УДК 621.383.52:539.12.04

DOI:10.36815/2073-8250-2020-258-3-43-52

350-ВАТТНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ X-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

**В.Е. Акинин, О.В. Борисов, К.А. Иванов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев,
Ал.В. Редька**

АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, 27

В статье представлены результаты проектирования и изготовления твердотельного усилителя мощности X-диапазона частот с воздушным охлаждением на основе AlGaIn/GaN/SiC ПТБШ. В состав усилителя мощности входят: предварительный усилитель мощности (ПУМ), выходные усилители мощности (ВУМ), блок вторичных источников питания (ВИП), цифровой блок управления, система контроля работоспособности усилителя мощности, блок волноводных сумматоров СВЧ мощности.

Ключевые слова: *полевой транзистор с барьером Шоттки (ПТБШ), выходной усилитель мощности (ВУМ), тепловое моделирование, суммирование СВЧ мощности, СВЧ усилитель мощности, СВЧ модуль*

Сведения об авторах: *Акинин Вячеслав Евгеньевич, akinin_ve@pulsarnpp.ru; Борисов Олег Валерьевич, 466@pulsarnpp.ru; Иванов Кирилл Андреевич, ivanov_ka@pulsarnpp.ru; Колковский Юрий Владимирович, д.т.н., проф., kolk@pulsarnpp.ru; Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н., minnebaev_vm@pulsarnpp.ru; Редька Алексей Владимирович, Redka_av@pulsarnpp.ru*

AIR-COOLED 350 W X-BAND SOLID-STATE POWER AMPLIFIER

V. E. Akinin, O. V. Borisov, K. A. Ivanov, Yu. V. Kolkovskiy, V. M. Minnebaev, Al. V. Redka

S&PE Pulsar JSC, 105187 Moscow, Okruzhnoy pr., 27

In this paper we present the results of the design and production of an air-cooled X-band solid-state power amplifier based on AlGaIn/GaN/SiC Schottky FET. The power amplifier includes: preliminary power amplifier, output power amplifiers, set of secondary power supplies, digital control unit, monitoring system for the power amplifier performance, set of microwave power waveguide combiners.

Keywords: *Schottky barrier field-effect transistor (Schottky FET), output power amplifier, thermal model testing, microwave power combining, microwave power amplifier, microwave module*

Data on authors: *Akinin Vyacheslav Evgenyevich, akinin_ve@pulsarnpp.ru; Borisov Oleg Valeryevich, 466@pulsarnpp.ru; Ivanov Kirill Andreyevich, ivanov_ka@pulsarnpp.ru; Kolkovskiy Yuri Vladimirovich, Sc.D., Professor., kolk@pulsarnpp.ru; Minnebaev Vadim Minkhatovich, Ph.D., minnebaev_vm@pulsarnpp.ru; Redka Aleksey Vladimirovich, redka_av@pulsarnpp.ru*

Введение

Развитие технологий нитрид-галлиевых мощных и маломощных СВЧ транзисторов, обладающих широким спектром преимуществ относительно транзисторов на арсениде галлия [1], приводит к всё более широкому их применению в составе СВЧ трактов усилителей мощности, приёмо-передающих, приёмных модулей и антенных модулей для АФАР в широком диапазоне частот, включая сантиметровый и миллиметровый [2-5]. Основными предпосылками внедрения новых технологий являются:

- изменение внутренней структуры современных радиоэлектронных систем (РЭС), обусловленное внедрением АФАР, состоящих из большого количества одинаковых функционально законченных управляемых блоков;

- непрерывно возрастающие требования к увеличению функций РЭС при уменьшении массогабаритных характеристик;

- совершенствование параметров СВЧ полупроводниковых приборов: увеличение удельной выходной СВЧ мощности практически во всех диапазонах рабочих частот, повышение линейности и широкополосности, снижение уровня собственных шумов.

Технология создания изделий СВЧ электроники на нитриде галлия относится к технологиям, существенно влияющим на облик, функциональные и технические характеристики радиоэлектронных систем.

Особенно ярко преимущества GaN/SiC HEMT проявляются при работе в импульсном режиме, позволяя увеличить отдаваемую активным прибором мощность при увеличении (или сохранении) КПД [6]. Применяются твердотельные устройства и в качестве предварительных усилителей в комплексированных изделиях, где в качестве выходного усилительного каскада выступают электровакуумные приборы [7]. Усилители мощности являются основным комплектующим элементом радиоло-

кационных систем наземного, морского и аэрокосмического базирования, предназначенных для работы как в импульсном, так и непрерывном режимах.

Особенно остро в такого рода изделиях стоит вопрос выбора типа охлаждения и конструкции радиатора, позволяющих обеспечить безопасный тепловой режим работы СВЧ транзисторов, что в свою очередь напрямую влияет на безотказность и надёжность конечного изделия.

В статье представлены результаты разработки широкополосного твердотельного 300-ваттного усилителя мощности X-диапазона, работающего в импульсном режиме.

Постановка задачи

Разрабатываемый усилитель мощности должен обладать техническими характеристиками, представленными в таблице.

Усилитель должен питаться от промышленной 3-фазной сети 220 В/400 Гц и функционировать круглосуточно в условиях охлаждения кондиционированным воздухом.

В результате предварительного схемотехнического моделирования определён функциональный состав блоков усилителя мощности:

- предварительный усилитель;
- выходные усилители;
- дополнительный выход контрольного сигнала СВЧ;
- дополнительный выход детектированного выходного сигнала уровнем LVDS;
- импульсный источник питания от сети 220 В/400 Гц;
- блок управления и контроля по интерфейсу RS-422;
- тумблер ручного переключения режимов «МЕСТ-ОТКЛ-ДИСТ»;
- устройство защитного отключения по току и температуре корпуса;
- устройство защитного отключения по длительности и скважности импульса;
- устройство защитного отключения по КСВН нагрузки;

Таблица

Основные технические характеристики модуля усилителя мощности

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Норма		Примечание
			не менее	не более	
1	Рабочий диапазон частот, ГГц	f_p	X-диапазон частот		
2	Выходная импульсная мощность, Вт	$P_{\text{вых.имп}}$	300	–	1
3	Подавление выходного сигнала в паузе между импульсами, дБ	α	130	–	
4	Неравномерность $P_{\text{вых.имп}}$, дБ		–	2	1
5	Время готовности из холодного состояния, сек	$t_{\text{гот}}$	–	5	
6	Уровень контрольного сигнала, мВт	$P_{\text{контр}}$	3	10	На нагрузку 50 Ом
7	Огибающая выходного сигнала	$f_{\text{дет } fp}$	Уровень LVDS		
8	Уровень побочных составляющих в импульсном режиме при отстройке на половину частоты повторения относительно несущей, дБ	$\alpha_{\text{побочн.}}$	90	–	
9	КСВН входа	КСВ _{вх}	–	1,4	
10	Параметры импульса (по огибающей СВЧ сигнала): длительность, мкс длительность фронта, мкс скважность	t_n t_{ϕ} Q	0,5 – 5	1100 0,5 –	1
11	Скос вершины импульса, дБ		–	1,5	1
12	Задержка фронта и среза выходного СВЧ импульса по отношению к фронту и срезу ИМ, мкс	t_z	–	1	
Примечания: 1 измеряется при КСВН нагрузки не более 1,3					

– устройство визуального контроля исправности и управления.

Конструкторско-технологическое проектирование

Для достижения заданного уровня выходной мощности усилителя и унификации его составных частей при проектировании было принято решение применить «блочную» компоновку с четырьмя идентичными выходными усилителями мощ-

ности. Функциональная схема усилителя мощности представлена на рис. 1.

В целях минимизации потерь мощности предварительный усилитель мощности (ПУМ) должен иметь четыре синфазных СВЧ выхода.

Модуль ПУМ представляет собой двухэ-тажный герметичный блок. Выход каждого канала модуля ПУМ имеет свой собственный выходной усилитель мощности. В состав предварительного усилителя мощности также входят:

Рис. 1

Функциональная схема усилителя мощности

В состав предварительного усилителя мощности также входят:

- цифровые шестизрядные фазовращатели;
- гибридные интегральные схемы усилителей мощности (ГИС УМ);
- пассивный делитель мощности;
- развязывающие ферритовые вентили.

В качестве усилительных каскадов в

предварительном усилителе мощности используются гибридные интегральные схемы на основе нитрид-галлиевых транзисторов, коэффициент усиления каждого каскада $K_{ур} = 10 \pm 1$ дБ. В качестве базовых кристаллов используются серийно выпускаемые АО «НПП «Пульсар» транзисторы. Внешний вид кристалла БКВП.757643.007 представлен на рис. 2.

Рис. 2

Внешний вид кристалла БКВП.757643.007

Рис. 3
Внешний вид модуля ПУМ

Для обеспечения эффективного суммирования мощностей каждого канала 300-ваттного усилителя мощности в каждом канале модуля ПУМ установлена монолитная интегральная схема 6-разрядного цифрового фазовращателя, используемая для корректировки начального фазового сдвига каждого канала ВУМ.

Внешний вид модуля ПУМ представлен на рис. 3.

Модуль выходного усилителя мощности (ВУМ) представляет собой трёхкаскадный усилитель мощности на основе внутрисогласованных нитрид-галлиевых транзисторов. Выходная мощность транзистора первого каскада $P_{\text{вых1}} \geq 3$ Вт при коэффициенте усиления $K_{\text{ур1}} = 10 \pm 1$ дБ, выходная мощность транзистора второго каскада $P_{\text{вых2}} \geq 20$ Вт при коэффициенте усиления $K_{\text{ур1}} = 8 \pm 1$ дБ,

в выходном каскаде стоят два транзистора с выходной мощностью $P_{\text{вых3}} \geq 50$ Вт при коэффициенте усиления $K_{\text{ур1}} = 7 \pm 1$ дБ. В качестве сумматора используются микрополосковые мосты типа «гибридное кольцо», выполненные на поликоровой подложке толщиной $H = 1$ мм [3].

Внешний вид кристаллов GaN/SiC СВЧ транзисторов, используемых в составе ГИС и внутрисогласованных транзисторов из состава модуля ВУМ, представлен на рис. 4.

Внутрисогласованные транзисторы изготавливаются в корпусах из сплава МД-40, что обусловлено тепловыми режимами работы активных элементов. На основе проведённого предварительного моделирования кристаллов транзисторов установлены коэффициенты нелинейной модели HFET

Рис. 4
Внешний вид кристаллов БКВП. 757643.046 и БКВП. 757643.048

Куртиса, используемой в системе схемотехнического проектирования Microwave Office, для активной области каждого типа используемого кристалла. Далее модель активной области кристалла дополняется постоянными реактивностями, найденными в результате электромагнитного моделирования топологии пассивных частей кристалла. Созданная таким образом нелинейная модель кристалла транзистора

адекватно описывает динамические и СВЧ параметры и используется для проектирования топологии цепей согласования в составе ГИС и внутрисогласованных транзисторов.

Модуль ВУМ является герметичным блоком с коаксиальным СВЧ-входом и волноводным СВЧ-выходом сечением 23x10 мм. Внешний вид модуля ВУМ представлен на рис. 5.

Рис. 5

Внешний вид модуля ВУМ

Тепловое моделирование

Тепловое моделирование модуля проведено с целью выбора конструкции модуля ВУМ, взаимного расположения его составных частей и расчёта параметров радиатора.

Особенностью функционирования модуля в аппаратуре является отсутствие жидкостного охлаждения и наличие системы подачи кондиционированного воздуха. Для решения поставленной задачи было проведено тепловое моделирование конструкции с целью обеспечения требуемой надёжности изделия.

Проведение расчёта позволило определиться с конструкцией воздушного ради-

атора охлаждения, позволяющего обеспечить необходимый тепловой баланс модуля в наиболее теплонагруженном режиме работы при длительности зондирующего импульса $\tau = 1,1$ мс и скважности $Q = 5$.

Усилитель мощности (модуль ВУМ) представляет собой моноблок с предварительным (ПУМ) и выходными (ВУМ) усилителями мощности, а также вторичными источниками питания и блоком цифрового управления и диагностики.

Источниками тепла в усилителе мощности с учётом минимальной скважности по питанию $Q_{\min} = 4$ являются:

- четыре ВУМ ($P_{\text{потр. вум}} = 59,6$ Вт);
- ПУМ ($P_{\text{потр. пум}} = 17,2$ Вт);

- модуль электропитания МАА1500-1П27СГП ($P_{\text{потр. ип}} = 41,3 \text{ Вт}$);
- шесть модулей защиты и фильтрации МРМ4-В20ДМУ ($P_{\text{потр. мзф}} = 7,5 \text{ Вт}$);
- пять вторичных источников питания МДМ500-1У28ТУА ($P_{\text{потр. вып1}} = 12,5 \text{ Вт}$);
- пять источников питания МДМ25-1Ш05ТУР ($P_{\text{потр. вып2}} = 1,5 \text{ Вт}$).

Таким образом, модуль ВУМ имеет сум-

марную энергетику (мощность тепловыделения) $P_{\Sigma} = 411 \text{ Вт}$.

Входное сечение воздуховода имеет габариты $594 \times 88 \text{ мм}$ с расходом воздуха $Q_S = 1700 \text{ м}^3/\text{ч}$ и скоростью воздуха $V_S = 9 \text{ м/с}$ при температуре кондиционированного воздуха на входе $T_{\text{вх}} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Схематичное изображение модуля ВУМ в воздуховоде представлено на рис. 6.

Рис. 6

Посадка модуля ВУМ на воздуховод

Для проведения теплового расчёта построена упрощённая «расчётная» модель модуля ВУМ, масса расчётной модели скорректирована для обеспечения эквивалентности по теплоёмкости реальному изделию. В упрощённой модели отсутствуют элементы конструкции и крепежа, не влияющие на тепловые процессы, а также не учитывается масса латунных волноводов.

Тепловой расчёт проводился с использованием средств расчётного комплекса «ANSYS Iсерак 19.0», в котором используется консервативный метод контрольного объёма.

По результатам моделирования определены тип и параметры радиатора воздушного охлаждения. Тип радиатора – рёберный, рёбра размещены по направлению потока воздуха. Площадь радиатора $S = 99,136 \text{ см}^2$. Количество рёбер $N = 42 \text{ шт.}$ Высота ребра

60 мм, толщина ребра 3 мм, расстояние между рёбрами 3,5 мм.

Результаты проведения теплового моделирования представлены на рис. 7.

По результатам расчёта можно сделать вывод, что выбранная конструкция как самого модуля, так и радиаторов охлаждения позволяет не допустить перегрева наиболее критичных элементов – мощных внутрисогласованных СВЧ транзисторов, температура канала которых не должна превышать $210 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для подтверждения параметров надёжности и безотказной работы.

350-ваттный усилитель мощности

Ввиду того, что нитрид-галлиевые транзисторы не могут работать в классе С, в целях повышения КПД усилителя применена импульсно-модулированная схема питания, при которой модулируется пита-

Рис. 7

Распределение температур в конструкции модуля

ние как по стоку транзистора, так и по затвору. При этом основной с точки зрения формирования импульса является затворная модуляция, которая за счёт отсутствия необходимости модулирования высоких уровней напряжений и токов обеспечивает уровень переднего и заднего фронта не более 100 нс.

В целях обеспечения подавления выходного сигнала в паузе между импульсами на уровне $\alpha \geq 130$ дБ в схеме подачи питания установлены преобразователи с низким уровнем шума, а также фильтры по шинам питания.

Конструктивно импульсный источник питания состоит из четырёх подблоков:

- преобразователя переменного трёхфазного напряжения 220 В 400 Гц в постоянное напряжение 27 В;
- блока фильтров шины питания 27 В;
- блока преобразователей из постоянного напряжения шины 27 В в группу напряжений для питания СВЧ модулей и блока управления;
- блока преобразователей из постоянного напряжения шины 27 В в 30 В, которое служит для питания стоков СВЧ модулей.

В качестве источников питания используются отечественные вторичные источники питания производства ООО «АЕДОН» серии МДМ, а также преобразователь переменного трёхфазного напряжения в постоянное того же производителя серии МАА.

В целях обеспечения скоса вершины импульса не более 1,5 дБ при длительности импульса $t_{\text{и}} = 1100$ мкс в схеме питания использованы высоковольтные танталовые конденсаторы большой ёмкости, обеспечивающие заданный уровень напряжения питания на стоках транзисторов на протяжении всего импульса.

Питание блоков и составных частей УМ осуществляется через импульсный источник электропитания от сети 3 ~ 400 Гц 220 В.

Входящий в состав модуля усилителя мощности блок управления и контроля служит для управления выходными усилителями мощности, предварительным усилителем мощности и импульсным источником питания, а также реализует функции:

- защитное отключение по току и температуре корпуса;

- защитное отключение по длительности и скважности импульса;
- защитное отключение по КСВН на грузки.

Управление блоком может осуществляться в двух режимах: местном и дистанционном (по интерфейсу RS-422). Устройство имеет систему визуального контроля состояния, которое выполнено с помощью группы светодиодов, установленных на боковой панели усилителя мощности. Блок управления и контроля с помощью дат-

чиков отслеживает параметры усилителя мощности: температуру в контрольных точках, напряжение питания усилителей мощности, параметры импульса модуляции и четыре уровня выходной мощности.

В результате проектирования разработан 350-ваттный усилитель мощности на нитрид-галлиевых СВЧ транзисторах. Изготовленная партия усилителей успешно выдержала испытания на воздействие внешних факторов. Внешний вид усилителя представлен на рис. 8.

Рис. 8

Внешний вид 350-ваттного усилителя мощности

Выводы

Изготовлен и испытан 350-ваттный усилитель X-диапазона на отечественных нитрид-галлиевых СВЧ транзисторах.

Преимущества новой промышленной технологии нитрид-галлиевых СВЧ приборов особенно ярко проявляются при обеспечении выполнения специальных требований, предъявляемых при использовании СВЧ приборов в различных типах современных РЭС.

Использование «блочной» компоновки усилителя мощности сокращает трудоза-

траты на наладку и проверку изделия в целом, а использование цифровых фазовращателей в каждом канале модуля ПУМ позволяет оперативно производить замену блоков выходных усилителей при наладке и ремонте.

Предварительное тепловое моделирование позволяет оптимизировать конструкцию не только конфигурации радиатора охлаждения, но и взаимное расположение теплонагруженных блоков в составе изделия в целом.

Литература

1. Груздов, В.В. Электронные блоки на основе AlGaIn/GaN/SiC СВЧ гетеротранзисторов для космических систем / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев // Известия Тульского университета. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – С. 201-207.
2. Герасимов, А.О. Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN транзисторах: опыт изготовления / А.О. Герасимов, В.Ф. Синкевич, В.М. Миннебаев, Ал.В. Редька // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1 (228). – С. 30-37.
3. Васильев, А.Г. Твердотельный нитрид-галлиевый 500-ваттный импульсный усилитель мощности X-диапазона / А.Г. Васильев, А.А. Глыбин, К.А. Иванов, Ю.В. Колковский, К.С. Мещерякова, В.М. Миннебаев // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – Вып. 1 (226). – С. 83-88.
4. Акинин, В.Е. 8-канальный приёмо-передающий модуль X-диапазона с первичной цифровой обработкой сигнала / В.Е. Акинин, О.В. Борисов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев, Ал.В. Редька, Ан.В. Редька, А.В. Ушаков, А.В. Царев // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 1 (248). – С. 57-67.
5. Груздов, В.В. Новые нитрид-галлиевые технологии для РЛС с АФАР / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский // Интеграл. – 2015. – № 1-2. – С. 4-6.
6. Аболдуев, И.М. Антенные модули для АФАР X-диапазона / И.М. Аболдуев, О.В. Борисов, А.О. Герасимов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев, А.А. Осиповский, Ал.В. Редька, Ан.В. Редька, А.В. Тихомиров // Наноиндустрия. – 2018. – № 5 (82). – С. 505-510.
7. Аболдуев, И.М. Импульсный режим работы мощных СВЧ гетеро-полевых AlGaIn/GaN транзисторов / И.М. Аболдуев, Г.З. Гарбер, А.М. Зубков, К.А. Иванов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев, Ал.В. Редька, А.В. Ушаков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1 (228). – С. 48-53.
8. Борисов, О.В. Широкополосный комплексированный усилитель мощности X-диапазона / О.В. Борисов, А.А. Глыбин, В.П. Еремин, Н.О. Коплевацкий, В.М. Миннебаев, Ал.В. Редька, А.В. Тихомиров, А.Н. Трушин, Е.А. Федоренко // Наноиндустрия. – 2017. – № 5 (74). – С. 409-413.

References

1. Gruzдов V. V., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M. Elektronnyye bloki na osnove AlGaIn/GaN/SiC SVCH geterotranzistorov dlya kosmicheskikh sistem [Electronic blocks based on AlGaIn/GaN/SiC microwave heterotransistors for space applications]. Izvestiya Tul'skogo universiteta, 2016, Tula State University, pp. 201-207.
2. Gerasimov A. O., Sinkevich V. F., Minnebaev V. M., Redka Al. V. Impul'snyy usilitel' moshchnosti iks-diapazona na GaN tranzistorakh: opyt izgotovleniya [X-band pulsed power amplifier on GaN transistors: manufacturing experience]. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices, 2012, iss. 1 (228), pp. 30-37.
3. Vasilyev A. G., Glybin A. A., Ivanov K. A., Kolkovskiy Yu. V., Meshcheryakova K. S., Minnebaev V. M. Tverdotel'nyy nitrid-galliyevyy 500-vattnyy impul'snyy usilitel' moshchnosti KH-diapazona [500-W X-band GaN solid-state pulsed power amplifier]. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices, 2011, iss. 1 (226), pp. 83-88.
4. Akinin V. E., Borisov O. V., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M., Redka Al. V., Redka An. V., Ushakov A. V., Tsarev A. V. 8-kanal'nyy priyomo-peredayushchiy modul' iks-diapazona s pervichnoy tsifrovoy obrabotkoy signala [X-band 8-channel transmit-receive module with primary digital signal processing]. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices, 2018, iss. 1 (248), pp. 57-67.
5. Gruzдов V. V., Kolkovskiy Yu. V. Novyye nitrid-galliyevyye tekhnologii dlya RLS s AFAR [New GaN technologies for radar systems with AESA arrays]. Integral, 2015, no. 1-2, pp. 4-6.
6. Abolduev I. M., Borisov O. V., Gerasimov A. O., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M., Osipovskiy A. A., Redka Al. V., Redka An. V., Tikhomirov A. V. Antennnyye moduli dlya AFAR iks-diapazona [Antenna modules for X-band AESA]. Nanoindustriya, 2018, no. 5 (82), pp. 505-510.
7. Abolduev I. M., Garber G. Z., Zubkov A. M., Ivanov K. A., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M., Redka Al. V., Ushakov A. V. Impul'snyy rezhim raboty moshchnykh SVCH getero-polevykh AlGaIn/GaN tranzistorov [Pulse operation of microwave high-power AlGaIn/GaN hetero-FETs]. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices, 2012, iss. 1 (228), pp. 48-53.
8. Borisov O. V., Glybin A. A., Eremin V. P., Koplevatskiy N. O., Minnebaev V. M., Redka Al. V., Tikhomirov A. V., Trushin A. N., Fedorenko E. A. Shirokopolosnyy kompleksirovanny usilitel' moshchnosti iks-diapazona [X-band wideband integrated power amplifier]. Nanoindustriya, 2017, no. 5 (74), pp. 409-413.