

ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.382.029

В.А. Сергеев, Р.Г. Тарасов, А.А. Куликов

ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ВЫХОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ АФАР ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЯМ¹

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, профессор, окончил физический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, заведующий кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета. Имеет монографии, статьи и изобретения в области исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Тарасов Руслан Геннадьевич, окончил Ульяновское высшее военное инженерное училище связи, директор АО «НПП «Завод Искра», соискатель кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет публикации в области разработки методов и средств контроля качества изделий радиоэлектроники. [e-mail: rgtarasov@mail.ru].

Куликов Александр Александрович, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Ведущий инженер УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, аспирант базовой кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет публикации в области разработки автоматизированных средств измерения параметров полупроводниковых приборов. [e-mail: ufire@mv.ru].

Аннотация

Кратко рассмотрена структурная схема приемно-передающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решеток (АФАР) X-диапазона и показано, что качество ППМ во многом определяется качеством сборки наиболее ответственного узла – submodule выходных усилителей мощности (ВУМ) с двумя параллельно включенными монолитными интегральными схемами (МИС) сверхвысокочастотных (СВЧ) усилителей. Приведена структура и описана работа измерительного стенда для контроля основных электрических и энергетических параметров ВУМ, а также температурных полей печатных плат submodule ВУМ с помощью инфракрасного (ИК) микроскопа OptoTherm. Выборочные распределения submodule ВУМ по энергетическим параметрам показали, что качество ВУМ определяется в значительной степени качеством СВЧ-трактов и качеством сборки. При исследовании с помощью ИК-микроскопа температурных полей печатных плат submodule ВУМ, не прошедших выходной контроль по выходной мощности, при работе ВУМ в номинальных и более жестких по рассеиваемой мощности режимах установлено, что до 75% дефектов сборки и пассивных цепей submodule ВУМ проявляются в локальных перегревах элементов submodule. В частности, наблюдается сильная (с коэффициентом $\sim 0,8$) отрицательная корреляционная связь между уровнем выходной мощности и температурой перегрева балансного резистора в выходном сумматоре мощности. Детальный анализ причин локальных перегревов элементов ВУМ показал, что до 40% выявленных дефектов можно

1 Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ и Правительства Ульяновской области, проект № 18-47-730024.

устранить путем корректировки монтажа. Остальные 60% дефектов субмодулей ВУМ, вероятно, определяются качеством самих элементов.

Ключевые слова: приемно-передающие модули АФАР, субмодуль выходного усилителя мощности, измерительный стенд, выходная мощность, температурные поля, диагностика, дефекты.

THE QUALITY DIAGNOSTICS OF OUTPUT POWER AMPLIFIERS OF THE APAA TRANSCEIVER MODULES BY TEMPERATURE FIELDS

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Science in Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Physics of Gorky State University; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Head of the Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of monographs, papers in the field of the modeling and researching semiconductor devices and integrated circuits parameters and measure of its thermal parameters. e-mail: sva@ulstu.ru.

Ruslan Gennadievich Tarasov, graduated from the Ulyanovsk High Military Engineering School of Communications; Director of Research-and-Production Association 'NPP 'Zavod Iskra' JSC; Postgraduate Student at the Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of development of analytical quality control methods and automated measurement tools of semiconductor devices. e-mail: rgtarasov@mail.ru.

Aleksandr Aleksandrovich Kulikov, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Lead Engineer at the Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student at the Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of development of semiconductor devices automated measurement tools. e-mail: ufire@mv.ru.

Abstract

A structural diagram of Transmit/Receive modules (TRM) of Active Phased Array Antennas X-band is briefly reviewed and it is shown that the quality of TRM is largely determined by the build quality of the most critical node - submodules of output power amplifiers (OPA) with two parallel-connected monolithic integrated circuits (MIC) microwave amplifiers. The structure and the operation of the measuring stand for monitoring the main electrical and energy parameters of the OPA, as well as the temperature fields of printed circuit boards of the OPA submodules using an OptoTherm infrared (IR) microscope are given. Selective distributions of the OPA submodules by energy parameters showed that the quality of the OPA is determined to a large extent by the quality of the microwave paths and the build quality. When examining the temperature fields of printed circuit boards of OPA submodules using an IR microscope, which did not pass the output power control, when using OPA in nominal and more severely dissipated power modes, it was established that up to 75% of assembly defects and passive circuits of OPA submodules appear in local overheating of submodule elements. In particular, a strong (with a coefficient of ~ 0.8) negative correlation is observed between the output power level and the overheating temperature of the balanced resistor in the output power adder. A detailed analysis of the causes of local overheating of OPA elements showed that up to 40% of the detected defects can be eliminated by adjusting the installation. The remaining 60% of defects of the OPA submodules are probably determined by the quality of the elements themselves.

Key words: APAA transceiver modules, submodules of output power amplifiers, measuring stand, output power, temperature fields, diagnostics, defects.

ВВЕДЕНИЕ

Приёмно-передающий модуль (ППМ) активной фазированной антенной решетки (АФАР) представляет собой электронный модуль на печатной плате, содержащий приемный и передающий каналы [1, 2]. Для формирования сканирующей диаграммы направленности заданной формы АФАР содержит большое число ППМ. При высокой себестоимости ППМ каждый процент забракованных на приемно-сдаточных испытаниях изделий приводит к многомиллионным потерям.

Структурная схема ППМ показана на рисунке 1 [2]. Передающий канал содержит функциональный узел, обеспечивающий предварительное усиление передаваемого сигнала и управление его параметрами, и функциональный узел, обеспечивающий выходное усиление передаваемого сигнала. Приемный канал – функциональный узел, обеспечивающий усиление принимаемого сигнала и управление его параметрами. Каждый функциональный узел выполнен в виде отдельного конструктивного блока, механически и электрически

соединенного с несущей печатной платой, размещенной в защитном металлическом корпусе.

Активный элемент ППМ АФАР – выходной усилитель мощности (ВУМ) делает ППМ электродинамически не-взаимным. Для обеспечения работы устройства как на приём, так и на передачу, приёмный и передающий каналы разделяются либо коммутатором, либо циркулятором.

В состав приёмного канала входят следующие компоненты: устройство защиты приёмника, малошумящий усилитель (МШУ), фазовращатель $\Delta\phi$, аттенюатор (АТТ). Отличие передающего канала от приемного заключается в отсутствии устройства защиты и менее жестких требованиях к усилителю по шумам. При этом ВУМ должен обеспечивать существенно большую выходную мощность, чем приёмный.

Создание современных ППМ АФАР стало возможным благодаря развитию полупроводниковой СВЧ-электроники и, в частности, развитию технологии СВЧ-усилителей мощности на основе монокристаллических интегральных схем (МИС). В развитие этих технологий на основе арсенида галлия (GaAs) в течение двух последних десятилетий вкладывались значительные средства и интеллектуальные силы ведущих мировых электронных компаний и университетов [3]. Каждый submodule ВУМ содержит, как правило, две параллельно включенные МИС (рис. 2). Входная мощность распределяется между МИС по полосковым линиям, с развязкой через балластные резисторы. Импульсная мощность современной типичной GaAs МИС ППМ АФАР X-диапазона (средняя частота 10 ГГц) составляет ~10 Вт, средняя мощность – 1–3 Вт [3]. В номинальном режиме ВУМ усиливает СВЧ-радиоимпульсы длительностью 5 мкс, скважностью 5, номинальная выходная мощность ВУМ 15 Вт при уровне входной мощности 250 мВт, с коэффициентом полезного действия (КПД) порядка 20%.

МИС ВУМ потребляет основную мощность от источника питания, и тепловой режим работы ППМ определяется в основном тепловыделением в активных элементах ВУМ; мощность, выделяющаяся в остальных элементах, много меньше [4, 5]. Ключевыми параметрами

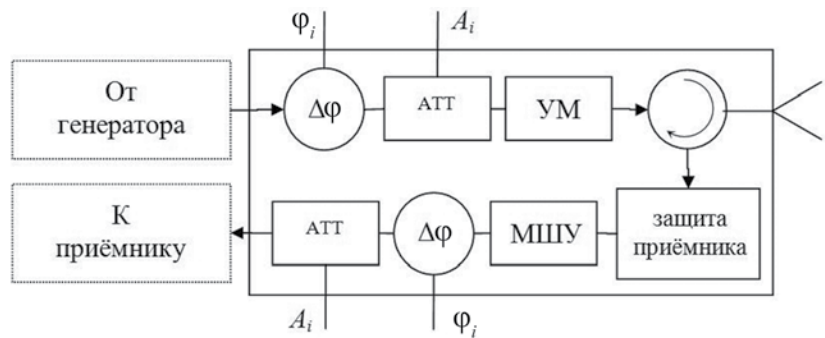


Рис. 1. Структурная схема ППМ для АФАР [2]

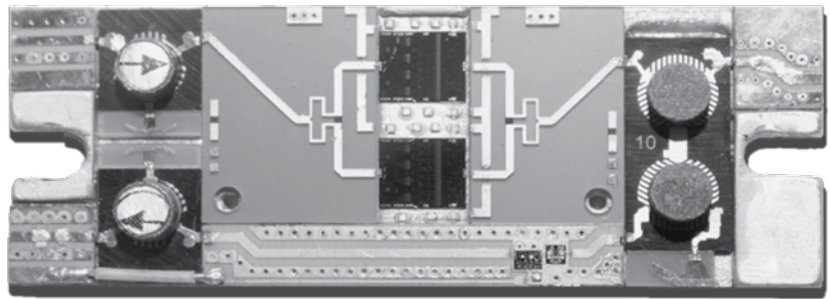


Рис. 2. Внешний вид submodule ВУМ АФАР

трами submodule ВУМ являются коэффициент усиления мощности и КПД. Значения этих параметров зависят от многих факторов, но главным образом от качества СВЧ-трактов и качества монтажа элементов ВУМ. Отклонение этих параметров от номинальных значений, очевидно, будет проявляться в изменении теплового режима работы ВУМ.

В данной статье рассматриваются возможности диагностики качества сборки submodule ВУМ ППМ АФАР X-диапазона по температурным полям их печатных плат.

1 Стенд для исследования характеристик submodule ВУМ

Измерения энергетических параметров submodule ВУМ и контроля их температурных полей проводились на исследовательском стенде [6], структурная схема которого показана на рисунке 3. Коэффициент усиления и выходная мощность ВУМ измерялись при длительности импульсов 5 мкс, скважности 5, уровне входной мощности 250 мВт, рабочей частоте 10 ГГц; контроль температурных полей осуществлялся в более жестких режимах работы.



Рис. 3. Структурная схема стенда для исследования характеристик submodule ВУМ

В состав исследовательского стенда входят следующие приборы и блоки: генератор СВЧ Rohde&Schwarz SMF 100A; измеритель мощности Rohde&Schwarz AVG Power Sensor NRP-Z24; усилитель мощности Mini-Circuits amplifier ZVE-3W-183+; источник питания Nameg HMP4040; микроскоп ИК-диапазона OptoTherm.

Управление режимом измерения осуществляется персональным компьютером 1, изменяемые параметры передаются для регистрации в персональный компьютер 2.

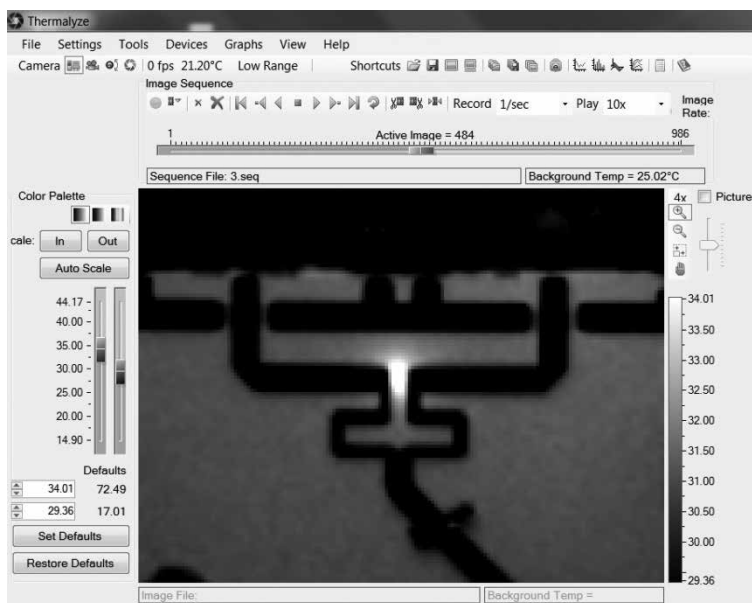
2 КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СУБМОДУЛЕЙ ВУМ

С целью выявления основных причин отклонения коэффициента усиления по мощности ВУМ от номинального значения для последующего улучшения технологических операций сборки субмодулей с помощью ИК-микроскопа OptoTherm были проведены исследования температурных полей печатных плат субмодулей ВУМ X-диапазона в количестве 270 штук, которые предварительно были отбракованы по выходной мощности ($P_{вых}$ менее 12 Вт).

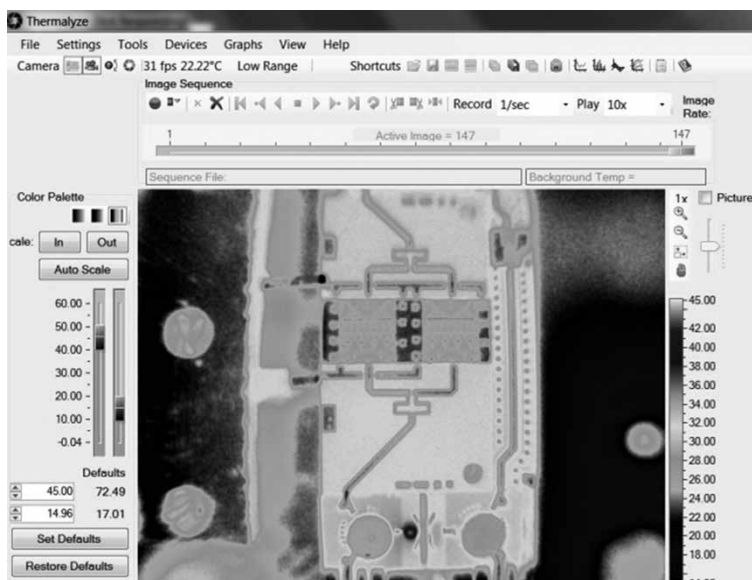
По результатам детального анализа температурных полей и причин локальных перегревов печатных плат субмодулей ВУМ выявлены такие дефекты субмодулей, как непропаи входных и выходных ферритовых циркуляторов, плохая посадка кристаллов МИС, непропаи перемычек от конденсаторов до контактных площадок МИС, несогласованные плечи делителей и выходных сумматоров мощности, приводящие к увеличению коэффициента стоячей волны (КСВ) и, как следствие, к падению выходной мощности [7].

Типичные картины перегрева балансного резистора и ферритового циркулятора на экране ИК-микроскопа приведены на рисунке 4. Нагрев циркулятора чаще всего обусловлен некачественной пайкой или рассогласованностью циркулятора и СВЧ-тракта. Перегрев балансного резистора происходит из-за разной выходной мощности кристаллов МИС, а также из-за разбаланса отраженной мощности.

У 65 образцов исследованных ВУМ (24% от общего числа) явных локальных перегревов не наблюдалось,



а)



б)

Рис. 4. Локальный перегрев балансного резистора при увеличении $\times 4$ (а) и локальный перегрев ферритового циркулятора при увеличении $\times 1$ (б)

и низкий уровень выходной мощности этих образцов определяется либо качеством и характеристиками МИС, либо качеством входного СВЧ-тракта.

Распределение выявленных дефектов субмодулей ВУМ по видам приведено в таблице.

Таблица

Распределение выявленных дефектов ВУМ с локальными перегревами по видам

	Непропай входных ферритовых циркуляторов	Непропай выходных ферритовых циркуляторов	Непропай кристалла МИС	Непропай контактов перемычек	Перегрев балансного резистора	Перегревов нет, причины не ясны
Всего	30	41	50	24	60	65
Удалось устранить	28	33	2	23	–	21
Не удалось устранить	2	8	48	1	60	44

3 Анализ выявленных дефектов субмодулей ВУМ

У 107 субмодулей выявленные дефекты удалось устранить (см. табл.) путем замены греющихся элементов или корректировкой монтажа: у 28 образцов – заменой входных ферритовых циркуляторов; у 33 – заменой выходных ферритовых циркуляторов; у 2 – заменой кристалла МИС, у 23 – повторной пайкой соединительных перемычек; у 21 субмодуля без явных перегревов выходная мощность восстанавливалась путем коррекции СВЧ-тракта с помощью микродобавок индия к золотым полоскам.

У 163 образцов исследованных субмодулей устранить дефекты не удалось. У 44 образцов перегревов не обнаружено, что обусловлено, вероятно, либо низким коэффициентом усиления МИС СВЧ-усилителя, либо рассогласованностью входного СВЧ-тракта [7].

У 25 ВУМ с выходной мощностью в штатном режиме меньше минимально допустимой была измерена температура перегрева балансного резистора в более жестком режиме [8]: при длительности импульсов 100 мкс и скважности 10. Поле корреляции между выходной мощностью и температурой перегрева показано на рисунке 5; коэффициент корреляции – 0,74.

На основе проведенных исследований для диагностики качества субмодулей ВУМ можно предложить следующую методику.

1. Если субмодуль ВУМ не обеспечивает необходимый уровень выходной мощности в номинальном режиме, необходимо произвести исследование температурных полей печатной платы субмодуля на ИК-микроскопе с целью выявления локальных перегревов в более жестком режиме работы: при увеличении длительности импульсов мощности в 10–20 раз.

2. При выявлении перегрева произвести замену или корректировку монтажа соответствующего элемента субмодуля.

3. В случае, если нет явных дефектов и локальные перегревы отсутствуют, необходимо произвести подстройку СВЧ-трактов входных и выходных делителей мощности путем наложения микродобавок индия на полоски.

4. Выполнить повторное измерение субмодулей в штатном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контроль температурных полей печатных плат субмодулей ВУМ АФАР X-диапазона с помощью ИК-микроскопа позволяет оперативно выявлять дефекты монтажа субмодулей по локальным перегревам. Локальные перегревы являются индикатором большинства (до 75%) дефектов субмодулей, приводящих к снижению

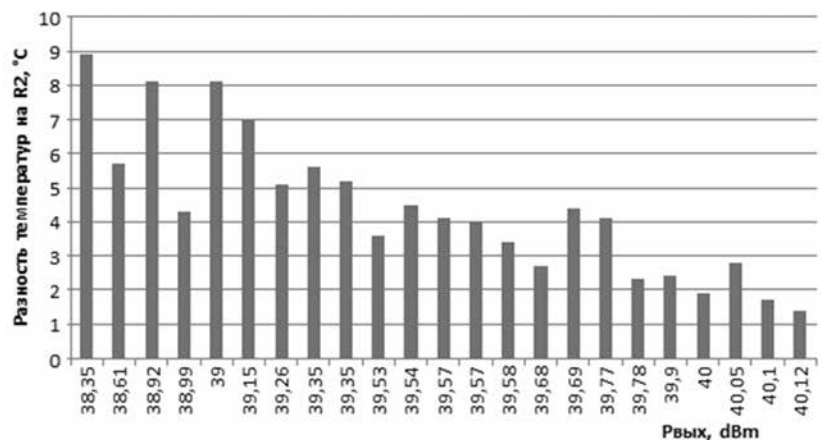


Рис. 5. Поле корреляции между температурой перегрева балансного резистора и выходной мощностью ВУМ

выходной мощности в штатном режиме. Значительная часть (до 40%) выявляемых по локальным перегревам дефектов субмодулей ВУМ может быть устранена путем замены греющихся элементов, корректировкой монтажа элементов и путем коррекции полосковых линий СВЧ-тракта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приемо-передающий субмодуль X-диапазона частот / Г.Я. Красников, А.В. Волосов, Е.Ю. Котляров [и др.] // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 2016. – № 3. – С. 23–29.
2. Езопов А.В., Коломейцев В.А. Электромагнитное взаимодействие компонентов приемного и передающего каналов в приемо-передающих модулях АФАР X-диапазона // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 2 (55), вып. 1. – С. 17–21.
3. Викулов И. Монолитные интегральные схемы СВЧ // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2012. – № 7. – С. 60–73.
4. Езопов А.В., Коломейцев В.А. Разработка метода контроля температуры выходного усилителя мощности приемо-передающего модуля активной фазированной антенной решетки // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (52), вып. 1. – С. 149–153.
5. Моделирование и исследование тепловых режимов работы ППМ АФАР / В.А. Сергеев, Р.Г. Тарасов, А.А. Куликов, А.М. Ходаков // Вузовская наука в современных условиях : сб. матер. 48-й науч.-техн. конф. В 3 ч. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 37–40.
6. Тарасов Р.Г., Сергеев В.А. Измерительный комплекс для контроля характеристик субмодулей выходных усилителей мощности приемо-передающих модулей АФАР X-диапазона // Радиотехника. – 2018. – № 6. – С. 98–102.
7. Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Куликов А.А. Выборочные распределения субмодулей выходных усилителей мощности АФАР X-диапазона по энергетическим пара-

метрам // Известия вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 93–98.

8. Сергеев В.А., Тарасов Р. Г. Куликов А.А. Диагностика качества сборки выходных усилителей приемо-передающих модулей АФАР методами ИК-микроскопии // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 192–193.

REFERENCES

1. Krasnikov G.Ia., Volosov A.V., Kotliarov E.Iu. et al. Priemo-peredaiushchii submodul X-diapazona chastot [X-Band Transmit/Receive Module]. *Elektronnaia tekhnika. Ser. 3. Mikroelektronika* [Electronics. Series 3. Microelectronics], 2016, no. 3, pp. 23–29.
2. Ezopov A.V., Kolomeitsev V.A. Elektromagnitnoe vzaimodeistvie komponentov priemnogo i peredaiushchego kanalov v priemo-peredaiushchikh moduliakh AFAR X-diapazona [Electromagnetic Interference Components Receiving and Transmitting Channels in Receiving and Transmitting Module Active Phased Array X-Band]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bull. of Saratov State Technical University], 2011, no. 2 (55), iss. 1, pp. 17–21.
3. Vikulov I. Monolitnye integralnye skhemy SVCh [Monolithic Microwave ICs the Technology Basis of AESA]. *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business Journal], 2012, no. 7, pp. 60–73.
4. Ezopov A.B., Kolomeytsev V.A. Razrabotka metoda kontrolya temperatury vykhodnogo usilitelia moshchnosti priemo-peredaiushchego modulia aktivnoi fazirovannoi antennoi reshetki [The Development of Temperature Control Method of Output Power Amplifier Receiving and Transmitting Module Active Phased Array]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bull. of Saratov State Technical University], 2011, no. 1 (52), iss. 1, pp. 149–153.
5. Sergeev V.A., Tarasov R.G., Kulikov A.A., Khodakov A.M. Modelirovanie i issledovanie teplovykh rezhimov raboty PPM AFAR [Simulation and Research of Heat Operation of Receiving and Transmitting Module Active Phased Array]. *Vuzovskaia nauka v sovremennykh usloviakh. Sb. mater. 48-i nauch.-tekhn. konf. v 3 ch.* [Proc. of the 48th Sci. Conf. in Three Volumes. Academic Research in the Contemporary Context]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2014, Part. 2, pp. 37–40.
6. Tarasov R.G., Sergeev V.A. Izmeritelnyi kompleks dlia kontrolya kharakteristik submodulei vykhodnykh usilitelei moshchnosti priemo-peredaiushchikh modulei AFAR X-diapazona [Measuring Complex for the Control of Characteristic of Output Power Amplifiers of X-Band Active Phased ARRAY Antennas]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2018, no. 6, pp. 98–102.
7. Sergeev V.A., Tarasov R.G., Kulikov A.A. Vyborochnye raspredeleniia submodulei vykhodnykh usilitelei moshchnosti AFAR X-diapazona po energeticheskim parametram [Sampling Distributions of Output Power Amplifiers of X-Band Active Phased Array Antennas on Power Parameters]. *Izvestiia vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2018, vol. 23, no. 1, pp. 93–98.
8. Sergeev V.A., Tarasov R. G. Kulikov A.A. Diagnostika kachestva sborki vykhodnykh usilitelei priemo-peredaiushchikh modulei AFAR metodami IK-mikroskopii [The Quality Diagnostics of Output Power Amplifiers of the APAA Transceiver Modules by the Method of IR-Microscopy]. *Fundamentalnye problemy radioelektronnogo priborostroeniia* [Fundamental Problems of Radioelectronic Instrument-Making Industry], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 192–193.