



Радиоэлектроника СВЧ – технологии, компоненты, приборы, комплексы

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Выпуск 1 – к 20-летию АО «Микроволновые системы»

под ред. А.А. Кищинского

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2024

УДК 621.3
ББК 32.85
Р15

Р15 Радиоэлектроника СВЧ – технологии, компоненты, приборы, комплексы
Сборник научных трудов. Выпуск 1
под ред. А.А. Кищинского
М.:ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 580 с. ISBN 978-5-94836-706-4

Книга является сборником научных статей и докладов по тематике, охватывающей широкий круг проблем радиоэлектроники СВЧ диапазона – от технологий полупроводниковых приборов и интегральных схем на арсениде и нитриде галлия до особенностей построения радиоэлектронных комплексов.

Все работы написаны и опубликованы в материалах конференций и периодических изданиях в разные годы авторами, работающими в настоящее время или работавшими ранее в АО «Микроволновые системы». В книгу включены наиболее интересные на момент опубликования и актуальные до настоящего времени технические и технологические результаты. Также два раздела посвящены истории и перспективам развития нашего предприятия, отмечающего в 2024 году 20-летний юбилей.

Книга предназначена для инженеров-разработчиков и конструкторов радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона, может быть полезна аспирантам и студентам университетов.

УДК 621.3
ББК 32.85

© Кищинский А.А., 2024
© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2024

ISBN 978-5-94836-706-4

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. <i>А.А. Кищинский</i>	10
20 лет: в прошлом – настоящее. <i>С.А. Исаев</i>	11
АО «Микроволновые системы» сегодня и завтра: тематический портрет. <i>А.А. Кищинский</i>	36
СВЧ-УСТРОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ	41
Сравнительный анализ схем суммирования мощности СВЧ-усилителей с октавной полосой частот. <i>С.В. Гармаш, А.А. Кищинский</i>	42
Широкополосное коммутационное устройство. <i>Н.А. Герасимова, А.А. Кищинский, В.О. Полещиков</i>	56
Новый радиопоглощающий материал ЖКС и результаты экспериментальной оценки его поглощающих свойств в СВЧ-диапазоне <i>Л.Е. Гуревич, К.Б. Джурицкий, Б.В. Крылов</i>	61
Применение технологии пассивных схем на арсениде галлия в изготовлении широкополосных усилителей мощности СВЧ. <i>С.В. Гармаш, А.А. Кищинский, В.Г. Лапин, М.С. Рогожников</i>	65
10-ваттный двухканальный переключатель 8-миллиметрового диапазона. <i>И.М. Аболдуев, В.М. Вальд-Перлов, В.В. Вейц, А.М. Зубков, В.М. Миннебаев</i>	75
Квазимонолитный широкополосный контрольный детектор. <i>С.В. Гармаш, А.А. Кищинский, В.Г. Лапин</i>	83
Результаты разработки и исследования устройств, созданных по технологии керамики низкотемпературного обжига. <i>С.Д. Логвиненко, А.А. Кищинский, Б.В. Крылов, Р.А. Зимин, Н.В. Фролова</i>	87
Корректор амплитудно-частотной характеристики широкополосной ЛБВ. <i>А.А. Кищинский</i>	92

Применение технологии поверхностного монтажа в производстве гибридно-интегральных модулей СВЧ. <i>С.М. Доровских</i>	97
Широкополосные квадратурные делители/сумматоры для применения в усилителях СВЧ-мощности. <i>А.А. Кищинский, В.В. Радченко, А.В. Радченко</i>	103
Конструкции и технологии изготовления современных микрокоммутационных модулей и тенденции их развития. <i>Н.И. Каргин, А.В. Волосов, С.В. Миннебаев, П.И. Блинов</i>	115
Двухканальный волноводный сумматор мощности в X-диапазоне длин волн. <i>С.В. Гармаш, В.М. Геворкян, Ю.А. Казанцев, А.А. Кищинский</i>	122
Мощные СВЧ полосовые объемно-резонаторные фильтры с минимальными потерями. <i>А.В. Радченко, В.В. Радченко</i>	127
Широкополосный программируемый дискретный фазовращатель С-диапазона. <i>А.А. Кищинский, Г.Б. Поляков, А.В. Радченко</i>	132
Параметрический умножитель частоты с низким уровнем вносимого фазового шума. <i>Д.А. Баринов, Н.О. Гурьянов</i>	138
ТРАНЗИСТОРЫ И МИС СВЧ	147
Монолитная интегральная схема усилителя средней мощности диапазона 8–12 ГГц. <i>А.А. Кищинский, Е.А. Свистов, Б.В. Крылов, А.Г. Михальченков, В.Г. Лапин, К.И. Петров</i>	148
Комплекс программных средств для быстрого получения нелинейных моделей ПТШ на основе результатов измерений S-параметров и импульсных вольт-амперных характеристик. <i>А.А. Кищинский, Б.Б. Надеждин, Е.А. Свистов</i>	154
Автоматизированная установка для измерения и идентификации параметров нелинейных моделей арсенид-галлиевых СВЧ-транзисторов. <i>А.А. Кищинский, Е.А. Свистов, Б.Б. Надеждин, В.В. Баранов, Г.Б. Поляков</i>	163

Широкополосный монолитный аттенюатор для АФАР X-диапазона. <i>А.В. Радченко, В.В. Радченко, А.А. Кищинский, А.В. Бутерин</i>	170
Широкополосный монолитный фазовращатель для АФАР X-диапазона. <i>В.В. Радченко, А.В. Радченко, А.В. Бутерин</i>	174
Серия GaAs МИС широкополосных преобразователей частоты. <i>В.С. Арыков, А.А. Баров, А.В. Кондратенко, Д.С. Хохол</i>	179
Влияние алмазного теплового распределителя на характеристики транзисторов на основе нитридов галлия. <i>К.С. Гришаков, В.Ф. Елесин, Н.И. Каргин, Р.В. Рыжук, С.В. Миннебаев</i>	184
Малошумящий транзистор с составным каналом на основе гетероструктур $Al_xGa_{1-x}N/GaN$. <i>С.В. Миннебаев, А.Л. Филатов, В.В. Краснов</i>	201
Монолитные интегральные усилители С-Х-Ку-диапазона с выходной мощностью 1,5 Вт. <i>С.В. Гармаш, А.А. Кищинский, Т.А. Маркелова, А.В. Радченко</i>	211
СВЧ-компоненты на основе технологии нитрида галлия: взгляд изнутри. <i>А.А. Кищинский</i>	217
Исследование GaN НЕМТ при криотемпературах. <i>В.В. Краснов, В.М. Миннебаев, С.В. Миннебаев, Ан.В. Редька</i>	230
Электрические, тепловые и механические механизмы деградации HFET на основе нитрида галлия. <i>В.М. Миннебаев</i>	237
Функциональные узлы радиотракта ППМ АФАР X-диапазона в монолитном интегральном исполнении. <i>А.В. Кондратенко, Д.С. Брагин, А.М. Досанов, Д.Д. Зыков, П.С. Сорвачев</i>	275
Фотоприемник с интегрированным малошумящим усилителем X-диапазона. <i>И.В. Юнусов, А.В. Кондратенко, В.С. Арыков, М.В. Степаненко, П.Е. Троян</i>	290
GaAs МИС дискретных широкополосных фазостабильных аттенюаторов: примеры из практики АО «Микроволновые системы». <i>П.С. Сорвачев, А.В. Кондратенко</i>	297

Экстракция параметров GAN HEMT для построения модели ASM-HEMT с использованием симулятора Ngspice. <i>И.О. Метелкин, С.В. Миннебаев</i>	304
УСИЛИТЕЛИ СВЧ	315
Расчет согласующих цепей широкополосных транзисторных СВЧ-усилителей мощности. <i>А.В. Бутерин, О.А. Петрова</i>	316
Усилитель мощности для радиорелейных станций с частотной и амплитудно-фазовой модуляцией диапазона 7,9–8,7 ГГц. <i>А.А. Кищинский, А.Х. Насыров, Е.А. Свистов, Б.В. Крылов, Ю.Н. Пронин</i>	324
Усилители мощности диапазона 0,8–2,5 ГГц на SiC-транзисторах. <i>А.А. Кищинский</i>	329
Маломощный широкополосный усилитель L-S-диапазона с выходной мощностью 1 Вт. <i>А.А. Кищинский, Е.Г. Маркинов</i>	334
Сверхширокополосный усилитель диапазона частот 4–12 ГГц с выходной мощностью 15 Вт. <i>С.В. Гармаш</i>	339
Сверхширокополосные усилители мощности на нитриде галлия – от инновационных технологий к серийной продукции. <i>А.А. Кищинский</i>	345
Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN СВЧ-транзисторах: опыт изготовления. <i>А.О. Герасимов, В.Ф. Синкевич, В.М. Миннебаев, Ал.В. Редька</i>	362
Контроль СВЧ-мощности в импульсных усилителях X-диапазона. <i>А.В. Бутерин, А.В. Езопов</i>	374
Импульсные усилители мощности L-, S-, C-диапазонов с высоким КПД на GaN-транзисторах. <i>Д.А. Суханов, А.А. Кищинский</i>	379
Широкополосный усилитель мощности S-диапазона с выходной мощностью 300 Вт в непрерывном режиме. <i>А.А. Кищинский, Д.А. Суханов</i>	384
Твердотельные усилители мощности СВЧ-диапазона со сверхоктавной полосой. <i>А.А. Кищинский</i>	389

Сверхширокополосные многоканальные усилители СВЧ-мощности на основе технологии многослойных печатных плат. <i>А.В. Радченко, А.А. Кищинский, В.Н. Смирнов</i>	398
Балансный усилитель мощности GAN-HEMT мощностью 35 Вт диапазона 1–6 ГГц с использованием инновационных квадратурных ответвителей. <i>А.В. Радченко, С.В. Гармаш, А.А. Кищинский</i>	403
ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ	413
Приемник Ка-диапазона для радиоастрономии. <i>В.М. Миннебаев, Н.Б. Гладышева, А.А. Дорофеев, А.А. Чернявский</i>	414
Передающий модуль в диапазоне 7,9–8,4 ГГц для аппаратуры высокоскоростной цифровой радиорелейной связи. <i>А.А. Кищинский, Б.В. Крылов, С.В. Гармаш, М.В. Гаврилов</i>	418
Приемные и передающие устройства миллиметрового диапазона. <i>В.М. Миннебаев</i>	423
Выносные конвертеры для сетей беспроводной связи диапазона 5,5 ГГц. <i>Б.В. Крылов, А.А. Кищинский, Р.А. Зимин, А.В. Данилов, И.А. Семочкин</i>	438
Модули приемо-передающего тракта для АФАР X-диапазона. <i>И.М. Аболдуев, В.М. Миннебаев, Ю.С. Сендерук</i>	442
Задачи и некоторые результаты разработок субблока приемо-передающих модулей АФАР бортовых РЛС. <i>Э.А. Семенов, В.Н. Посадский, А.В. Бутерин</i>	449
Миниатюрный гибридно-монокристалльный модуль X-диапазона управления амплитудой и фазой в приемо-передающих каналах АФАР. <i>А.В. Бутерин, Э.А. Семенов, А.А. Кищинский, В.В. Радченко</i>	458
Широкополосный импульсный транзисторный усилитель – формирователь диапазона 700–1000 МГц с мощностью 300 Вт. <i>В.В. Баранов, А.А. Кищинский, А.Д. Матвеев, Г.Б. Поляков</i>	463

Результаты разработки группового приемо-передающего модуля АФАР X-диапазона. <i>Э.А. Семенов, А.В. Бутерин, А.В. Иванов, А.В. Езопов</i>	468
Особенности формирования радиоимпульсов с фазокодовой манипуляцией и наносекундной длительностью. <i>Д.А. Баринов, В.А. Коломейцев, А.С. Михеев</i>	477
Радиоэлектронные комплексы командно-информационного взаимодействия высококомобильных абонентов авиационного, морского и сухопутного базирования. <i>Р.А. Шевченко</i>	482
Импульсные твердотельные усилители X-диапазона с выходной мощностью 115 и 420 Вт. <i>С.В. Гармаш, В.И. Водяницкий, В.М. Геворкян, А.А. Кищинский, А.Д. Матвеев, А.В. Радченко</i>	489
Широкополосные импульсные усилители мощности X-диапазона с низким уровнем вносимых флуктуаций. <i>А.А. Кищинский, С.В. Гармаш, А.Д. Матвеев, В.В. Рябиков, Д.М. Тюрин</i>	493
Многофункциональная радиолокационная система для летательных аппаратов вертолетного типа. <i>Г.И. Джанджгава, В.Ю. Субботин, В.Г. Чернов, Д.Б. Рогов, М.А. Рязузов</i>	498
Антенные модули для АФАР X-диапазона. <i>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</i>	507
Цифровые синтезаторы прямого синтеза с расширением диапазона перестройки выходной частоты. <i>Д.А. Баринов</i>	516
Малозумящий усилитель миллиметрового диапазона частот для работы в системах радиоастрономического наблюдения. <i>И.М. Аболдуев, В.В. Краснов, В.М. Миннебаев, Ан.В. Редька</i>	527
Многофункциональная система путевых параметров радиолокационного принципа действия летательных аппаратов вертолетного типа. <i>Г.И. Джанджгава, В.Ю. Субботин, В.Г. Чернов, С.П. Гулевич, С.А. Евхаритский</i>	534

Расчет воздушного охлаждения 1,4-кВт модуля в программе AliceFlow с применением модели турбулентности Ментора – Лантгрии. Сравнение с программой ANSYS Icepak. <i>К.А. Иванов, Ал.В. Редька</i>	541
Особенности проектирования АФАР радиолокационных комплексов с применением СВЧ интегральных схем собственной разработки. <i>А.А. Кищинский, В.Г. Чернов, А.В. Кондратенко, Д.А. Шишкин, П.С. Сорвачев, Ал.В. Редька, А.В. Бутерин, А.С. Щербаков, В.М. Миннебаев, С.В. Миннебаев</i>	548
Об авторах	565

ВВЕДЕНИЕ

А.А. Кищинский

Идея выпуска печатного издания к юбилею предприятия не нова, а скорее, традиционна. Вспомнить былое ныне живущим по большей части приятно. Отдадим дань этой традиции и мы, однако это не цель. Цель издания сборника научных статей – сделать небольшой и, возможно, полезный подарок партнерам и друзьям к нашему дню рождения, напомнить о возможностях АО «Микроволновые системы» и компетенциях его специалистов.

Наше предприятие находится в стадии юности – бурного роста, накопления опыта – «сына ошибок трудных», поиска своего пути в мире российской радиоэлектроники. Родившись в 2004 году как «мини-заводик» по производству одного-единственного СВЧ-усилителя, предприятие выросло в многопрофильную научно-производственную компанию, в области интересов и компетенций которой различные направления электроники от электронной компонентной базы до радиоэлектронных комплексов. Продолжает формироваться и коллектив специалистов, каждый из которых вносит свои знания и опыт в общее дело.

Мы решили поделиться этими знаниями и опытом наших специалистов, отраженными в научных статьях и докладах, опубликованных с 1980 по 2024 годы, как в период работы авторов на нашем предприятии, так и в другие периоды их творческой деятельности. Из сотен работ мы отобрали самые удачные (по мнению авторов) и отражающие наиболее широкий спектр компетенций. Что из этого получилось, судить вам, нашим читателям.

Тексты научных работ соответствуют ранее опубликованным авторским оригиналам, при подготовке сборника исправлены найденные ошибки и частично восстановлено качество рисунков. Также из работ исключены служебные элементы (например англоязычные тексты, ссылки на телефоны, сведения об авторах и другие), которые присутствовали ранее по требованиям редакций различных изданий и конференций.

20 ЛЕТ: В ПРОШЛОМ – НАСТОЯЩЕЕ

С.А. Исаев

Начало

В декабре 2004 года юристом Вячеславом Павловичем Губаревым, который и сейчас здоровствует и сотрудничает с нами, было зарегистрировано ЗАО «Микроволновые системы». Идея создания фирмы возникла у Андрея Кишинского, и реализовалась она прежде всего благодаря его недюжинным талантам и усилиям. Но об этом чуть подробнее ниже. А пока первыми сотрудниками, принятыми на работу, стали Андрей Кишинский (заместитель генерального директора – главный конструктор), Сергей Исаев (Генеральный директор) и Александр Панченко (главный бухгалтер).

Мы, все трое, раньше были нанятыми работниками, винтиками, встроенными в механизмы других предприятий, подчинялись другим руководителям. И вот теперь нам предстояло организовать нечто свое... Все три больших начальника не гнушались никакой работой, с энтузиазмом мели полы на территории, арендованной у Центрального научно-исследовательского института (ЦНИРТИ). Вот, например, Андрей Кишинский работает над медными шинами для будущих монтажных столов (на фото 1). А за самими столами отправились мы вдвоем с Александром Панченко. Помню, морозной ночью таскали их с какого-то полуразрушенного склада и грузили в арендованную «Газель». Под занавес «торжества» приехала милиция и арестовала гастарбайтеров – охранников склада, добавив во все мероприятие острую детективную нотку. И несколько седых волос нам с Александром Ивановичем. Но столы благополучно встали на свои места в цехе. Кстати,



Фото 1. А.А. Кишинский. ЦНИРТИ, 2005 г.

это были столы финской фирмы Treston, лучшие в своем классе. С самого начала и по сегодняшний день АО «Микроволновые системы» приобретает для своих работников оборудование, мебель, оргтехнику только высшего класса – таковы наши принципы. Хорошее производство возможно только в хороших производственных условиях и с хорошим оборудованием.



Фото 2. Производственный цех. ЦНИРТИ, 2006 г.

Через год на предприятии работало 17 человек, включая трех администраторов. Большая группа специалистов пришла вслед за Андреем из ЦНИРТИ: Роман Зимин, Дмитрий Бочкарев, Алексей Радченко, Лариса Дорофеева, Светлана Грановская, Валерий Баранов. Другая часть работников пришла из Фрязино: Галина Сибелева, Ирина Латышева, Алла Папина, Александр Матвеев, Александр Панченко, Владимир Антипин, чуть позже – Сергей Зайцев и Сергей Ладоньчев. С другого предприятия Москвы пришел Сергей Доровских. Все они рискнули, уволившись со своих прежних мест работы, перейдя в нечто неизведанное и неочевидное. Все они были первыми и внесли заметный вклад в становление предприятия, большинство благополучно трудятся и сейчас...

Первая наша совместная поездка с Андреем в поселок Протва (ныне город Жуков, Калужская область) на предприятие «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт» (КНИРТИ) состоялась в 2005 году. Ехали на электричке до Обнинска, потом на маршрутке до Протвы. В электричке завязался разговор: каждый что-то рассказывал, делились взглядами



Фото 3. А. Кищинский и С. Исаев

на организацию работы. Помню, обсудили две фундаментальные вещи (точных формулировок не помню, но смысл передам).

Мы оба в прошлом были простыми инженерами во власти других начальников. Не все нам нравилось в том, как они управляли и как относились к людям, в частности к нам. Поэтому решили, что сами, став руководителями, постараемся не делать тех ошибок, которые совершали «неправильные» начальники из нашего прошлого.

У нас могут быть разные взгляды на те или иные проблемы, разные идеи по их решению. Мы можем спорить и доказывать друг другу свою правоту. Но, когда консенсус достигнут, оба поддержим это единственное решение.

КНИРТИ – добрый отчим «Микроволновых систем»

Добрый – потому что финансирует контракты, а отчим – потому что в производственной кооперации добрых «пап» не бывает: слишком сложна совместная жизнь многочисленных «головников», смежников, государственных проверяющих организаций. В этом горячем котле варятся не только большие деньги, но и большая ответственность, амбиции, возможности, опасности, победы и поражения...

Во все времена КНИРТИ был и есть основной заказчик «Микроволновых систем», его вклад в ежегодный оборот нашего предприятия доходил в разные годы до 40%. Традиционно хорошие, конструктивные связи установлены между руководителями и специалистами обоих предприятий. Для нас такая совместная работа почетна: общеизвестно, что КНИРТИ – лидер в области радиоэлектроники, не каждого он выберет в качестве своего поставщика.



Фото 4. Су-30 МКИ с подвешенной САП



Фото 5. САП, демонстрировавшаяся на МАКС-2009

На редком фото 4 – прототип истребителя Су-30 МКИ (модернизированный коммерческий – Индия) с подвешенной под фюзеляжем станцией активных помех (САП) групповой защиты контейнерного типа. Сам контейнер (фото 5) демонстрировался КНИРТИ на выставке «МАКС-2009». Начинка контейнера – плод многолетней совместной работы специалистов КНИРТИ и «Микроволновых систем». Именно эта работа позволила нам встать на ноги, в итоге за 20 лет с нуля развиваться в современное предприятие.

А действительными «родителями» ЗАО «Микроволновые системы» в 2004–2005 годах стали Андрей Александрович Кищинский, задумавший и воплотивший в жизнь этот проект, и Евгений Сергеевич Качанов, в то время генеральный директор ФГУП «КНИРТИ», наш первый заказчик.



Фото 6. Слева направо: А.А. Кищинский, С.М. Доровских, Е.С. Качанов, А.А. Плюснин в цехе предприятия ЗАО «Микроволновые системы», 2005 год

До сих пор задаю себе вопрос: как поверил Евгений Сергеевич в силы столь молодого коллектива, согласившись доверить нам разработку и поставку тысяч (!) усилителей СВЧ для важнейшего международного (!) контракта? Думаю, рискнул, потому что верил в опыт и организаторские способности главного конструктора этих усилителей Андрея Александровича Кищинского.

Евгений Сергеевич неоднократно посещал предприятие, живо интересовался его развитием, давал интервью, в которых выражал свою уверенность в нашем будущем. Еще он был прекрасным оратором. Я не раз становился слушателем его выступлений: говорил он о перспективном развитии систем многолучевых антенн и антенных решеток с увлечением и глубоким знанием дела. От простого инженера до директора (которым был в 1989–2013 гг.) прошел путь длиной 57 лет на единственном предприятии – КНИРТИ.

К сожалению, наши земные пути неминуемо заканчиваются. В 2018 году закончил свой путь и Евгений Сергеевич. Мы с Андреем, как и множество работников КНИРТИ, были участниками печальной процессии. В какой-то момент она подошла к дому, в котором много лет проживал Евгений Сергеевич со своей семьей. Весь двор вышел прощаться. А я увидел простой панельный дом, самую обыкновенную хрущевку.. Не жажда богатства и славы двигали Королевым (в космосе), Качановым (в электронике), Мясищевым (в авиации) и многими-многими другими, а чувство ответственности перед людьми и страной. Никогда не оценят это те, кто волнуются только о наполненности своих карманов...

На территории АО «Микроволновые системы» увековечена память о Евгении Сергеевиче Качанове, висит его портрет. Этому замечательному человеку наше признание и наша благодарность.

Совсем недавно, в 2024 году, я стал невольным свидетелем разговора двух начальников одного молодого предприятия: они с энтузиазмом обсуждали, как поставят на «буханку» систему РЭБ, планировали большое производство. Наверное, система будет современной, и пусть им все удастся...



Фото 7. «Буханка» с системой РЭБ во дворе КНИРТИ

Но посмотрите на фото памятника, посвященного одной из первых в стране мобильных систем РЭБ. Этот памятник-«буханка» стоит на территории КНИРТИ, и ему шесть десятков (!) лет. Воистину «новое — хорошо забытое старое».

Он уважать себя заставил...



Фото 8. Торт-усилитель РМ12-С8-1

Году так в 2006 настало время массовых проверок усилителей, поставляемых в КНИРТИ. Был создан прообраз тогда еще неавтоматизированного стенда ЭТТ (электротермотренировки), и первая партия усилителей РМ24-С8 была установлена для испытаний на этот стенд. Дело было вечером, испытателям хотелось домой. Поэтому усилители отправились

в ночной термоэлектропрогон на опытном, толком не проверенном стенде. Утром первый пришедший на стенд испытатель с неподдельным удивлением обнаружил: на корпусах нескольких усилителей присутствовала температура +122 градуса! Как шутили студенты тех времен, еще чуть-чуть, и «расплавленный металл мог испортить казенные сапоги».

Конечно, эти усилители не должны были выдержать столь высокую температуру, их удел был — погибнуть во имя торжества науки и техники. Но стоило им чуть остыть, и они заработали как ни в чем не бывало! Чем вызвали глубокое уважение к себе у испытателей: вместо нахлобучки — открытие новых, уникальных качеств!

Кстати, РМ24-С8 и РМ12-С8 оказались столь востребованными, что производятся и до сих пор...

Себя показать и арфу послушать

Мало кто помнит сейчас, что первой выставкой, в которой участвовало тогда еще ЗАО «Микроволновые системы» в 2006 году, была выставка, проводимая администрацией Центрального округа Москвы. Она была бесплатной для нас, что в те времена было существенным фактором для молодого предприятия, и еще давала нам право на интервью газете «Деловая Москва». Так мы бесплатно убили двух бедных зайцев: впервые выступили экспонатом на выставке и в качестве победителя этой выставки засветились в прессе.

Сама выставка была странной по составу участников. Помню, я один стоял с маленькой, наспех купленной в «ИКЕА» витринкой с двумя усилителями внутри (PM12-C8 и PM24-C8). Справа от меня какой-то мужчина рекламировал свою философскую теорию и посвященную ей книжку, а слева периодически играла на арфе томная дама. Иногда мне казалось, что со своими усилителями я попал в страну, хм, чудес...

Потом было множество МАК-Сов, «Экспо-Электроник» и «Чип-Экспо»... Мы выросли: показывали все большую палитру своих изделий, строили все более помпезные и комфортные стенды, но тот бесплатный стендик на одном квадратном метре в сопровождении арфы стал для предприятия началом большого пути и вспоминается мной со светлой грустью: как молоды мы были тогда, как мало было нужно нам для счастья!

Случались и казусы. Как-то раз при въезде на аэродром ЛИИ для участия в очередном МАКСе на КПП к машине подошел солдат в сопровождении забавного песика. Песик повел носом, быстро вычислил коробку с богатым набором спиртного, традиционно завозимого на (любую) выставку, и уселся рядом с ней, преданно смотря в глаза своему провожатому... Так в нашей истории случилась трагедия — безалкогольный МАКС.

Людам не дает покоя эта мысль, и меня часто спрашивают, сколько контрактов мы заключили на очередной выставке? Как быстро окупались затраты на нее? — Отвечаю

Деловая Москва № 12 (886) 2007

Тема номера

ПОДВЕДЕТЬ ИТОГА

Представляем финалистов конкурса

Там, где нужен качественный инновационный продукт, прежде всего востребован интеллект

В настоящий момент в мире за счет дорогостоящих научных СЧП реализуются, применяются в основном в оборонной промышленности, при определенных условиях способны выполнять те же функции, что и дорогостоящие аналогичные современные методы традиционной разработки. Преимущество таких изделий по сравнению с аналогами заключается в их компактности, долговечности, существенно меньших массо-габаритных и ценовых характеристиках.

Среди известных разработчиков, применяющих в своей деятельности методы сверхпроводящих СВЧ, с успехом функционируют многофункциональные СВЧ-системы, в том числе антенно-фидерные системы, системы радиолокационного контроля, системы радиотехнической безопасности, системы радиотехнической безопасности авиации, системы радиотехнической безопасности авиации, системы радиотехнической безопасности авиации.



В настоящее время в мире за счет дорогостоящих научных СВЧ реализуются, применяются в основном в оборонной промышленности, при определенных условиях способны выполнять те же функции, что и дорогостоящие аналогичные современные методы традиционной разработки. Преимущество таких изделий по сравнению с аналогами заключается в их компактности, долговечности, существенно меньших массо-габаритных и ценовых характеристиках.

Готовы ли вы за деньги компании обучать своих сотрудников?

34%

Если возникает такая необходимость, то именно, но через свой работодатель нет.

33%

В каких бизнесе этого не требуется.

30%

Мы регистрируем за счет компании обучение наших сотрудников.

3%

У нас сотрудничают все и так грамотные...

ДИПЛОМ

Награждается

ЗАО «Микроволновые системы»

Победитель окружного этапа городского конкурса «Московский предприниматель 2006» в номинации «Производство продукции промышленного назначения»

Префект Центрального административного округа *С. Л. Байдаков*

Фото 9. Статья в газете «Деловая Москва» и диплом

раз и навсегда всем по порядку: нисколько и никак! По поводу заключения контрактов на выставках: поменьше смотрите телевизор. А вот затраты, смею надеяться, окупаются, но очень опосредованно, растянуто во времени, чаще неявно. Как это работает? Например, лет 14 назад наш стенд заметил инженер из компании «НВП «Протек» (г. Воронеж). Через год они купили у нас один РМ12-С8, а еще через год – 300 штук.

На выставках в основном происходят встречи с уже известными и хорошо знающими нашу продукцию специалистами других предприятий. Идет обмен информацией, обсуждаются перспективные разработки, технологии, сроки, намечаются различные варианты реализации и т.п., что, безусловно, полезно для всех сторон.

Еще одной причиной участия в выставках является «демонстрация флага»: «Смотрите все! – мы живы и бодры, легко ухайдокали кучу денег – и даже не заметили!»

Совесть фирмы

Галя

Галя Сибелева – одна из самых первых пришедших на работу в компанию в 2005 году. Любой руководитель мечтает о сильных специалистах, способных взять на себя самое сложное – ответственность и тем самым двинуть вперед развитие предприятия в рамках своих навыков и знаний. Вот такой всегда была и есть Галя.

Помню, как с замиранием сердца поехал на проходную «Истока» (г. Фрязино), куда вызвал ее для разговора. Я работал несколько лет с ней прежде, на «Истоке», и знал, каким уважением она пользовалась в своем коллективе. «Разве ее отпустят в Москву? Ведь никто ее не заменит... А она сама-то как решится? Каждый день по три часа на электричке, совершенно новая



Фото 10. Галина Евгеньевна Сибелева

работа...» – сомнения печально выстраивались в очередь в моей голове, но так хотелось немного удачи нашему общему только что рожденному делу! Галя сразу прониклась серьезностью и разнообразием будущей работы, задала несколько вопросов. Я почувствовал, как интересно ей открыть для себя новые горизонты... Через полчаса, торопясь на работу, я, сам себе не веря, нес в душе кусочек счастья и ее со-

гласие. Кстати, она была единственным специалистом, которого я «увел» с родного «Истока», остальные приходили сами.

Ее знают все работники предприятия, во всех, даже дальних, подразделениях. Спросите каждого из нас: кто всю жизнь посвящает родному предприятию, участку, бескорыстно горит душой за все его проблемы и победы? Ответ будет очевидным и единственным... Спасибо тебе, Галя!

Дима

Дима Бочкарев работал в лаборатории мощных усилителей ЦНИРТИ, которую возглавлял Андрей Кишинский. Придя вслед за Андреем на предприятие в 2005 году, Дима обнаружил качества лидера и стал начальником выпускающего участка настройки СВЧ-модулей. Все годы, что он возглавлял участок, руководство было спокойно за порядок, учет и организацию работ на участке:



Фото 11. Дмитрий Владимирович Бочкарев

Дмитрий был настоящим хозяином своего дела, отличным инженером и организатором, уважаемым всеми работниками предприятия. А ведь работа выпускающего участка одна из самых ответственных: как говорят иногда, «за выпускающим инженером – только борт самолета».

Казалось бы, у Дмитрия в настоящем и будущем только удача, почет и уважение, но в 2023 году пришла беда – Димы не стало... Трагедия для всех, кто его знал! Ему не исполнилось и 46 лет... Спасибо тебе, Дмитрий, за то, что был и работал вместе с нами! Светлая память.

Александр Дмитриевич

Александра Дмитриевича Матвеева на предприятии из уважения все величают по имени-отчеству. Потому что мнение его авторитетно, знания и опыт в электронике обширны: очевидны крепкие базовые начала, полученные в учебных и производственных университетах. Настоящий специалист своего дела: или знает ответ, или подскажет пути решения задачи и сам будет активно участвовать.



Фото 12. Александр Дмитриевич Матвеев

Начальник лаборатории НЧ. Я знал его по работе на «Истоке», где он пользовался уважением. В 90-х годах многие спецы покинули свои лаборатории и пошли зарабатывать деньги в коммерческие организации – иначе было не прожить. Александр Дмитриевич занимался в Москве ремонтом и сборкой ноутбуков, и, долго не думая, откликнулся на мое предложение – наверное, почувствовал, что работа на нашем предприятии более творческая и разносторонняя, значит, интересная. Друзья с уважением зовут его Митричем. Он порядочен, интеллигентен, всегда дружелюбен и прост в общении. Максимальное время, свободное от работы, проводит на природе, никогда не отказывается от наших туристических поездок. Задайте ему вопрос по устройству транзистора или по устройству мироздания – он покопается в своей памяти и обязательно расскажет что-нибудь по делу. Пожелаем долгих лет жизни замечательному человеку и специалисту Александру Дмитриевичу Матвееву.

Василий Николаевич



Фото 13. Василий Николаевич Смирнов

Василий Николаевич Смирнов сам нашел нас на просторах Интернета и был приглашен на собеседование в 2013 году. Кто бы знал тогда, что предприятие на многие годы вперед заполучит Конструктора (с большой буквы), который самостоятельно будет решать самые нетривиальные конструкторские задачи, иногда уникальные по сложности и глобальные по важности! Его конструкторский талант для предприятия незаменим. С раннего утра, по будням, по выходным, бывает, и по праздникам Василий Николаевич на работе. Подозреваю, ему не только «надо», но и «интересно». Интересно и нам с ним: способен колко острить, ершисто защищать свою позицию – имеет право. Пожелаем Василию Николаевичу хорошего здоровья и дальнейших успехов в конструкторском творчестве.

Безусловно, на предприятии работает множество выдающихся специалистов и просто хороших людей. Надеюсь, в будущих книгах мы напишем и о них. Но те четверо, о которых я коротко рассказал, работают не столько за деньги, сколько за СОВЕСТЬ и, сами того не подозревая, вовсе не задумываясь об этом, являются примером для всех нас. И для меня тоже.

Мы не хуже

В 2013 году несколько специалистов компании направились в Мюнхен на выставку микроэлектроники. Параллельно через представительство предприятия Rohde&Schwarz в Москве удалось договориться о посещении его главной штаб-квартиры недалеко от Мюнхена: было интересно, как на знаменитой на весь мир фирме поставлены разработка и производство СВЧ-изделий.



Фото 14. Корпус Rohde&Schwarz

Производство произвело впечатление своими площадями (несколько футбольных полей) и масштабами (связная, навигационная, телекоммуникационная аппаратура, сложные измерительные приборы и т.п.). Конвейерные линии под потолками цехов доставляли комплектующие к рабочим местам монтажников точно в срок и точно по адресу. Бегая по огромным цехам за ведущим экскурсию высокопоставленным менеджером, я прокричал ему в спину пару вопросов и получил от спины пару удивительных для нас ответов.

1. Никакой системы премирования на Rohde&Schwarz... нет.

В день работник (монтажник, инженер-регулировщик и т.д.) должен давать заведомо известную выработку, ни больше, ни меньше.

Если работник делает меньше, он, смею предположить, недолго проработает на предприятии: найдутся другие, успевающие. Если делает больше, он «гонит брак». Все просчитано с холодной немецкой обстоятельностью и расчетливостью. Все делают ровно столько, сколько нужно, и получают только оклады.

2. Но как же быть работникам с амбициями и способностями? Как им учиться и зарабатывать больше?

Для таких работников имеется учебное заведение при самом предприятии. Работник поступает туда по рекомендации управляющих менеджеров, проходит курс обучения (как мне помнится, не менее года без отрыва от производства), сдает экзамен и переводится на следующую квалификационную ступень. Соответственно, после перевода получает больший оклад.

Далее нас повели в разрабатывающие лаборатории, но показали все через стеклянную перегородку. Так же, как и у нас, приблизительно на такой же

площади сидели разработчики, чем-то похожие на нас. И, как мы увидели, занимались тем же — компьютерными расчетами, настройкой, проверкой СВЧ-изделий. Был один момент, заслуживающий внимания: в каждой лаборатории стояло по одной автоматической сварочной установке и больше никаких других, хотя бы полуавтоматических. «Ну, хорошо — они могут себе позволить столь дорогие установки при серийном производстве», — подумали мы, — а как же быть, например, при выпуске экспериментального изделия в единичном экземпляре?» Ответ был таков: «Нам выгоднее использовать сварку-автомат и держать при ней одного программиста, способного запрограммировать стежки. Даже если нужно сваривать только один экспериментальный образец. Автомат не ошибется, сделает все качественно, и сварщик не нужен».

А в целом после знакомства с предприятием мы почувствовали определенную уверенность в себе: мы занимаемся похожими по сложности СВЧ-изделиями, измерительное оборудование, оснастка и методы проектирования у нас сопоставимы по качеству и возможностям. Да и вообще сложилось впечатление, что «Микроволновые системы» как минимум ни в чем не уступают разрабатывающему подразделению знаменитой Rohde&Schwarz.

Не нужен нам берег турецкий, а нужен нам шведский Стокгольм

На 10-летие фирмы в смелости выбора своих турпоездок мы превзошли самих себя и отправились в путешествие по маршруту Москва — Хельсинки (поездом) — Стокгольм (на пароме) — Таллин (на пароме) — Москва (поездом). Другими словами, около сорока человек решили проверить,



Фото 15. Памятник композитору Я. Сибелиусу.
Финляндия, 2014 г.

что ехать, весело отрываться, ходить морем, весело отрываться, снова морем, весело отрываться, ехать — и так четыре дня — вовсе не плохо, а даже забавно. В гостиницах мы не жили — спали в поездах и на пароме.

Конечно, познакомились с достопримечательностями и жизнью трех больших старинных европейских горо-

дов. Далее – сугубо мои впечатления, каждый вспоминает свое.

Хельсинки своими проспектами и жилыми домами меня не удивил, а напомнил типовой... советский город. Порядок и чистота, а в

общем ничего особенного, если не знать, что это страна и город с необычайно высоким уровнем жизни (средняя зарплата финна – 3800 евро), совершенно бесплатными – при этом высочайшего качества, образованием и медицинским обслуживанием, бытом, пропитанным заботой об экологии. Конечно, наш человек ехидно вспомнит про налоги до 40%, но по мне лучше так.

Из достопримечательностей мы посетили католическую церковь, высеченную в скале, и удивительно воздушный, «парящий» в пространстве памятник национальной гордости Финляндии – композитору Яну Сибелиусу.

Паром был вполне незаурядным заведением: множество баров, ресторанов, дьюти-фри, танцы, пиво, вино... хм, пожалуй, достаточно.



Фото 16. Паром Хельсинки – Стокгольм – Таллин



Фото 17. Стокгольм, Швеция, 2014 г.

Стокгольм — сказочный город, который человеческим гением построен на огромных скальных глыбах, притащенных когда-то древним ледником... К сожалению, мы промчали его на автобусе, оставляя в стороне чудесные парки, интерактивный музей группы «АВВА» и много чего еще (чтобы познакомиться по-настоящему, мне пришлось потом дважды возвращаться в этот город). И все же центр мы прошли пешком, и каждый из нас проникся старинным благообразием города, где с любовью поддерживается древняя архитектура, где все сделано для удобства человека.

«Знаете, как заботится Швеция о своих новорожденных подданных и их родителей? — задала нам вопрос экскурсовод. — Отцы, как и матери, имеют право взять отпуск по уходу за ребенком с ежемесячной выплатой 80% зарплаты и сохранением рабочего места. Таким образом мужья помогают своим женам, дают им разгрузку и активно это практикуют — 50% шведских мужчин с рождением ребенка уходят в “декрет”».

Однако при покидании парома в Таллине мне пришлось потерять год жизни за 10 минут. Дело в том, что при выходе с парома мы пересекали границу со всеми сопутствующими атрибутами: проходом через таможенную, предъявлением иностранного паспорта — все «по-взрослому». Мы все благополучно сошли, весело толкаясь на пристани Таллина, когда прибежал наш последний «член экипажа» и, стоя по ту сторону границы на пароме, богато артикулируя, сообщил о потере им иностранного паспорта... Улыбка слетела с моего лица, и вопросы встали перед начальником табора во весь свой огромный рост, выше памятника Сибелиусу. «Посольство? Своему помогут? Накрылась поездка — все уйдут, а мы вдвоем останемся?» — вопросы судорожно толкались в моей голове, пока как-то естественно не перешли в глаголы. Наверное, они помогли, потому что паспорт потенциальный «невозвращенец» нашел. Он лежал там, где и положено лежать иностранному паспорту, — в углу каюты на полу под кроватью.

Таллин встретил нас нависшими облаками и снегом, когда-то род-



Фото 18. Таллин, 2014 г. Чайка-попрошайка

ными видами, частой русской речью, вкусной едой в замке, приготовленной по старинным рецептам. Над городом на смотровой площадке нас ждала большая чайка, которая кормилась из рук посетителей и никуда не улетала, хотя и могла. Она разрешала себя трогать, но требовала взамен чего-нибудь вкусненького...

Люди иногда говорят, что такие поездки сплачивают коллектив. Возможно, но то, что они хотя бы на время просвещают нас и делают умнее, – это точно.

Стройки века

Сколько «Микроволновые системы» живут, столько строятся.

Первые три года жизни предприятия в ЦНИРТИ – это время, к которому можно применить термин «впервые». Впервые мы построили, как нам тогда казалось, чистый цех, запустили производство. Конечно, сегодня очевидно, что система воздухоподготовки была слаба для той даже небольшой площади цеха – он не был даже условно чистым. Да и вообще на протяжении трех лет мы были для арендодателя каким-то ненужным «пасынком»... Обстоятельства сложились так, что впервые мы покинули арендованную территорию, которую нежно пестовали, за свои деньги отстраивали, делали функциональной и удобной, в 2008 году.

Завод «Плутон» оказался для нас «доброй тещей» – приютил, разрешил поселиться на своей площади (в итоге около 1000 кв. метров), накормил (на территории была хорошая столовая) и прижал к сердцу (решил делать с нами совместные проекты). Последнее не удалось – наша скорость выполнения проектов была раз в 10 выше. И все же первые 10 лет (из 11), что мы прожили на «Плутоне», были для нас непрерывным поступательным движением и в части разработки-производства, и в части приобретения опыта в строительстве.



Фото 19. «Сокол», 2018 г. Здесь был ресторан, а будет чистая зона



Фото 20. «Сокол», 2020 г., чистая зона

Администрация на «Плуtone» менялась несколько раз, но в отношении к нам была всегда лояльна. Пока не наступил 2018 год. В знак благодарности и уважения к прежним администрациям и работникам «Плутона» я опущу подробности... А мы стали беженцами второй раз. Кстати, освобожденная нами территория была законсервирована на несколько лет, все эти годы «Плутон» ее не использовал.

Но все к лучшему. Бизнес-центр «Сокол» стал нам товарищем, протянувшим руку: выделил достаточно площадей, помог в строительстве. Общая площадь, арендуемая сегодня «Микроволновыми системами», – 4250 кв. м.

Всех, кто легко советует «купить площади в собственность», я попрошу дать нам кредит – немаленький, дешевый и лет на 10...

Но я верю: когда-нибудь «Микроволновые системы» исполнят свою мечту.

Ученье (ничто не проходит бесследно)

Сначала поезд мчал 12 человек в Саратов, потом «Газель» по ухабам и бездорожью – на турбазу. Помню слегка взволнованное настроение путешественников – мол, что это за точка мира, куда Вы, Сергей Алексеевич, нас завезли? Так в 2010 году перспективные настоящие и будущие начальники отправились для прохождения курса «Эффективный менеджмент» на берег Волги. Волнения оказались напрасны: турбаза была мне известна, а курс

я сам прошел несколькими годами раньше. Тьютор (ведущая 2-дневного семинара), кроме теории, создавала различные игровые ситуации, которые приходилось решать мозговым штурмом, объединяясь в разные группы, меняя их состав, генерируя неожиданные решения, и все это в состоянии стресса и ограниченного лимита времени. Одним из самых сложных заданий, между прочим, были изложение и защита своего собственного решения «у доски», один на один с аудиторией. Мы-то все смелы коллективным мнением... Наградой за 2-дневное напряжение мыслей и нервов были вареные раки, поездка по Волге на теплоходике и посещение парка с замечательной коллекцией выдающихся образцов военной техники...

Вы спросите, зачем это нам, какое отношение такие «игры» имеют к нашей работе? Отвечаю: самое непосредственное! Каждый день любой из нас, независимо от должности и степени нелюбви к заморскому слову «менеджер» (не путать с чисто русским негативным понятием «новый менеджер»!), вольно или невольно выполняет самые настоящие функции менеджера: договаривается, даже по пустякам, с коллегами (ведет переговоры), принимает решение и сообщает его окружающим (управляет коллективом, процессом), «держит себя в руках» (управляет собой), просит кого-то выполнить определенную часть своей работы (делегировать полномочия), задумывается о завтрашнем дне (планирует), приглашает потенциально заказчика посетить фирму (выполняет представительские функции).



Фото 21. Курс «Эффективный менеджмент», г. Саратов, 2010 г.

Работа менеджера нетривиальная, ей можно учиться всю жизнь... Старайтесь, и тогда когда-нибудь и вам поручат писать главу в книге.

Кстати, при проведении мозгового штурма есть обязательное правило: каждый участник имеет право выдвигать любые решения, даже самые невероятные, или, на первый взгляд, глупые. Между тем, иногда среди них находятся самые изящные и в итоге правильные...

Администрация всегда поддерживала начинания своих работников в части, касающейся самообразования, если это было в рамках интересов предприятия. Разные работники в разное время обучались на курсах, посвященных выполнению Гособоронзаказа, управлению производством и проектами, даже работе на... токарном станке. И сегодня обучаются, эта практика обязательно продолжается.

Эффективно ли такое обучение? На мой взгляд, ответ неоднозначный. Зависит от человека. А иногда, чтобы понять, что курс интересен, хорошо подан, в нем мало «воды», необходимо сначала его прослушать. Как говорится, «точный прогноз погоды на завтра слушайте послезавтра». Но чаще всего польза безусловна, полученные знания применимы. Да и жизнь и работа человека столь многогранны, что неизвестно, когда и в какой ситуации он извлечет из закоулков своей памяти нужную строку из конспекта или испытает вспышку – воспоминание события, почти забытого... Ничто не проходит бесследно.

Сентиментальный директор

В моем детстве мы с дедом любили ходить на железную дорогу – провожать поезда. Поезда мелькали мимо окошками и убегали куда-то в степную саратовскую даль... Как мне кажется сейчас, по прошествии многих лет, дед, несмотря на свою простую, деревенскую сущность и на то, что прошел войну, был сентиментальным романтиком. Тогда, наверное, это чувство поселилось и во мне.

Директору оно мешает: некогда отвлекаться на пустяки. Но иногда и директора ездят в поездах, например, в командировки. И тут романтика дальних дорог подстерегает некоторых из них ненужным душевным шумом...

...Я люблю слушать стук колес. Мысли неспешно появляются ниоткуда, медленно текут по закоулкам сознания. Некуда торопиться, некому давать тебе советы – ты один на один со своими думами. Поезд мерно стучит колесами по стыкам, увозя тебя от людей и проблем, и кажется, что впереди новая жизнь, светлая и свободная от ошибок, которых насOVERSHALL в прошлой, оставшейся на вокзале...

Какие шедевры рождаются в голове человека, лежащего с закрытыми глазами на верхней полке! Какие тонкие умозаключения и выводы делает он! Как искренне клянется себе покончить с рутинной и дать наконец миру

то, ради чего явился на свет, — свершения и потрясения, рожденные его недюжинным умом... Никто и не догадывается, что полный и с виду усталый человек в трениках с отвислыми коленками — второй Леонардо да Винчи! А поезд уже сбавляет ход, пассажиры толкаются чемоданами в проходе, выискивая на перроне встречающих. Дома и на работе ждут знакомые проблемы... Где же вдохновение, парившее под потолком купе? Приехали.

...А моего деда война догнала через много лет после ее окончания, во времена мира и благополучия. Он был контужен на войне и плохо слышал. Не услышал он и приближающегося поезда глухой зимой на переезде... Я помню, в моей жизни был замечательный дед! Хранится, как память, его медаль...

Конечно, директора совершают ошибки — сколько угодно, как любой человек. От одной из них, возможной, мне тревожно на сердце до сих пор.

История на самом деле самая обыкновенная. На собеседование по рекомендации из Ярославля был вызван технолог. Молодой парень с открытым добрым лицом. В процессе разговора не произвел сногшибательного впечатления: волновался, но на вопросы отвечал, было видно, что молод еще, старателен, но нам «немного не в тему». И я ему отказал — мы в последнее время «со скрипом» берем тех, кого надо обучать. Некогда! Да и квартиру он должен снимать, хлопотно это... будет ли?

Он вышел из нашего корпуса, повернул в сторону метро и скрылся вдали. Навсегда.

Я было пошел по своим делам. Но что-то тревожило меня, возникло какое-то предчувствие совершаемой ошибки. Мало ли мы отвергли таких претендентов? На всех жалости не напасешься. А тут впервые возникло чувство несправедливости, которую совершаю я. Парень-то, очевидно, перспективный.



Фото 22. Дедова медаль



Фото 23. Штирлицев уважают везде...

Я попросил созвониться с ним. Вернется ли?

Он вернулся. И уже несколько лет работает на предприятии хороший человек, толковый начальник производственного цеха Александр Крылов.

А мне и радостно, и тревожно до сих пор при виде его — я мог бы совершить ошибку. Но не совершил.

Крепкое настоящее



Фото 24. Уникальные усилители СВЧ, разработанные в АО «Микроволновые системы»



Фото 25. Андрей Александрович Кищинский

Изделия, которые разрабатывают и производят «Микроволновые системы», по своей сложности во многом уникальны. Сложность — не самоцель, а необходимый ответ на ряд характеристик, заданных в ТЗ. Хороший, удачный прибор — это, как правило, оригинальные схемотехника и конструктив, долгие испытания, проверки найденных решений на измерительных стендах, множество итераций, разочарования и радостные минуты подтвержденных результатов.

О чем я? В большей степени не о приборах, а о людях, их разрабатывающих. Чтобы создавать такие приборы, нужно много лет глубокого погружения в разрабатываемую тему. Тогда есть шанс, что количество потраченного времени перейдет в качество тебя-как-специалиста. Из своего опыта скажу: такие люди — штучный товар. Их видно, и на них держится фирма.

Андрею Александровичу Кищинскому, заместителю генерального директора и главному конструктору предприятия, не требуется моя похвала. Со своими заслугами и известностью в СВЧ-мире он давно вошел в

зал славы ведущих конструкторов страны в области микроэлектроники и там останется уже навсегда без нашей помощи. Хотите знать и удивляться кругу его интересов и компетенций в микроэлектронике? Читайте статьи, подписанные его именем, коих множество в этой книге.

От себя скажу: всегда преклонялся перед двумя его качествами:

- разоружающей логикой,
- абсолютной порядочностью.

У главного конструктора есть мощная поддержка. Его заместитель, начальник проектного отдела **Алексей Радченко** – сформировавшийся, опытный инженер, успешный руководитель. Одно из важнейших его качеств, нечасто встречающихся в нашем суетном мире, – умение эффективно работать в режиме многозадачности. Поэтому уже сегодня в области микроэлектроники он многое успел. В его послужном списке разработка и запуск в серию десятков интереснейших и сложнейших СВЧ-усилителей.



Фото 26. Алексей Владимирович Радченко

Отец Алексея Владимир Васильевич Радченко – мой друг, опытнейший инженер-радиотехник ЦНИРТИ. Таких, как он, я характеризую как людей со светлой головой, имея в виду умение генерировать толковые идеи. Хорошего сына воспитал Владимир Васильевич!

Но усилители как законченные модули СВЧ – только одна сторона «творчества» Алексея. Совместно со своим отцом он, например, разработал новый тип квадратурного сумматора мощности спирального типа, который применяется в десятках усилителей высокой мощности и МИС, на который был получен патент в России и нескольких странах за рубежом. Для замены мощных ЛБВ твердотельными аналогами Алексеем были разработаны многоканальные схемы суммирования на основе подвешенных линий, работающие в сверхширокополосном диа-

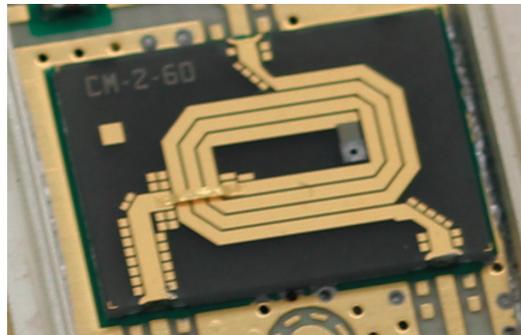


Фото 27. Сумматор спирального типа

пазоне частот от С-до Ки-диапазона, позволившие получить выходную мощность более 75 Вт в непрерывном режиме.

Будущее «Микроволновых систем» в светлых головах.

P.S. Вы когда-нибудь видели свои фото, чтобы они – редкий случай – нравились вам? Отличный ракурс, профессиональный подход к съемке сюжета, грамотная постобработка? Так это снова про Алексея! Талант – во всем талант.

На предприятии ныне есть целая плеяда молодых и не очень молодых старательных толковых специалистов – простых работников и их руководителей, как в головном офисе, так и в обособленных подразделениях. Все они вместе и по отдельности стараются реализовать свои амбиции в профессиональной области. Мир каждого из них – открытый космос, вселенная. Поэтому рассказы о них – дело неформальное, они обязательны в будущем.

И все же, отдавая дань молодым, скажу, что способность любой фирмы производить уникальный продукт в значительной степени держится на багаже знаний и навыках ее маститых конструкторов, разработчиков. Это они, испытывая юношескую увлеченность, изобретают новые изящные решения, которые потом люди называют уникальными. Это они закрывают этапы, корпят над ТЗ и защищают РКД.



Фото 28. Александр Владимирович Бутерин

В полной мере это относится к моему другу и старшему товарищу **Александру Владимировичу Бутерину**, руководителю обособленного подразделения «Микроволновых систем» в городе Саратове. Вся преамбулу (см. выше) до последней буквы я написал с него.

Даже в кратком рассказе об А.В. Бутерине не обойтись без аббревиатуры «АФАР» (активная фазированная антенная решетка). АФАР – настоящее и будущее современной радиолокации, применение ее дает качественные, кратные преимущества по сравнению с РЛС других типов. Однако она и кратно сложнее. Разработка и производство приемо-передающих модулей (ППМ) для АФАР – удел немногих передовых в микроэлектронике фирм. Значит, «Микроволновых систем», а в ее составе – обособленного подразделения, возглавляемого Александром Владимировичем. Он по-

дулей (ППМ) для АФАР – удел немногих передовых в микроэлектронике фирм. Значит, «Микроволновых систем», а в ее составе – обособленного подразделения, возглавляемого Александром Владимировичем. Он по-

следовательно шел к этому всю свою сознательную жизнь в микроэлектронике: многие годы был членом рабочей группы Российского агентства по системам управления (РАСУ), главным конструктором направления АФАР предприятия «Алмаз-Фазотрон» (город Саратов), главным конструктором и научным руководителем более двадцати (!) НИОКР по созданию СВЧ элементной базы АФАР, ППМ АФАР, сложных многофункциональных модулей для авиационных бортовых радиолокационных систем.

Вот всего два примера СЧ ОКР, выполненных коллективами разрабатывающих подразделений (в составе АО НПЦ «Алмаз-Фазотрон») под руководством главного конструктора А.В. Бутерина.

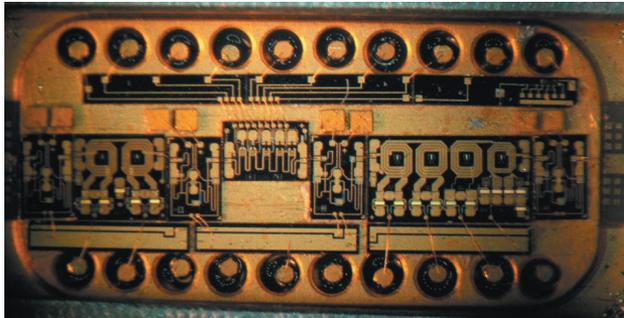


Фото 29. Корпусированный ППМ АФАР

Входе одной из них были разработаны и освоены в производстве ПЕРВЫЕ отечественные образцы высокоинтегрированных GaAs-кристаллов функциональных элементов ППМ АФАР X-диапазона (2002–2004 гг.). В этой работе также принимали участие будущие работники «Микроволновых систем», в то время работники ЦНИРТИ, – Андрей Кищинский и Алексей Радченко. Добрые же взаимоотношения между Кищинским и Бутериным общеизвестны: на протяжении многих лет они помогали друг другу и консультировали в различных вопросах микроэлектроники.

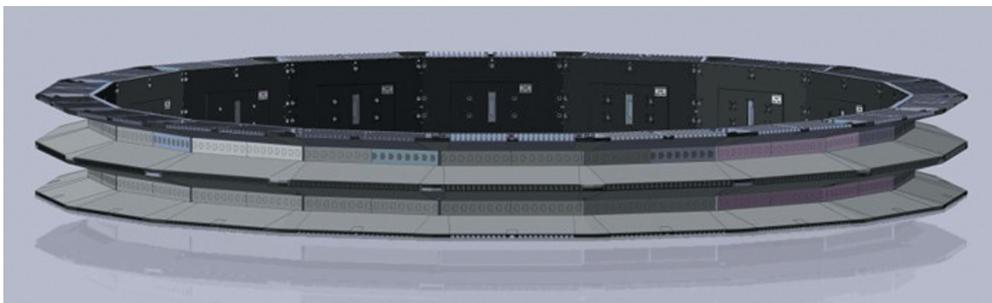


Фото 30. Кольцевая АФАР

На другом фото – кольцевая АФАР с 288 передающими и 288 приемными модулями, с одновременным формированием трех лучей и зоной обзора 360 градусов (2014–2016 гг.).

Я привел пример пионерской работы (первое фото) и работы, на мой взгляд, вполне изящной в своем конструктивном решении (второе фото). Чувствуется класс разработок! И сейчас, уже в составе АО «Микроволновые системы», коллектив обособленного подразделения в городе Саратов под руководством Александра Владимировича Бутерина занят разработкой составных частей сложных СВЧ-изделий. Пожелаем им и нам всем удачи!

Что еще мне нравится? Александр Владимирович – перфекционист: любит, чтоб все было красиво, добротно – изделия, рабочие места, помещения. Сам все это продумывает и заботливо воплощает, конечно, не без помощи московского офиса. Везде чувствуется его рука хозяина.

Я люблю бывать в Саратове, в помещении обособленного подразделения «Микроволновых систем». Толковые специалисты, умные, приветливые лица. Хорошо оборудованные рабочие места. Светлое просторное помещение с большим логотипом «Микроволновых систем» на стене. Рядом за стеной – маленькая, но по всем канонам самая настоящая чистая зона. Этажом ниже – такой же просторный зал «Лаборатории синтеза сигналов», еще одного нашего подразделения. Это вотчина Дмитрия Анатольевича Барина, начальника лаборатории. Там тоже толковые спецы и хорошие условия для работы. Чувствуется, что я здесь как дома.

А за окном Волга, до нее метров 200. Мерно и спокойно, искрясь и играя брызгами на солнце, катит она свои волны навстречу дням и столетиям. И мне спокойно и хорошо.



Фото 31. Помещение ОП «Микроволновые системы» в г. Саратове

Прыгнуть выше головы

В 2025 и в последующие годы у АО «Микроволновые системы» «планов громадье». Чтобы их выполнить, всем работникам предстоит прыгнуть «выше головы», напрячь свои волю и желание. А знания и умения имеются в избытке. Это видно по множеству публикаций, в подготовке которых участвовали специалисты предприятия. В том числе и об этом наша книга...



Фото 32. И прыгнем...

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ» СЕГОДНЯ И ЗАВТРА: ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОРТРЕТ

А.А. Кищинский

Становление предприятия от пустого помещения в корпусе экспериментального производства ЦНИРТИ до многопрофильной научно-производственной фирмы, о ходе которого живописно рассказано в предыдущей главе, завершено.

Сегодня АО «Микроволновые системы» – это непрерывно растущее производство технически сложных модулей СВЧ с объемом более 7000 изделий в год, все необходимые службы управления и обеспечения и проектно-конструкторские подразделения, в которых работают (или работали ранее) авторы публикуемых в нашем сборнике работ. Об этих подразделениях и их возможностях немного подробнее.

Исторически первым и основным подразделением, разрабатывающим модули СВЧ и их элементы, а также блоки высокомошных твердотельных усилителей непрерывного режима, является проектный отдел (ПО), возглавляемый заместителем главного конструктора Алексеем Владимировичем Радченко, краткое резюме его (как и большинства остальных руководителей) приведено ниже в разделе «Об авторах». Отдел существует уже более 15 лет, сегодня в нем трудятся десять инженеров-разработчиков. Сотрудниками ПО выполнено более 40 НИОКР, разработаны и внедрены в производство практически все серийные изделия, выпускаемые сегодня производством. Ведется непрерывная поддержка производства, модернизация приборов, связанная с крайне нестабильными возможностями и условиями поставок электронных компонентов. Освоены диапазоны частот от 200 МГц до 20 ГГц и уровни выходной мощности до 150 Вт. В числе традиционных направлений ПО остаются также разработки специализированных импульсных усилителей мощности с малыми вносимыми флуктуациями, малошумящих усилителей со специальными характеристиками, устройств питания и управления, нестандартного оборудования, усилителей для телекоммуникационного оборудования и некоторых других. Первые транзисторы и монолитные интегральные схемы (МИС) усилителей на арсениде галлия по схеме fabless – foundry нашей разработки также были созданы специалистами ПО.

Конструкторская документация на изделия основного производства разрабатывается конструкторским бюро (КБ), созданным в 2014 году,

возглавляет которое Дарья Сергеевна Горбачева. КБ, в котором сегодня работают семь специалистов, не только разрабатывает конструкторскую документацию, но и координирует работу конструкторов обособленных подразделений, обеспечивает развитие системы электронного управления документацией (PDM), ведение баз данных САПР, обеспечивает и планирует экспериментальное производство в ходе НИОКР, сопровождает внедрение наших изделий на серийных заводах отрасли.

Распространение тематики работ предприятия в область радиолокации, инициированное в 2017 году первой разработкой блока АФАР X-диапазона в интересах вертолетной тематики, потребовало дальнейшего расширения компетенций, что привело к созданию новых подразделений, в которые привлекались ведущие специалисты необходимых отраслей знаний.

Первым из них в феврале 2022 года стало обособленное подразделение в г. Саратове (ОПС), которое возглавил Александр Владимирович Бутерин. Основной тематикой ОПС стали разработки приемно-передающих модулей для радиолокационных АФАР X- и Ku-диапазонов, мощных малогабаритных усилителей импульсного режима, модулей распределения мощности на основе многослойных печатных плат. Сегодня в подразделении трудятся семь инженеров и конструкторов, построен и развивается собственный экспериментальный участок микросборки. Большую помощь работе ОПС оказывает директор предприятия-арендодателя АО «Стирол-Газ» Михаил Евгеньевич Барабанов, за что ему огромная благодарность.

В сентябре 2021 года было образовано обособленное подразделение в г. Нижнем Новгороде (ОПН) – дизайн-центр МИС СВЧ, которое возглавил Алексей Владимирович Кондратенко. Сегодня в ОПН пять разработчиков интегральных схем, за прошедшие три года ими были разработаны 25 проектов МИС СВЧ на арсениде и нитриде галлия, от простых 1-битных переключаемых аттенуаторов до сложнейшего векторного модулятора Ku-диапазона с высокоскоростной (100 МГц) загрузкой управляющих кодов по последовательному интерфейсу. Из них 11 проектов завершены и готовы к серийному производству. Разработанные МИС стали основой изделий АО «Микроволновые системы» для внутренних проектов и поставки потребителям. Микросхемы малошумящих усилителей с распределенным усилением МС3058-2 широко поставляются предприятиям отрасли в рамках мероприятий импортозамещения. Активное участие специалисты ОПН принимают в работах по созданию отечественной foundry-технологии МИС на нитриде галлия.

Внедрение, выпуск конструкторской и технологической документации, организацию испытаний разрабатываемых МИС, а также разработку дискретных транзисторов на нитриде и арсениде галлия и ряда других компо-

нентов обеспечивает отдел электронных компонентов (ОЭК), созданный в январе 2022 года и возглавляемый заместителем генерального директора по развитию ЭКБ Вадимом Минхатовичем Миннебаевым. В отделе работают три специалиста, обеспечивая кроме сопровождения собственных разработок и проектов ОПН и ПО развитие испытательной базы, исследования в области моделирования транзисторных структур и другие сопутствующие направления. Один из разработанных нами для собственного производства арсенид-галлиевых транзисторов поставляется флагману российской СВЧ-электроники АО «НПП «Исток».

В феврале 2022 года было организовано обособленное подразделение в г. Санкт-Петербурге, его возглавил Роман Алексеевич Шевченко. Задачами подразделения стали разработка аппаратной и программной платформ собственного специализированного вычислителя для проектов БРЛС «Атлас», устройств, алгоритмов и программ первичной цифровой обработки радиолокационных сигналов, создание устройств широкополосной цифровой радиосвязи. Сегодня в подразделении работают 13 специалистов, включая трех инженеров-программистов. Ближайшие перспективные проекты ОПСП – аппаратура радиолинии широкополосной связи для Российской орбитальной станции (РОС) и устройства первичной и вторичной обработки сигнала для БРЛС «Атлас-Ku-01», разрабатываемой предприятием.

В апреле 2022 года в составе ОПС была создана специализированная лаборатория синтеза сигналов (ЛСС), которую возглавил Дмитрий Анатольевич Баринов. В числе задач лаборатории разработка устройств формирования высокочистых опорных, зондирующих и гетеродинных сигналов для радиолокационных проектов предприятия, а также по техническим заданиям других предприятий. В лаборатории сегодня работают 11 сотрудников. Первые разработанные подразделением изделия отгружены потребителю уже в конце 2023 года.

Процесс формирования инфраструктуры разработок завершился созданием двух специализированных подразделений на центральной площадке – отдела комплексного проектирования (ОКП) и отдела радиотехнического оборудования (ОРТО).

ОКП, созданный в июне 2022 года, возглавил заместитель главного конструктора по направлению радиолокации Владимир Германович Чернов, ставший в 2017 году инициатором упомянутых работ по созданию блока АФАР со стороны предприятия-заказчика. Главной задачей ОКП сегодня является организация и обеспечение разработки собственной БРЛС «Атлас-Ku-01», в которую предприятие вкладывает значительные усилия и средства, а также другого необходимого для эффективного применения

БРЛС авиационного радиооборудования. Усилиями ОКП, в котором сегодня работают восемь специалистов, создается стенд главного конструктора на базе мини-безэховой камеры, находящийся в финальной стадии изготовления образца, разрабатывается образец радиолокационного маркера (вынесенной навигационной точки), завершается формирование технического облика БРЛС «Атлас-Ку-01», обеспечивается взаимодействие с предприятиями – потребителями радиолокационных комплексов и с предприятиями кооперации.

ОРТО является самым молодым проектно-конструкторским подразделением (создан в феврале 2023 года), его возглавляет Алексей Владимирович Редька. Задачей ОРТО является разработка в качестве финальной продукции предприятия и сопровождение изготовления в созданном для этих работ сборочном цехе радиотехнических блоков, включающих в себя модули и узлы, спроектированные остальными подразделениями компании и предприятиями-соисполнителями. Несмотря на «молодость», ОРТО в сотрудничестве с ОПС, ОПН, ПО и КБ успел обеспечить разработку и поставку (включая создание стендового оборудования) в 2023 году одному из предприятий-потребителей партии 8-канальных приемо-передающих модулей АФАР X-диапазона (около 1400 каналов), отработку КД и запуск в производство первого образца радиолокационной модульной сборки, завершить начатую ранее разработку и внедрить в производство автоматизированный стенд приемо-сдаточных испытаний усилительных модулей СВЧ. В ближайшей перспективе – разработка блоков высоко-мощных импульсных усилителей X-диапазона, СВЧ-блока оборудования широкополосной радиолинии РОС, «оживление» и отработка РМС, разработка и организация изготовления антенного блока БРЛС «Атлас-Ку-01».

Тематическую поддержку подразделениям-разработчикам оказывают патентный отдел в лице Ильи Александровича Балыко и служба главного конструктора, возглавляемая Денисом Михайловичем Томашевым.

Профессиональные компетенции практически всех руководителей подразделений и направлений в той или иной степени отражены в собранных в этой книге научных статьях и докладах разных лет. Это и есть их лучшие рекомендации.

Задачи предприятия к следующему юбилею – 25-летию просты и понятны:

- компоненты нашей разработки должны заполнить российский рынок ЭКБ широкополосных и радиолокационных применений;
- модули СВЧ должны устойчиво выпускаться в объемах, необходимых потребителям, с высоким качеством и привлекательной ценой;

- сверхширокополосные твердотельные усилители нашей разработки в классе 100 Вт должны полностью заменить вакуумные приборы в существующих системах;
- БРЛС «Атлас-Ки-01» с оборудованием поддержки должна летать и быть «самой желанной опцией» летательного аппарата;
- радиолиния широкополосной связи РОС должна круглосуточно работать на орбите и не вызывать вздохов сожаления у космонавтов.

СВЧ–УСТРОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ

В первом тематическом разделе сборника мы поместили статьи и доклады об устройствах и технологиях, не относящихся напрямую к известной продукции АО «Микроволновые системы», но присутствующих незримо или зримо внутри наших изделий как важные элементы, которые также создаются нашими инженерами наряду с СВЧ-усилителями, интегральными схемами и комплексами. Это пассивные СВЧ-элементы (фильтры, сумматоры и делители мощности, корректоры и др.), устройства коммутации, преобразования и управления СВЧ-сигналами, технологии изготовления и сборки СВЧ-модулей. Работы относятся к периоду 1997–2024 годов. Некоторые технические решения защищены российскими и международными патентами и внедрены в десятках моделей выпускаемых нами серийных изделий.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ СУММИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ С ОКТАВНОЙ ПОЛОСОЙ ЧАСТОТ¹

С.В. Гармаш, А.А. Кищинский

Аннотация. Проведен анализ эффективности суммирования мощности схемами широкополосного суммирования, построенными на основе различных типов планарных сумматоров. Описываются конструкции и сравниваются характеристики трех типов выходных каскадов, построенных по различным схемам суммирования в диапазоне 4–8 ГГц. Приведены конструкция и характеристики усилителя мощности в диапазоне 4–8 ГГц, использующего делители – сумматоры бегущей волны и имеющего выходную мощность насыщения 3,9–4,5 Вт и усиление 36–38 дБ.

I. Введение

Выбор и техническая реализация схемы суммирования мощности выходного каскада в значительной степени определяют достижимые параметры СВЧ-усилителя мощности, в первую очередь его КПД и выходную мощность. Для широкополосных усилителей проблема усложняется тем, что невозможно использовать наиболее эффективные узкополосные резонансные сумматоры (радиальные, волноводные, квазиоптические). В одной из наиболее широкополосных технических реализаций схем суммирования этого класса [1] эффективность суммирования мощности в полосе 8–12 ГГц составила 42–68% при суммировании восьми активных элементов. К числу наиболее распространенных планарных схем суммирования, применяемых в широкополосных усилителях мощности, относятся мосты Ланге, синфазные кольцевые делители и цепочечные делители. Целью настоящей работы является расчетное и экспериментальное сравнение достижимых параметров существующих схем суммирования при работе в нелинейном режиме, а также выбор и экспериментальная апробация схемы суммирования для построения мощного усилителя в диапазоне 4–8 ГГц.

II. Сравнительный анализ схем суммирования мощности

Для правильной оценки потерь в схеме суммирования мощности при различном числе каналов суммирования и обоснованного выбора структурной схемы широкополосного усилителя мощности необходимо провести ана-

¹ Материалы 7-й Крымской международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 1997. – С. 17–22.

лиз параметров возможных вариантов схем сумматора выходного каскада. Рассмотрим ниже пять типов широкополосных сумматоров, при этом для сравнения результатов используем схему четырехканального суммирования. В работе исследованы характеристики следующих типов сумматоров:

- синфазный кольцевой сумматор (IP);
- цепочечный сумматор на отрезках линий (TW);
- сумматор на основе мостов Ланге (LL);
- сумматор на основе комбинации двух мостов Ланге и синфазного кольцевого сумматора (LIP);
- цепочечный сумматор на мостах Ланге (TWL).

На практике иногда применяется также схема цепочечного суммирования на основе направленных ответвителей с лицевой связью [2], однако ее параметры очень близки к параметрам схемы TWL и отдельно здесь не рассматриваются. Расчет проводился по следующей схеме:

- 1) синтезировались схема и топология данного типа сумматора;
- 2) геометрические размеры и величины элементов схемы оптимизировались в октавной полосе частот (конкретно в полосе 2–4 ГГц) по критерию минимальных потерь на деление-суммирование при встречном включении и минимального разбаланса амплитуд выходных сигналов плеч;
- 3) формировалась нелинейная модель четырехэлементного усилительного каскада на базе четырех идентичных по схеме широкополосных усилительных ячеек и рассчитывались частотные зависимости максимальной выходной мощности, отдаваемой каскадом в 50-омную нагрузку в четырех различных ситуациях.

К ним относятся следующие ситуации:

- идентичные ячейки, номинальные размеры элементов сумматоров (зазор, полосок);
- идентичные ячейки, размеры завышены (зазор – 15 мкм, полосок + 15 мкм);
- идентичные ячейки, размеры занижены (зазор + 15 мкм, полосок – 15 мкм);
- неидентичные ячейки (две идентичные, одна с увеличенными масштабируемыми элементами модели на +20%, одна с уменьшенными на –20%), номинальные размеры.

Для расчетов была использована нелинейная модель арсенид-галлиевого полевого транзистора Матерки – Каспрчака, встроенная в пакет программ Supercompact-Microwave Harmonica [3]. Был взят мощный транзистор с затвором 0,5×5000 мкм, параметры его нелинейной модели определены экспериментально по методике, аналогичной той, что использована в работе [4]. В качестве усилительного элемента в расчетах использована усилительная ячейка, спроектированная отдельно и включающая два идентичных транзи-

стора, включенные параллельно (общая ширина затвора составляет, таким образом, 10 000 мкм), входную и выходную согласующе-трансформирующие цепи, цепи развязки по питанию и подачи питающих напряжений. Расчетные параметры усилительной ячейки:

- диапазон рабочих частот 2–4 ГГц
- минимальное малосигнальное усиление 10,43 дБ
- неравномерность малосигнального усиления +1,27 дБ
- минимальная выходная мощность насыщения 36,1 дБм
- максимальная выходная мощность насыщения 36,9 дБм
- максимальный коэффициент отражения по входу 0,86
- максимальный коэффициент отражения по выходу 0,31

При сравнении основных параметров схем суммирования анализировались три основных показателя, получаемые при помощи расчета частотной зависимости выходной мощности насыщения каскада:

ΔP_1 – максимальное в рабочей полосе частот снижение выходной мощности насыщения каскада с идентичными ячейками и номинальными размерами по отношению к «идеальной» выходной мощности (т.е. учетверенной выходной мощности усилительной ячейки в 50-омном тракте);

ΔP_2 – наибольшая в рабочей полосе частот величина ΔP_1 из четырех расчетных ситуаций, описанных выше. Этот показатель позволяет оценить потенциальную технологическую чувствительность той или иной схемы суммирования;

ΔP_2+ – тот же показатель ΔP_2 , рассчитанный в расширенной на 10% с каждой стороны полосе частот (конкретно от 1,8 до 4,4 ГГц). Этот показатель позволяет оценить запас по полосе частот для октавного усилителя и возможности использования данной схемы суммирования в более широких полосах частот.

Рассмотрим перечисленные выше варианты схем суммирования подробнее. Структурная схема мощного усилительного каскада на четырех ячейках, включенных по схеме IP, показана на рис. 1.

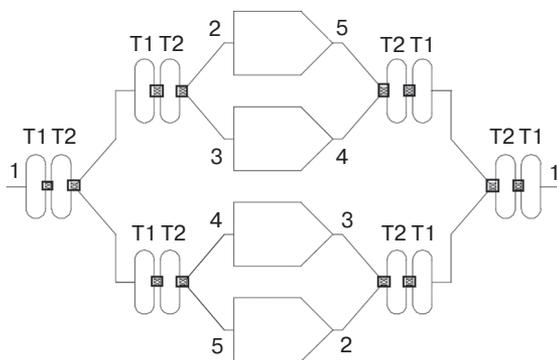


Рис. 1. Схема каскада с сумматором типа IP

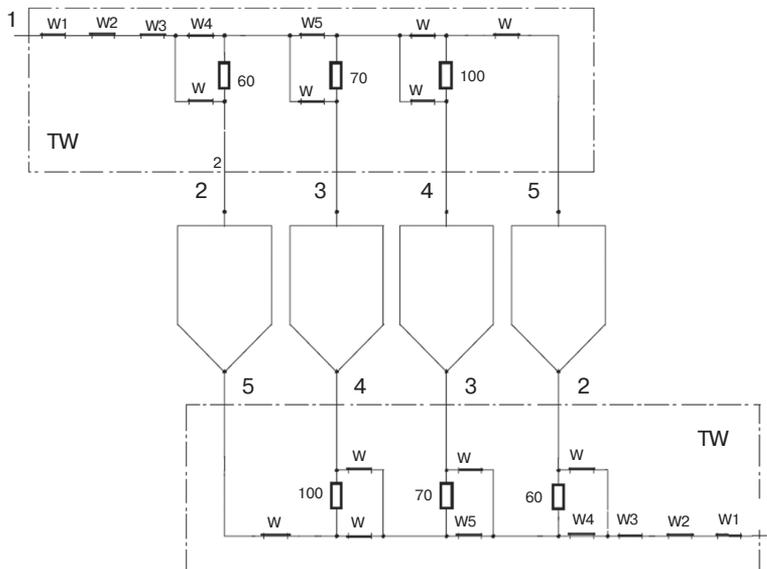


Рис. 2. Схема каскада с сумматором типа TW

Для достижения перекрытия по частоте 2:1 каждая ступень суммирования содержит по два трансформирующих отрезка T1 и T2. Сумматор типа IP обеспечивает теоретически идеальное равноамплитудное деление мощности на четыре канала, частотная неравномерность коэффициентов передачи выходных плеч (ΔC_{i1}) не превышает 0,13 дБ в диапазоне 2–4 ГГц, деление мощности составляет 6,18–6,31 дБ. Прямые потери на деление-суммирование при исключенных из схемы ячейках в рабочем диапазоне составляют 0,32–0,52 дБ.

Структурная схема мощного усилительного каскада на четырех ячейках, включенных по схеме TW, показана на рис. 2.

Для достижения перекрытия по частоте 2:1 на входе сумматора использован трехступенчатый трансформатор импеданса с коэффициентом трансформации 4:1 на четвертьволновых отрезках линии передачи W1, W2 и W3. Сумматор типа TW имеет весьма равномерные характеристики деления мощности, частотная неравномерность коэффициентов передачи выходных плеч не превышает 0,25 дБ в диапазоне 2–4 ГГц, деление мощности составляет 6,19–6,44 дБ. Идентичность амплитудных характеристик всех четырех каналов суммирования составляет 0,15 дБ. Прямые потери на деление-суммирование при исключенных из схемы ячейках в рабочем диапазоне составляют 0,45–0,68 дБ. За счет сдвига фаз выходных сигналов плеч деления мощности отраженные от входов ячеек сигналы частично компенсируются на балластных резисторах сумматора, за счет этого достигается приемлемый (в данном случае не хуже 0,29) коэффициент отражения входа и выхода каскада и обеспечиваются условия каскадирования схем.

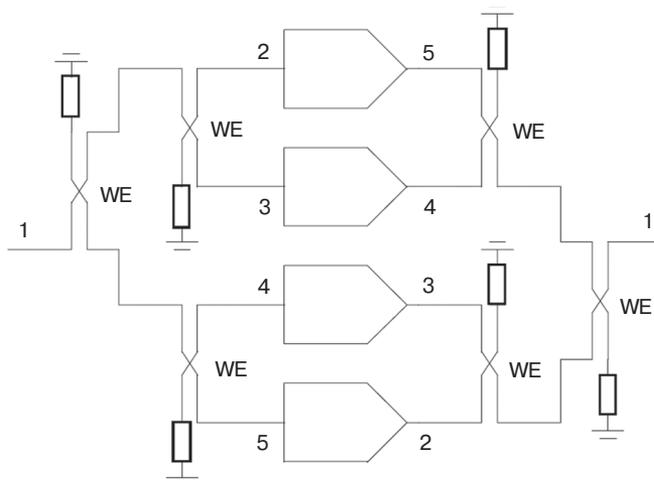


Рис. 3. Схема каскада с сумматором типа LL

Структурная схема мощного усилительного каскада на четырех ячейках, включенных по схеме LL, показана на рис. 3.

Для моделирования параметров сумматора использована встроенная модель моста Ланге программы Supercompact. Данный тип сумматора является одним из самых распространенных и широко используется при производстве широкополосных усилителей мощности. Это обусловлено компактностью и очень хорошей степенью подавления отраженных сигналов (в четырехканальном каскаде за счет двойного подавления максимальные коэффициенты отражения входа и выхода не превышают 0,083). Сумматор типа LL имеет неравномерное деление мощности по каналам, при этом два канала имеют практически равномерные АЧХ с коэффициентами передачи на уровне 6,4–6,55 дБ, а два других разбалансированы относительно них на $\pm 0,8 \dots 0,9$ дБ, частотная неравномерность коэффициентов передачи этих двух выходных плеч достигает 1,4 дБ в диапазоне 2–4 ГГц. Прямые потери на деление-суммирование при исключенных из схемы ячейках в рабочем диапазоне составляют 0,64–0,96 дБ. Условия каскадирования схем при данной схеме выполняются практически идеально.

Структурная схема мощного усилительного каскада на четырех ячейках, включенных по схеме LP, показана на рис. 4.

Использование в этой схеме синфазной ступени суммирования вместо одного из мостов Ланге позволяет при некотором увеличении габаритов каскада уменьшить потери на деление-суммирование и частотную неравномерность деления при незначительном ухудшении свойств подавления отраженных сигналов (коэффициенты отражения входа и выхода в данной схеме не превышают 0,21).

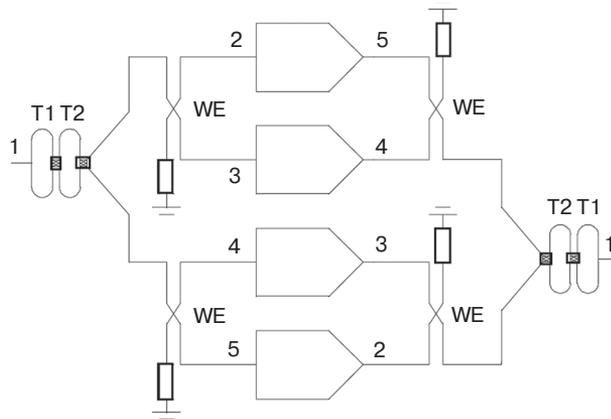


Рис. 4. Схема каскада с сумматором типа LIP

Частотная неравномерность коэффициентов передачи выходных плеч не превышает 0,8 дБ в диапазоне 2–4 ГГц, деление мощности составляет 5,95–6,85 дБ. Идентичность амплитудных характеристик всех четырех каналов суммирования составляет 0,8 дБ. Прямые потери на деление-суммирование при исключенных из схемы ячейках в рабочем диапазоне составляют 0,5–0,85 дБ. Для моделирования параметров сумматора также использована модель моста Ланге, указанная выше.

Структурная схема мощного усилительного каскада на четырех ячейках, включенных по схеме TWL, показана на рис. 5.

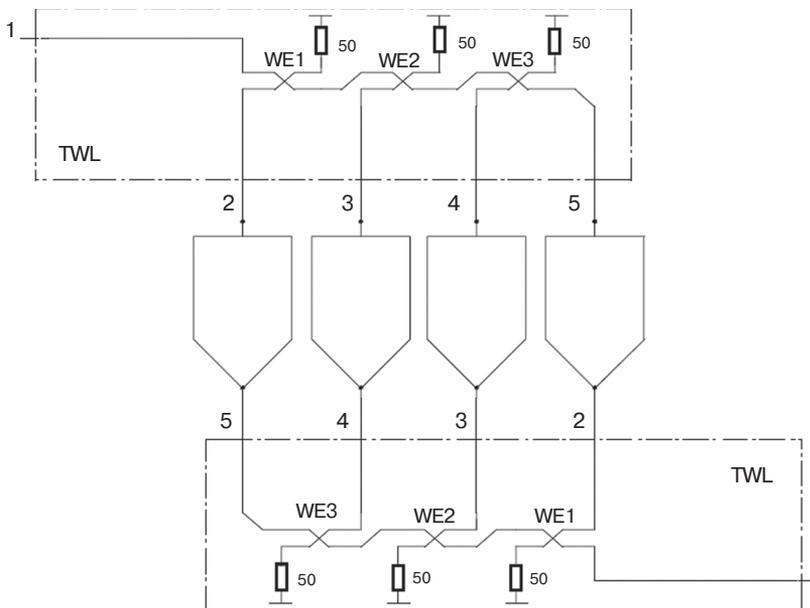


Рис. 5. Схема каскада с сумматором типа TWL

Это также весьма компактная схема, в которой мосты Ланге используются в качестве направленных ответвителей с сильной (от -3 до -6 дБ) связью для реализации цепочечного сумматора мощности. Для данного типа сумматора в диапазоне $2-4$ ГГц деление мощности составляет $5,5-7,0$ дБ, неидентичность амплитудных характеристик всех четырех каналов суммирования составляет $1,5$ дБ. Прямые потери на деление-суммирование при исключенных из схемы ячейках в рабочем диапазоне составляют $0,8-1,24$ дБ.

Провести сравнение расчетных собственных электрических характеристик рассмотренных типов сумматоров можно, воспользовавшись сводными данными табл. 1.

Таблица 1

Тип сумматора	L:/Σ, дБ max	ΔC11, дБ max	MS11, max	MS22, max
IP	0,52	0	0,869	0,36
TW	0,68	0,16	0,289	0,138
LL	0,96	1,8	0,08	0,083
LIP	0,86	0,8	0,207	0,142
TWL	1,24	1,11	0,178	0,142

L:/Σ – собственные потери на деление-суммирование при исключенных из схемы ячейках;
 ΔC11 – неидентичность коэффициентов передачи плеч в октавном диапазоне частот;
 MS11 – входной коэффициент отражения каскада в линейном режиме при включенных ячейках;
 MS22 – выходной коэффициент отражения каскада в линейном режиме при включенных ячейках.

Однако собственные параметры схем суммирования не полностью характеризуют достижимые характеристики мощного выходного каскада, поскольку на уровень выходной мощности в нелинейном режиме существенно влияют достаточно малые отклонения от идеальных нагрузок выходов усилительных ячеек на основной частоте и гармониках сигнала, дополнительный разбаланс возбуждающих напряжений, вызванный конечной и невысокой развязкой плеч сумматора в широкой полосе частот, и ряд других факторов. Для интегральной оценки потерь мощности при суммировании в различных схемах воспользуемся сводными данными табл. 2, параметры в которой получены по результатам расчета в режиме колебаний, близком к насыщению.

Таблица 2

Тип сумматора	LΣ, дБ max	ΔP1, дБ max	ΔP2, дБ max	ΔP2+, дБ max
IP	0,26	0,773	0,92	0,92
TW	0,34	0,54	0,86	0,86
LL	0,48	0,661	1,1	1,52
LIP	0,43	0,543	1,05	1,15
TWL	0,62	0,816	1,25	1,5

LΣ – ожидаемые потери выходной мощности исходя из собственных потерь на деление-суммирование данного типа сумматора.

Отметим, что малосигнальные амплитудно-частотные характеристики каскадов практически не изменяются, неравномерность АЧХ в рабочей полосе частот остается в пределах от 0,87 до 1,27 дБ (для отдельной ячейки – 1,27 дБ). Исключение составляет сумматор типа IP, для которого неравномерность АЧХ увеличилась до 2,29 дБ, что обусловлено интерференцией собственных отражений выходных плеч делителя (несмотря на их малость) и входных отражений ячеек.

Из приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) схемы IP и TW наименее чувствительны к технологическим погрешностям изготовления плат, изменения характерных размеров элементов сумматоров на ± 15 мкм изменяют выходную мощность не более чем на 0,2 дБ. В этих же условиях остальные схемы изменяют мощность на 0,5–0,6 дБ;
- 2) все схемы суммирования имеют потери выходной мощности по отношению к идеальному сумматору, на 0,2–0,5 дБ большие, чем собственные потери в выходном сумматоре, даже при идеальных ячейках;
- 3) потери выходной мощности в схемах типа LL и TWL за границами октавной полосы частот (в участках 1,8–2,0 и 4,0–4,4 ГГц) быстро растут, что не наблюдается в сумматорах других типов;
- 4) даже не очень сильная неидентичность параметров ячеек (две ячейки с разбросом $\pm 20\%$) снижает достижимую выходную мощность каскада на 0,4–0,5 дБ по отношению к каскаду с идентичными ячейками;
- 5) оптимальным сочетанием характеристик обладает цепочечный сумматор мощности на отрезках линий (TW), называемый в литературе также сумматором бегущей волны. Он показывает наименьшие расчетные потери мощности как в идеальном случае, так и при различных технологических отклонениях, имеет значительный запас по полосе частот и обеспечивает подавление отраженных от входа ячеек волн с коэффициентами отражения не более 0,14–0,29 (КСВН не более 1,82);
- 6) при проектировании структурной схемы широкополосного усилителя мощности необходимо учитывать, что дополнительные потери мощности по сравнению с расчетными параметрами выходного сумматора с учетом неизбежного разброса параметров транзисторов будут составлять не менее 0,6–0,7 дБ;
- 7) схемы суммирования, построенные на отрезках линий (IP, TW) имеют в условиях технологического разброса на 0,25–0,35 дБ меньшие потери выходной мощности, чем схемы, построенные на базе мостов Ланге (LL, LIP, TWL).

III. Экспериментальное исследование четырехканальных выходных каскадов в диапазоне 4–8 ГГц

Для экспериментальной оценки полученных результатов и исследования возможностей применения были спроектированы, изготовлены и испытаны макеты выходных усилительных каскадов, построенные по трем схемам суммирования: LIP (каскад A212-22), IP (каскад 48X4) и TW (каскад И-64). Для экспериментов был выбран базовый диапазон частот 4–8 ГГц. В качестве активных элементов использованы опытные кристаллы арсенид-галлиевых полевых транзисторов с шириной затвора 2200 мкм, предоставленные ГНПП «Исток». При проектировании схем и топологий каскадов использовалась усредненная нелинейная модель данного транзистора, параметры которой получены экспериментально по методике, аналогичной [4]. Измерялись и затем усреднялись параметры четырех образцов транзисторов, смонтированных в микрополосковые держатели.

Конструкция каскада типа A212-22 полностью аналогична конструкции выходной части модуля A212-01, подробно описанной в [5] (она и была использована для эксперимента). Отличие состоит в том, что использована новая усилительная ячейка на указанном выше транзисторе, монтируемом методом прямого монтажа и имеющем металлизированные отверстия истоков. Кроме того, по сравнению с приведенной ранее схемой LIP (рис. 4) в данной реализации синфазный сумматор T1, T2 имел только один развязывающий резистор, что ухудшает развязку плеч. Основные параметры спроектированных и изготовленных усилительных ячеек приведены в табл. 3. Видно, что (с учетом погрешностей измерения) результаты моделирования и измерений практически совпадают.

Таблица 3

Параметр, единица изм.	Значение	
	Расчет	Эксперимент
Минимальный коэффициент усиления, дБ	9,1	7,5–8,2
Частотная неравномерность АЧХ, дБ	0,3	0,6–1,0
Минимальная выходная мощность насыщения, мВт	750	790–850
Неравномерность выходной мощности, дБ	+0,7	+1,1

Конструкция каскада типа И-64 показана на рис. 6.

Каскад содержит четыре усилительных ячейки, установленные на общем металлическом основании. На этом же основании установлены платы сумматоров типа TW, причем согласующие четвертьволновые трансформаторы вынесены на отдельные платы. В обоих типах каскадов все транзисторы имеют индивидуальные цепи подачи питающих напряжений и установки напряжений затвора.

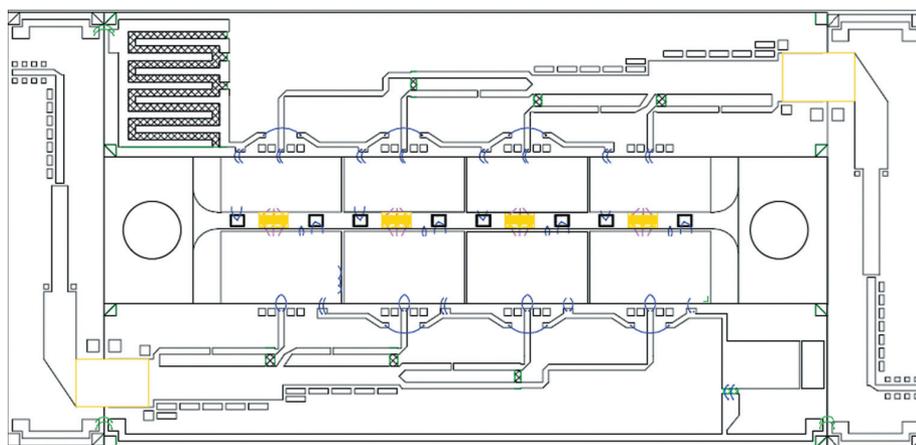


Рис. 6. Конструкция каскада типа И-64

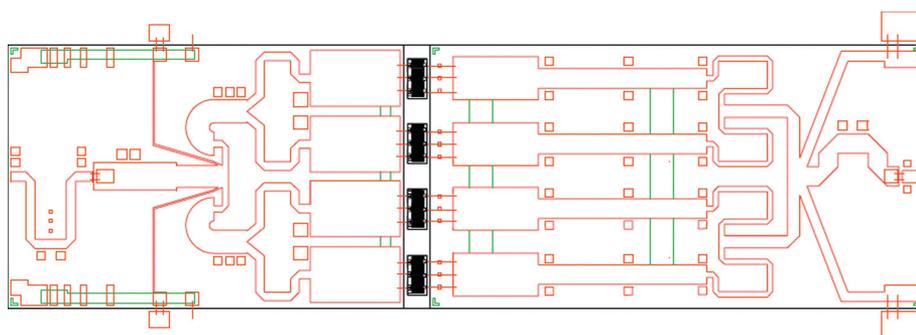


Рис. 7. Конструкция каскада типа 48X4

Каскад типа 48X4 отличается по принципу построения от предыдущих. Схема синфазного суммирования (IP) здесь частично совмещена со схемами входной и выходной согласующих цепей и напоминает по принципу построения каскад, описанный в [6]. Это позволяет провести оптимизацию схемы в целом и, как следствие, несколько улучшить ее параметры и уменьшить габариты, однако не исключает основных недостатков, присущих схеме IP. Конструкция каскада 48X4 показана на рис. 7.

Макеты описанных выше каскадов были изготовлены и испытаны, полученные основные экспериментальные характеристики сведены в табл. 4, а частотные зависимости выходной мощности насыщения показаны на рис. 8.

Таблица 4

Тип каскада	Кр, дБ min	ΔКр, дБ max	Р _{вых} , Вт min	ΔР _{вых} , дБ max	КСВ _{нвх} , max
A212-22	5,2	+1,25	1,61	+1,2	1,58
И-64	5,0	+1,5	2,08	+0,6	1,66
48X4	6,5	+2,25	2,3	+1,1	8,0

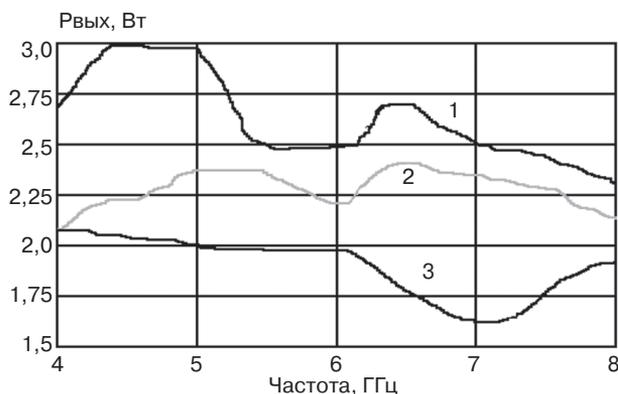


Рис. 8. Частотные зависимости выходной мощности насыщения каскадов: 1 – 48X4; 2 – И-64; 3 – A212-22

Все каскады испытывались при одинаковых напряжениях питания стоков транзисторов и близких рабочих токах ($V_{си} = 6,5$ В, $I_c = 220$ мА). В испытанных каскадах установлены разные образцы транзисторов и ячеек, не подбирившиеся предварительно по параметрам.

Результаты эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

- 1) схемы, использующие «внешние» сумматоры (A212-22 и И-64) имеют на 1,3–1,5 дБ меньшее малосигнальное усиление, чем схема со «встроенным» сумматором (48X4);
- 2) при одинаковых в конкретной технологической реализации собственных потерях сумматоров типа LIP и TW (коэффициенты усиления каскадов A212-22 и И-64 практически совпадают) схема типа TW показывает существенно лучшую (на 1,1 дБ) эффективность суммирования мощности в нелинейном режиме, что качественно соответствует проведенному ранее анализу;
- 3) схема с синфазным суммированием (48X4) существенно (на 1,1 дБ) увеличивает неравномерность АЧХ каскада даже при совместной оптимизации сумматора и согласующих цепей, что соответствует проведенному ранее анализу;
- 4) наименьшую неравномерность выходной мощности демонстрирует каскад со схемой TW (И-64);
- 5) максимальную выходную мощность насыщения (2,3–3,0 Вт) демонстрирует каскад со «встроенной» схемой IP (48X4), однако прямое каскадирование этого узла с какими-либо узлами предварительного усиления без принятия дополнительных мер по развязке невозможно из-за высокого входного КСВН (8,0).

Наилучшим сочетанием параметров, на наш взгляд, обладает каскад типа И-64, этот тип выходного каскада использован в ходе дальнейшей работы для создания макета мощного усилителя в диапазоне 4–8 ГГц.

IV. Конструкция и характеристики усилителя мощности

Разработка макета усилителя мощности в диапазоне 4–8 ГГц в сущности является развитием работы, опубликованной ранее [7]. Конструкция усилителя приведена на рис. 9.

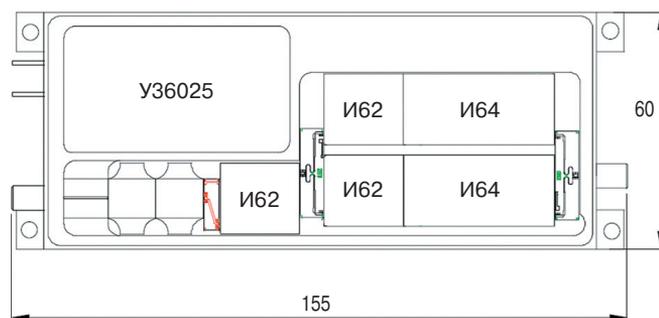


Рис. 9. Конструкция усилителя мощности

В новую конструкцию усилителя внесены два существенных изменения (кроме использования нового транзистора).

- 1) Усилительные ячейки не являются самостоятельными конструктивными элементами, их платы и элементы входят в состав конструкции усилительных узлов И-62 (балансный каскад с мостами Ланге) и И-64. Это стало возможным вследствие использования метода прямого, а не перевернутого, как ранее, монтажа кристалла транзистора и высокой степени воспроизводимости характеристик новых транзисторов.
- 2) Исключено «лишнее» звено деления-суммирования мощности между предвыходным и выходным каскадами усилителя, вносящее дополнительные потери.

Усилитель состоит из трех балансных каскадов предварительного усиления (два каскада на основе ячеек типа 1, описанных ранее в [7], и каскада И-62) и двух линеек окончного усиления, мощности которых суммируются синфазно. В качестве выходного сумматора использован синфазный микрополосковый кольцевой сумматор с двумя ступенями трансформации и одним балластным резистором.

Все входящие усилительные узлы имеют собственные уровни КСВН не более 1,6–2,0 и легко каскадируются без существенной деформации общей АЧХ усилителя. Все узлы подвергались предварительной настройке в контактном устройстве (установка индивидуальных режимов смещения транзисторов, подстройка АЧХ в режиме малого сигнала и проверка выходной мощности).

Узел УЗ6025, показанный на рис. 9, обеспечивает защиту усилителя в случае сбоев питания, а именно:

- ограничение напряжения внутренней шины $-U$ при коммутационных бросках и перенапряжении;
- защиту от переполюсовки питающих напряжений;
- отключение питания $+U$ в случае отсутствия или пропадания питания $-U$ с необходимыми задержками;
- отключение питания $+U$ при повышении внешнего положительного напряжения выше 9 В;
- ограничение коммутационных импульсов в цепи $+U$.

Падение напряжения на ключевом элементе платы защиты при токе до 4,0 А не превышает 0,5 В. Узел выполнен на дискретных корпусных радиоэлементах.

Конструктивно макет усилителя выполнен в алюминиевом чашечном корпусе с разъемами типа СРГ50-751. Узлы устанавливаются в корпус на винтах и коммутируются сваркой золотых перемычек.

Измеренные основные параметры макета усилителя показаны на рис. 10.

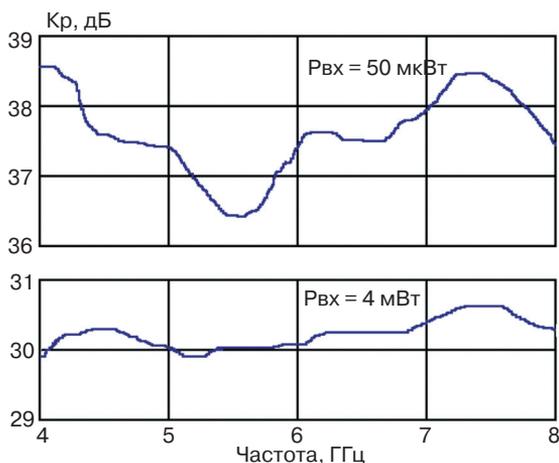


Рис. 10. АЧХ усилителя мощности

Минимальное малосигнальное усиление в нормальных климатических условиях составляет 36,4 дБ, неравномерность АЧХ – 2,2 дБ. Выходная мощность насыщения при входной мощности 4 мВт и усилении около 30 дБ составляет 3,9–4,5 Вт, при этом КПД усилителя находится в пределах 12–14%. В режиме компрессии усиления –1 дБ выходная мощность составляет 2–2,5 Вт в диапазоне частот 4–8 ГГц, в этом режиме КПД находится в пределах 7–9%. Питание усилителя осуществляется от двухполярного источника +8 В / –5 В, мощность потребления – 31,5–32 Вт. Теплоотвод при испытаниях осуществлялся при помощи литого штыревого радиатора.

V. Заключение

Результаты, изложенные в настоящем докладе, позволяют рекомендовать к использованию при числе каналов суммирования четыре и более схему на основе цепочечных сумматоров на отрезках линий. Данная схема в октавной полосе частот обеспечивает равномерную выходную мощность, эффективность суммирования с учетом технологических разбросов элементов 67–75%, легко реализуется конструктивно и обеспечивает возможность каскадирования усилительных узлов. Возможности данной схемы подтверждены экспериментально также и в диапазонах частот 2–4 и 8–12 ГГц в рамках проводимых нами исследовательских и проектных работ. При соответствующем совершенствовании может оказаться перспективной также схема прямого синфазного суммирования, дополненная квадратурными мостами для обеспечения каскадирования, поскольку она обладает максимальной эффективностью суммирования.

Список литературы

- [1] A. Alexanian, R.A. York. Broadband spatially combined amplifier array using tapered slot transitions in waveguide // IEEE Microwave and Guided Wave Letters, v. 7, no. 2, February 1997, pp. 42–44.
- [2] J.W. Gipprih et al. A power amplifier yields 10 Watt over 8–14 GHz using GaAs MMICs in an LTCC serial combiner/divider network // 1993 IEEE MTT Symposium Digest, pp. 1369–1372.
- [3] Microwave Harmonica PC, Users Guide. Compact Software, 1991.
- [4] В.Г. Лапин и др. Внутрисогласованный гибридно-монолитный транзистор диапазона 5,6–6,4 ГГц с выходной мощностью 1 Вт // Материалы 7-й Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 10–16 сентября 2017 г.
- [5] В.Ф. Гармаш и др. Серия широкополосных гибридно-интегральных усилителей мощности в планарном исполнении для диапазонов 2–4, 4–8 и 8–12 ГГц // Материалы 6-й Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 1996. – С. 112–116.
- [6] Y. Itoh et al. A 5–10 GHz 15 Watt GaAs MESFET amplifier with flat gain and power response // IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1995, v. 5, no. 12, pp. 454–456.
- [7] А.А. Кищинский, А.Х. Насыров. Усилитель мощности диапазона 4–8 ГГц с выходной мощностью 2,5 Вт // Материалы 6-й Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 1996. – С. 117–119.

ШИРОКОПОЛОСНОЕ КОММУТАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО¹

Н.А. Герасимова, А.А. Кищинский, В.О. Полещиков

Аннотация. В докладе описана конструкция широкополосной коммутационной матрицы 4×4 канала диапазона 2–8 ГГц, построенной на основе перпендикулярного соединения микрополосковых линий передачи. Матрица предназначена для распределения сигналов по лучам передающей многолучевой антенной решетке и обеспечивает независимую передачу четырех входных сигналов в четыре выходных канала с коэффициентом передачи ± 3 дБ и уровнем запыриания более 35 дБ.

I. Введение

Основной технической проблемой при конструировании многоканальных коммутационных СВЧ-устройств (матриц $N : M$) с произвольным объединением каналов является реализация качественных межпересечений линий передачи, обеспечивающих низкие отражения и потери мощности, и требуемый уровень развязки. Одним из путей решения этой проблемы является расположение коммутационных и объединительных устройств в различных взаимноперпендикулярных плоскостях. В данной работе для перехода сигнала из одной плоскости в другую использован перпендикулярный стык микрополосковых линий (рис. 1), предлагавшийся ранее в качестве элемента пассивных СВЧ-устройств различного назначения [1].

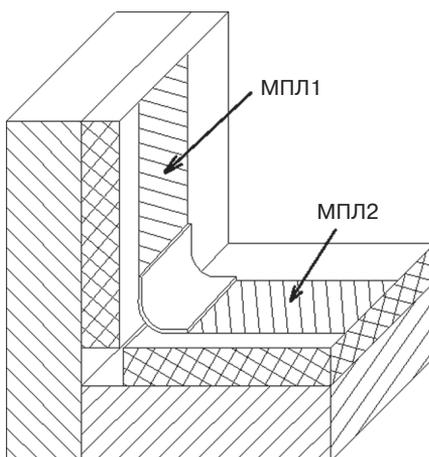


Рис. 1. Перпендикулярный МПЛ-переход

¹ Материалы 9-й Крымской международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. – 1999. – С. 81–82.

Ниже описаны конструкция и параметры коммутационно-распределительной матрицы 4×4, построенной с использованием такого соединения линий.

II. Конструкция устройства

Разработанная матрица 4×4 предназначена для независимого одновременного распределения четырех входных сигналов малого уровня мощности (до 10 мВт) в диапазоне 2–8 ГГц в четыре выходных канала. При этом сигналы могут как объединяться в одном выходном канале, так и распределяться в произвольных комбинациях в разные. Матрица состоит из четырех р-і-п-диодных переключателей 1×4, расположенных в вертикальной плоскости, четырех планарных четырехканальных сумматоров мощности и четырех компенсирующих усилителей, расположенных в горизонтальной плоскости. Переключатель (рис. 2) содержит счетверенный арсенид-галлиевый р-і-п-диод с общим катодом 1, обеспечивающий переключение каналов, и по два параллельных кремниевых р-і-п-диода 2 в виде кристаллов с катодом на верхней контактной площадке, обеспечивающих требуемый уровень развязки. Между параллельными диодами установлены пассивные кристаллы из полуизолирующего арсенида галлия с распределенными согласующими элементами.

Прямые потери включенного канала в диапазоне частот 1–16 ГГц не превышают 2,0 дБ, затухание выключенного канала – более 35–40 дБ. Смещение диодов осуществляется через тракты выходных плеч, общий катод диодной сборки 1 через резистор автосмещения 4 подключен к земле.

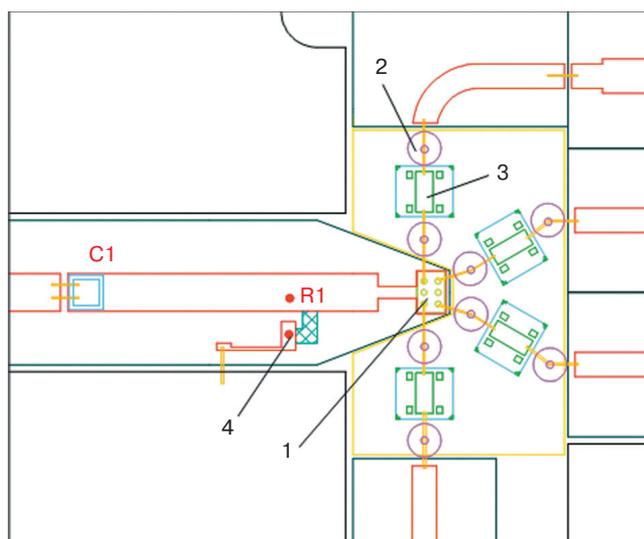


Рис. 2. Конструкция переключателя 1×4

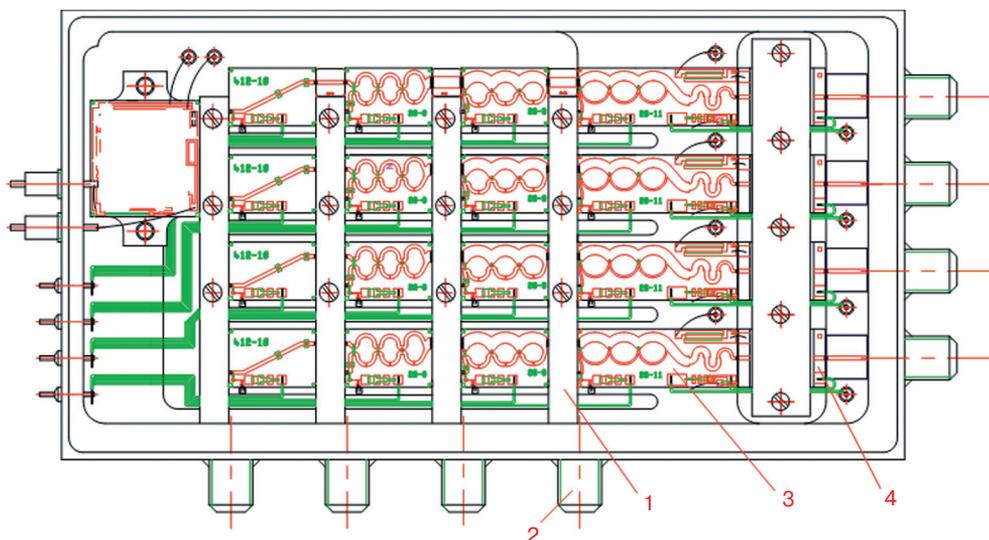


Рис. 3. Конструкция матрицы 4×4

Общий вид конструкции матрицы 4×4 показан на рис. 3. Переключатели 1 установлены вертикально на металлических пластинах, к которым подключены входные коаксиальные СВЧ-разъемы 2. Сумматоры мощности 3 построены по схеме бегущей волны [3], широко использовавшейся в усилителях СВЧ-мощности. Для уменьшения в широкой полосе частот влияния на коэффициент передачи открытого канала отражений закрытых каналов использованы трехсекционные звенья суммирования мощности. Управляющее диодами напряжение вводится через R-L-цепочки в выходные плечи сумматоров. Компенсирующие усилители 4 построены по двухтранзисторной схеме с реактивно-диссипативными согласующими цепями на транзисторах с шириной затвора 300 мкм по схеме автосмещения. Матрица имеет герметичную конструкцию с габаритами 130×70×20 мм.

III. Электрические характеристики

Измеренные параметры макета коммутационного устройства показаны на рис. 4.

Коэффициенты передачи открытых каналов в полосе частот 2–8 ГГц изменяются от –2,9 до +3,0 дБ, разброс АЧХ различных каналов не превышает 2,5 дБ. Затухание закрытого канала (паразитное проникание сигнала в нерабочий выходной канал) составляет 35–43 дБ и более. КСВН входа открытого канала – 1,6–2,0, КСВН выхода (определяется выходным КСВН усилителя) – не более 2,5. Питание и управление матрицей осуществляется от цепей постоянного напряжения +9 В / 200 мА и –5 В / 40 мА.