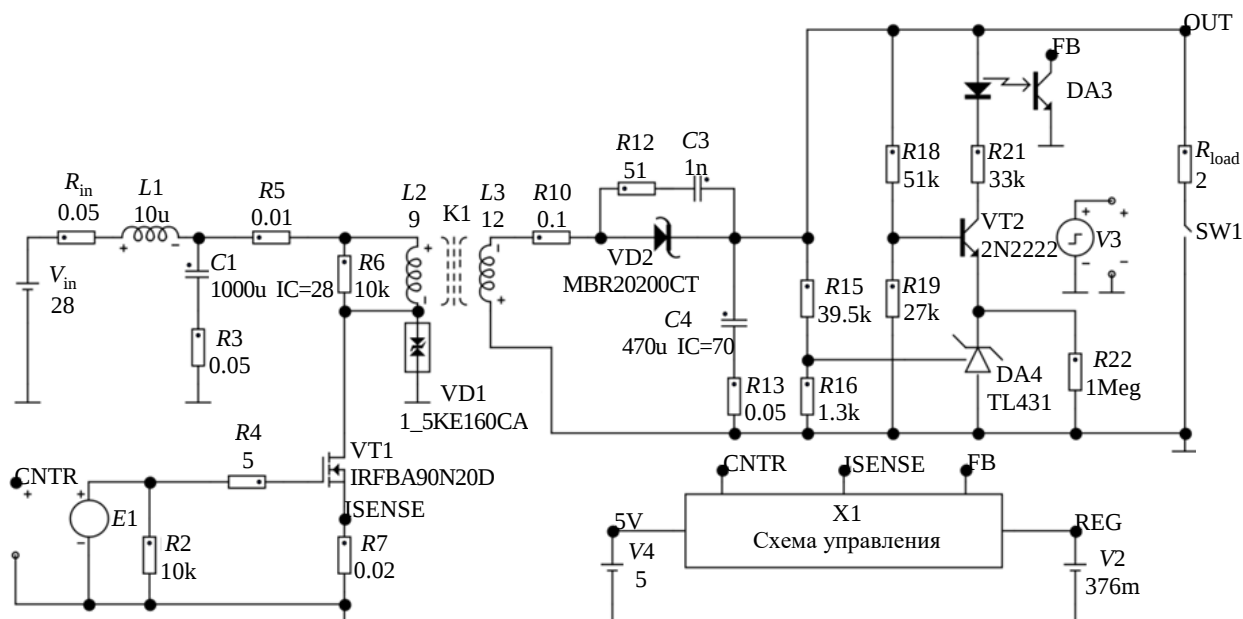


Рис. 6. Схема имитационной модели предлагаемого ЗУ

Fig. 6. Simulation model of the proposed charger

счет изменения напряжения $U_{упр}$, так и за счет изменения частоты задающего генератора. При этом уровень зарядной мощности прямо пропорционален частоте генератора (при фиксированном напряжении $U_{упр}$).

С точки зрения режимов работы ЗУ процессы заряда и разряда НЭ не имеют различий: ЗУ постоянно передает в НЭ при его заряде и в нагрузку при разряде фиксированную мощность. Таким образом обеспечивается равномерность энергопотребления ЗУ.

Результаты имитационного моделирования и экспериментальной отработки. Схематическая имитационная модель предлагаемого авторами ЗУ, разработанная в программе Micro-Cap, приведена на рис. 6.

При входном напряжении $U_{вх} = 28$ В ЗУ обеспечивает на НЭ (конденсатор C4) напряжение до $U_{пит} = 70$ В. Уровень мощности заряда задается источником напряжения V2. Частота задающего генератора составляет 60 кГц.

Как следует из полученных осциллограмм (рис. 7), импульсная выходная мощность ЗУ достигает 2450 Вт, средняя мощность в течение импульса тока нагрузки – 1800 Вт. При скважности зондирующих радиоимпульсов $Q = 15$ средняя выходная мощность ЗУ составляет 120 Вт. Форма тока потребления, независимо от

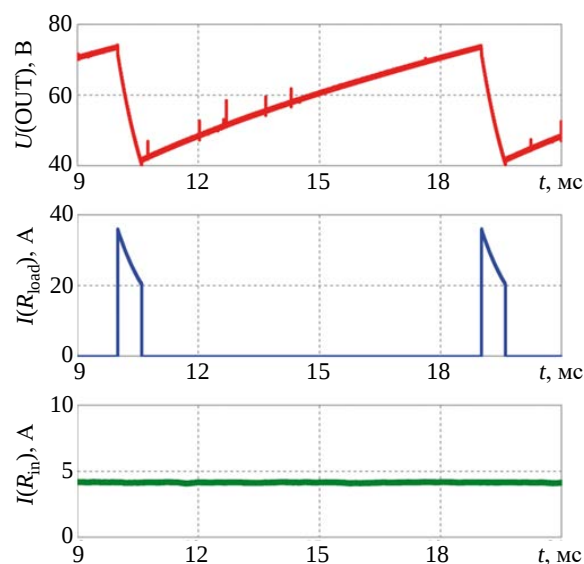


Рис. 7. Осциллограммы напряжения и токов в схеме модели

Fig. 7. Voltage and current waveforms in the simulation model

режима заряда/разряда, практически не меняется, что подтверждает равномерность энергопотребления от источника V_{in} .

Для верификации данных имитационного моделирования был изготовлен и исследован макет ЗУ, работающий на имитатор импульсной нагрузки. Внешний вид макета ЗУ и полученные в результате его отработки осциллограммы напряжений и токов представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

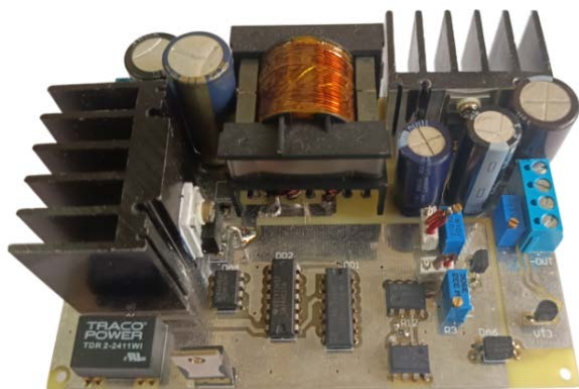


Рис. 8. Фотография макета ЗУ

Fig. 8. Photo of the charger prototype

Как видно из осциллограмм (рис. 9, *а* и *б*), при значении скола напряжения на НЭ 15 % (длительность радиоимпульса $t_{\text{и}} = 200$ мкс, скважность $Q = 15$) и даже при значении скола 45 % (длительность радиоимпульса $t_{\text{и}} = 600$ мкс, скважность $Q = 15$) модуляция тока потребления ЗУ от входного источника $U_{\text{вх}}$ с частотой

следования зондирующих радиоимпульсов не наблюдается. Измеренное значение КПД ЗУ составило 90.5 %. Аналогичные результаты были получены для разных скважностей (рис. 9, *в* и *з*) зондирующих радиоимпульсов (длительность радиоимпульса $t_{\text{и}} = 100$ мкс).

Обсуждение результатов. Результаты имитационного моделирования и экспериментальной отработки макета ЗУ подтвердили адекватность теоретических представлений о возможности заряда ЗУ неизменной мощностью и позволили исследовать его поведение с учетом реальных свойств элементов, входящих в его состав.

Итак, заряд НЭ неизменной мощностью независимо от уровня напряжения на НЭ, обеспечивая высокий КПД заряда, позволяет за счет лучшей равномерности энергопотребления ЗУ существенно уменьшить установленную мощность первичного источника электроэнергии системы электроснабжения РЛС. Кроме того, устраняются низкочастотные пульсации

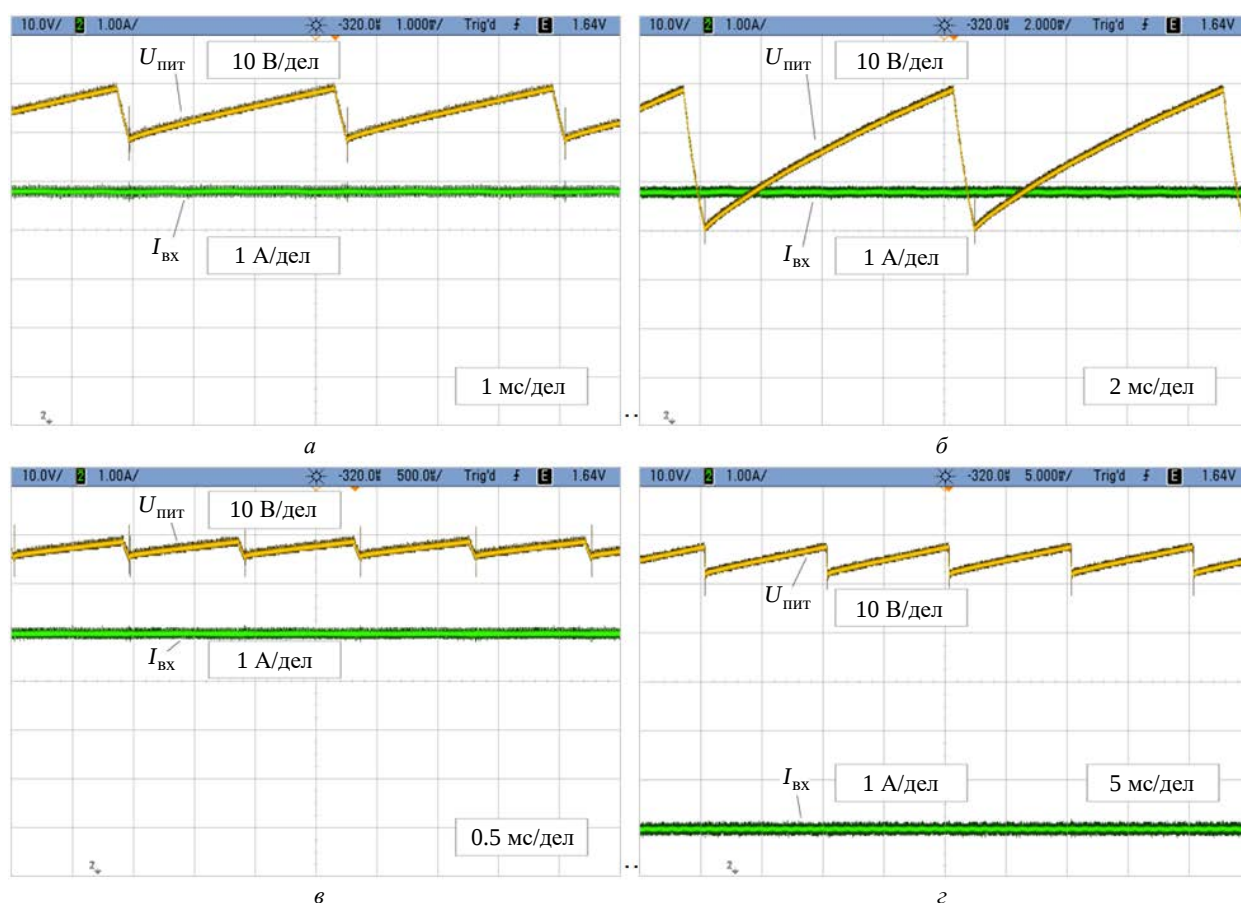


Рис. 9. Осциллограммы напряжений и тока в макете ЗУ при разных значениях скола 15 % (*а*) и 43 % (*б*) и скважности радиоимпульсов 10 (*в*) и 50 (*з*)

Fig. 9. Voltage and current waveforms in the charger prototype at different droop values of 15 % (*a*) and 43 % (*б*) and the duty cycle of radar signal of 10 (*в*) and 50 (*з*)

напряжения на входе ЗУ, которые оказывают неблагоприятное влияние на работу других потребителей в составе аппаратуры РЛС. Поэтому заряд НЭ неизменной мощностью особенно важен в бортовых РЛС, имеющих, как правило, системы электроснабжения ограниченной мощности. Помимо этого, предложенное ЗУ дает возможность отказаться от сглаживающего дросселя на своем выходе, что позволяет улучшить массогабаритные параметры ПМ в целом (а значит, и АФАР). Само ЗУ имеет высокий КПД (свыше 90 %), малые массу и габаритные размеры, высокую надежность (в том числе при работе на НЭ большой емкости).

Основным недостатком предложенной схемы ЗУ является посредственная стабильность предзарядного напряжения на НЭ. Без дополнительной подстройки уровня выходной мощности ЗУ в процессе работы происходит плавное изменение предзарядного напряжения из-за девиации эквивалентного сопротивления УМ по постоянному току по мере его прогрева, изменения КПД самого ЗУ, дрейфа параметров датчика тока и индуктивности двухобмоточного дросселя. Поэтому неперенным условием дальнейшего совершенствования представленного ЗУ является разработка алгоритмов управления уровнем зарядной мощности НЭ в зависимости от временных параметров зондирующих радиоимпульсов.

Анализ уровня развития современной элементной базы и особенностей режимов ее работы в предложенном ЗУ показывает, что без заметного ухудшения КПД его рабочая частота может быть поднята до 200...250 кГц. Мощность ЗУ также может быть повышена до 200 Вт, что соответствует уровням потребления мощности большинства ПМ АФАР, работающих в различных диапазонах длин волн. Оценка удельной мощности ЗУ близка к показателям унифицированных DC-DC-преобразователей, выпускаемых промышленностью серийно, и может составить 2...4 кВт/кг. Также следует учитывать, что предложенное ЗУ может эксплуатироваться практически без запаса по выходной мощности, который необходим для ЗУ на основе серийных DC-DC-преобразователей.

Кроме того, в случае необходимости создания более мощных ЗУ без дополнительных схе-

технических усложнений возможна работа неограниченного количества таких ЗУ на один НЭ.

Таким образом, предложенное ЗУ емкостного НЭ, обеспечивая устойчивую и надежную работу в составе ПМ, позволяет снизить массу и габариты АФАР, одновременно повысить эффективность использования первичного источника электроэнергии РЛС и снизить нагрузку на него, улучшить электромагнитную совместимость аппаратуры АФАР. Как следствие, станет возможным, например, увеличение времени полета носителя РЛС и надежности ее функционирования.

Заключение. Резюмируя полученные в работе результаты, следует отметить следующее:

1. Значительное снижение неравномерности энергопотребления оконечных усилителей мощности передающих модулей импульсных РЛС с АФАР возможно за счет заряда емкостного накопителя неизменной мощностью. Устройство, обеспечивающее такой заряд, разработано и представлено авторами.

2. Предложенная схема ЗУ обеспечивает высокий КПД, является простой и надежной. Разработанное ЗУ может быть рекомендовано для заряда емкостных накопителей в передающих модулях АФАР импульсных РЛС в широком диапазоне длительностей и скважностей зондирующих радиоимпульсов. Новое ЗУ позволяет снизить массу и габариты АФАР, одновременно повысить эффективность использования первичного источника электроэнергии РЛС и снизить нагрузку на него, улучшить электромагнитную совместимость аппаратуры АФАР.

3. Наиболее заметный выигрыш по массе ЗУ предложенная схема обеспечивает при работе с большими значениями скола напряжения на накопителе и при большой длительности и скважности импульсов тока в нагрузке за счет отказа от громоздкого сглаживающего дросселя на выходе ЗУ.

4. Дальнейшее совершенствование разработанного ЗУ должно идти в направлении разработки алгоритмов управления уровнем зарядной мощности емкостного накопителя в зависимости от временных параметров зондирующих радиоимпульсов. Авторы планируют рассмотреть этот вопрос в последующих работах.

Список литературы

1. Skolnik M. Radar Handbook. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008. 1351 p.
2. Brown A. Active Electronically Scanned Arrays: Fundamentals and Applications. New York: Wiley-IEEE Press, 2022. 272 p.
3. Design and Research on a Power Distribution System for Airborne Radar / K. Ding, F. Wu, S. Li, B. Li, Y. He, Y. Zhang // The J. of Engineering. 2018. Vol. 2019, № 16. P. 1528–1531. doi: 10.1049/joe.2018.8636
4. Realization of DC/DC High Power and Large Current Combined Power Supply for Airborne Radar / Y. Zhang, S. Xu, Z. Chen, X. Li, B. Dong, Q. Luo, B. Li, Y. He // The J. of Engineering. 2018. Vol. 2019, № 16. P. 1930–1933. doi: 10.1049/joe.2018.8743
5. A Power Supply System for TR Modules of Active Phased Array Radar / Y. Wang, X. Bao, Y. Liu, L. Li, H. Liu // Open J. of Circuits and Systems. 2020. Vol. 9, № 2. P. 28–34. doi: 10.12677/OJCS.2020.92004
6. Engineering Application of a Large Airborne Radar Power Supply System with 100 kW / J. Xia, Y. Wang, X. Zhang, T. Cheng, Z. Chen, Y. Zhang // IEEE 9th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf., Nanjing, China, 29 Nov.–02 Dec. 2020. IEEE, 2020. P. 2331–2335. doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9368054
7. Novel AESA Architecture for Earth Observation and Planetary Sciences / A. Pereira, N. Weste, D. Abbot, S. Al-Sarawi, O. Yurduseven // IEEE Aerospace Conf., Big Sky, USA, 06–13 March 2021. IEEE, 2021. P. 1–13. doi: 10.1109/AERO50100.2021.9438227
8. GaN-Based Two-Stage Converter With High Power Density and Fast Response for Pulsed Load Applications / Y. Yao, G. Kulothungan, H. Krishnamoorthy, A. Das; H. Soni // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2022. Vol. 69, № 10. P. 10035–10044. doi: 10.1109/TIE.2022.3159946
9. Design and Implementation of High Power Pulsed Output DC-DC Converter / M. Kumar, K. Rayees, B. Singh, V. Chippalkatti // Smart Small Satellites: Design, Modelling and Development. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2023. Vol. 963. P. 85–97. doi: 10.1007/978-981-19-7198-3_9
10. Design and Realization of a Compact, Rugged and Highly Efficient Power Supply Module for Large Aperture Antennas in Naval Environment / A. Sarkar, B. Guruvulu, V. H. Bhosale, J. Chakrabarty, M. S. Althaf // IEEE Wireless Antenna and Microwave Symp., Visakhapatnam, India, 29 Feb. 2024–03 March 2024. IEEE, 2024. P. 1–5. doi: 10.1109/WAMS59642.2024.10528098
11. Кириенко В. П. Регулируемые преобразователи систем импульсного электропитания. Н. Новгород: НГТУ, 2008. 617 с.
12. Таназлы Г. И., Мунасыпов Р. А. Проектирование сложных систем заряда емкостных накопите-лей энергии // Вестн. УГАТУ. 2012. Т. 16, № 1 (46). С. 133–142.
13. Кушнерев Н. А., Родин М. В. Особенности проектирования и тенденции развития систем электропитания АФАР бортовых радиолокаторов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т. 17, № 6. С. 68–82. doi: 10.18127/j20700814-201905-09
14. Кныш В. А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. Л.: Энергоиздат, 1981. 156 с.
15. Пентегов И. В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. Киев: Наук. думка, 1982. 424 с.
16. Булатов О. Г., Иванов В. С., Панфилов Д. И. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей. М.: Радио и связь, 1986. 159 с.
17. A Constant Current High Voltage Capacitor Charging Power Supply for Pulsed Power Applications / G. Rim, I. Jeong, G. Gusev, Y. W. Choi, H. J. Ryoo, J. S. Kim // 13th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA, 17–22 June 2001. IEEE, 2001. P. 1284–1286. doi: 10.1109/PPPS.2001.1001783
18. High Power Density Capacitor Charging Power Supply Development for Repetitive Pulsed Power / M. McQuage, V. McDowell, F. Peterkin, J. Pasour // 27th Intern. Power Modulator Symp., Arlington, USA, 14–18 May 2006. IEEE, 2006. P. 368–371. doi: 10.1109/MODSYM.2006.365261
19. Cassel R., Hitchcock S., Hitchcock R. A High Power Dynamically Flexible Pulse Width Radar Modulator // The 34th IEEE Intern. Conf. on Plasma Science, Albuquerque, USA, 17–22 June 2007. IEEE, 2007. P. 1492–1494. doi: 10.1109/PPPS.2007.4652469
20. Design of Series Resonant High Voltage Capacitor Charging Power Supply / Q. Wang, Y. Gao, C. Liang, J. Zhao // The 16th IET Intern. Conf. on AC and DC Power Transmission, Xian, China, 02–03 July 2020. IEEE, 2021. P. 1294–1297. doi: 10.1049/icp.2020.0309
21. Dias A., Filho E. Switching Mode System to Supply Pulse Modulators in Radar Applications // 9th IEEE/IAS Intern. Conf. on Industry Application, Sao Paulo, Brazil, 08–10 Nov. 2010. IEEE, 2010. P. 1–6. doi: 10.1109/INDUSCON.2010.5740011
22. Буркин Е. Ю., Кожемяк О. А. Устройство формирования ступенчато-падающего тока заряда емкостного накопителя энергии // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 2. С. 91–95. doi: 10.7868/S003281621601033X
23. Novel Virtualization Intelligent Power Supply with Large Capacity Energy Storage / G. Liu, W. Xue, Z. Hao, Z. Niu, K. Mu, J. Ma // IEEE Sustainable Power and Energy Conf., Chengdu, China, 23–25 Nov. 2020. IEEE, 2020. P. 2028–2033. doi: 10.1109/ISPEC50848.2020.9350938

24. Design and Implementation of a 2.1-kV Charging Power Supply for Capacitor Array of Pulse Power Modulators / Y. Wang, J. Chen, L. Wang, M. Xu, H. Chen, J. Huang // IEEE 2nd Intern. Conf. on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence, Nanchang, China, 17–19 Dec. 2021. IEEE, 2021. P. 36–40.
doi: 10.1109/ICIBA52610.2021.9688199

25. Research on LC Series Resonant High Voltage Capacitor Charging Power Supply / H. Zhao, X. Wang, Y. Zheng, H. Ding, C. Yao // IEEE 5th Intern. Electrical and Energy Conf., Nanchang, China, 27–29 May 2022. IEEE, 2022. P. 1631–1636.
doi: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846751

26. Fixed Frequency LCC Resonant Converter Modeling and Optimal Design for High-Voltage Capacitor Charging Power Supply in Constant Power Control / J. Chen, Y. Xu, H. Lu, Zh. Yan, Zh. Yu, Q. Li // IEEE Transactions on Industry Applications. 2023. Vol. 59, № 4. P. 4287–4299.
doi: 10.1109/TIA.2023.3264221

27. A Variable Frequency Phase-Shift Modulation Constant Power Control Strategy for LCC Resonant Capacitor Charging Power Supply / Y. Xu, Z. Yu, J. Chen, Y. Wang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023. Vol. 70, № 2. P. 1883–1893.
doi: 10.1109/TIE.2022.3161803

28. Мошкин В. И. Энергетические характеристики процесса заряда емкостного накопителя энергии // Вестн. КГУ. 2012. № 2 (24). С. 82–85.

29. Кушнерев Н. А., Родин М. В., Степанов А. В. К вопросу об усреднении импульсной мощности в источниках электропитания приемо-передающих модулей бортовых радиолокационных АФАР // Практическая силовая электроника. 2020. № 3 (79). С. 45–50.

30. Rodin M., Popov D. Hysteretic Voltage Regulator as a Dynamic Supply Modulator for Radar Power Amplifier // 6th Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 29 Feb.–02 March 2024. IEEE, 2024. P. 1–5.
doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479739

Информация об авторах

Кушнерев Николай Александрович – кандидат технических наук (2010), начальник лаборатории АО «Концерн "Вега"». Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов: системы и устройства электропитания радиолокационных комплексов; радиолокация.
Адрес: АО «Концерн "Вега"», Кутузовский пр., д. 34, Москва, 121170, Россия
E-mail: kushnerev@inbox.ru

Родин Михаил Валерьевич – кандидат технических наук (2017), доцент (2022), доцент кафедры радиоэлектронных систем и устройств Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов: системы и устройства электропитания радиолокационных комплексов; активные фазированные антенные решетки радиолокационных комплексов; радиолокация.
Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, Москва, 105005, Россия
E-mail: mvrodin@bmstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2245-8771>

Попов Дмитрий Олегович – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2023, МГТУ им. Н. Э. Баумана), аспирант кафедры радиоэлектронных систем и устройств Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов: активные фазированные антенные решетки радиолокационных комплексов.
Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, Москва, 105005, Россия
E-mail: popovdo@student.bmstu.ru

References

1. Skolnik M. Radar Handbook. New York, The McGraw-Hill Companies, 2008, 1351 p.
2. Brown A. Active Electronically Scanned Arrays: Fundamentals and Applications. New York, Wiley-IEEE Press, 2022, 272 p.
3. Ding K., Wu F., Li S., Li B., He Y., Zhang Y. Design and Research on a Power Distribution System for Airborne Radar. The J. of Engineering. 2018, vol. 2019, no. 16, pp. 1528–1531.
doi: 10.1049/joe.2018.8636
4. Zhang Y., Xu S., Chen Z., Li X., Dong B., Luo Q., Li B., He Y. Realization of DC/DC High Power and Large Current Combined Power Supply for Airborne Radar. The J. of Engineering. 2018, vol. 2019, no. 16, pp. 1930–1933.
doi: 10.1049/joe.2018.8743

5. Wang Y., Bao X., Liu Y., Li L., Liu H. A Power Supply System for TR Modules of Active Phased Array Radar. Open J. of Circuits and Systems. 2020, vol. 9, no. 2, pp. 28–34.
doi: 10.12677/OJCS.2020.92004
6. Xia J., Wang Y., Zhang X., Cheng T., Chen Z., Zhang Y. Engineering Application of a Large Airborne Radar Power Supply System with 100 kW. IEEE 9th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf., Nanjing, China, 29 Nov.–02 Dec. 2020. IEEE, 2020, pp. 2331–2335.
doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9368054
7. Pereira A., Weste N., Abbot D., Al-Sarawi S., Yurduseven O. Novel AESA Architecture for Earth Observation and Planetary Sciences. IEEE Aerospace Conf., Big Sky, USA, 06–13 March 2021. IEEE, 2021, pp. 1–13.

doi: 10.1109/AERO50100.2021.9438227

8. Yao Y., Kulothungan G., Krishnamoorthy H., Das A., Soni H. GaN-Based Two-Stage Converter With High Power Density and Fast Response for Pulsed Load Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022, vol. 69, no. 10, pp. 10035–10044.

doi: 10.1109/TIE.2022.3159946

9. Kumar M., Rayees K., Singh B., Chippalkatti V. Design and Implementation of High Power Pulsed Output DC-DC Converter. *Smart Small Satellites: Design, Modelling and Development. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023, vol. 963, pp. 85–97.

doi: 10.1007/978-981-19-7198-3_9

10. Sarkar A., Guruvulu B., Bhosale V. H., Chakrabarty J., Althaf M. S. Design and Realization of a Compact, Rugged and Highly Efficient Power Supply Module for Large Aperture Antennas in Naval Environment. *IEEE Wireless Antenna and Microwave Symp., Visakhapatnam, India, 29 Feb. 2024–03 March 2024. IEEE*, 2024, pp. 1–5.

doi: 10.1109/WAMS59642.2024.10528098

11. Kirienko V. P. *Reguliruemye preobrazovateli sistem impulsnogo elektropitaniya* [Adjustable Converters of Switching Power Supply Systems]. Nizhniy Novgorod, NGTU, 2008, 617 p. (In Russ.)

12. Tanazli G. I., Munasipov R. A. Designing of Complexes Charge Systems of the Capacitor Energy Stores. *UGATU Bulletin*. 2012, vol. 16, no. 1(46), pp. 133–142. (In Russ.)

13. Kushnerev N. A., Rodin M. V. Design Features and Development Trends of Power Supply Systems for Onboard AESA Radars. *Information-measuring and Control Systems*. 2019, vol. 17, no. 6, pp. 68–82. (In Russ.)

doi: 10.18127/j20700814-201905-09

14. Knish V. A. *Poluprovodnikovye preobrazovateli v sistemah zaryada nakopitelnykh kondensatorov* [Semiconductor Converters in Storage Capacitor Charging Systems]. Leningrad, *Energoizdat*, 1981, 156 p. (In Russ.)

15. Pentegov I. V. *Osnovy teorii zaryadnykh tsepey emkostnykh nakopiteley energii* [Fundamentals of the Theory of Charging Circuits of Capacitive Energy Storage Devices]. Kiev, *Naukova Dumka*, 1982, 424 p. (In Russ.)

16. Bulatov O. G., Ivanov V. S., Panfilov D. I. *Poluprovodnikovye zaryadne ustroystva emkostnykh nakopiteley* [Semiconductor Chargers of Capacitive Storage Devices]. Moscow, *Radio i Svyaz*, 1986, 159 p. (In Russ.)

17. Rim G., Jeong I., Gusev G., Choi Y. W., Ryoo H. J., Kim J. S. A Constant Current High Voltage Capacitor Charging Power Supply for Pulsed Power Applications. *13th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA, 17–22 June 2001. IEEE*, 2001, pp. 1284–1286.

doi: 10.1109/PPPS.2001.1001783

18. McQuage M., McDowell V., Peterkin F., Passour J. High Power Density Capacitor Charging Power Supply Development for Repetitive Pulsed Power. *27th Intern. Power Modulator Symp., Arlington, USA, 14–18 May 2006. IEEE*, 2006, pp. 368–371.

doi: 10.1109/MODSYM.2006.365261

19. Cassel R., Hitchcock S., Hitchcock R. A High Power Dynamically Flexible Pulse Width Radar Modulator. *The 34th IEEE Intern. Conf. on Plasma Science, Albuquerque, USA, 17–22 June 2007. IEEE*, 2007, pp. 1492–1494.

doi: 10.1109/PPPS.2007.4652469

20. Wang Q., Gao Y., Liang C., Zhao J. Design of Series Resonant High Voltage Capacitor Charging Power Supply. *The 16th IET Intern. Conf. on AC and DC Power Transmission, Xian, China, 02–03 July 2020. IEEE*, 2021, pp. 1294–1297.

doi: 10.1049/icp.2020.0309

21. Dias A., Filho E. Switching Mode System to Supply Pulse Modulators in Radar Applications. *9th IEEE/IAS Intern. Conf. on Industry Application, Sao Paulo, Brazil, 08–10 Nov. 2010. IEEE*, 2010, pp. 1–6.

doi: 10.1109/INDUSCON.2010.5740011

22. Burkin E. Yu., Kozhemyak O. A. A Device for Forming a Stepwise-Decreasing Current for Charging a Capacitive Energy Storage. *Instruments and Experimental Techniques*. 2016, no. 2, pp. 91–95. (In Russ.)

doi: 10.7868/S003281621601033X

23. Liu G., Xue W., Hao Z., Niu Z., Mu K., Ma J. Novel Virtualization Intelligent Power Supply with Large Capacity Energy Storage. *IEEE Sustainable Power and Energy Conf., Chengdu, China, 23–25 Nov. 2020. IEEE*, 2020, pp. 2028–2033.

doi: 10.1109/iSPEC50848.2020.9350938

24. Wang Y., Chen J., Wang L., Xu M., Chen H., Huang J. Design and Implementation of a 2.1-kV Charging Power Supply for Capacitor Array of Pulse Power Modulators. *IEEE 2nd Intern. Conf. on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence, Nanchang, China, 17–19 Dec. 2021. IEEE*, 2021, pp. 36–40.

doi: 10.1109/ICIBA52610.2021.9688199

25. Zhao H., Wang X., Zheng Y., Ding H., Yao C. Research on LC Series Resonant High Voltage Capacitor Charging Power Supply. *IEEE 5th Intern. Electrical and Energy Conf., Nanchang, China, 27–29 May 2022. IEEE*, 2022, pp. 1631–1636.

doi: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846751

26. Chen J., Xu Y., Lu H., Yan Zh., Yu Zh., Li Q. Fixed Frequency LCC Resonant Converter Modeling and Optimal Design for High-Voltage Capacitor Charging Power Supply in Constant Power Control. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2023, vol. 59, no. 4, pp. 4287–4299.

doi: 10.1109/TIA.2023.3264221

27. Xu Y., Yu Z., Chen J., Wang Y. A Variable Frequency Phase-Shift Modulation Constant Power Control Strategy for LCC Resonant Capacitor Charging Power Supply. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023, vol. 70, no. 2, pp. 1883–1893.

doi: 10.1109/TIE.2022.3161803

28. Moshkin V. I. Energy Characteristics of Charge Capacitive Energy Storage. *Bulletin of KSU*. 2012, no. 2 (24), pp. 82–85. (In Russ.)

29. Kushnerev N. A., Rodin M. V., Stepanov A. V. On Pulse Power Averaging in Electric Power Supplies of Re-

ceive-Transmit Modules of Onboard AESA Radar. Practical Power Electronics. 2020, no. 3 (79), pp. 45–50. (In Russ.)
30. Rodin M., Popov D. Hysteretic Voltage Regulator as a Dynamic Supply Modulator for Radar Power

Amplifier. 6th Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 29 Feb.–02 March 2024. IEEE, 2024, pp. 1–5.
doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479739

Information about the authors

Nikolay A. Kushnerev, Cand. Sci. (Eng.) (2010), Head of laboratory of JSC "Vega". The author of 50 scientific publications. Area of expertise: power supply systems and devices for radars; radiolocation.
Address: JSC "Vega", 34, Kutuzovsky Ave., Moscow 121170, Russia
E-mail: kushnerev@inbox.ru

Mikhail V. Rodin, Cand. Sci. (Eng.) (2017), Associate Professor (2022), Associate Professor of the Department of Radio Electronic Systems and Devices of Bauman Moscow State Technical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: power supply systems and devices for radars; active electronically scanned arrays for radars; radiolocation.
Address: Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia
E-mail: mvrodin@bmstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2245-8771>

Dmitriy O. Popov, Engineer's degree in electrical engineering (2023, Bauman Moscow State Technical University), graduate student of the Department of Radio Electronic Systems and Devices of Bauman Moscow State Technical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: active electronically scanned arrays for radars.
Address: Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia
E-mail: popovdo@student.bmstu.ru