

УДК 621.378

Двукратно резервированный твердотельный усилитель СВЧ-мощности для бортовой аппаратуры космических аппаратов

Алыбин В. Г., Авраменко С. В.

*АО «Российские космические системы»
г. Москва, 111250, Российская Федерация
avramenko.gv@spacecorp.ru*

Получено: 18 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: Рассмотрены наиболее сложные в реализации структурные схемы и варианты известных и предложенной конструкции двукратно резервированного твердотельного усилителя СВЧ мощности (РТУМ) для бортовой аппаратуры космических аппаратов, работающих в одном из частотных диапазонов L , S , C , X , K в сеансном режиме при включенном одном из трех входящих в его состав усилителей. Отмечены современные ключевые требования к РТУМ: срок активного существования не менее 10 лет при вероятности безотказной работы не менее 0,995, минимизация массы и габаритов, включая площадь, занимаемую РТУМ на термостатированной плите (ТСП), при которой средняя плотность теплового потока на нее порядка $0,2 \text{ Вт/см}^2$. Показаны достоинства и недостатки «двухэтажных» конструкций и конструкций с вертикальным расположением плат усилителей мощности по отношению к ТСП. Предложен РТУМ, в котором его составные части (СЧ) с большим тепловыделением и непосредственно связанные с ними СЧ размещены на основании корпуса РТУМ, установленного на ТСП через теплопроводящую прокладку, а все остальные СЧ расположены на боковых стенках корпуса. С их внешних сторон размещены коаксиальные разъемы входов и выходов СВЧ сигналов, разъемы для подачи электропитания, управления телеметрии и итенгель для герметизации РТУМ. Предложенный РТУМ удовлетворяет всем отмеченным требованиям, проще по конструкции и имеет меньший вес. Усилитель перспективен для использования в бортовой аппаратуре, включая командно-измерительные системы.

Ключевые слова: резервированный троированный твердотельный усилитель СВЧ мощности, термостатированная плита космического аппарата, источники вторичного электропитания, тепловыделение, срок активного существования, масса, габариты.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Алыбин В. Г., Авраменко С. В. Двукратно резервированный твердотельный усилитель СВЧ-мощности для бортовой аппаратуры космических аппаратов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 2. С. 166—176.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Алыбин, В. Г. Двукратно резервированный твердотельный усилитель СВЧ-мощности для бортовой аппаратуры космических аппаратов / В. Г. Алыбин, С. В. Авраменко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 166—176.

1. Введение

Твердотельные усилители СВЧ мощности нашли широкое применение в бортовой аппаратуре космических аппаратов (КА) благодаря достижениям последних десятилетий в твердотельной электронике с применением транзисторных усилителей на нитриде галлия [1, 2]. Большой КПД, малые габариты и достаточно большие рабочие мощности в СВЧ диапазоне частот обеспечили им преимущества по сравнению с вакуумными усилителями мощности (в основном, на лампах бегущей волны) для большинства применений, за исключением работы КА в дальнем космосе.

Однако уровень современной космической техники ставит новые задачи перед бортовыми передающими устройствами, СЧ которых и являются усилители СВЧ мощности.

Практически для всех усилителей СВЧ мощности (кроме предназначенных для использования в сверхмалых КА) остается требование резервирования их для обеспечения необходимого срока активного существования (САС), в большинстве случаев в виде дублирования или троирования их или их функциональных узлов. Такие резервированные твердотельные усилители мощности (РТУМ) имеют соответственно большие массу и габариты, особенно когда изготавливаются в разных корпусах.

Характерной особенностью РТУМ является необходимость в течение САС отведения тепла от транзисторов выходных каскадов включенного усилителя мощности и их источников вторичного электропитания (ИВЭП). С этой целью РТУМ, как и другие приборы КА, размещаются на ТСП, содержащей жидкостное охлаждение и обеспечивающей поддержание рабочих температур в течение САС в диапазоне от минус 20—40 °С до плюс 40—50 °С [3].

При этом площадь части корпуса РТУМ, контактирующей с ТСП КА, не должна быть меньше величины, при которой средняя плотность теплового потока с нее в установившемся режиме не превышала бы 0,2 Вт/см² для современных ТСП КА. С другой стороны, нежелательно делать

площадь этой части корпуса РТУМ больше требуемой, т. к. при этом растут габариты всего передающего устройства КА и, соответственно, место, занимаемое им на ТСП.

Особенностью РТУМ является его работа в сеансном режиме бортовой аппаратуры КА, при котором включается только один из резервируемых твердотельных усилителей мощности (ТУМ), а в это время остальные ТУМ находятся в «холодном» резерве, как и их ИВЭП [3, 4, 5]. Это позволяет рассчитывать необходимую площадь РТУМ, занимаемую им на ТСП КА, исходя из его одного включенного ТУМ. Основной проблемой сокращения площади, занимаемой РТУМ на ТСП, является размещение его части СЧ не на основании корпуса, контактирующего с ТСП КА, а в других элементах конструкции корпуса РТУМ. При этом, чем больше степень резервирования РТУМ (троирование вместо дублирования его СЧ), а также чем больше его требуемая выходная мощность ($P_{\text{вых}}$), тем сложнее решается эта задача.

В данной статье рассматривается вариант конструкции троированного РТУМ, как наиболее сложного при условии удовлетворения перечисленных выше требований.

2. Анализ известных технических решений для РТУМ с минимальной площадью корпуса, занимаемой им на ТСП

На рис. 1 показана типичная структурная схема одиночного твердотельного усилителя СВЧ мощности (ТУМ) [1]. Он содержит по два усилительных входных и выходных каскадов ТУМ ($\langle \rangle_{\text{вх}}$) и ($\langle \rangle_{\text{вых}}$), заграждающий фильтр гармоник (Ф), цепь автоматической регулировки мощности (АРМ), включающую направленный ответвитель (НО) с детектором (ДЕТ), операционный усилитель (ОУ), управляющий аттенуатором (АТТ) и формирующий выход датчика выходной мощности (ДАТ_{Р_{вых}}). За Ф и НО с ДЕТ цепи АРМ расположен циркулятор (Ц) с согласованной нагрузкой (СН), которая типично рассчитана на мощность, равную половине номинальной $P_{\text{вых}}$ для предохранения УМ при нештатном нарушении во время его работы выходного контакта с цепью внешней антенно-фидерной системы.

Цепь датчика входной мощности ДАТ_{Р_{вх}} расположена на входе УМ (Вх) и состоит из НО с ДЕТ и ОУ, формирующего значение ДАТ_{Р_{вх}}.

Электропитание каскадов ТУМ $\langle \rangle_{\text{вх}}$ и $\langle \rangle_{\text{вых}}$ осуществляется с помощью ИВЭП, имеющего входные и выходные каскады (ИВЭП_{вх}, ИВЭП_{вых}).

На рис. 1 цветом выделены СЧ ТУМ без значительного тепловыделения, т. е. не нуждающиеся в хорошем теплоотводе от них; остальные СЧ

ТУМ требуют хорошего теплоотвода и поэтому их целесообразно размещать на ТСП или вблизи нее. К таким СЧ следует отнести и СЧ, составляющие единое целое с выходными каскадами УМ, к которым относятся Ф, НО АРМ с ДЕТ, вентили и Ц с СН.

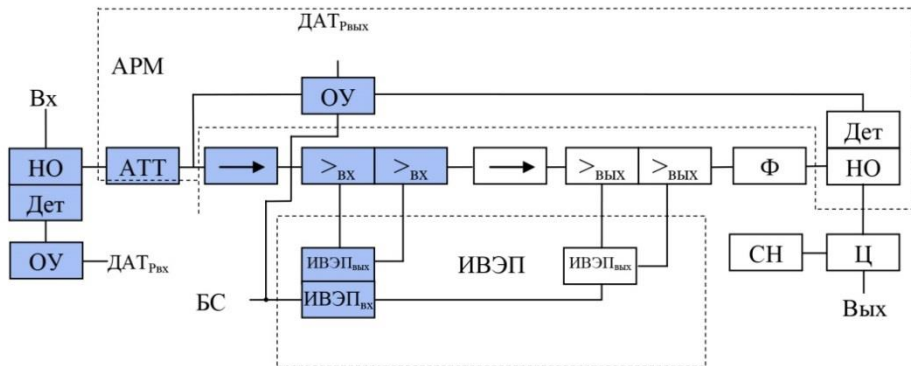


Рис. 1. Структурная схема одиночного ТУМ.

Fig. 1. Structural diagram of a single solid-state power amplifier

На рис. 2 показана типичная структурная схема РТУМ с двукратным резервированием (троированием) ТУМ.

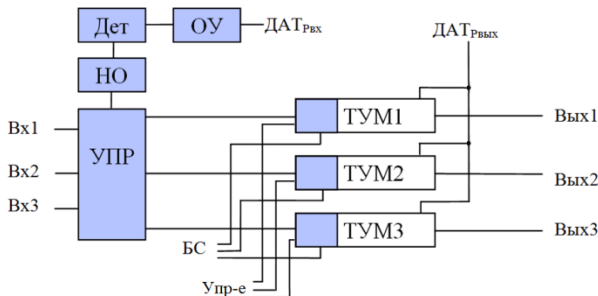


Рис. 2. Структурная схема троированного РТУМ.

Fig. 2. Structural diagram of a triple redundant solid state power amplifier

Отличием двукратно резервированного РТУМ является введение устройства перекрестного резервирования (УПР), имеющего два или три входа (V_{x1} , V_{x2} , V_{x3}) в зависимости от того, сколько резервируемых приемопередающих устройств имеется в бортовой аппаратуре. Такие УПР строятся на микрополосковых линиях с применением мостов Ланге и делителей мощности Уилкинсона и имеют размерность 2×3 или 3×3 [6, 7] и реализуются в диапазонах частот, применяемых в бортовой аппаратуре КА (L , S , C , X , K).

Использование в троированном РТУМ УПР позволяет применить один ДАТ_{РВХ}, на который сигнал поступает от НО с ДЕТ с одного из выходов УПР, поскольку в УПР при подаче СВЧ сигнала на любой из его входов на любом из его выходов образуются сигналы одинаковой мощности, поступающие далее на входы ТУМ.

На рис. 2 цветом выделены СЧ РТУМ, которые целесообразно разместить не на плоскости корпуса, контактирующей с ТСП, включая СЧ ТУМ и цепь ДАТ_{РВХ}.

Известны технические решения для РТУМ, позволяющие сократить площадь его корпуса на ТСП, исходя из требований ограничения по тепловому потоку во время работы РТУМ.

На рис. 3 показана конструкция «двухэтажного» РТУМ [1]. На этаже, контактирующем с ТСП, целесообразно размещать каскады ТУМ с большим тепловыделением, а из соображений технологичности — все СЧ ТУМ, включая и их выходные каскады, вентили, циркулятор с СН и НО с ДЕТ цепи АРМ, а на «втором» этаже — УПР, цепь ДАТ_{РВХ}, входные каскады ИВЭП, выходные каскады ИВЭП для входных каскадов УМ и цепи СЧ АРМ с ДАТ_{РВХ}.

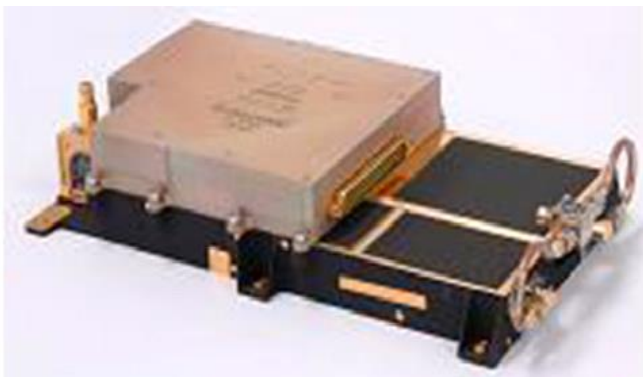


Рис. 3. Двухэтажная конструкция РТУМ С-диапазона частот.

Fig. 3. Double-deck redundant C-band solid-state power amplifier design

Недостатком этой конструкции является трудность размещения всех узлов троированного РТУМ на «втором» этаже, даже с учетом того, что в настоящее время уменьшение их габаритов диктуется возможностями использования многослойных печатных плат и создания гибридно-монокристаллических схем типа «система на кристалле» и «система в корпусе», а также технологическими трудностями реализации многочисленных межэтажных соединений.

На рис. 4 показана конструкция троированного РТУМ [5] с уменьшенной площадью, занимаемой им на ТСП до значения, удовлетворяющего требованиям теплоотвода при одном включенном ТУМ. Двукратно резервированный РТУМ содержит дублированный РТУМ и одиночный ТУМ, размещенные в двух корпусах, между которыми обеспечен тепловой контакт за счет теплопроводящей прокладки, размещенной между их частично перекрывающимися частями, обращенными к ТСП. Дублированный РТУМ содержит размещенную в корпусе пластину, параллельную двум его широким стенкам, на которой с обеих сторон размещены ТУМ1 и ТУМ2. Корпус РТУМ крепится на ТСП своей торцевой стенкой, перпендикулярной пластине с ТУМ1 и ТУМ2. В зоне, ближайшей к ТСП, пластина имеет увеличенную толщину, и в этой ее зоне размещаются узлы ТУМ1 и ТУМ2 с наибольшим тепловыделением. Уменьшение толщины пластины достигается с помощью паза, выполненного в верхней ее части. Тем самым обеспечивается уменьшение массы РТУМ.

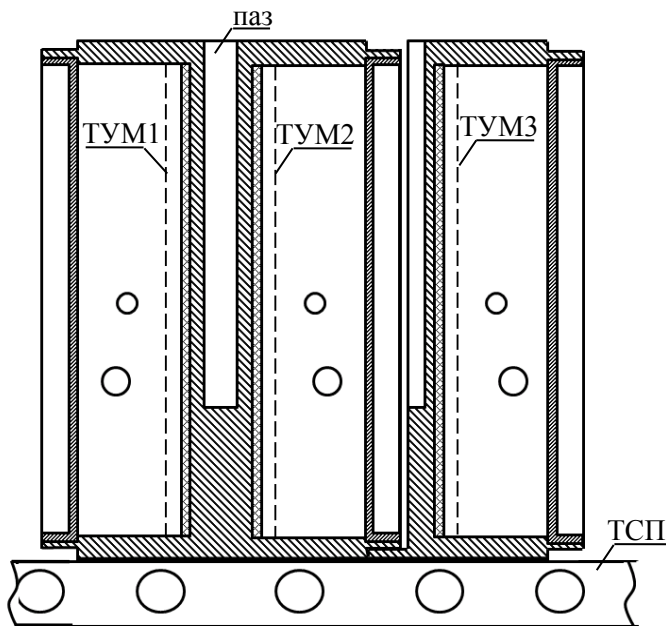


Рис. 4. Поперечное сечение троированного РТУМ.

Fig. 4. Cross section of a triple redundant solid state power amplifier

Одиночный ТУМ выполнен в отдельном корпусе и расположен на его широкой стенке, при этом толщина ее в зоне размещения тепловыделяющих элементов ТУМ3, контактирующей с ТСП, выполнена увеличен-

ной. Два корпуса троированного РТУМ скреплены между собой так, что ТУМ3 расположен параллельно ТУМ2.

Недостатком предложенной конструкции двукратно резервированного РТУМ является сложность конструкции, заключающаяся в необходимости изготовления двух корпусов РТУМ вместо одного с их отдельной герметизацией, изготовления трех герметичных крышек вместо одной, и ограничению максимально допустимой мощности из-за худшего теплоотвода, чем при контактировании тепловыделяющих частей РТУМ с частями корпусов, расположенных на ТСП.

3. Троированный РТУМ для БА КА

В данной работе предложен троированный РТУМ, который может быть реализован в одном из используемых в БА КА СВЧ-диапазонов (L , S , C , X , K). Его особенностью является размещение всех его СЧ в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2, в одном корпусе. При этом части УМ1, УМ2 и УМ3 и другие элементы РТУМ, выделенные цветом на рис. 2, размещены на боковых стенках корпуса, а СЧ РТУМ с большим тепловыделением и непосредственно связанные с ними СЧ размещены на основании корпуса, непосредственно контактирующего с ТСП.

На рис. 5 показана развертка корпуса РТУМ. Обозначения всех узлов РТУМ сохранены такими же, как и на рисунках 1 и 2. Для большей информативности у ряда из них поставлены порядковые номера ТУМ.

На основании 1 корпуса размещены вентили, выходные каскады ТУМ с выходными каскадами ИВЭП, загораживающие фильтры, направленные ответвители и циркуляторы с относительно малыми согласованными нагрузками.

На боковой стенке 2 корпуса расположены устройство перекрестного резервирования (УПР), совмещенное с двумя или тремя входами (в зависимости от числа приемо-передающих устройств БА) и входные каскады ТУМ с выходными каскадами ИВЭП.

Боковая стенка 3 корпуса свободна от размещения на ней СЧ РТУМ.

На стенке 4 корпуса с внешней стороны расположены разъемы выходов РТУМ и, при необходимости, штенгель для герметизации корпуса.

На стенке 5 корпуса с внешней стороны размещены разъемы входов электропитания, управления конфигурацией РТУМ, входные каскады ИВЭП, операционные усилители, формирующие показания датчиков $P_{вх}$ и $P_{вых}$, а также выходы этих датчиков.

Крышка корпуса на рис. 5 не показана.

Таким образом, внутри корпуса организовано шесть угловых соединений СВЧ диапазона, развязанных с помощью вентиля и циркуляторов, и четыре низкочастотных угловых соединения.

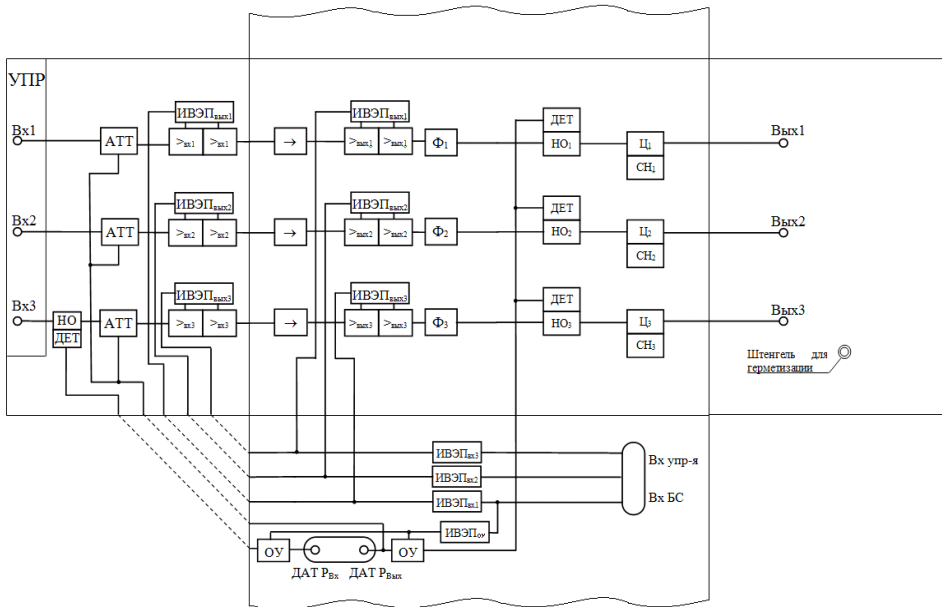


Рис. 5. Развертка корпуса троированного РТУМ.

Fig. 5. Trinity redundant solid state power amplifier case unfold

Предложенная конструкция РТУМ выгодно отличается от известных технических решений, т. к. имеет меньшую массу, конструктивно проще и обладает более благоприятными возможностями по достижению максимальной выходной СВЧ мощности. Наиболее приемлемым вариантом применения предложенного РТУМ является, в частности, бортовая аппаратура командно-измерительной системы для малых КА с массой порядка сотен кг, с САС 10—15 лет при вероятности безотказной работы не менее 0,995 и с минимальной площадью, занимаемой РТУМ на ТСП.

4. Заключение

Представлены современные конструкции РТУМ СВЧ диапазонов для БА КА, удовлетворяющие жестким требованиям по габаритно-массовым характеристикам, включая площадь, занимаемую РТУМ на ТСП, по САС, по максимальной выходной СВЧ мощности и по технологичности.

Предложен вариант реализации РТУМ с использованием для размещения его СЧ как основания корпуса, контактирующего с ТСП, так и его боковых стенок. Показаны преимущества этого варианта РТУМ по сравнению с известными техническими решениями. Предложенный двукратно

резервированный РТУМ приемлем для создания как БА командно-измерительных систем для малых КА (порядка сотен кг) с относительно большим САС (10—15 лет), так и для БА более крупных КА.

Список литературы

1. Алыбин В. Г., Сёмочкин А. С. Бортовые твердотельные СВЧ-усилители мощности будущего для командно-измерительных систем // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3, вып. 3. С. 89—97.
2. Гуляев В. И., Глазунов В. В., Зыкова Г. С., Мякишев Ю. Б., Мончарес Н.В. Усилитель с выходной мощностью 15 Вт диапазона 8,5—12,5 ГГц на GaN КМИС. В сб. : 22-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2012 (Севастополь, 10—14 сент. 2012 г.). 2012. С. 72—73.
3. Алыбин В. Г., Сёмочкин А. С., Рожков В. М., Авраменко С.В. Особенности конструкции усилителей СВЧ мощности для служебных систем космических аппаратов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 1. С. 70—78.
4. Коновалов С. Д., Тазиков А. А., Алыбин В.Г. Повышение надежности и улучшение массогабаритных параметров усилителя мощности СВЧ для бортовой аппаратуры командно-измерительных систем. В сб. : «Будущее российской космонавтики в информационных разработках молодых ученых и специалистов предприятий ракетно-космической промышленности Московской области. По итогам науч.-практич. конф... (Королев, 4—6 апреля 2011 г.). 2012. Ч. 1. С. 118—120.
5. Алыбин В. Г., Сёмочкин А. С. Управление современными автоматическими космическими аппаратами. В сб. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. Т. 2. С. 272—284.
6. Делитель мощности 2×3 , 3×2 для бортовой аппаратуры космических аппаратов : пат. 2766843 Рос. Федерация № 2021104707 ; заявл. 25.02.2021 ; опубл. 16.03.2022, Бюл. № 8. 9 с.
7. Делитель мощности 3×3 для бортовой аппаратуры космических аппаратов : пат. 2693877 Рос. Федерация № 2018141772 ; заявл. 27.11.2018 ; опубл. : 05.07.2019, Бюл. № 19. 8 с.

Информация об авторах

Алыбин Вячеслав Георгиевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник центра АО «Российские космические системы», г. Москва.

Авраменко Сергей Владимирович, кандидат технических наук, начальник бюро дирекции АО «Российские космические системы», г. Москва.

Twofold Reserved Solid-State Amplifier of UNF Power for Onboard Equipment of Spacecraft's

V. G. Alybin and S. V. Avramenko

Joint-stock company «Russian Space Systems»

Aviamotornaya str., 53, Moscow, 111250, Russian Federation

avramenko.gv@spacecorp.ru

Received: May 18, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: *The paper considers a block diagram, known constructions, and proposed design of a twofold reserved solid-state microwave power amplifier (RSSPA) for spacecraft onboard equipment. Modern requirements of the RSSPA to a thermostatically controlled plate (TCP) used to remove heat from only one amplifier of the RSSPA are stated. The advantages and disadvantages of “two-storey” constructions and design with vertical positioning of power amplifier boards with respect to the TCP are shown. The paper proposes the RSSPA, in which its components with a high heat dissipation and the components directly connected with them are placed on the base of the RSSPA case mounted on the TCP via a thermally conductive pad, and all other components are placed on the side walls of the case. Its design is simpler and lighter. The proposed RSSPA is perspective for spacecraft onboard equipment including command and measurement systems.*

Keywords: *double redundant solid-state power amplifier, microwave power, thermostatically controlled plate, spacecraft, secondary power supply source, active operating life, mass, dimensions.*

For citation (IEEE): V. G. Alybin and S. V. Avramenko, “Twofold Reserved Solid-State Amplifier of UNF Power for Onboard Equipment of Spacecraft's,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 166–176, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.13. (In Russ.).

References

- [1] V. G. Alybin and A. S. Syomochkin, “Onboard Microwave Solid-State Power Amplifiers for Future Command and Measurement Systems.” *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, vol. 3, pp. 89–97, 2016. (In Russ.). DOI: 10.17238/issn2409-0239.2016.3.89.
- [2] V. I. Gulyaev, V. V. Glazunov, G. S. Zukova, Y. B. Myakichev, and N. V. Monchares, “Amplifier with Power 15 W, 8,5–12,5 GHz on GaN CMIS,” in : 22nd International Crimean Conf. “*Microwave and Telecommunication Technology*,” Sevastopol, 2012. pp. 72–73. (In Russ.).
- [3] V. G. Alybin, A. S. Syomochkin, V. M. Rogkov, and S. V. Avramenko, “Major Items of Construction Amplifiers of UHF Power for the Auxiliary Systems of Spacecrafts.” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 70–78. (In Russ.). doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.05.

- [4] S. D. Konovalov, A. A. Tazikov, and V. G. Alybin, "Reliability rise and improvement of mass-gabarit parameters of onboard Equipment command and measurement systems," in : *Science-practice Conf. of young scientists. Rocket-Space Industry* (Korolyov, April 4–6, 2011), Part 1, 2012, pp. 118–120. (In Russ.).
- [5] V. G. Alybin and A. S. Syomochkin, "Directional of modern automatic Spacecrafts." 28th *Intern. Crimean Conf. "Microwave and telecommunication technologies"* (Sevastopol, Sept. 9–15, 2018), vol. 2, pp. 272–284. (In Russ.).
- [6] S. A. Zarapin et al., Pat. No. 2766843 (RF), "Power divider 2×3 , 3×2 for spacecraft onboard Equipment." Bull. of Inventions, no. 8, 2022. (In Russ.).
- [7] V. G. Alybin et al., Pat. No. 2693877 (RF), "Power divider 3×3 for onboard equipment spacecraft's," Bull. of Inventions, no. 19, 2019. (In Russ.).

Information about the authors

Vyacheslav G. Alybin, DSc., Russian space systems Co., Moscow, Russian Federation.

Sergey V. Avramenko, CSc, Russian space systems Co., Moscow, Russian Federation.