

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДЕПАРТАМЕНТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

---

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

## СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

---

Выпуск 1 (500)

2009

Издается с 1950 г.

---

*Главный редактор*  
д.т.н. **А.Н. Королев**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*),  
д.т.н. **Б.Н. Авдониин** (*зам. главного редактора, ОАО ЦНИИ «Электроника»*),  
к.т.н. **В.Н. Батыгин**, **Ю.А. Будзинский**, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**, **Б.Ф. Горбик**,  
**С.И. Гришин**, д.ф.-м.н. **Б.Ч. Дюбуа**, д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **Ю.А. Кондрашенков**,  
к.т.н. **А.С. Котов**, к.т.н. **Е.А. Котюргин**, к.т.н. **П.В. Куприянов**,  
к.т.н. **В.В. Лисс**, д.т.н. **М.И. Лопин**, **В.М. Малыщик**, **В.А. Мальцев**,  
к.т.н. **П.М. Мелешкевич**, д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**,  
**Е.Н. Покровский**, к.т.н. **А.В. Потапов**, к.т.н. **С.Е. Рожков**,  
д.т.н. **К.Г. Симонов**, **В.П. Стебунов** (*ответственный секретарь*),  
к.т.н. **А.М. Темнов**, д.т.н. **Н.Д. Урсуляк**,  
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО НПП «Исток-Система»),  
**О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»),  
к.т.н. **А.Г. Михальченко** (МУП «ДПРН Фрязино»),  
д.ф.-м.н. **А.И. Панас** (ИРЭ РАН),  
к.т.н. **В.В. Абрамов** (ФГУП СКБ ИРЭ РАН),  
**А.А. Туркевич** (ФГУП «НПП «Циклон-Тест»)

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук)

---

© Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Исток», 2009 г.

## ПАМЯТИ СЕРГЕЯ ИВАНОВИЧА РЕБРОВА

9 февраля 2009 г. исполнилось 80 лет со дня рождения известного специалиста и ученого в области вакуумной и твердотельной электроники сверхвысоких частот Сергея Ивановича Реброва. Этот выпуск посвящается его памяти.

После окончания в 1952 году Московского энергетического института Сергей Иванович Ребров пришел в НПП «Исток», где проработал 55 лет, из которых 26 лет был его генеральным директором и почти 20 лет – генеральным конструктором.

В течение многих лет Сергей Иванович являлся главным конструктором разработок специальных электронных приборов и устройств к важнейшим радиолокационным системам, в том числе для всемирно известных комплексов ПВО С-300П и С-300В. Под его руководством и при непосредственном участии разработаны основные принципы системы обеспечения производственной надежности и качества продукции с использованием операционного контроля унифицированных технологических процессов в СВЧ-приборостроении. Он является родоначальником комплексированных устройств – нового класса радиоэлектронных изделий, оптимально сочетающих требования радиотехники с возможностями электроники. Впервые в нашей стране под его руководством осуществлена программируемая цифровая обработка радиосигнала в бортовых радиолокационных системах на основе отечественных быстродействующих процессоров и проведено картографирование земной поверхности с использованием антенны с синтезированной апертурой в реальном масштабе времени. Сформулированные им принципы системотехнического решения сложных радиоэлектронных комплексов нашли полное подтверждение в процессе полигонных испытаний и использованы при построении СВЧ-части новейших видов радиоэлектронной аппаратуры.

С. И. Ребров являлся одним из организаторов Постановления Правительства Российской Федерации «О государственном оборонном заказе на 2002 год» от 21 февраля 2002 г. по техническому перевооружению и реконструкции ФГУП «НПП «Исток» для обеспечения современными монолитными СВЧ-микросхемами приоритетных радиоэлектронных систем, комплексов вооружения и военной техники.

С. И. Ребров – автор двух монографий, около ста научных трудов и двадцати пяти изобретений. Он – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации. За свой существенный вклад в развитие отечественной СВЧ-электроники он был удостоен звания Героя Социалистического Труда, являлся лауреатом Ленинской и Государственной премий, кавалером трех орденов Ленина, ордена Октябрьской Революции и ряда других правительственных наград.

В выпуске приводятся: интервью, которое дал Сергей Иванович в канун своего 70-летия, ряд фотографий, на которых представлены моменты из его жизни, некоторые его статьи, посвященные различным вопросам в области развития СВЧ-электроники, а также воспоминания коллег, которые работали вместе с ним.

Редакция благодарна всем авторам воспоминаний за активное участие в подготовке этого выпуска журнала.



**СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ РЕБРОВ**

**(1929 – 2007 гг.)**

---

## СОДЕРЖАНИЕ

---

Выпуск 1(500)

2009

---

*Балыко А.К.* – Интервью с Сергеем Ивановичем Ребровым ..... 6

### Научно-технические статьи С. И. Реброва

*Ребров С.И.* – Электронная СВЧ-техника ..... 31

*Ребров С.И.* – Военная СВЧ-электроника в России ..... 71

*Ребров С.И.* – Состояние крупносерийных промышленных и критических технологий  
электронной промышленности и ближайшие перспективы ..... 77

*Ребров С.И.* – Приоритетные направления развития электронной СВЧ-техники ..... 83

### Воспоминания о С. И. Реброве

*Пролейко В.М.* – Лидер отечественной СВЧ-электроники ..... 92

*Федосов Е.А.* – Из воспоминаний..... 94

*Шокин А.А.* – Отрывок из книги «Министр невероятной промышленности СССР» ..... 96

*Дюбуа Б.Ч.* – Высокий уровень технологии – основа надежности электронных при-  
боров ..... 98

*Перегонов С.А.* – Государственный человек ..... 100

*Обрезан О.И.* – О закономерностях и случайностях ..... 103

*Воскобойник М.Ф.* – Памяти С. И. Реброва ..... 106

*Киселев А.Б.* – Генеральный конструктор ..... 107

*Погорелова Э.В.* – С. И. Ребров – председатель диссертационного совета ..... 109

*Черненко Е.И.* – Фрязинский Зубр ..... 111

*Попов Р.М.* – Грани таланта ..... 115

---

# ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

## SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Radioelectronic Industry Department

Published by Federal State Unitary Enterprise “RPC “Istok”

The Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation (MINPROMTORG)

### C O N T E N T S

---

---

Issue 1(500)

2009

Founded in 1950

---

---

*Balyko A.K.* – Interview with Sergey Ivanovich Rebrov ..... 6

#### **S.I. Rebrov’s scientific – technical articles**

*Rebrov S.I.* – Electronic microwave engineering ..... 31

*Rebrov S.I.* – Military microwave electronics in Russia ..... 71

*Rebrov S.I.* – The state of large-scale industrial and critical technologies of electronic industry  
and the nearest future prospects ..... 77

*Rebrov S.I.* – Priority trends of development of electronic microwave engineering ..... 83

#### **Reminiscences of Sergey Ivanovich Rebrov**

*Proleyko V.M.* – The leader of native microwave electronics ..... 92

*Fedosov E.A.* – From reminiscences ..... 94

*Shokin A.A.* – An abstract from the book “Minister of incredible industry USSR” ..... 96

*Dyubua B.Ch.* – High technology level is the basis of reliability of electronic devices ..... 98

---

**C O N T E N T S**  
**(continued)**

---

<i>Peregonov S.A.</i> – A State man .....	100
<i>Obrezan O.I.</i> – About regularities and chances .....	103
<i>Voskoboynik M.F.</i> – In memory of S.I. Rebrov .....	106
<i>Kiselev A.B.</i> – General designer .....	107
<i>Pogorelova E.V.</i> – S.I. Rebrov – the chairman of the thesis council .....	109
<i>Chernenko E.I.</i> – Fryazino Bison .....	111
<i>Popov P.M.</i> – The talent diversity .....	115

УДК 621.385.6(09)

А. К. Балько

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

## ИНТЕРВЬЮ С СЕРГЕЕМ ИВАНОВИЧЕМ РЕБРОВЫМ

В канун своего 70-летнего юбилея Сергей Иванович любезно согласился поделиться своими воспоминаниями о прошедших годах, рассказать о ключевых поворотных событиях в жизни предприятия, о выдающихся руководителях, разработчиках и ученых.

– **Глубокоуважаемый Сергей Иванович! Расскажите, пожалуйста, о своих родителях.**

– Начну с отца, поскольку он, безусловно, был «стержнем» семьи и многое я заимствовал у него.

Детство отца прошло в Тверской губернии, в селе Линея. Он закончил 2 класса сельской школы, работал подпаском. Затем, где-то в году 1910-м, переехал в Питер, служил матросом и шкипером на барже, перевозившей уголь из Кронштадта в Санкт-Петербург. Об этом периоде жизни отец всегда вспоминал с особой теплотой, а простое блюдо матросов – гречневая каша с топленым маслом за 5 копеек – так и осталось для него любимым на всю жизнь. В первую мировую войну отец служил на Балтийском флоте.

В октябре 1917 года, будучи в охране арсенала в Кронштадте, он открывал двери восставшим рабочим. Так что революцию встретил политически грамотным и в 1918 году вступил в партию большевиков.

После окончания гражданской войны отец служил в угрозыске в городах средней полосы России. В Верхнем Волочке встретился с моей матерью. Период жизни родителей до середины 30-х годов в основном был связан с рождением и уходом за двумя сыновьями. У меня ведь был старший брат, но в 10-летнем возрасте он заболел воспалением легких и умер. Я родился в городе Калинин в 1929 году. В 1935-м году семья переехала в г. Щекино Тульской области: отца, к тому времени уже образованного и перспективного руководителя, назначили председателем райисполкома. Мать много лет проработала бухгалтером, но затем перенесла почечную инфекцию и так до конца жизни уже и не возвращалась на службу.

В 1938 году отца вызвали в Москву и предложили на выбор две должности: начальника сахарных трестов России – в г. Москве или заместителя Председателя Совета Министров – в Киргизии. Не знаю, какое было внутреннее побуждение отца, но он выбрал последнюю должность, за что, к слову сказать, мать частенько его «пилила».

– **Трудно, наверное, было привыкать к совершенно новым условиям жизни?**

– Во Фрунзе, как и во многих других национальных республиках, ситуация в те годы была сложной. Большинство прежних руководителей оказались за решеткой, и практически на всех высших должностях были новые люди. Первым секретарем ЦК Компартии Киргизии был с 1937 года А. В. Вагов – донбасский шахтер, член партии с 1917 года. Он-то с моим отцом фактически и начали поднимать запущенное хозяйство республики. К этому времени отец был уже грамотным экономистом. По сложившемуся тогда положению должность Председателя Совмина республики занимал национальный кадр – на этот высший пост был назначен первый шахтер-стахановец Киргизии Кулатов, не умевший ни читать, ни писать. Но человек он

был чрезвычайно талантливый и быстро освоил и грамоту, и методы управления республикой, закончил Высшую партшколу. В конце концов Кулатов стал великолепным работником и возглавлял правительство Киргизии более 20 лет. К отцу он всегда относился очень уважительно, и дружеские отношения между ними сохранились и в дальнейшем, когда отец переехал жить во Фрязино. Каждый раз, бывая в столице, Кулатов обязательно посещал наш город и всегда был у нас желанным гостем.

Я же, мальчишка, переезд во Фрунзе перенес совершенно нормально. Учился в средней школе, принимал участие в различных школьных мероприятиях, преимущественно спортивных.

– **Вас, оставшегося единственным сыном, родители, наверное, баловали?**

– Чтобы ответить на этот вопрос, надо отвлечься от общей канвы рассказа. Дело в том, что у моей матери была родная сестра, которая вышла замуж за латыша. Муж очень быстро продвигался по службе и в какой-то момент стал председателем Калининского облисполкома. Но в 1938 году в семью нагрянула беда: мужа расстреляли, а мамину сестру отправили в лагерь для политзаключенных. Двух их детей отправили в детдом. Мои родители долго пытались забрать детей из детдома, но это им удалось сделать лишь в 1942 году. Двоюродные брат и сестра стали жить у нас и фактически сделались родными. У брата Юры к тому времени подошел призывной возраст, и его забрали в армию. Великую Отечественную войну он закончил в звании майора. Сейчас живет в Подольске. Сестра после войны вышла замуж за друга Юры, тоже военного, и всю жизнь моталась с ним по стране.

Грустно говорить, но так получилось, что двоюродные брат и сестра остались единственными моими родственниками – больше в нашем роду не осталось никого.

– **Сергей Иванович, судя по вашей целеустремленности, вы, наверное, очень хорошо учились в школе?**

– Бывало всякое. Помню, например, что сочинения я писал неплохо, но почерк у меня был отвратительный. Так что в 9-м классе по бескомпромиссному требованию учителя литературы (кстати, кандидата наук) вынужден был фактически заново учиться писать – под линейку. И выправил почерк. Кроме литературоведа очень сильными были учителя по немецкому языку и, особенно, математике. Склонность к математике осталась у меня на всю жизнь. Красота математики сродни искусству.

Кстати, и рисовал я неплохо.

Школы в то время были разделены на мужские и женские. У мальчиков любимым предметом, особенно в старших классах, было военное дело. Увлекались им страшно. Пулемет «Максим» я мог собрать и разобрать за считанные минуты. Так вот, изучая «Максим», я обратил внимание на то, что патрон в ствол пулемета устанавливается за два прохода замка. Сразу же стал думать, как сделать это за один проход замка. И нашел решение! Мысленно представил себе новый замок и зарисовал его в своем альбоме для рисования. Это было мое первое изобретение. Позднее, на военной практике в институте, в крупнокалиберном пулемете Березина я увидел точно такой же замок, принцип перезарядки патрона из ленты.

Школу я закончил с золотой медалью. В то время с таким аттестатом можно было поступать в любой вуз без экзаменов.

– **И вы выбрали Московский энергетический институт?**

– Получилось это так. Во Фрунзе приехал студент МЭИ и рассказал нам много интересно, особенно расхваливал он электрофизический факультет. И я заразился желанием учиться в этом вузе.



Отец как-то был в Москве и заехал к ректору МЭИ Голубцовой, жене Маленкова, с моим заявлением. Та стала отговаривать отца, предлагая более простые, чем электрофизический, факультеты, мотивируя это тем, что в национальных республиках школьники слабее подготовлены, чем в столице. Но отец уговорил ее, и меня приняли на лучший в то время и наиболее трудный факультет МЭИ.

Учеба шла неплохо. Единственное, с чем я столкнулся в начале, — это резкая смена быта и плохое питание. Во Фрунзе мы были достаточно обеспечены, поэтому к новым условиям пришлось привыкать. Да и поступал я в 1946 году, пожалуй, самом трудном, послевоенном. Дело в том, что до 1946 года студенты получали «водочные» талоны; на два таких талона на рынке можно было выменять 2–3 мешка картошки. В 1946 году талоны ликвидировали.

Студенту полагалось 550 г черного хлеба и полный день питания в столовой. А что это было за питание, мои сверстники помнят: щи без малейшего пятнышка масла, скромные котлетки. Я же был тогда уже довольно высокого роста — 1 м 85 см, и организму требовалось пополнять ресурсы более существенными продуктами. В то время я весил 62 кг и был немного похож на скелет.

Хорошо помню ребят с нашего курса, больше половины из них — это офицеры, вернувшиеся с войны. Но что интересно, о войне они практически не говорили, а если и вспоминали после рюмки-другой, то только хорошее, с юмором, по-мужски. А ведь им было несравненно более тяжело, чем нам. У каждого была семья, дети. Но я никогда не слышал, чтобы они на что-то жаловались, скулили. Откуда было такое поразительное самосознание, не знаю. К учебе они относились очень серьезно, хотя она и давалась им с превеликим трудом: многое забылось за военные годы. Я как-то сдавал экзамен, и рядом со мной сел капитан, так от волнения он так трясся, что парта ходила ходуном. А ведь эти люди прошли войну, и бесстрашия в лихие дни им было не занимать. Надо отдать должное фронтовикам и в том, что они воспитывали нас, молодых, заражая духом патриотизма.

И в дальнейшем они принесли большую пользу, став очень хорошими и надежными руководителями среднего звена на предприятиях и заводах страны. Мне кажется, что роль молодых офицеров — выпускников вузов в становлении хозяйства недостаточно полно показана в истории нашей страны.

— **А любимые предметы у вас были?**

— На первых курсах с огромным интересом я занимался математикой и спортом. Получилось так, что после первого курса из 250 студентов должно было остаться 120...130 человек, причем сверху пришла команда — офицеров не трогать. Мы на лекции ходили очень приблизительно, тем более, что на экзаменах предмет разрешали сдавать хоть четыре раза. Писали шпаргалки, но они редко использовались впрямую, основная их польза состояла в том, что при написании шпаргалки предмет вольно или невольно, но систематизировался и откладывался в памяти.

К спорту у меня всегда отношение было очень хорошее. В Киргизии, школьником, я установил рекорд республики по прыжкам в высоту среди юношей, который, правда, продержался недолго. Там же играл в баскетбол за юношескую команду «Динамо». Наверное, об этом узнали и в МЭИ, потому что в первый же месяц моего пребывания в институте меня неожиданно вызвали в команду МЭИ из совхоза, где мы на поле проходили традиционный обряд «посвящения в студенты». Так до конца учебы я играл во второй из трех баскетбольных команд МЭИ, в течение двух лет возглавлял ее капитаном. Позднее я увлекся еще и волейболом

и много времени проводил на спортивных площадках. Что касается математики, то, несмотря на то, что я ее знал хорошо, на экзаменах бывали конфузы. Практические занятия по математике вела Е. Б. Кацельсон. Однажды я решил задачу матанализа нетрадиционным методом, и она долго перепроверяла решение, настолько оно ее потрясло. Лекции нам читал профессор Очан. На коллоквиуме он подсел ко мне за парту и начал со мной беседовать в свободном стиле. Я смутился такой необычной формой собеседования и из-за растерянности получил двойку. Кацельсон, узнав об этом, была очень расстроена, она меня уважала после случая с решением задачи. На экзаменах первой сессии главный отсеб студентов был на математике. Из 5-6 студентов сдавал один. Особенно все боялись идти к неизвестному «мужичку», а я пошел и сдал. Позднее узнал, что в этот день он поставил двадцать двоек, одну тройку и только мне – пятерку. Последний экзамен по математике уже на 2-м курсе я сдавал в третий раз Очану. Он внимательно рассмотрел мою зачетку, где по математике были одни пятерки и сказал: «А я вам поставлю 4, учитывая, что в аттестат пойдет 5». «За что?» – спросил я. «За развязность в определениях», – ответил профессор, чем спустил меня на грешную землю.

– **А как вы оказались во Фрязино?**

– С третьего курса я устроился на работу, на кафедру к доценту И. В. Лебедеву. Думаю, что лучшего преподавателя технического вуза просто нельзя найти. Те, кто хоть раз встречался с Игорем Всеволодовичем, согласятся со мной. Каждое его объяснение было предельно понятно даже самому нерадивому студенту. С другой стороны, он постоянно генерировал новые идеи, ставил перед студентами задачи одна интересней другой. У И. В. Лебедева я писал и дипломную работу. Он в то время работал над проблемами резонансных разрядников для антенных переключателей радиолокационных станций по договорам с НИИ-160 для лаборатории Д. Я. Ашкенази. После окончания с красным дипломом МЭИ меня распределили в Министерство вооружения, которое возглавлял Д. Ф. Устинов, и направили в Красногорск, в КБ оптического завода. Я приехал, зарегистрировался и укатил в отпуск, а когда вернулся, то узнал, что меня перевели в другое министерство – МПСС и направили в НИИ-160, г. Фрязино. Оказывается, И. В. Лебедев, который хотел оставить меня при аспирантуре в МЭИ, когда ему это не удалось, связался с Ашкенази и попросил его помочь перевести меня в НИИ-160. Директором института был тогда А. А. Захаров, который одновременно исполнял еще должности зам. министра и начальника главка. Основную же нагрузку по руководству НИИ-160 нес главный инженер В. А. Гольцов. Они написали письмо в Минвооружение о моем переводе. Так я оказался в НИИ-160 и начал свою трудовую деятельность в лаборатории Ашкенази. Из нашего же потока на это предприятие были распределены В. Эфрос, О. Любич и И. Игумнов, участник отечественной войны, чуть раньше – Я. Старец, Ю. Вецгайлис и В. Кармазин, а чуть позже – В. Беляев, которых я знал по МЭИ.

– **Как начиналась ваша трудовая деятельность во Фрязино?**

– Как иногороднего молодого специалиста поселили меня в общежитии на ул. Московской. В двухкомнатной квартире проживало 6 человек. Я, правда, практически дома не бывал, приходил только спать. Все время проводил на работе, которой был страшно увлечен. Занимался разработкой разрядников для антенных переключателей РЛС, продолжая работы, начатые на кафедре МЭИ. Думаю, что был неплохим специалистом отдела 220. Уже через год работы я был назначен главным конструктором темы «Диана». Многим может показаться невероятным такой рост. Уверен, что во многом этому способствовала прекрасная подготовка, которую я получил на кафедре профессора И. В. Лебедева.

А еще через год произошел печально-знаменитый «разгром вакуумщиков под Москвой». Многих известных специалистов и, в частности, из отдела 220 тогда отправили в Саратов и Рязань.

Через два года меня назначили начальником лаборатории резонансных разрядников, фактически головной по этому направлению в стране. Надо сказать, что в то время лаборатория представляла собой подразделение с 80-ю сотрудниками, несколькими испытательными участками и т.п.

А еще через четыре года был назначен начальником отдела 220 вместо Кашникова, переведенного главным инженером в Рязань во вновь открывшийся НИИ газоразрядных приборов. В лучшие свои годы отдел насчитывал до 300 человек. Кстати, наш отдел по приказу директора Федорова первым переехал в только что отстроенный главный корпус. Расположились мы на первом этаже, было холодно, так что зиму проработали в шубах. Это потом уже все наладилось...

**– А как развивалась ваша научная деятельность?**

– Кандидатскую диссертацию я защитил через 6 лет после начала работы на предприятии. Я несколько раз бывал на заседаниях ученого совета и присутствовал на защитах диссертаций. Понял, что у меня есть достаточный материал для защиты. Закончились четыре темы, где я был главным конструктором, в том числе одна очень серьезная НИР для радиосистем оборонной промышленности. В этих системах использовался первый мощный магнетрон Федосеева «Альбатрос» с очень высокими, почти предельными параметрами. Для защиты приемников РЛС от возможного попадания сигнала передатчика и коммутации мощных трактов в наших работах были созданы надежные сверхмощные по тому времени разрядники защиты приемника и блокировки передатчика в составе антенного переключателя на 10 МВт импульсной мощности. Подобных работ по сверхмощным коммутаторам до нас никто не делал. Помимо практической ценности, в моей работе было много новых идей: к тому времени я имел 10 изобретений преимущественно без соавторов. Так что объективно моя диссертационная работа была на приличном научном уровне. Я поступил в нашу аспирантуру соискателем. Посещал в рабочее время только занятия по философии, остальные предметы из кандидатского минимума подготовил и сдал экстерном. Диссертацию написал на работе, выкраивая для этого в основном вечерние часы.

О самоотверженной работе сотрудников в то время можно было бы рассказывать долго. Поэтому случались трагикомические ситуации. Помню, как перед самой сдачей темы «Диана» государственной комиссии оказалось, что в разрядник блокировки передатчика не внесли положенную дозу радиоактивного кобальта. Времени на изготовление новой партии не было. Я закрылся в первом отделе, достал свинцовый контейнер с кобальтом, набирал его в длинную стеклянную трубку и закапывал в каждый прибор. Комиссия отработала успешно.

Другая характерная черта инженеров тех лет – все делать своими руками. Когда мне потребовался широкополосный коаксиально-волноводный переход с повышенной устойчивостью к пробоям, то основной согласующий элемент сложной конфигурации точил на станке сам, подбирая размеры для получения нужной полосы частот. Никто не разделял – моя или твоя работа, каждый делал, что было надо и что было в силах сделать. Думаю, что этот всеобщий порыв в послевоенное время к новому, неизведанному можно назвать трудовым подвигом народа и его инженерной интеллигенции.

Сама защита диссертации на ученом совете проходила спокойно. Я получил хорошие отзы-

вы Лебедева и Федосеева. Последний очень интересовался моими работами. Он делал магнетрон мощностью 20 МВт для первой отечественной системы ПРО, а моя группа – защитные устройства к нему. Кстати, за эти разработки мы тогда получили хорошие денежные премии, мне ее хватило для оплаты половины стоимости моей первой «Волги», очередь на которую уступил мне один сотрудник в счёт моей очереди на «Москвич».

Чтобы завершить тему о своей научной работе, отмечу, что через четыре года за существенный вклад в разработку и создание антенных переключателей для РЛС нашему коллективу с участием сотрудников «Светланы» была присуждена Государственная премия СССР. В составе творческого коллектива были такие высококлассные специалисты нашего отдела, как Ашке-нази, Беляев, Бакакина и другие – всего 12 человек.

– **А как складывалась ваша личная жизнь?**

– Еще в МЭИ на одном из вечеров я обратил внимание на двух сестер-близнецов, которые были очень похожи друг на друга. Они даже использовали это свойство для сдачи одного из вступительных экзаменов. С одной из них – Татьяной Линевиц – я вскоре познакомился и мы стали довольно часто встречаться. Линевицы по происхождению – из белорусских дворян. Двоюродный дед Татьяны в японскую войну принял командование русской армией от генерала Куропаткина. Солдаты уважительно называли его «дедушка Линевиц». И когда в 1905 году на кораблях произошел бунт и генералу доложили об этом, он не поверил и сказал: «Русские матросики бунтовать не могут», – чем приостановил арест. Родной дед Т. Линевиц также служил в русской армии генерал-майором. Я помню, как листал семейный альбом Линевиц: какие там были благородные лица! Отец Татьяны также был дворянином, получил высшее медицинское образование. Уже в советское время женился на медсестре и тем самым «испортил голубую кровь рода». Семья Линевиц пережила немецкую оккупацию в Харькове, где от голода погибла ее мать, а отец был на фронте врачом. Мы с Татьяной Борисовной ровесники, но в институт она поступила на два года позже и училась в МЭИ на радиофакультете. Во Фрязино я приехал в 1952 году, а она – в 1954 году. Мы оба жили в общежитиях, в которых я провел более 8 лет жизни, но в 1955 году нам выделили комнату (14 кв. м) в доме на ул. Ленина. Вскоре у нас родилась дочь, которую, правда, мы «подбросили» моим родителям во Фрунзе.

Вскоре мои родители переехали во Фрязино. Отец вышел на пенсию и был в тяжелом состоянии: здоровье не позволяло больше находиться в жарких климатических условиях г. Фрунзе. По ходатайству Президиума Верховного Совета Киргизии директор предприятия Федоров выделил нам на 5 человек двухкомнатную квартиру в доме на улице Ленина и Институтской. Так что банкет по случаю защиты кандидатской диссертации я устраивал в новой квартире. Мы всецело были заняты работой. Татьяна Борисовна последний период работы много времени уделяла медицинской тематике, имеет большое число публикаций по использованию КВЧ-терапии для лечения различных болезней. И хотя диссертаций она не защищала, уровень ее исследований очень высокий как в научном, так и в практическом отношении. Сестра же ее стала доктором медицинских наук.

– **В 1962 году вас назначили директором предприятия. Расскажите о своих предшественниках.**

– Расскажу о тех, кого я застал, начав работать на предприятии в 1952 году. Об А. А. Захарове я уже упоминал раньше. Андрей Андреевич здравствует и поныне. В канун Нового года мы с ним обменялись поздравлениями по телефону. Он, конечно, был незаурядным руководите-

лем, работая на посту замминистра МПСС в чрезвычайно сложный период. Электронику курировал сам Л. П. Берия. Нашему институту в начале 50-х годов был передан важнейший госзаказ на пальчиковые лампы серии «Анод». Перед этим ту же задачу пытался решить МЭЛЗ, но работа провалилась. Да и у нас поначалу воспроизводимость лампы была никудышной, а они требовались для системы управления первой советской «летающей крепости». Захаров и Гольцов создали в институте 200 отдел по ПУЛам и назначили начальником Н. В. Черепнина. Этот отдел численностью в 900 человек был создан за одни сутки. Так исполнялись в то время распоряжения руководства НИИ. Из нашего 220 отдела в 200 отдел перевели 15 инженеров, то же самое было проделано с другими отделами. Работа пошла, но не так успешно, как хотелось бы. Берия вновь вызывал Захарова и требовал предложений по форсированию работы. Был случай, когда расстроенный Захаров вышел в комнату референта, взял чистый лист бумаги и начал думать, что попросить. Написал три пункта:

1. Повысить категоричность института.

2. Ввести дополнительный отпуск для сотрудников с ученой степенью по аналогии с Академией наук.

3. Провести во Фрязино электричку.

Особенно показательно было исполнение указаний властных структур на примере электрички: через 2 месяца к нашему городу уже подводили пути.

Серия «Анод» прошла удачно. Н. В. Черепнину удалось получить необходимую надежность и долговечность первых отечественных пальчиковых ПУЛ и начать их производство в требуемых количествах. В какой-то момент производство этих ламп было основным для нашего института. Но примерно с середины 50-х годов в стране стали разрабатываться новые радиолокационные системы и для них требовалась широкая номенклатура СВЧ-приборов.

Существенный вклад в развитие института внес директор М. М. Федоров. Он был по званию строитель, хорошо понимал, что нужны новые производственные площади для института. Именно он сумел «пробить» и построить наш великолепный главный корпус, один из последних на металлическом каркасе. Не очень «влезал» в тематику, по существу, передавая эти функции главному инженеру Акулину, а затем И. И. Девяткину (тоже выпускнику МЭИ). Новые задачи требовали перестройки института. Стали возникать новые направления в тематике, во главе которых вставали талантливые люди. Можно было бы назвать почти сотню имен ученых, положивших начало отечественной СВЧ-электронике. Это выходит за рамки данного интервью, но большинство из них можно найти в «биографии» нашего НИИ, посвященной 50-летию его образования.

Отличительной чертой нашего предприятия, проявившейся в это время, явилось гармоничное развитие науки и опытного завода НИИ. Как правило, объем продукции завода превышал общий объем работ научной части, что создавало финансовую устойчивость предприятия и служило конечным критерием правильности выбираемых научной частью направлений, количественной оценкой эффективности её работ.

Среди лучших цехов завода был цех 44, которым руководил выпускник МЭИ В. Г. Кармазин. Он первым начал производство магнетронных генераторов, и перед ним в то время стояла проблема «Бисера». Эти приборы, разработанные В. Некрасовым, имели в своей основе высокую по тому времени техническую новизну, реализация которой в производстве не была подкреплена технологическим оснащением. Требовалось совместить два, казалось бы, взаимоисключающих параметра: быструю перестройку в широком диапазоне и высокую стабильность частоты

от импульса к импульсу. Позже В. Некрасов с участием Э. Гельвича доработал свои идеи, создав один из лучших отечественных быстроперестраиваемых магнетронов со «связками». Но проблема производства «вселитерного Бисера» была успешно решена Д. Самсоновым с использованием разнорезонаторной конструкции прибора. Время здесь решало всё, так как этот магнетрон использовался в качестве СВЧ-передатчика в первой отечественной системе С-75 с селекцией воздушных целей. Именно этот магнетрон освещал самолёт Пауэрса под Уралом, наводя на него ракету. Эти системы не позволили американцам хозяйничать в воздушном пространстве Вьетнама, сохраняя их села и города.

Нельзя не вспомнить моего непосредственного предшественника Овчинникова. Человек он был очень талантливый и многогранный. В хрущевские времена партия направляла его поднимать Фряновский совхоз. В период «кукурузного» бума он сделал хитрость: вдоль дороги посадил кукурузу, а дальше – картофель. Кукуруза тогда в первый раз не уродилась по всей области, а совхоз выжил за счет картошки, хотя это стоило Овчинникову выговора. В конце 50-х годов он вернулся на предприятие начальником ОТК и почти тут же был назначен директором завода. Коллектив завода очень уважал Овчинникова, и он платил ему тем же.

В 1960 году с введением совнархозов вместо оборонных министерств были созданы государственные комитеты по направлениям оборонной техники, и впервые электронная промышленность получила автономию в лице Государственного комитета по электронной технике во главе с А. И. Шокиным. По всему было видно, что назревают перемены. М. М. Федоров был вскоре назначен заместителем председателя этого комитета, а Овчинников стал исполняющим обязанности директора института. Утверждение его директором затягивалось более чем на полгода, чему мешала его недостаточная техническая эрудиция.

Я в тот период возглавлял отдел 220, причем наш отдел газоразрядных приборов для радиолокации был головным в стране. А поскольку антенные переключатели и мощные импульсные тиратроны использовались практически во всех системах радиоэлектронного вооружения, то мне приходилось часто бывать в ВПК СМ СССР, участвовать там в совещаниях по согласованию план-графиков разработки систем. На одном из них – по противоракетной обороне – я впервые встретился с министром радиопромышленности В. Д. Калмыковым. Он произвел на меня чрезвычайно сильное впечатление. По своим качествам руководителя, глубине и широте понимания проблем, организаторским способностям он мог бы вполне руководить ВПК в целом. По 2–3 года он сидел на полигонах, знал все до мельчайших подробностей. Умер В. Д. Калмыков в возрасте 60 лет, имея семь орденов Ленина и, как показало вскрытие, семь инфарктов. Буквально за три месяца до смерти он приехал к нам на предприятие и несколько часов провел в техническом кабинете, рассматривая со всех сторон каждое наше новое изделие и любуясь ими. О нем я еще буду рассказывать дальше.

Хорошие отношения у меня складывались с И. Т. Якименко, генерал-майором, начальником 1-го Главного управления Министерства электронной промышленности. Он был высокого мнения о моей работе в отделе 220. В 1960 году по постановлению СМ СССР на юго-западе Москвы начал создаваться НИИ «Титан» – институт мощных СВЧ-приборов для ПРО, куда из НИИ-160 была переведена большая группа (более 100 человек) высококлассных специалистов во главе с Федосеевым с предоставлением в столице жилья. Директор НИИ «Титан» Иванов, будучи в основном хозяйственным руководителем, не устраивал руководство министерства, и в конце 1961 года ко мне приехал Якименко и стал предлагать мне должность директора. Я, конечно, начал говорить, что не справлюсь, ведь опыт у меня ограничивался руководством

отдела численностью 300 человек. Якименко же убеждал, что в НИИ на юго-западе только 500 человек, а пока численность возрастет до 5000, я наберусь опыта в процессе окончания строительства. Я колебался, колебался и... дал согласие. И вдруг звонок из Щелковского горкома партии. Сначала второй секретарь горкома, а затем и первый выразили удивление, почему меня переводят в Москву, тогда как директор НИИ-160 не назначен. Это вызвало у меня категорическое возражение. Я убеждал, что нельзя сравнивать проблемы руководства строящимся предприятием численностью 500 человек с проблемами руководства головным институтом страны, насчитывающим более 14 тыс. человек, ведущим важнейшие государственные задания и ответственным за развитие города Фрязино.

Но далее все шло по обычной схеме. Меня вызвали в МК КПСС. Первый секретарь обкома Абрамов, очень интеллигентный человек, мягко, но настойчиво стал убеждать меня в неправоте. Он привел пример: «Вот мы, – говорил он, – назначили директором института в Калининграде ученого, доктора наук С. П. Королева, и, смотрите, как справляется». В конечном счете после разных разговоров в управлении кадров госкомитета меня вызвали в ЦК к заведующему оборонным отделом И. Д. Сербину. Разговор с ним был очень жестким и коротким. Сербин просто не стал слушать возражений. «Назначают – скажи спасибо», – и добавил кое-что на популярном русском языке.

Так закончилась история моего назначения директором крупнейшего предприятия электронной промышленности, создавшего себе известный авторитет уже за полтора десятилетия своего существования. Как это не странно, с И. Д. Сербиным мне пришлось встретиться по этому же вопросу еще раз в конце 70-х годов. В это время скоростно скончался Малинин, генеральный директор Научного центра г. Зеленограда. Министр А. И. Шокин планировал назначить туда Э. Иванова, возглавляющего один из институтов Центра. Сербин не принял этого предложения и вызвал меня к себе, предложив возглавить Научный центр микроэлектроники СССР. Но времена изменились. Я был уже не мальчик в вопросах руководства, да и жесткость кадровых действий ЦК КПСС была уже не та. После получасового разговора мне удалось убедить Сербина оставить меня во Фрязино.

**– И вот вы во главе крупнейшего в стране предприятия электроники. Какие первые проблемы возникли перед молодым руководителем?**

– Жизнь руководителя в советское время была не так безоблачна, как кажется сейчас. Нагрузка руководителей обязанностями и работой была велика, требовали отдачи со всех сторон: и по административной линии, и по партийной. Конечно, положение с финансовым обеспечением было совсем другим, подавляющее большинство предприятий имело достаточные оборотные средства, без которых устойчивая деятельность предприятия невозможна. Но действовали строгая плановая система, особенно в части госзаказов, и финансовая дисциплина, обеспечиваемая ежегодными ревизиями и последующими балансовыми комиссиями руководства Главка. Срывы жестких сроков выполнения важнейших систем немедленно разбирались ВПК СМ СССР и часто оборонным отделом ЦК КПСС. После этих разборок нередко у директоров нарушалась сердечная деятельность.

Практически сразу после моего назначения прошла очень тяжелая для меня партийная конференция предприятия. Ряд крупных ученых и руководителей подразделений не согласился с решением вышестоящих организаций по моей кандидатуре; по их мнению, директором предприятия мог быть Кармазин – авторитетная и очень сильная на предприятии фигура. Возникла определенная оппозиция, которая не восприняла меня как директора, способного решать слож-

нейшие научные и технические проблемы. Честно говоря, я и сам сомневался в своих возможностях, ведь мне было тогда 33 года. Но меня как-то сразу хорошо приняли хозяйственники. Нормальные отношения сложились с директором завода А. А. Маклаковым. Главный инженер И. И. Девяткин, хотя и занимал нейтральную позицию по отношению ко мне, но в силу своих прекрасных качеств руководителя уверенно вёл свой участок работы. И наконец, что немало важно, у меня сразу сложились правильные отношения с парткомом предприятия, членом которого меня неизменно избирали во все годы моего директорства. Наш партком все годы совместной работы очень четко строил ее, не увлекаясь научными проблемами, но контролируя ритм жизни коллектива и, главное, брал на себя организацию всей низовой массовой работы. Большую поддержку я получил в первые годы работы от лучшего, по моей оценке, секретаря парткома Л. Лаврененко. Это был очень сильный партийный руководитель, уважаемый в коллективе. В свое время я очень жалел, что он не пошел дальше по партийной линии, такие кадры нам были очень нужны там, наверху.

**– Но все это в большей степени касается политической обстановки на предприятии. А как обстояли дела в институте?**

– К началу 60-х годов на предприятии сложилась сложная ситуация. На заводе в основном выпускались СВЧ-приборы металлостеклянных конструкций. Результаты долговременных испытаний их были удручающими: из двух партий изделий военная приемка браковала каждую вторую по результатам периодических испытаний и срока службы. Так что 50 % номенклатуры «зависало» по результатам квартальных испытаний. К тому времени в лабораториях НИИ были закончены разработки нового поколения СВЧ-приборов металлокерамической конструкции, требования по параметрам которых были значительно повышены. Освоение их в производстве при столь низкой производственной надежности вызвало бы полную остановку завода со всеми последствиями. Требовалась техническая революция производства.

Научная часть находилась в лучшем положении, благодаря кадровому составу, сочетанию молодых и опытных ученых и инженерно-технического персонала с высоким трудовым энтузиазмом. Тормозом дальнейшего развития предприятия в то время был завод. И пять последующих лет я вплотную занимался проблемами завода. Вскоре понял, что интуиция меня не обманула и выбранный путь оказался правильным. Прежде всего, встала проблема с состоянием рабочих площадей завода, которые не соответствовали никаким мало-мальски приемлемым требованиям. Нужно было уходить от маленьких «каморок», которые создавали технологи, пытаясь в ограниченном пространстве получить необходимую для вакуумной гигиены чистоту. Они в то время не осознавали, что решение лежит в больших залах с многократным обменом чистого воздуха. И здесь, как, впрочем, и в дальнейшем, мне очень помог своей требовательностью министр А. И. Шокин.

**– С А. И. Шокиным вас связывали хорошие отношения?**

– Да, пожалуй, здесь я расскажу немного об этом крупном организаторе и удивительном человеке подробнее. Когда А. И. Шокин принял Министерство электронной промышленности, его чрезвычайно увлекали вопросы технологии и электронных материалов. Тогда в тяжелейшем положении находилась быстроразвивающаяся отрасль полупроводниковых приборов и начинающееся производство микросхем. Основным полупроводниковым материалом был отечественный кремний, имеющий недопустимые загрязнения, что приводило к почти 100%-му браку полупроводниковых приборов. Сам Александр Иванович был хорошим технологом, знал досконально технологию полупроводников, владел в совершенстве английским



языком и, что немаловажно для руководителя, обладал невероятной работоспособностью. Например, при подготовке расширенного заседания коллегии по итогам года он требовал от директоров представить ему свои доклады и, хотя на коллегии заслушивалось не более 20, сам прочитывал не менее 50, прорабатывал и в заключительном слове давал свою оценку, зачастую ироническую, если не сказать больше.

В моем воспитании, как руководителя, из вышестоящего руководства главную роль играл А. И. Шокин. Внешне он был очень резким, и его отношения с подчиненными нередко проходили на повышенных тонах. И в то же время за всем этим скрывались уважительные отношения к руководящему составу предприятий подчиненного ему министерства. Сам он мог директора даже оскорбить, но всегда выступал на его защиту от нападений советского и партийного начальства, особенно от местного.

Сделав качественный скачок в полупроводниковых приборах за счет очистки кремния, А. И. Шокин решил те же технологические приемы перенести и в область вакуумных приборов. Рассуждал так: если, удалив «грязь» из кремния, удалось существенно улучшить параметры полупроводниковых приборов, то, удалив из металлов воздух, удастся улучшить параметры и вакуумных приборов. Но эта постановка вопроса оказалась неправомерной в технологии мощных ЭВП СВЧ. Как говорил Н. В. Черепнин, «если из стекла удалить все газы, то получим порошок». А. И. Шокин настаивал на внедрении вакуумно-плавленных металлов, видя в этом панацею от всех бед. Я же не разделял этого убеждения, считая необходимым комплексный подход к производственной надежности в СВЧ-приборостроении. Шесть раз в течение года меня слушали на коллегии МЭП по этому вопросу. Масло в огонь подливал директор «Плутона» Живописцев, который был лет на двадцать пять старше меня и значительно опытнее. Он все время утверждал, что приборы из вакуумно-плавленных металлов показывают чудеса в качестве и надёжности. Но это было не совсем верно. Просто эти партии приборов изготавливались более тщательно. Спустя год наших мучений Александр Иванович в сердцах бросил: «Чтобы я еще когда-нибудь занимался вакуумной технологией!» Зато он полностью поддержал предложение о реконструкции завода и создании новых помещений для цехов.

Основные цеха завода в то время размещались в здании, построенном еще в 1936 году по американскому проекту. При реконструкции цеха въезжали друг в друга. Основной задачей реконструкции завода был переход на новые принципы построения рабочих площадей. Для этого требовалось ломать перегородки в первую очередь не в маленьких комнатках, а в сознании людей, в том числе наших передовых технологов. Когда реконструкция была закончена, то заведующий оборонным отделом ЦК Украины Я. К. Руденко привез к нам на предприятие председателей Совнархоза Украины и показывал им, как надо из старых корпусов делать современные производственные помещения.

– **С вашим именем связывают и внедрение в СВЧ-приборостроение системы качества.**

– Толчком к тому послужили внедряемая по всему Советскому Союзу саратовская система бездефектной сдачи продукции и, естественно, положение с производственной надежностью на нашем заводе в начале 1962 года. Эта система по своей форме подходила к нашему производству, как и к любому другому. Однако ее содержание и, главное, основные положения требовали принципиальной переработки с учётом частичной неуправляемости технологических процессов производства электронных приборов. Идеологические основы нашей системы качества были разработаны в комплексной НИОКР «Операция». Эта работа содержала основные принципиальные особенности конструктивного и технологического аспектов надежности в СВЧ-

приборостроении. По ее результатам была издана монография в количестве 500 экз., которая разошлась по всем предприятиям электронной промышленности и послужила настольной книгой многим технологам нашей отрасли.

В конце 1962 года, вернувшись из Саратова, с совещания по известной бездефектной системе, мной была поставлена задача по разработке и внедрению системы качества. Часть руководителей сочла тогда эти предложения дурью молодого неопытного директора, не осознавая, что закладывается на многие годы будущее нашего предприятия. На первом производственном совещании по этому вопросу, проходившем без меня, 90 % руководителей подразделений проголосовали против внедрения системы качества продукции. Тогда я вновь собрал совещание. Выступил весомо и резко, а этого у меня уже тогда было не занимать, и голосование было практически единогласным. Руководство по внедрению этой системы возглавил целый штаб под моим председательством, в котором интенсивно трудились все руководители основных отделов, цехов, включая дирекцию.

Моими непосредственными заместителями в этой работе были Ю. М. Кауфман, начальник ОТК, который с энтузиазмом взялся за дело, и Д. Цветков, начальник тематического отдела. Основными участниками НИОКР «Операция», включающей в себя более 20 НИОКР, были главные конструкторы направлений С. В. Королев, В. Г. Кармазин, Л. А. Парышкуро, А. М. Алексеенко, И. В. Соколов, В. И. Мнойн и руководители технологических отделов Г. А. Метлин, В. Н. Батыгин, Л. А. Тимошин, Н. В. Черепнин, В. В. Окшин, В. А. Бродский с П. Морозовым и др. Сейчас том по «Операции» – библиографическая редкость. Спустя 20 лет в Саратове на ПО «Тантал» видел весь потрепанный до дыр экземпляр и там же начальники технологических лабораторий жалобно просили: еще бы один томик.

В результате внедрения новой системы качества мы получили принципиальное коренное улучшение положения с производственной надежностью. По грубой оценке, это дало за 10 лет экономию более 25 млн рублей, а в показателях работы завода сказалось следующим образом: число отказов на долговременных испытаниях снизилось с 50 % до 5...7 %, то есть отказывала одна партия из 15...20 предъявленных, завод с 1965 года семь кварталов подряд занимал первое классное место по министерству.

Только после всего этого комплекса работ, а он потребовал пять лет, я мог заняться в полной мере проблемами НИИ, используя накопленный опыт в области комплексных НИОКР.

**– Научная деятельность на промышленном предприятии – это чрезвычайно интересная тема для разговора.**

– Это так, но, затрагивая эти вопросы, мы вольно или невольно должны затрагивать и людей. Мне бы не хотелось сейчас слишком широко об этом говорить, тем более, что многих людей уже нет в живых, а по русскому обычаю «о мертвых – либо хорошо, либо ничего»...

Главным результатом научной деятельности в период 70-х и начале 80-х годов был последовательный переход научной части, а затем и производства на развитие направления твердотельных приборов (ТТП) и модулей на их основе с применением гибридно-интегральной схемотехники. Толчком к этому послужило требование минимизации габаритов аппаратуры для бортовых РЛС. К этому времени с помощью научного состава дирекции (И. И. Девяткин, Н. Д. Девятков, А. А. Маклаков) и информационно-тематических отделов (Ю. А. Вецгайлис, И. С. Фельдблум) мы уже создали новые организационные формы научного прогнозирования и годового планирования НИОКР: секцию программного тематического планирования и отраслевой семинар главных конструкторов (ГК). Эти организационные формы, дискуссии и

ожесточенные споры как на заседаниях, так и в кулуарах позволили избежать многих ошибок, привлечь всесторонний коллективный мыслительный процесс к формированию основных научно-технических направлений предприятия.

Через 30 лет видно, что эти коллективные проработки были абсолютно верны и к концу 80-х годов сделали наш институт одним из лучших предприятий СВЧ-приборостроения во всем мире.

Проблемы комплексной миниатюризации аппаратуры и задачи СВЧ-приборостроения были рассмотрены на I Отраслевом семинаре ГК. В конце 60-х годов казался перспективным путь миниатюризации ЭВП СВЧ, начатый несколькими главными конструкторами, в частности М. Б. Голантом. На семинаре идеи вакуумной миниатюризации как основного пути минимизации бортовой аппаратуры рассматривались в первый и последний раз. В результате обсуждения стало ясно, по крайней мере для меня, что таким основным путем является развитие твердотельного направления. Это был рискованный и до некоторой степени революционный шаг для НИИ, в котором приборостроение на основе успешно развивающейся вакуумной технологии составляло более 90 %. Тем не менее, мне была понятна неизбежность кардинальных изменений технических направлений, учитывая быстрый рост нашего дублера по ЭВП СВЧ – НИИ «Титан». Кроме того, необходимость такой научной «диверсификации» технических направлений с течением времени является залогом эффективного развития научных учреждений, особенно прикладных.

Идею развития твердотельных приборов СВЧ-модулей на основе гибридно-интегральной схемотехники поддержали наши ученые и уважаемые на предприятии люди: С. А. Перегонов, А. С. Тагер, А. Г. Михальченков и другие. Она быстро стала распространяться, захватывая все новые подразделения и группы разработчиков. В течение 2–3 лет твердотельная тематика прочно закрепилась как важнейшее направление развития микроволновых технологий и СВЧ-приборостроения в нашем НИИ. Темп работ в этом направлении тщательно отслеживался на секции программного планирования и семинаре ГК. К концу 70-х годов объемы работ по направлениям ЭВП и ТТП стали сравнимыми. Значительную роль в этом сыграли А. Н. Королев и С. А. Зайцев, пришедшие из ФИРЭ и интенсивно внедрявшие методы проектирования ГИС СВЧ в разработки, развивая этот раздел САПР.

Здесь уместно было бы остановиться на том вкладе, который сделал в новых направлениях наш теоретический отдел под руководством заслуженного деятеля науки и техники, доктора технических наук В. П. Сазонова и его первого помощника – руководителя САПР в области ЭВП СВЧ, доктора технических наук А. С. Победоносцева. Деятельность этого подразделения с начала его образования и его роль в развитии нашего НИИ подробно освещена в биографии ГНПП «Исток», посвященной его 50-летию.

Хотелось бы остановиться еще на нескольких вопросах, касающихся масштабного перехода предприятия на твердотельную тематику. Знаменательно, что при этом революционном переходе мы не только сохранили кадры, но и избежали, казалось бы, неизбежных конфликтных ситуаций. Переход был проведен плавно и безболезненно. Сотрудники наших ведущих НПК смело и инициативно использовали технику и технологию ГИС, отличающуюся существенным повышением доли интеллектуального инженерного труда и уменьшением дефицитных механических работ. Помню, как в НПК-1 Айзенберг приспособил фотоаппарат «Зенит» для получения фотошаблонов первых простейших ГИС и добился сокращения экспериментального цикла при отработке их топологии до 1–2 смен. Твердотельная тематика стала одним из главных технических направлений на наших последующих «островных» семинарах ГК.

Большую роль в этом технологическом перевороте сыграл В. Н. Батыгин. Сменив на посту главного инженера Ю. П. Уточкина, он взял на себя вопросы дальнейшего развития в первую очередь вакуумной технологической базы. Будучи крупным ученым, лауреатом Ленинской премии, Виталий Николаевич нашел оптимальный путь совмещения двух базовых микроволновых технологий – вакуумной и твердотельной, помог мне снимать любые противоречия в их развитии. Он всегда курировал развитие машиностроения в НПО, как фундамент его технологического развития, и впоследствии возглавил реконструкцию энергетического комплекса ГНПП «Исток», всегда оставаясь первым надежным заместителем генерального директора.

– **Помимо «твердотельного» были и другие повороты в тематике предприятия?**

– Другой важный, сравнимый по своему значению поворот в тематике НИИ связан с переходом к комплексированным устройствам. Вместе с первым преобразованием тематики он готовил основу дальнейшей диверсификации научно-промышленной базы нашего объединения в сторону аппаратурной тематики. Поводом к его появлению послужило следующее. Для самолета МиГ-23 главным конструктором Кунявским была разработана новая РЛС, в которой впервые использовалась цепочка задающего и усилительных клистронов. Для решения основной проблемы, стоявшей перед разработчиками бортовых РЛС, – обнаружение подвижной цели на фоне земли – требовалась стабильность частоты от импульса к импульсу в сотни герц, что принципиально невозможно получить, используя магнетронные автогенераторы. Решив задачу обнаружения цели на фоне земли с помощью нашей одночастотной клистронной цепочки, Кунявский не учел взаимопомехи в звене самолетов при работе на одной несущей частоте и был освобожден от должности. Встала проблема, как быть с перспективным истребителем, разработка которого уже стоила стране многих сотен миллионов рублей. Министр МРП В. Калмыков и Главком ВВС маршал Кутахов собрали экстренное совещание по дальнейшей судьбе радиоэлектронного вооружения МиГ-23, в котором, как обычно, участвовало НПО «Исток». Мы с С. В. Королевым, на мой взгляд, самым выдающимся разработчиком нашего предприятия, не раз обсуждали возможные решения сложившейся ситуации и пришли к мнению – создать комплексированное двухчастотное устройство в виде полного СВЧ-передатчика, взяв на себя большую часть работы специалистов МРП и всю ответственность за достижение требуемых параметров СВЧ-передатчика и, стало быть, радиолокатора в целом. Хотя идея была еще не опробована, я с ней выступил на совещании. Калмыков, высоко ценивший наше предприятие, одобрил идею. Энергично поддержал ее и Кутахов. Тут же было оформлено решение о создании 4-частотного СВЧ-передатчика для самолета МиГ-23 МЛ на основе нашего предложения. Так родился моноблок «Альтернатива», ставший первым отечественным комплексированным устройством, при разработке и изготовлении которого радисты стали изготовителями компонентов для нас. Под руководством С. В. Королева и Э. А. Гельвича в кратчайшие сроки был создан в НПК-2 моноблок, решивший судьбу истребителя МиГ-23 МЛ. Пожалуй, впервые в истории разработок радиоэлектронного вооружения кардинальное техническое решение было реализовано представителями нашего НИИ.

Добавлю, что в те годы сложилась мощная шестерка министров (Калмыков, Шокин, Зверев, Дементьев, Славский, Бутома) во главе с Д. Ф. Устиновым, которые с огромным пониманием относились к роли электроники в различных системах и на всех уровнях поддерживали ее развитие. Не случайно поэтому в начале 80-х годов Советский Союз ежегодно продавал вооружений на сумму более 20 млрд долл., в то время как США – только на 15 млрд долл. Так начался продолжительный период, когда наше предприятие успешно разрабатывало комплексующие устройства на основе комплектации Минрадиопрома.

Главные работы 70-х годов были посвящены созданию комплекса приборов для систем С-300П и С-300В (генеральные конструкторы Б. В. Бункин и В. П. Ефремов). Эти системы и сейчас остаются лучшими в мире. Совместная работа наших отделов с коллективами МКБ «Алмаз» и НИИЭМИ над СВЧ-частями обеих систем дала нашим ведущим НПК-2, 17 и другим очень много. Это был прорыв в когерентную локацию. Для меня общение с лучшими генеральными конструкторами радиопромышленности и их заместителями было великолепной школой, так же как и для наших ведущих ученых С. В. Королева, В. И. Новосельца, Л. А. Парышкуро, руководителя НПК-2 Э. А. Гельвича, моего заместителя по этому комплексу работ, и ряда других.

Следующим этапом по созданию комплексированных устройств стали работы над передающим моноблоком для системы «Заслон», где мы вплотную сотрудничали с уже начальником отделения Кармазиным. Он, несомненно, был выдающимся научным администратором, и ему по силам было руководить коллективом и более крупного научно-производственного подразделения. По моноблоку «Заслон» мы буквально выворачивали «радистов» наизнанку, заставляя их работать с полной отдачей. В конечном счете эта система была высоко оценена специалистами, как лучший в мире РЛПК для истребителей-перехватчиков. Очень жаль, что Кармазин рано ушел из жизни и многого еще не успел сделать.

– **И уж совсем крутой поворот был связан с работой над «Синтезом»...**

– Это не совсем так. Внедрение комплексированных устройств и схмотехники на основе ГИС уже фактически создало задел для разработки на нашем предприятии сложнейшей радиолокационной аппаратуры. К тому же, в отличие от предприятий МРП, мы в то время обладали более совершенной технологией изготовления базовых элементов и компонентов систем, в том числе и твердотельных. Завершилась реорганизация полупроводникового отделения, которую возглавил начальник отделения А. Г. Михальченков. Так что задел у нас уже имелся и весьма неплохой. Начало аппаратурного направления в ГНПП «Исток» связано опять-таки с нашим министром А. И. Шокиным. Учитывая нарастающее отставание в области радиоэлектронного вооружения для истребительной авиации, Шокин привлек нас и предприятия Зеленограда к обсуждению возможного построения нового поколения этого вооружения. Выслушав все доводы за и против, он остановился на нашем предприятии. Так родилось известное распоряжение ВПК СМ СССР о постановке НИЭР «Синтез-Союз», где головная роль по созданию экспериментального образца радиолокационного прицельного комплекса и активной головки самонаведения была поручена нам.

На предприятии сразу же среди руководящего состава определилась целая группа единомышленников в лице А. Н. Королева, С. А. Зайцева, М. И. Лопина, В. И. Гуртового, М. А. Воскобойника и других. Исключительным энтузиастом среди них был Владимир Никитич Русаков. Он обладал всеми качествами, необходимыми для крупного руководителя, и, безусловно, стал знаменательной фигурой в коллективе разработчиков «Синтеза». Русаков хорошо разбирался в технических вопросах, мог сходу ухватить суть проблемы. Его слово, данное им обещание было законом, и в этом он никогда не подводил. Нагрузку нес колоссальную, работал на износ. В. Н. Русаков ушел из жизни, когда ему было чуть больше сорока...

Некоторые руководители не слишком приветствовали начало работ в этом нетрадиционном направлении. Какой-то организованной оппозиции мне, правда, уже не было. На партийных конференциях против моей кандидатуры в партком голосовало не более 20 человек. Я чувствовал поддержку всего коллектива предприятия, хотя, выполняя коллегиально принятые решения, нередко проявлял излишнюю жёсткость. Считаю это одним из моих главных недостатков.

Правильность выбранных направлений была доказана временем. Работы, выполненные на предприятии 15 лет назад, стали в настоящее время заделом для основных источников финансовых поступлений.

В конце прошлого года исполнилось 10 лет, как на конференции трудового коллектива Александра Николаевича Королева избрали генеральным директором после разделения должностей генерального конструктора и директора предприятия. Сейчас он, несомненно, один из лучших директоров отрасли, сумевший найти пути выживания предприятия в самые тяжелые годы псевдорыночных реформ. Наверное, в это время таким, как А. Н. Королев, и должен был быть генеральный директор крупного градообразующего предприятия.

В целом же работы по «Синтезу» – это особый предмет для разговора, разговора серьезного и долгого. В последнее время я все больше анализирую свою роль в свершении этих работ, свои преимущества и свои недостатки. Все больше понимаю, что от руководителей подразделений можно было бы добиться лучших результатов убеждением, а не окриком. Но для убеждения, казалось, не было времени, телефон разрывался от звонков, только начальник главка ежедневно обращался ко мне по 7...10 раз. Каждые две недели участвовал в совещаниях замминистров смежных отраслей. Числу совещаний не было счета...

**– И все же, несмотря на большую нагрузку на предприятии, вы находили время заниматься проблемами города?**

– Сначала о строительстве. Конечно, директор Федоров как строитель был грамотнее меня. Тем не менее, за мою бытность было построено почти 100 тыс. кв. м производственных площадей, более 200 тыс. кв. м жилых домов, что-то около 10 детских садов, объекты соцкультбыта, включая 2 базы отдыха, профилакторий, Дворец культуры, спортивный комплекс из 5-ти залов, проведена реконструкция пионерского лагеря. Это масштабное строительство в основном связано с именами А. Пушкина, К. Еремина и Б. Гильмана. Большой вклад в строительство внес и К. Амосов, хотя оно и не входило в его обязанности.

Пользуясь этим разговором, хочу принести извинения тем многим сотрудникам, которых я не назвал персонально, особенно великолепных начальников наших обслуживающих цехов и многих других. Я помню их всех и всегда буду благодарен им за самоотверженный труд, преданность делу и нашему родному предприятию.

В то время на балансе предприятия числилось более половины жилищного фонда города. Мы поддерживали и этот фонд и, по мере возможности, продолжали строительство города. Большая эпопея развернулась вокруг строительства МЖК. Обо всем рассказать не представляется возможным, но некоторые вопросы хотелось бы затронуть.

Прежде всего хотел бы отметить ту помощь, которую получал в этом вопросе от горкома партии и членов дирекции. Я всегда несколько с опаской относился к горкому, но первый секретарь Щелковского горкома Л. Ф. Фролов полностью изменил мое отношение. Это был прекрасный человек, с которым я проработал душа в душу 7 лет. Вспоминается эпизод, связанный со строительством ДК «Исток». Московские проектировщики предлагали возвести ДК в непосредственной близости к гребневской церкви, были, по-видимому, тому идеологические причины. Я же считал это полнейшей дурью. На совещании зампреда Мособлисполкома чуть было не приняли решение в пользу проектировщиков и только предельно резкое выступление Фролова от имени горкома КПСС привело к тому, что вопрос был перенесен на Мособлисполком. На этом заседании председатель Мособлисполкома В. Виноградов, с которым мы часто сидели вместе на Верховном Совете, энергично нас поддержал. Было принято разумное решение:

построить ДК на 800 мест в старом городе, а затем, когда город разрастется в сторону гребневской церкви, построить еще один ДК на 1200 мест. Деньги на строительство пришлось искать обходным путем: мы включили его в постановление правительства по созданию важнейших военных систем. Первый раз из-за проволочки с проектом сроки прошли. Через год включили еще раз в такое же постановление, и строительство было начато.

Неоценимую помощь в строительстве ДК оказывал мой заместитель К. А. Амосов. Достаточно сказать, что приобрести кресла в большой зрительный зал ДК удалось лишь после того, как Константин Алексеевич подписал разрешение лично у А. Н. Косыгина – Председателя Совета Министров СССР. Да и в других вопросах материального обеспечения предприятия К. А. Амосов творил чудеса. Промышленность тогда жила на фондах и лимитах, определяемых Госпланом СССР и областей. Безналичные средства в банках мало что значили, роль ценностей выполняли фонды на материалы и лимиты на строительство. К. А. Амосов был выдающимся человеком по части владения этими вопросами, отличаясь высочайшей честностью и порядочностью, и неслучайно его 25 лет избирали в состав Верховного Суда СССР. В то же время он оставался исключительно скромным работником, отзывчивым товарищем. В коллективе пользовался уважением, единогласно был избран первым председателем СТК предприятия. Заканчивая разговор о наших хозяйственных руководителях, не могу не сказать о роли И. М. Панаса в жизни нашего предприятия и моей жизни. Трижды он менял направление своей деятельности в руководстве, возглавляя профком, затем кадры и, наконец, длительный период руководил нашим заводом, крупнейшим в электронной промышленности. В любой из этих сфер деятельности он проявил себя с самой лучшей стороны, его помощь мне трудно переоценить, как и помощь других членов дирекции: Ю. А. Степанова, Г. Г. Авдиенко, В. А. Красуцкого, Н. И. Прохорова, Е. Н. Покровского, А. М. Мухина, Б. Я. Кистина, А. Ю. Слободенюка, секретаря парткома Д. Г. Арапова, руководителей нашего профкома.

**– Уважаемый Сергей Иванович! Ваши воспоминания чрезвычайно интересны. Большое вам спасибо за то, что вы нашли время поделиться с нами своими воспоминаниями.**



**Герой Социалистического Труда,  
лауреат Ленинской и Государственной премий,  
доктор технических наук С.И. Ребров**





**Первоклассник Сережа Ребров**



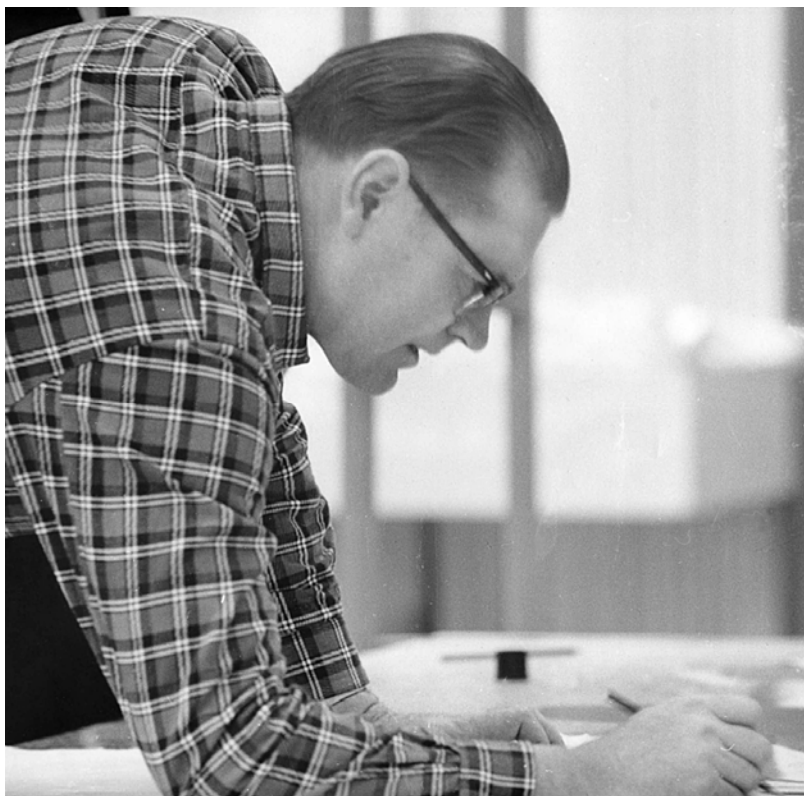
**Студент Сергей Ребров  
с двоюродным братом  
Юрием Карловичем Сирмайсом**



**Решение задачи требовало  
усиленного мышления**



**Супруга С.И. Реброва  
Татьяна Линеви́ч**



**За оформлением  
планшетов для выставки**



**Демонстрация министру электронной промышленности  
А. И. Шокину последних разработок института**



**На вручении Ленинской юбилейной почетной грамоты, 1970 г.**



**Космонавты в гостях на предприятии**



**В Музее трудовой и боевой славы «Истока»**



**На спартакиаде сотрудников предприятия**



**Вручение предприятию ордена Ленина, 1966 г.**



**Вручение министром А. И. Шокиным  
Юбилейного почетного знака, 1967 г.**



**На демонстрации в честь годовщины Октября**



**Коси коса пока роса  
(на субботнике)**



Участники 30-го семинара ведущих специалистов ФГУП «НПП «Исток», 2005 г.

---

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ С. И. РЕБРОВА

---

УДК 621.385.6(09)

**С. И. Ребров**

*ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино*

## ЭЛЕКТРОННАЯ СВЧ-ТЕХНИКА\*

В конце 1940-х и начале 1950-х годов отмечается рост внимания разработчиков аппаратуры различного назначения к применению колебаний сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн. СВЧ-колебания применяются для создания пространственного информационного поля сигналов, обеспечивая передачу, прием и первичную обработку информационных сигналов с широкой рабочей полосой, динамическим диапазоном и высокой тактовой частотой.

Накопленный к этому времени опыт использования СВЧ-колебаний для целей радиолокации, а также созданные мощные и маломощные генераторы, кристаллические смесительные диоды и усилители показали высокую эффективность применения этого диапазона длин волн. Велись работы по использованию таких колебаний в интересах навигации, радиорелейных линий связи. После запуска спутников Земли в космос стали особенно очевидны такие преимущества колебаний СВЧ-диапазона, как возможность узконаправленной передачи и приема информации, относительно небольшие затухания на всей протяженности линии связи, возможность использования широких полос частот для передачи информации.

К концу 1960-х годов весь участок СВЧ-диапазона длин волн от 300 МГц до 30 ГГц (по определению American Electronic Laboratories) был полностью распределен для использования в следующих технических средствах (рис. 1 и 2): радионавигации; радиолокации; спутниках Земли; наземных станциях связи со спутниками; международной космической связи; радиоастрономии; метеорологических наблюдениях и исследованиях; радиорелейных линиях связи; радиовысотомерах; системах посадки и контроля за воздушным пространством; системах охраны побережья; для внутригородской связи; мобильной связи; в телевидении.

Аппаратура СВЧ-диапазона намечалась к использованию в стационарных, подвижных наземных, морских, воздушных и космических средствах. Микроволновые технологии и СВЧ-техника, основанная на их использовании, были, есть и остаются критическими базовыми технологиями, являющимися показателями принадлежности страны к высокому уровню технической цивилизации и развития. Продукция этих технологий обеспечивает высокий уровень оборонной техники страны, её информационных систем и гарантирует сохранение технического суверенитета. В связи с этим СВЧ-техника, безусловно, относится к наиболее приоритетным и сложнейшим направлениям научно-технического и технологического развития отечественной элементной базы. Диапазон параметров совокупности всех типов приборов СВЧ-техники характеризуется следующими величинами:

---

\* Динамика электроники. Гл. 2 / Под общ. ред. Ю.И. Борисова. - М.: Техносфера, 2007.- С. 42-83.



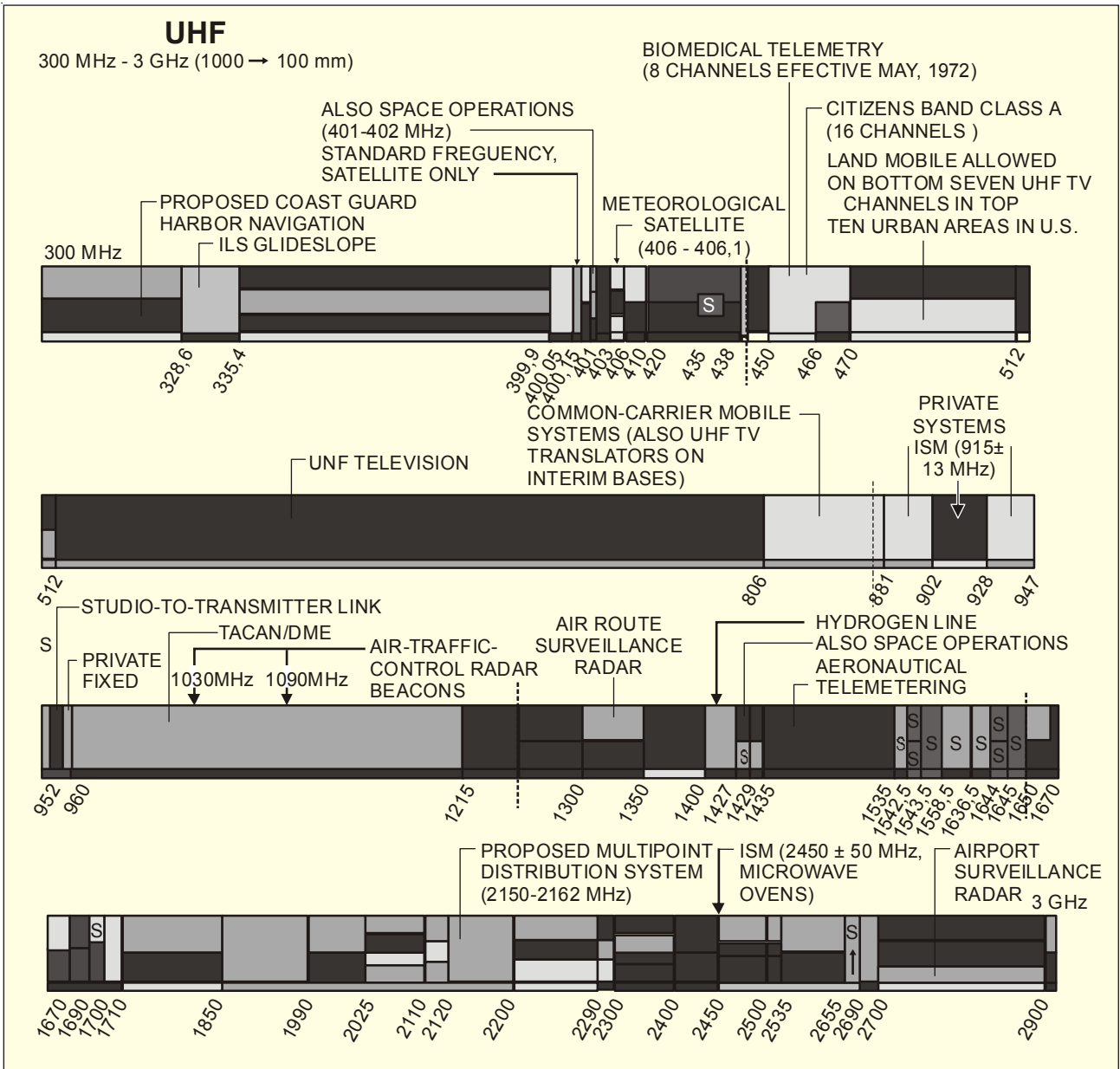


Рис. 1. Распределение частот UHF диапазона 0,3...3 ГГц

- Масса приборов ..... от 0,01 г до нескольких тонн
- Габаритные размеры ..... от 0,1 мм до 2-3 м
- Диапазон рабочих частот ..... 0,1-10 000 ГГц
- Диапазон излучаемых и принимаемых мощностей .....  $10^{30}$  Вт

За последние 60 лет отечественная СВЧ-техника прошла сложный путь развития. На рис. 3 показано развитие отечественной СВЧ-техники от вакуумного триода СВЧ

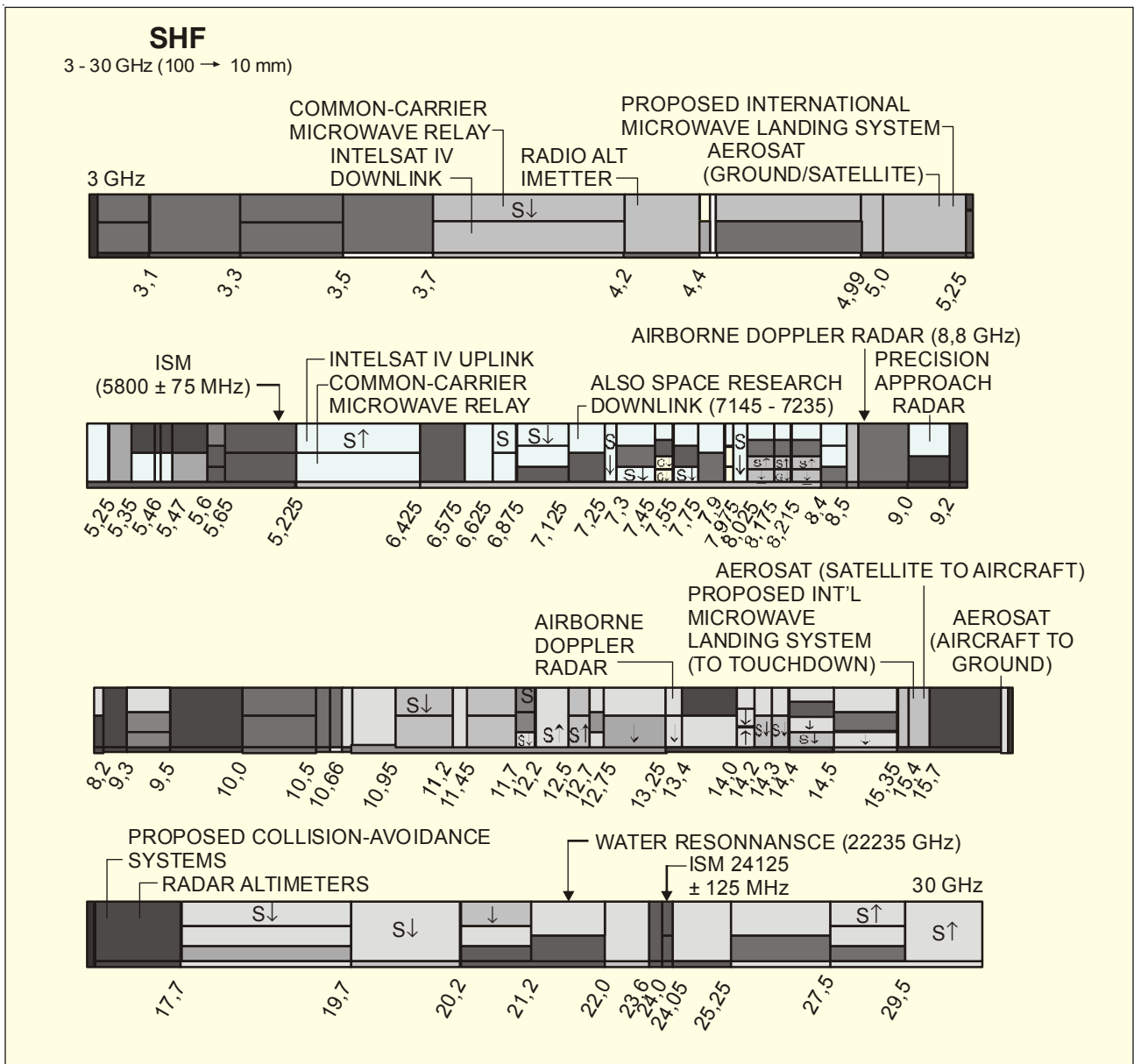


Рис. 2. Распределение частот SHF диапазона 3...30 ГГц

до multifunctional complexed devices and monolithic microwave integrated circuits (MMIC) on the example of the leading organization ФГУП «НПП «Исток». Multifunctional directions of modern microwave technology are based on two fundamentally different branches of electronics:

- technique and technology of powerful vacuum amplifiers and generators;
- technique and technology of monolithic microwave integrated circuits.

In the further we will stop at the analysis of the state and dynamics of separate consolidated technical directions of microwave technology in the period from 1950 to 2000 year, using these basic microwave technologies.

## ОТ ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНОЙ ЛАМПЫ



Разработки серии ПУЛ "Анод", отражательных кlistронов и импульсных триодов успешно использовались при создании РЛС конца 40-х годов.

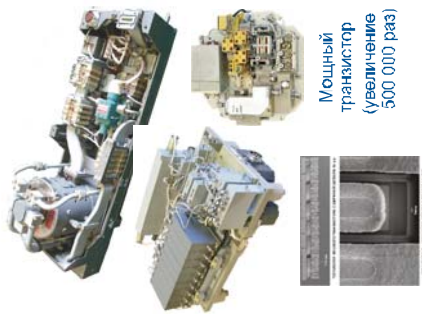
Первый отечественный кинескоп для РЛС и телевизоров СВН (1949 г.)

Мощные импульсные магнетроны с быстрой перестройкой частоты 5С-60-х годов использовались в помехозащищенных РЛС наземных, самолетных и корабельных ЗРК систем ПВО С-26, С-76, С-125 и др.

Сверхмощные предельно-волноволновые магнетроны обеспечили создание уникальной системы ПВО Москвы и первой системы ПРО страны, осуществившей впервые в мире поражение головки межконтинентальной баллистической ракеты в 1962 г. Аналогичный результат получен в США почти 20 лет спустя.

Однолучевые кlistроны серии 60-х годов применены в мощных передатчиках систем связи "Горизонт", "Градент", ЗРК С-200, С-225, "БУК", в аппаратуре треволновых измерений "Вега", самолетных РЛПК "Сапфир-23М", Исследовательских Центрах РФ, Китая, США.

Не имеющие мировых аналогов электропотоковые усилители на быстрых волнах, многолучевые кlistроны и ПБВ разработки 70-80 гг. позволили создать многофункциональные системы и комплексы ЗРК "ТОР", С-225, С-300, ДРЛ "Шмель", РЛС боевого обзора "Штык", РЛС морского базирования "Кинжал", "Кортик", АРГС для ракеты РВВ-АЕ и др.



Мощный транзистор (увеличение 500 000 раз)



БРЛС "Синтез-10"

По решению ВПК СМ СССР в конце 80-х годов по теме "Союз-Синтез" созданы диверная многофункциональная БРЛС и АРГС, переоборудованная в 1996-2002 гг. в лучшую в мире активную головку самонаведения ракет класса "воздух-воздух".



## ДО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СВЧ-ТЕХНИКИ

Рис. 3. Динамика развития отечественной СВЧ-техники

**МОЩНЫЕ ВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ М-ТИПА**

Типичные представители семейства отечественных приборов магнетронного типа, использующих скрещенные электрические и магнитные поля, представлены на рис. 4. В начале 1950-х годов в качестве автогенераторов СВЧ-передатчиков РЛС, станций оружейной наводки и бортовых радиолокационных прицелов использовались импульсные магнетроны в 3- и 10-сантиметровом диапазоне длин волн с фиксированной частотой излучения. Отсутствие перестройки частоты являлось серьезным недостатком этого класса приборов, так как в значительной мере ограничивало частотную совместимость радиолокационных средств и их помехозащищенность, что существенно ухудшало тактико-технические характеристики аппаратуры.

Новое поколение РЛС 50-х годов выставило в качестве обязательного требования наличие быстрой перестройки частоты магнетронных СВЧ-автогенераторов, значительно усложняющего конструкцию и технологию изготовления магнетронов. К этому требованию добавлялись стабильность задержки фронта нарастания СВЧ-колебаний относительно фронта импульса напряжений и устойчивость характеристик к влиянию рассогласованных нагрузок с изменяющейся фазой, в том числе и при изменении частоты генерируемых колебаний. Реализация указанных требований позволила решить принципиальную проблему селекции воздушной движущейся цели на фоне пассивных помех. На этих принципах были построены в 1950-х годах зенитные ракетные комплексы (ЗРК) С-75, С-125 и др. В качестве СВЧ-автогенераторов в передатчиках этих комплексов использовались мощные импульсные магнетроны (см. рис. 4, 1-я колонка).

Дальнейшее развитие ЗРК в начале 1960-х годов было связано с наращиванием потенциальных характеристик аппаратуры, и в первую очередь дальности действия. Для решения поставленной задачи было необходимо создание принципиально новых магнетронов. Её решение реализовалось в виде предельно-волноводной конструкции, которая позволила на порядок увеличить пространство взаимодействия СВЧ-поля с электронным пучком в фокусирующей системе магнетрона при сохранении заданных стабильности частоты и спектра несущих колебаний от импульса к импульсу (см. рис. 4, 2-я колонка). Благодаря этой конструкции, не имеющей аналогов за рубежом, излучаемая мощность в импульсе была увеличена до 10 МВт (ЗРК С-25) и 30 МВт для первой системы противоракетной обороны страны (ПРО). Именно этой системой ПРО была сбита боеголовка межконтинентальной баллистической ракеты в 1962 году. О сложности этого высочайшего достижения говорит тот факт, что в США этот эксперимент был повторен лишь спустя 20 лет. Магнетроны, на базе которых были созданы первые РЛС систем ПРО, по параметрам не имеют себе равных до настоящего времени.

В конце 1950-х годов началась разработка первых отечественных усилителей М-типа – амплитронов, на базе которых была создана РЛС дальнего обнаружения корабельного базирования «Круг» и многоцелевые корабельные РЛС «Фрегат» и «Фрегат МА». Дальнейшее развитие эти работы получили в создании серии амплитронов с широкой (до 10 %) полосой усиливаемых частот и высокой средней и импульсной мощностью (см. рис. 4, 3-я колонка). Для аппаратуры связи специального назначения были разработаны амплитроны непрерывного действия с выходной мощностью 50...200 Вт в рабочей полосе частот 5...6 % (см. рис. 4, 4-я колонка). Для носимых наземных передатчиков спутниковой связи в диапазоне частот 2...6 ГГц были созданы сверхминиатюрные магнетроны, отличающиеся высокими значениями КПД, 60...70 % (см. рис. 4, 5-я колонка).



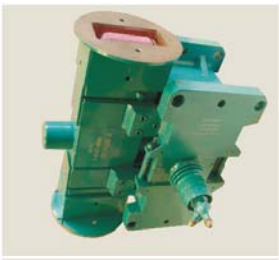

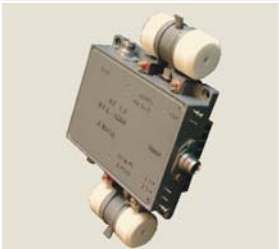

МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНЕТРОНЫ	СВЕРХМОЩНЫЕ ПРЕДЕЛЬНО-ВОЛНОВОДНЫЕ МАГНЕТРОНЫ	МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ АМПЛИТРОНЫ	АМПЛИТРОНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ	МИНИАТЮРНЫЕ СИНХРОНИЗИРОВАНИЕ МАГНЕТРОНЫ	МАГНЕТРОНЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ
<p>Серия мощных импульсных магнетронов с быстрой перестройкой и высокой стабильностью частоты позволила создавать помехозащищенные РЛС наземных, самолетных и корабельных ЗРК систем ПВО (системы С-25, С-75, С-125).</p>	<p>Сверхмощные предельно-волноводные магнетроны обеспечили создание уникальной системы ПВО Московской и первой системы ПРО страны.</p>	<p>Мощные импульсные амплитроны стали основой РЛС дальнего обнаружения системы "Круг" и многоцелевых РЛС ("Фрегат", "Фрегат МА") современных кораблей.</p>	<p>Амплитроны негерманного действия работают в самолетных и космических системах связи повышенной надежности (авиационная приемопередаточная система "Венера-15", система космического противоракетного мониторинга, радиостанция "Барьер-Т").</p>	<p>Но имеем аналоги в миниатюрные магнетроны обеспечили создание переносных и бортовых систем спутниковой связи (проект "Венера-15", система космического противоракетного мониторинга, радиостанция "Барьер-Т").</p>	<p>Области применения: пищевая, химическая, резинотехническая, деревообрабатывающая промышленности; плазменная металлургия, строительная индустрия; сельское хозяйство; утилизация отходов, в т.ч. радиоактивных.</p>
					
<b>ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>					
Частота, ГГц	1 – 10	2 – 3	2 – 3	2 – 6	433; 914; 2450; 6800 МГц
$P_{\text{вых}}$ (имп.) МВт	0,3 – 2	10 – 30	0,06 – 2	–	–
$P_{\text{вых}}$ (непр.) Вт	–	–	–	6 – 40	0,6 – 100 кВт
КПД, %	30 – 50	50 – 60	30 – 50	50 – 72	80 – 90
$U_p$ , кВ	$\leq 20$	$\leq 50$	$\leq 30$	0,6 – 1,4	–
Масса, кг	5 – 10	$\leq 50$	$\leq 30$	0,06 – 0,12	–
Количество типов	40	3	10	5	10

Рис. 4. Приборы М-типа

Наконец, в 1970-х годах были заложены научно-технические основы, а затем разработана серия высокоэффективных мощных магнетронов для применения в различных отраслях промышленности и медицинской технике, перекрывающих диапазон мощностей от 200 Вт до 100 кВт в непрерывном режиме и диапазон длин волн от 10 до 70 см. Магнетроны отличаются оригинальной конструкцией, обеспечивающей высокую эксплуатационную надёжность (см. рис. 4, 6-я колонка).

### МОЩНЫЕ ВАКУУМНЫЕ УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КЛИСТРОНЫ

В 1960–1970 годах продолжается активное освоение СВЧ-диапазона длин волн. Расширяется фронт работ по использованию свойств этого диапазона для построения многоцелевых РЛС повышенной помехозащищённости наземного, морского и самолетного базирования. Активно разрабатываются станции обнаружения и управления ракетами в системах ЗРК, в интересах ПРО и космических систем.

Усложнение решаемых радиоэлектронным вооружением задач и повышение их функциональных возможностей требуют дальнейшего повышения стабильности частоты от импульса к импульсу до значений 10...100 Гц, применения сложных сигналов и методов их обработки. Реализация таких устройств возможна только с использованием усилительных схем построения передатчиков, когда сигнал необходимой формы формируется на низком уровне, а затем усиливается до величины мощности, необходимой для получения заданного потенциала станции. Для обеспечения когерентности сигналов в режимах приёма и передачи выставляются требования низкого уровня амплитудных и фазовых шумов.

Было установлено, что такие требования могут быть выполнены с помощью многорезонаторных усилительных клистронов. Приборы этого вида разрабатываются на малые, средние, большие и сверхбольшие уровни мощности. В 1950-х годах работы по созданию мощных клистронов находились на начальной стадии. Велись исследования по созданию мощных однолучевых многорезонаторных клистронов, отрабатывались конструкция и технология их создания. В период с 1970 по 1980 год была создана целая гамма однолучевых клистронов, работающих в импульсном и непрерывном режимах различного уровня мощности. Были созданы:

- на диапазон частот 6,5...15 МГц клистроны малого (0,02...0,7 кВт) и среднего (3...15 кВт) уровня мощности;
- на диапазон частот 0,6...9 МГц клистроны мощностью 59...100 кВт;
- на диапазон частот 2...3 ГГц сверхмощные импульсные клистроны мощностью 20...30 МВт.

Всего было разработано более 30 типов однолучевых клистронов для систем связи, РЛС обнаружения воздушных целей, ЗРК, бортовых РЛПК истребителей и ускорителей заряженных частиц. Типичные представители однолучевых клистронов и области их применения приведены на рис. 5.

Характерными особенностями однолучевых клистронов являются высокое напряжение катода, достигающее в мощных клистромах сотен киловольт, относительно низкий КПД и значительная масса магнитной фокусирующей системы, что затрудняет их применение в передатчиках подвижной и бортовой радиотехнической аппаратуры. Поэтому в России началось интенсивное развитие оригинального отечественного многолучевого клистрона, не имеющего аналогов за рубежом.

Однолучевые усилительные клистроны характеризуются высокой надёжностью и стабильностью выходного сигнала, низким уровнем амплитудных и фазовых шумов.

Они находят широкое применение в различных наземных и бортовых системах военной техники, в телевидении и связи, в ускорительной технике. Разработано 30 типов клистронов.

Параметры	Типы клистронов		
	Малого уровня мощности	Среднего уровня мощности	Мощные
Частота, ГГц	6,5 – 15	0,6 – 9	1,5 – 3
$P_{\text{в.к.}}$ , кВт	0,02 – 0,7	3 – 15	50 – 100, 400*
$\Delta f$ , МГц	40 – 100	12 – 50	10 – 50
$K_v$ , гБ	30 – 40	40 – 45	45 – 55
КПД, %	20 – 40	35 – 40	45 – 60

\*Импульсный режим



КУ-152



КУ-326



КУ-77



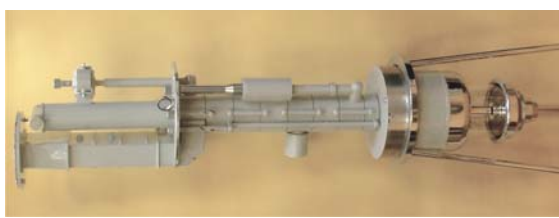
КУ-217



КУ-335



КУ-1500 (АЛДАН)



КУ-15М

ПРИМЕНЕНЫ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ "ГОРИЗОНТ", "ГРАДИЕНТ", "ОРБИТА", ЗРК С-200, С-300, "БУК", С-225, В СИСТЕМЕ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ "ВЕГА", САМОЛЕТНЫХ РПС МИГ-23М, В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕНТРАХ РФ, КНР, США (РАЗОГРЕВ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКАХ ТИПА "ТОКОМАК"), В УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.

Рис. 5. Мощные однолучевые клистроны

В 1960-х годах были созданы многолучевые клистроны (МЛК), имеющие в 2–3 раза меньшее питающее напряжение и пониженную в 3–4 раза массу прибора при увеличении полосы рабочих частот по сравнению с однолучевыми клистроном в 2–5 раз. Такие клистроны были разработаны на различные уровни выходной импульсной мощности, от единиц до сотен киловатт в импульсе, в диапазонах частот 6...18 ГГц, величина рабочей полосы частот – до 400 МГц. Малогабаритные и средней мощности МЛК работают в постоянных магнитах на основном виде колебаний, число лучей – от 7 до 37, отличаются уникальными массогабаритными характеристиками и низким рабочим напряжением. Мощные МЛК работают на основном и высших видах колебаний, число лучей – от 6 до 36. В качестве магнитной системы используются как соленоиды, так и постоянные магниты. Всего разработано свыше 80 типов МЛК. В обзоре ведущих специалистов США отмечалось, что именно в России созданы многолучевые клистроны с количеством лучей от 6 до 60, усилением 40...45 дБ и КПД 30...45 %, не имеющие аналогов за рубежом.

В системах, где доминирующими требованиями являются как можно меньшие масса и габаритные размеры передатчика и высокое качество усиливаемого сигнала (сверхмалые шумы, высокая фазовая и частотная стабильность), многолучевые клистроны являются основными источниками мощных СВЧ-колебаний. Многолучевые клистроны используются в передатчиках современных перспективных самолетных, морских и наземных многофункциональных радиоэлектронных систем повышенной помехозащищенности: ЗРК «Тор», С-225, С-300, самолетных системах «Шмель», РЛС бокового обзора «Штык», «Шомпол», РЛС морского базирования «Кинжал», «Кортик», ракете РВВ-АЕ и др.

Типичные отечественные многолучевые клистроны, их технические характеристики и области применения приведены на рис. 6.

В 1995–2002 годах специалисты ФГУП «НПП «Исток», основываясь на своем 25-летнем опыте разработок и производства многолучевых СВЧ-приборов, создали новую конструкцию мощного клистрода с фирменным названием «Истрон». Переход к многолучевой конструкции позволил разработать приборы, обладающие определенными преимуществами по сравнению с западными однолучевыми клистродами. В их числе снижение рабочего напряжения, увеличение коэффициента усиления, патентная чистота.

«Истрон» неоднократно демонстрировался на международных и отечественных выставках и прошел испытания в составе передатчиков итальянской фирмы ITELKO и в аппаратуре АООТ «МАРТ» (г. Санкт-Петербург). «Истрон» – гибрид тетрода и пролетного клистрода – обладает высокими КПД, амплитудной и фазовой линейностью и выходной мощностью, соответствует самым жестким требованиям применения в современных аналоговых и цифровых телевизионных передатчиках.

### МОЩНЫЕ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

В начале 1950-х годов в России создается первая отечественная малошумящая ЛБВ в 10-сантиметровом диапазоне длин волн. По чувствительности (коэффициент шума – около 10 дБ) эта ЛБВ соответствовала зарубежным аналогам. На ее базе была разработана серия стеклянных малошумящих ЛБВ для оснащения отечественных РЛС, перекрывающая весь сантиметровый и часть дециметрового диапазона длин волн. Для целей радиоразведки и радиопротиводействия в последующем были созданы ЛБВ, перекрывающие весь сантиметровый диапазон длин волн.



### МАЛОГАБАРИТНЫЕ КЛИСТРОНЫ



KIV-174



KIV-176



KIV-154

Многолучевые усилительные клистроны начали широко внедряться в современные системы РЭА с шестидесятых годов 20-го столетия. За эти годы были созданы многолучевые конструкции клистронов на основном и высших видах колебаний. МЛК позволяют уменьшить питающие напряжения в 2-3 раза, массу прибора в 4 раза, увеличить полосу рабочих частот и значительно уменьшить габариты радиопередаточных устройств. Благодаря этому они являются основой передатчиков современных перспективных бортовых, морских и наземных радиосредств.

МЛК подразделяются на малогабаритные, средней мощности и мощные. Малогабаритные и средней мощности МЛК работают в постоянных магнитах, на основном виде колебаний, с числом лучей от 7 до 37, отличаются уникальными массогабаритными характеристиками и низким расходом электроэнергии.

Для расширения полосы рабочих частот используются 2- и 3-зарядные резонаторы и многоконтурная выходная система.

Мощные МЛК работают на основном и высших видах колебаний, число лучей – от 6 до 36, в качестве магнитной фокусирующей системы в основном используется солонид.

Всего разработано 50 типов МЛК.

Параметры	Типы клистронов	
	Малогабаритные	Мощные
Рабочий диапазон, ГГц	6 – 18	6 – 10
Выходная импульсная мощность, кВт	0,1 – 1,2	150 – 900
Выходная средняя мощность, кВт	0,05 – 0,5	10 – 17
Полоса рабочих частот, МГц	40 – 200	100 – 400
Коэффициент усиления, дБ	50 – 30	35 – 40
Рабочее напряжение, кВ	1 – 4	22 – 32
Масса, кг	0,4 – 1,2	15 – 35*

\* Без солонида

### КЛИСТРОНЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ



KIV-94M



KIV-109



KIV-93

### МОЩНЫЕ КЛИСТРОНЫ



"АККОРД"



"АТЛАНТ"

ПРИМЕНЕНЫ В ЗРК "ТОР", С-225, С-300, С-400, САМОЛЕТНЫХ СИСТЕМАХ "ШМЕЛЬ", РЛС БОКОВОГО ОБЗОРА "ШТЫК", "ШОМПОЛ", РЛС МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ "КИНЖАЛ", "КОРТИК", РАКЕТАХ РВВ-АЕ.

Рис. 6. Многолучевые клистроны

Выдающимся достижением и заключительным этапом направления малошумящих ЛБВ стала разработка и создание оригинального отечественного прибора металлокерамической конструкции с ленточным электронным пучком и с фокусировкой электронного пучка однородным магнитным полем. На базе первой лампы с ленточным пучком для РЛС были созданы десятки типов сверхчувствительных (коэффициент шума – до 3 дБ) ЛБВ сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

Одновременно с развитием малошумящих ЛБВ для связи и радиопротиводействия стали разрабатываться ЛБВ малой и средней мощности. Первые такие ЛБВ были созданы для радиорелейных линий связи. Фокусировка электронного пучка осуществлялась магнитным полем соленоида. Вскоре создаются первые отечественные ЛБВ, пакетированные с магнитной периодической фокусирующей системой на основе феррит-бариевых магнитов. Разрабатывается малошумящая ЛБВ с периодической магнитной фокусировкой, а к началу 60-х годов – десятки типов пакетированных ЛБВ с уровнями мощности от десятков милливатт до двадцати ватт, охватывающие весь сантиметровый диапазон длин волн.

На границе 1950–1960-х годов появляются космические ЛБВ для первых отечественных спутников связи. Благодаря усовершенствованию технологических процессов и оборудования, внедрению машинных методов проектирования стало возможным создание космических ЛБВ для спутников связи последующих поколений. Если первые ЛБВ обеспечивали минимальную наработку в 5...10 тыс. ч, то ЛБВ для спутника связи «Горизонт», транслировавшего в 1980 году Олимпийские игры из Москвы на весь мир, обеспечивала не менее чем трехлетний срок активного существования аппаратуры (около 30 тыс.ч). Современные отечественные космические ЛБВ, работающие в различных участках сантиметрового диапазона с выходной мощностью от единиц до сотен ватт, обеспечивают срок активного существования бортовой аппаратуры ретрансляторов на спутниках связи в десять и более лет.

Развитие техники ламп бегущей волны для РЛС в СССР вплоть до 1980 года по темпам уступало зарубежному, главным образом, из-за конкуренции с успехами в области многолучевого клистроостроения. Однако требования многофункциональности бортовых радиолокационных прицельных комплексов самолетов-истребителей стимулировали разработки в этом актуальном техническом направлении. Используя все достижения технологии клистроостроения, передовые научные коллективы к середине 1980-х годов создали и внедрили в производство образцы ЛБВ, не уступающие лучшим зарубежным аналогам.

Особый интерес представляют многолучевые так называемые «прозрачные» ЛБВ для систем связи и многофункциональных РЛС. Эти приборы обеспечивают широкий набор режимов работы передатчика, вплоть до непрерывного, при меньших в 1,5–2 раза напряжениях питания. На базе «прозрачной» ЛБВ был создан экспериментальный образец передатчика многофункциональной РЛС с общей массой 27 кг при выходной импульсной мощности в режиме обзора 5 кВт (скважность – 3) и в режиме подсвета около 1 кВт при длительном непрерывном излучении. Этот тип ламп отличается также очень низким уровнем шума в области доплеровских частот.

Широкое распространение начиная с 1970-х годов получили ЛБВ средней мощности для спутников связи. Наибольшее количество разработок в направлении ЛБВ проводилось в области широкополосных ламп, предназначенных главным образом для аппаратуры постановки активных помех. Технология их изготовления и основные параметры близки к зарубежным аналогам.

Космические ЛБВ обладают высоким (до 60 %) КПД, большим коэффициентом усиления (40...60 дБ), малыми амплитудными и фазовыми нелинейными искажениями усиленного СВЧ-сигнала, малыми габаритами и массой (до 1 кг). Минимальная наработка таких ЛБВ, как правило, превышает 100 тыс. ч.

В последующие годы существенно возрос уровень выходной мощности пакетированных ЛБВ для аппаратуры радиоэлектронной борьбы. Разработаны широкополосные (до октавы) ЛБВ с мощностью до 500 и даже 1000 Вт на различных участках сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн.

В середине 1960-х годов были созданы первые отечественные мощные ЛБВ 3- и 4-см диапазонов длин волн на замедляющих системах типа цепочки связанных резонаторов с выходной мощностью 1...2 кВт в непрерывном режиме. ЛБВ предназначались для наземных базовых станций спутниковой связи, тропосферной связи, наземных и морских станций широкополосных помех с полосой частот 18 %.

Следующий этап развития мощных ЛБВ – создание пакетированных ламп с высоким КПД, выдерживающих жесткие механические и климатические воздействия, для помехозащищенной высокостабильной аппаратуры связи. Первая отечественная пакетированная ЛБВ 5-см диапазона с мощностью 1,5 кВт, КПД 25 % стала основой серии ламп 7-, 3- и 1-см диапазонов с шириной полосы рабочих частот 500 МГц, долговечностью до 3 тыс. ч. Особенностью этих приборов является их унификация по параметрам питания, что значительно облегчило разработку современной аппаратуры спутниковой и тропосферной связи.

Значительные успехи достигнуты в области создания мощных многорежимных усилителей для бортовых РЛС на базе цепочек ЛБВ с выходной многолучевой «прозрачной» ЛБВ, позволяющих обеспечивать перепад мощностей 5...10 дБ при переходе из режима поиска в режим подсвета. Такие цепочки имеют существенно более низкие рабочие напряжения, более высокий промышленный КПД и более широкую полосу рабочих частот по сравнению с другими типами многорежимных СВЧ-усилителей. Одним из преимуществ такого построения СВЧ-передатчика является отсутствие необходимости подстройки напряжения и входной мощности при всех режимах его работы. В диапазоне рабочих частот 3 и 2 см получен уровень выходной импульсной мощности 30 кВт при средней мощности 1...2 кВт, усиление более 50 дБ, КПД 35...40 % и полоса рабочих частот 7...10 %.

Типичные образцы отечественных ЛБВ различных классов показаны на рис. 7. Там же приведены их основные характеристики и применяемость в отечественной радиоаппаратуре.

### ПРИБОРЫ СВЧ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Вакуумные генераторы СВЧ малой мощности используются в качестве гетеродинов и задающих генераторов в бортовых, наземных радиоустройствах. В 1950-х годах наиболее распространенными маломощными приборами СВЧ были отражательные клистроны и лампы обратной волны. Отличительной особенностью этого вида приборов является наличие у них электронной перестройки частоты колебаний, что позволяло в аппаратуре простым способом обеспечивать быструю автоматическую подстройку частоты колебаний путем изменения питающего напряжения. В 1950–1975 годах была создана и выпускалась промышленностью широкая номенклатура таких вакуумных приборов. Приборы работали в диапазоне частот 3...14 ГГц, имели мощность от десятков до сотен милливатт. Диапазон электронной перестройки частоты был

Мощные ЛБВ на цепочке связанных резонаторов — широкополосные вакуумные приборы СВЧ с уровнем мощности до нескольких десятков киловатт, применяемые в системах радиопротиводействия, дальней, тропосферной и космической связи, многоцелевой радиолокации, ракетно-зенитных комплексах.

НПП \*Исток<sup>®</sup> разрабатывает и выпускает для системы РПД мощные ЛБВ непрерывного действия с мощностью более 1 кВт в 20 % рабочей полосе в 3-см диапазоне длин волн, серии мощных пакетированных приборов для систем дальней, космической и тропосферной связи. Применение в ЛБВ ЗС типа "встречные штыри" и утилизированной магнитной системы позволило уменьшить массу приборов в 2,5 раза. Для связанных систем, работающих в широком диапазоне частот (до 40 %) в режиме одновременного усиления большого числа сигналов, разработана спиральная ЛБВ непрерывного действия с выходной мощностью 1,2 кВт.

Создано новое направление — многолучевые "прозрачные" ЛБВ. Это позволило реализовать многолучевость передающих систем по выходной мощности. Разработан ряд цепочек приборов, состоящих из предварительной ЛБВ и выходной "прозрачной" ЛБВ, которые обеспечивают регулировку мощности от сотен ватт до нескольких десятков киловатт, высокой КПД и широкую полосу при сравнительно низких питающих напряжениях.

Созданы импульсные ЛБВ миллиметрового диапазона с выходной мощностью 20 Вт в диапазоне 3 мм и 2 кВт в диапазоне 8 мм. Для самолетных РПС разработана серия ЛБВ с низковольтным сеточным управлением, многоступенчатыми коллекторами и коэффициентом усиления до 60 дБ.

Всего разработано 42 типа ЛБВ.



ЛБВ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ



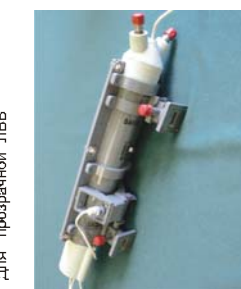
САМОЛЕТНАЯ ЛБВ



ЛБВ ДЛЯ РПД

Параметры	ЛБВ непрерывного действия	Импульсная ЛБВ	Спиральная ЛБВ непрерывного действия	Многолучевая "прозрачная" ЛБВ	ЛБВ миллиметрового диапазона
Рабочий диапазон, ГГц	4 - 14,5	8 - 17	5,5 - 8,5	8 - 14,5	27 - 94
Выходная непрерывная мощность, кВт	1,5 - 2	—	1,2	—	0,15 - 0,02
Выходная импульсная мощность, кВт	—	0,3 - 10	—	5 - 30	2 - 0,02
Полоса рабочих частот, %	0,5 - 20 типовой 10	10	40	10	5 - 0,3
Коэффициент усиления, дБ	40 - 40	40 - 60	40	10 - 13	30 - 40 - 10*
КПД, %	27	26 - 35	30	30 - 35	—
Рабочее напряжение, кВ	10 - 11	8 - 30	11 - 12	8 - 25	25 - 18
Напряжение модуляции, % от ускоряющего	—	3 - 10	—	10 - 15	10 - 12

\*Для "прозрачной" ЛБВ



СПИРАЛЬНАЯ ЛБВ



МНОГОЛУЧЕВЫЕ "ПРОЗРАЧНЫЕ" ЛБВ



МИЛЛИМЕТРОВАЯ ЛБВ НА 93 ГГц

ПРИМЕНЕНЫ В СИСТЕМАХ ТРОПОСФЕРНОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ "ЛИВЕНЬ", СИСТЕМАХ РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ, ЗЕНИТНО-РАКЕТНОМ КОМПЛЕКСЕ "ПАНЦИРЬ", СИСТЕМЕ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ "БОЛИД".

Рис. 7. Мощные лампы бегущей волны

в пределах 8...10 %. Лампы обратной волны работали как в сантиметровом диапазоне, так и миллиметровом. Диапазон электронной перестройки частоты ЛОВ достигал 40 %.

Вакуумные генераторы СВЧ малой мощности используются в устройствах радиолокации, радиоразведки, радиомаяках, радиовзрывателях, системах связи и телевидения, измерительной и медицинской аппаратуре. Было разработано более 200 типов таких приборов, которые применялись в более чем 65 видах аппаратуры. Типичные представители этого класса приборов показаны на рис. 8.

В 1970-х годах начинается постепенная замена маломощных вакуумных генераторов СВЧ твердотельными. В отличие от вакуумных генераторов, для нормальной работы которых были необходимы напряжения питания в несколько сотен вольт, твердотельные генераторы работают в диапазоне напряжений единицы-десятки вольт. Для их работы не требуется отдельный источник питания катода прибора.

Твердотельные генераторы малой мощности разрабатываются для бортовой и наземной аппаратуры военного и гражданского назначения. В качестве активных элементов в них используются диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды и, главным образом, биполярные и полевые транзисторы. Создаются в виде завершенной конструкции генераторы с электрической перестройкой частоты, стабилизированные по частоте, многочастотные модули, генераторы с фазовой автоматической подстройкой частоты. На основе биполярных и полевых транзисторов со стабилизацией диэлектрическими резонаторами разрабатываются генераторы с низким уровнем частотных шумов в доплеровском диапазоне частот. Разработаны генераторы с широким диапазоном электрической перестройки частоты в пределах 10...67 % на основе биполярных транзисторов и варакторных диодов.

К 1990-м годам было разработано более 120 типов твердотельных генераторов, которые нашли применение более чем в 30 системах радиоэлектронной аппаратуры. Твердотельные генераторы работали в диапазоне частот от 0,1 до 110 ГГц при выходной мощности от 3 до 300 мВт. Типичные представители этого класса приборов показаны на рис. 9.

На основе клистронов, полупроводниковых диодов и транзисторов СВЧ было разработано более 30 типов приборов, предназначенных для использования в качестве малошумящих задающих генераторов с выходной мощностью 0,1...1 Вт в передатчиках когерентных доплеровских РЛС в диапазоне 6...15 ГГц.

Применение таких генераторов обеспечило:

- возможность обнаружения целей на малых углах над горизонтом;
- повышенную помехозащищенность от активных помех и мешающих отражений от местных предметов;
- высокую разрешающую способность при когерентной обработке сигнала;
- возможность электрического переключения рабочих частот.

Типичные представители этого класса приборов и области их применения в аппаратуре показаны на рис. 10.

С развитием полупроводниковой технологии начались разработки твердотельных СВЧ-приборов различного функционального назначения. Так, были разработаны монолитные и гибридно-монолитные СВЧ-микросхемы для генерирования, усиления, преобразования сигнала, умножения и деления частоты. Созданные приборы работали в участках диапазона от 1 до 18 ГГц. В общей сложности было разработано более 75 типов схем СВЧ.

1950 -1975 годы – период широкого использования СВЧ вакуумных генераторов малой мощности. Разработано свыше 200 типов изделий, применяемых более чем в 65 системах бортовой и наземной аппаратуры, в радиолокации, радиоразведке, радиомаяках, системах связи и телевидения, радиозеркалах и т.д.

КЛИСТРОНЫ	$f_i$ ГГц	$U_{\text{разд}}$ В	$P_{\text{вых}}$ МВт	$\Delta M$ электр., %	$\Delta M$ механ., %
Отражательные с электронной перестройкой частоты	3 – 6	20 – 300	60 – 100	8 – 10	–
Отражательные с механической перестройкой частоты	3 – 14	300 – 400	60 – 100	0,4 – 0,6	40 – 60
Отражательные с повышенной выходной мощностью	4 – 9	750 – 850	500 – 1500	0,5 – 0,8	2,5 – 3
Пролётные	6 – 10	300 – 700	120 – 500	–	3 – 10



**ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ КЛИСТРОН "К-30"**  
Уникален высокой надёжностью при практически неограниченном числе (миллионы) быстрых (<1 с) механических перестроек частоты.



**ПРОЛЁТНЫЙ КЛИСТРОН "К-140"**  
Сочетает низкое напряжение резонатора (300 В) с высоким значением перестройки частоты (1С %, малым уровнем частотных шумов (<120 дБ/Гц на 5 кГц) и кратковременной нестабильностью <10<sup>-6</sup>.

**ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ КЛИСТРОН "КГ-22"**  
Не имеет аналогов по уровню частотных шумов (<130 дБ/Гц на 5 кГц).  
Повышенная мощность (0,6 Вт).



ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ	$f_i$ ГГц	$\Delta M$ , %	$P_{\text{вых}}$ МВт	$U_{\text{инт}}$ кВ
Сантиметровый и дециметровый диапазон. Магнитная фокусировка	0,1 – 20	5 – 30	20 – 50	0,2 – 2
Сантиметровый и миллиметровый диапазон. Периодическая электро-статическая фокусировка	1 – 40	20 – 40	50 – 1000	0,1 – 0,8
Миллиметровый диапазон. Пакезированные	35 – 260	15 – 60	6 – 40	0,4 – 1,9
Субмиллиметровый диапазон. Непакетированные	258 – 1400	15 – 60	0,5 – 10	1 – 6



**СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ НЕПАКЕТИРОВАННАЯ ЛОВ "ОВ-8,5"**

Диапазон рабочих частот:  
1176 – 1400 ГГц  
Выходная мощность:  
0,5 – 2 МВт  
Рабочее напряжение:  
1,5 – 6 кВ  
Фокусирующее магнитное поле: 1'000 Э



**ПАКЕТИРОВАННАЯ ЛОВ "ОВ-86" С МИНИАТЮРНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ**

Диапазон рабочих частот: 118 – 177 ГГц  
Выходная мощность: 6 – 20 МВт  
Рабочее напряжение: 500 – 500 В  
Общая масса: < 1кг

ВАКУУМНЫЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НАШЛИ СВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СЛЕДУЮЩИХ СИСТЕМАХ: "ТОПОЛЬ-2", "КЛАБ", "ДВИНА-А", "ТРОСТНИК", "РЕЗЕДА-Б", "ШМЕЛЬ "КУРС", "ФИЛИН", "ТАНГЕНС", "НЕЗАБУДКА", С-300 И Т.Д.

Рис. 8. Вакуумные генераторы малой мощности

В 70-х годах начались разработки твердотельных генераторов малой мощности для бортовой и наземной аппаратуры военного и гражданского назначения. Разработано более 120 типов изделий, применяемых в более чем 30 системах РЭА.

● ГЕНЕРАТОРЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

Основные параметры	$f_c$ , ГГц	$\Delta f/f$ , %	$S$ , МГц/В	$P_{\text{вых}}$ , мВт
На биполярных и полевых транзисторах	0,1 – 14	10 – 67	5 – 500	10 – 300
На диодах Ганна и ЛПД	8 – 110	10 – 40	50 – 900	3 – 100

● ГЕНЕРАТОРЫ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ПО ЧАСТОТЕ

Основные параметры	$f_c$ , ГГц	$\delta f/f$ , отн. ед	$G_{\text{ш}}$ , на 10 кГц, дБ/Гц	$P_{\text{вых}}$ , мВт
На биполярных и полевых транзисторах с диэлектрическими резонаторами	1 – 18	$1 \cdot 10^{-4}$	-(85 – 118)	10 – 130
Кварцевые генераторы	0,05 – 0,4	$5 \cdot 10^{-5}$	-(150 – 160)	10 – 500
На лейкокапфирных резонаторах	7 – 10	$5 \cdot 10^{-4}$	-140	10 – 50

● МНОГОЧАСТОТНЫЕ МОДУЛИ

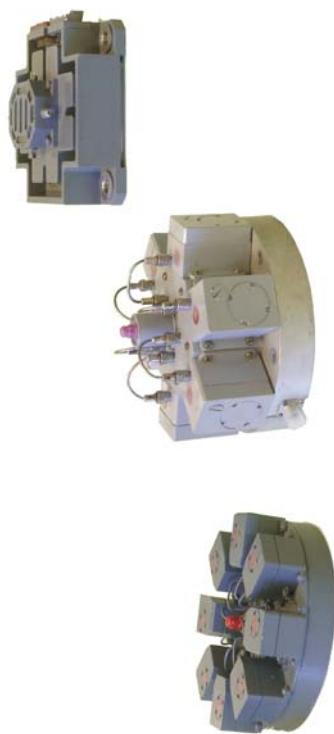
Основные параметры	$f_c$ , ГГц	$\Delta f/f$ , %	$\delta f/f$ , отн. ед	$G_{\text{ш}}$ , на 10 кГц, дБ/Гц	$\tau_{\text{пер}}$ , мкс	$P_{\text{вых}}$ , мВт
Многогенераторные модули с быстрым переключением частоты	3 – 18	5 – 20	$2,5 \cdot 10^{-4}$	-(95 – 115)	1 – 3	5 – 50
Генераторы с ФАПЧ	1 – 12	—	$1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-8}$	-(90 – 110)	—	10 – 300
Синтезаторы частот*	1 – 18	1 – 10	$1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-8}$	-(75 – 110)	50 – 1000	10 – 130



Генераторы с широким диапазоном электрической перестройки частоты на основе биполярных транзисторов и варакторных диодов со сверхрезким переходом.



Параметрический ряд высокостабильных СВЧ-генераторов на биполярных и полевых транзисторах со стабилизацией частоты диэлектрическими резонаторами, отличающихся низким уровнем частотных шумов ( $G_{\text{ш}}$ ) в доплеровском диапазоне частот.



Быстро переключаемые генераторные модули на 4, 6, 8 и более запертых фиксированных частот.

ШИРОКО ИСПОЛЬЗУЮТСЯ В СИСТЕМАХ: "РЕНЕР-М", "ЗООПАРК", "КРЕДО", "ВИСЕНЕ", "ЧЕЛНОК", "ИГЛА", "ШИМЭЛЬ", "ЭНЕРГИЯ-БУРАН", "МОСКИТ", "ОН-ИКС".

Рис. 9. Твердотельные генераторы малой мощности

ПРИМЕНЯЮТСЯ В КАЧЕСТВЕ ЗАДАЮЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ В ПЕРЕДАТЧИКАХ КОГЕРЕНТНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ РЛС

За время развития направления направления малошумящих высокостабильных задающих генераторов произошло существенное улучшение всех технических параметров приборов, качественно изменились их элементная база и технология изготовления, принципиальные электрические схемы и конструкции электродинамических систем, освоены новые диапазоны частот.

Создано 30 типов промышленных СВЧ-генераторов нового поколения на базе кlistронов, полупроводниковых СВЧ-диодов и транзисторов, микроволновых и микроролосковых электродинамических систем с высокочастотными стабилизированными резонаторами различных типов.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ:

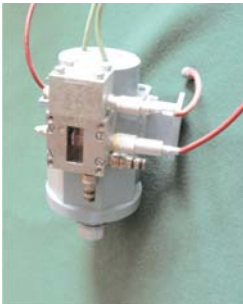
- применение сильно связанных многоконтурных систем;
- параметрическая (высокочастотный резонатор) стабилизация частоты;
- интеграция кlistронов и управляющих полупроводниковых элементов;
- комбинированная параметрическая и электрическая (системой ФАПЧ) стабилизация частоты;
- компенсация частотных шумов в режиме двойного использования высокочастотного резонатора с целью стабилизации частоты и выделения шумового сигнала;
- синтез высокостабильных частот с использованием опорного кварцевого генератора



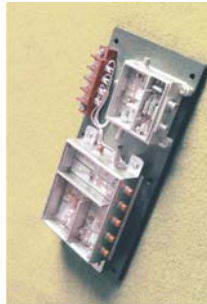
КРИСТАЛЛИННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ



КРИСТАЛЛИННЫЙ ГЕНЕРАТОР С КОМБИНИРОВАННОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ



ГЕНЕРАТОР НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЧАСТОТНЫХ ШУМОВ



СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ НА ТРАНЗИСТОРАХ С ТЕХНОЛОГИЕЙ ГИС

Типы генераторов	Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Стабильность частоты	Полоса рабочих частот, %	Уровень шумов, дБГц	Уровень амплитудных шумов, дБГц	Питающее напряжение, В
Кристалльные генераторы	5 – 15	0,3 – 1	$10^4 - 10^5$	0,5 – 1	-(100-140)	-(140-50)	1000-5000
Полупроводниковые генераторы	2 – 15	0,03 – 0,1	$10^4 - 10^5$	0,1 – 10	-(80-30)	-(130-40)	15 – 50

Представленные в таблице значения электрических параметров могут быть получены на любой из частот указанного диапазона в соответствии с требованиями конкретного применения и обеспечиваются выбором типа генератора и особенностями его построения.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКСТАБИЛЬНЫХ МАЛОШУМЯЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ ОБЕСПЕЧИВАЕТ:

- возможность радиолокации при малых углах цели над горизонтом;
- помехозащищенность от активных помех и мешающих отражений от поверхности Земли;
- высокую разрешающую способность при когерентном построении передатчика;
- возможность электрического переключения рабочих частот



ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С КОМБИНИРОВАННОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ ПО ТЕХНОЛОГИИ ГИС



ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ (ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ) СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ



ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЧАСТОТНЫХ ШУМОВ

ПРИМЕНЕНЫ В РАКЕТНО-ЗЕНИТНЫХ КОМПЛЕКСАХ С-200Д, С-300ВМ, С-300П, С-300В, "ТОР", БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ С-23, С-23МЛ, СИСТЕМАХ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ "КИНЖАЛ", "ПОЛИМЕНТ-РЕДУТ".

Рис. 10. Малошумящие задающие генераторы



В конце 1970-х годов в маломощных генераторах и усилителях различного назначения (приемные устройства радиотехнических и связных средств, измерительная аппаратура и др.) вакуумные приборы СВЧ были полностью заменены на твердотельные полупроводниковые приборы. Эта замена позволила на порядок повысить надежность устройств СВЧ и существенно сократить величину питающих напряжений, повысив КПД устройств, при значительном улучшении массогабаритных характеристик.

#### КОМПЛЕКСИРОВАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ СВЧ-ТЕХНИКИ\*

Постоянное усложнение задач, решаемых современными средствами локации, навигации, управления и связи, требует создания все более сложных по своей структуре СВЧ-сигналов. Их формирование и первичная обработка осуществляются СВЧ-частью приемопередатчика. Она состоит из цепочек (комплексов) СВЧ-приборов, соединенных между собой различными регулирующими и развязывающими пассивными СВЧ-элементами. В зависимости от степени сложности сигнала в состав цепочек могут входить СВЧ-приборы, способные генерировать, преобразовывать, модулировать, усиливать как излучаемый, так и гетеродинный СВЧ-сигналы.

Традиционно, до 1970-х годов, устройства СВЧ, входящие в состав этих цепочек, поставлялись потребителю в виде отдельных приборов. Для обеспечения нормальной работы аппаратуры параметры СВЧ-приборов в составе цепочки должны быть взаимно согласованы. Так как значения параметров приборов каждого типа имеют естественный (по нормальному закону) разброс, то для обеспечения взаимозаменяемости приборов при их эксплуатации это согласование должно было проводиться по типовым характеристикам приборов. При этом мог не обеспечиваться оптимальный режим работы для каждого отдельного экземпляра прибора. Кроме того, типовое согласование требовало больших запасов по сопрягаемым параметрам СВЧ-приборов и регулирующих устройств, обеспечивающих надежную стыковку приборов цепочки. Большие запасы приводили к значительному росту массы и габаритов как СВЧ-приборов, так и аппаратуры. Для получения наиболее высоких характеристик радиоэлектронной системы (РЭС) нередко требовалось при производстве аппаратуры проводить работы по оптимальному, а не типовому сопряжению СВЧ-приборов, входящих в цепочку. Иногда настройку СВЧ-тракта приходилось проводить практически при каждой смене СВЧ-прибора в эксплуатационных условиях.

Эти особенности применения сложных цепочек СВЧ-приборов очень усложняли их использование и сдерживали развитие современных и перспективных приемопередающих радиотехнических устройств, особенно тех, которые должны были обеспечить, начиная со второй половины XX века, высокие тактико-технические характеристики многофункциональных и, особенно, бортовых РЭС.

Решение этой проблемы в значительной степени было обеспечено разработкой и производством отечественной электронной промышленностью комплексированных изделий (КИ), созданных в начале 1970-х годов в НПО «Исток». Комплексированное изделие представляет собой взаимозаменяемое компактное устройство, состоящее из двух или более активных элек-

---

\* При написании этой части статьи был использован материал, подготовленный Э. А. Гельвичем.

тронных приборов СВЧ и пассивных СВЧ-элементов, функционально и конструктивно связанных между собой. Настройка КИ производится специалистами в условиях завода – изготовителя СВЧ-приборов. СВЧ-приборы в КИ сопрягаются не по типовым, а по индивидуальным характеристикам, т.е. подбор приборов производится селективно по их функционально связанным параметрам. Индивидуальное сопряжение и селективный подбор приборов в условиях производства позволяют значительно уменьшить величину необходимых запасов по сопрягаемым параметрам приборов, в том числе и за счет уменьшения деградации параметров, вносимой трактом и регулирующим устройством, необходимым в аппаратуре при сопряжении приборов по их типовым характеристикам. В результате функциональной интеграции появляется возможность использования управляющей обратной связи внутри КИ, что позволяет компенсировать влияние внешних дестабилизирующих факторов в широких пределах, сохраняя значения выходных параметров устройства вблизи их номинальных значений. В частности, как правило, удается существенно расширить допуск на нестабильность питающих напряжений, исключив необходимость их стабилизации.

Особенности функциональных связей в КИ СВЧ позволяют влиять на характеристики входящих в них СВЧ-приборов и пассивных СВЧ-элементов. В частности, достигается значительное уменьшение массы и габаритов благодаря сокращению запасов по параметрам СВЧ-приборов и резкому уменьшению необходимой амплитуды регулировки управляющих устройств или их исключению.

Такой принцип построения КИ СВЧ позволил:

- резко уменьшить массогабаритные характеристики СВЧ бортовых передатчиков;
- реализовать в одном устройстве следующие функции: генерацию, усиление, переключение, умножение, преобразование формируемых сигналов и их фильтрацию;
- оптимизировать режимы работы входящих в КИ приборов и получить наилучшие показатели по выходным параметрам, в частности минимальные уровни шумов и искажений;
- повысить эксплуатационную надежность;
- снизить требования к стабильности первичных источников питания в передатчике;
- исключить необходимость регулировки приборов КИ в условиях эксплуатации.

Перечисленные положительные свойства стали возможными благодаря селективному согласованию в КИ СВЧ-параметров функционально связанных между собою СВЧ-приборов.

Вначале комплексированные изделия строились на основе только электровакуумных приборов СВЧ. В дальнейшем, с развитием полупроводниковых генераторных и усилительных СВЧ-приборов, а также гибридно-интегральной и гибридно-монокристаллической технологий задающая часть КИ стала формироваться на основе твердотельных приборов, включая генераторы и синтезаторы частот, твердотельные промежуточные усилители, умножители частоты, смесители и преобразователи частоты, фильтры широкого назначения, регуляторы и оптимизаторы выходной мощности, переключатели рабочих частот и управляющих сигналов, устройства индикации параметров и защиты узлов от перегрузок и др.

Широкополосное усилительное КИ, как правило, состоит из предварительного полупроводникового усилителя, возбуждающего мощный выходной вакуумный прибор, обычно многолучевой клистрон, или предвыходную ЛБВ.

Отличительной чертой мощного КИ СВЧ (МКИ СВЧ) является наличие в его составе одного или нескольких мощных электровакуумных приборов и предварительной (задающей) СВЧ-части. Так, одно из созданных МКИ СВЧ для бортового радиолокатора самолета выполняло

функции мощного малошумящего двухчастотного усилителя импульсного сигнала. Выходная мощность МКИ, работающего в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн, составляла 100 кВт в импульсе при скважности 300 и коэффициенте усиления более 60 дБ в полосе частот 1 %. В качестве предварительных усилителей были применены узкополосные усилительные клистроны (что обеспечивало хорошую фильтрацию сигнала) и на выходе – мощный широкополосный усилительный МЛК с рабочим напряжением не более 20 кВ. Это бортовое МКИ отличалось компактностью конструкции и малой массой (8 кг). Эквивалентная СВЧ-часть передатчика, сконструированного по традиционному принципу, имела массу около 40 кг и занимала больший, почти на порядок, объем. В дополнение к экономии по массогабаритным характеристикам МКИ позволяло в два раза увеличить число рабочих частот радиолокатора.

Другим примером широкополосного МКИ является изделие с полосой усиления 6 %, в котором в качестве предварительного усилителя применялись лампа бегущей волны и полупроводниковые оптимизаторы входной мощности мощного выходного усилителя на многолучевых клистродах.

Положительные свойства КИ:

- широкая мгновенная полоса усиливаемых частот (6 %), позволяющая решить задачу частотного электронного сканирования луча по углу места в течение одного импульса;
- высокий уровень импульсной мощности (до 75 кВт) и средней выходной мощности (более 1,5 кВт), позволяющий решить задачу обнаружения целей с малой эффективной поверхностью рассеивания;
- низкий уровень вносимых фазовых и амплитудных шумов, дающий возможность решить задачу обнаружения низколетящих целей;
- низкое напряжение анода мощного выходного усилителя (15 кВ) и способность работы при значительных изменениях питающих напряжений ( $\pm 5\%$ ), что позволяет исключить крупногабаритный стабилизатор напряжения из состава передатчика.

Отсутствие необходимости стабилизировать напряжение мощного источника питания, уникальные массогабаритные (масса – 20 кг) и электрические параметры МКИ позволили создать многоцелевой высокопотенциальный мобильный радиолокатор обнаружения ПВО ЗРК «Тор» с электрическим сканированием луча в пространстве.

Спектр функциональных возможностей современных КИ, включающих как вакуумные, так и полупроводниковые приборы различных типов, чрезвычайно широк. Он определяется гибкой структурой КИ, соответствующей содержанию конкретных задач, решаемых прибором. К основным возможным функциям, выполняемым КИ, следует отнести: генерирование опорного сигнала, преобразование частот, сдвиг и умножение частот, формирование излучаемого и гетеродинных сигналов, их амплитудную и (или) фазочастотную модуляцию, усиление сформированных сигналов до заданного уровня мощности. Компактные размеры КИ позволяют эффективно их использовать в малогабаритных бортовых системах.

Характерным представителем этого направления является КИ 2-сантиметрового диапазона длин волн. Изделие состоит из двух основных частей: твердотельного возбуждателя, изготовленного по гибридно-интегральной и гибридно-монокристаллическим технологиям, и выходного усилителя мощности на миниатюрном МЛК. КИ обеспечивает выходную импульсную мощность более 400 Вт (средняя мощность – 150 Вт) при КПД 25...30 % (без учета ВИП). Нестабильность частоты излучаемого сигнала – менее  $2 \cdot 10^{-4}$  при уровне частотных шумов на частоте

анализа 5 кГц не более 90 дБ/Гц и вносимых амплитудных и фазовых шумов -125 дБ/Гц на частотах анализа 5...500 кГц. Параметры КИ сохраняются в интервале температур от -50 до 70 °С. Масса КИ – не более 1,7 кг (без ВИП).

В общей сложности отечественной электронной промышленностью было создано более 30 типов КИ, которые работают в участках диапазона частот от 7 до 30 ГГц с полосой рабочих частот до 6 % и низким уровнем фазовых и частотных шумов.

Ниже в историческом плане рассматривается динамика развития принципов построения КИ СВЧ на конкретных разработках радиоэлектронной аппаратуры. Впервые к активному использованию принципов построения изделий СВЧ обратились в начале 1970-х годов, когда перед разработчиками авиационных радиолокационных прицельных комплексов (РЛПК) была поставлена задача обнаружения и поражения скоростной малозаметной цели на фоне земли. Ее решение осложнялось наличием сигнала, отражаемого земной поверхностью, величина которого на много порядков превышала сигнал от цели. Характеристики ранее созданных РЛПК с использованием передатчиков на мощных магнетронных СВЧ-автогенераторах не позволяли применить принцип селекции движущихся целей в связи со слишком большой нестабильностью частоты от импульса к импульсу. Необходимо было использовать усилительные цепочки с высокостабильным маломощным задающим генератором, в выходных каскадах которых использовались мощные усилители – клистроны или ЛБВ.

Головная организация НПО «Фазотрон» по созданию РЛПК для разрабатываемого истребителя МиГ-23 вместе со специалистами НПП «Исток» выбрали передатчик СВЧ, построенный на трехкаскадной клистронной цепочке. Совместными усилиями его удалось разместить в требуемых габаритных размерах. Такой трехкаскадный СВЧ-передатчик полностью соответствовал техническому заданию. Облеты подтвердили эффективность выбранного решения по выполнению требований по дальности обнаружения и сопровождения целей на фоне земли. Однако при этом возникла неучтенная проблема радиосовместимости групповых действий истребителей в заданном квадрате.

СВЧ-передатчик на клистроны излучал мощный сигнал только на одной несущей частоте, и заданные боевые совместные действия группы из четырех истребителей были невозможны из-за взаимных помех при работе по целям на фоне земли. Размещение четырех усилительных цепочек с тремя дискретными клистронами и соединяющей их между собой волноводной аппаратурой было физически невозможно в заданных размерах отсека самолета. Специалистами НПП «Исток» было предложено неординарное решение: используя возможности электронных технологий, разработать на базе НПП «Исток» комплексированное изделие «Альтернатива» в виде единого двухчастотного моноблока из трех клистронов и элементов их соединений, поставляемых по кооперации из НПО «Фазотрон». Предложенная миниатюризация СВЧ-передатчика позволила разместить в пределах тех же массогабаритных параметров РЛПК два моноблока «Альтернатива» и полностью удовлетворить всем тактико-техническим требованиям на истребитель МиГ-23МЛ. Серийные поставки моноблока были начаты заводом НПП «Исток» в 1975 г. и до 1980 года совместно с заводом «Генератор» (г. Киев) было поставлено на комплектацию и эксплуатацию самолетов более 5000 изделий. Так было создано первое комплексированное изделие СВЧ-техники (КИ СВЧ).

Решение по созданию комплексированных устройств для бортовых РЛПК было настолько удачным, что все дальнейшие разработки 70-х и 80-х годов были сделаны по этому принципу. Так, в 1975 г. в аварийном порядке было принято решение перепроектировать когерентный

СВЧ-передатчик радиолокационной системы «Заслон» для истребителя-перехватчика МиГ-31 с переводом его с дискретных цепочек на два СВЧ-моноблока: «Азов» – для станции обзора и «Верша» – для станции подсвета цели. Все работы были выполнены совместно с НИИП им. В. В. Тихомирова (г. Жуковский) в установленные сроки, и создана самолетная РЛС с пассивной фазированной антенной решеткой, что дало возможность впервые в мире поражать одновременно четыре цели ракетами с полуактивным наведением.

На рис. 11 показаны типичные представители КИ на основе вакуумных СВЧ-приборов для бортовой наземной и воздушной аппаратуры.

Развитие полупроводниковых генераторных и усилительных СВЧ-приборов и полосковой гибридно-интегральной и монокристаллической технологий привело к дальнейшей миниатюризации КИ СВЧ с одновременным расширением их функциональных возможностей. В состав КИ СВЧ на основе вакуумных приборов дополнительно вошли: полупроводниковые умножители частоты; смесители и преобразователи частоты; фильтры широкого назначения; регуляторы и оптимизаторы выходной мощности; переключатели рабочих частот управляющих сигналов; устройства индикации параметров и защиты узлов от перегрузок и др.

КИ СВЧ выполняют функции генерации, переключения, умножения, преобразования, фильтрации, усиления, оптимизации, защиты. В результате в 3–5 раз увеличена средняя наработка КИ СВЧ, а также значительно снижено количество регламентных работ при эксплуатации СВЧ-части передатчиков РЛС. На рис. 12 приведены типичные представители многофункциональных КИ на основе мощных вакуумных и твердотельных приборов СВЧ, их характеристики и области применения.

#### ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА И УСТРОЙСТВА НА ЕЕ ОСНОВЕ

Несмотря на продолжающееся развитие традиционных и новых направлений вакуумной СВЧ-электроники, создание перспективной радиоэлектронной аппаратуры 5-го поколения базируется главным образом на достижениях твердотельной СВЧ-техники, и в частности на широком использовании монокристаллических СВЧ-микросхем.

С развитием полупроводниковой технологии на предприятиях электронной промышленности стали внедряться принципы и технологии, присущие радиоэлектронным отраслям. Такое положение было обусловлено физической общностью процессов изготовления полупроводниковых приборов СВЧ и их монтажа в аппаратуре. Стали реальными разработка и изготовление на предприятиях электронной промышленности на основе полосковой гибридно-интегральной и гибридно-монокристаллической технологий сложных многофункциональных твердотельных устройств. С использованием различных вариантов схемного объединения в одном корпусе нескольких однофункциональных твердотельных узлов создавались многофункциональные модули. Была разработана гамма приемных и приемопередающих твердотельных модулей, модулей для фазированных антенных решеток. Гибридно-интегральные модули в системах радиоразведки, радиолокации, станциях активных помех, головках самонаведения, аппаратуре связи обеспечивали: прием и передачу сигналов, активную и пассивную защиту входных малошумящих усилителей, управление уровнем усиления, фазой приемных и передающих каналов, преобразование входных сигналов в сигналы промежуточной частоты, усиление по промежуточной частоте, детектирование сигнала.

- Созданные в НИП "Исток" в 70-х годах в электровакуумной промышленности новые оригинальные направления комплексированных изделий СВЧ позволило:
- резко уменьшить массогабаритные характеристики СВЧ-части бортовых передатчиков;
  - одновременно значительно увеличить число выполняемых функций: генерацию, усиление, переключение, преобразование формуемых сигналов;
  - оптимизировать режимы работы входящих в КИ приборов;
  - повысить эксплуатационную надёжность;
  - снизить требования к стабильности источников питания.

**РАЗРАБОТАНО 10 ТИПОВ КИ СВЧ**



МОЩНОЕ УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



МАЛОГАБАРИТНОЕ УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



ВЫСОКОСТАБИЛЬНОЕ МАЛОШУМЯЩЕЕ МАЛОГАБАРИТНОЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



УСИЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



ВЫСОКОСТАБИЛЬНОЕ МАЛОШУМЯЩЕЕ МАЛОГАБАРИТНОЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ

Параметры	КЛАСС КИ СВЧ		
	Усилительные	Усилительно-преобразовательные	Генераторно-усилительно-преобразовательные
Рабочий диапазон, ГГц	7,0 – 14	8,0 – 4	6,5 – 16
Полоса рабочих частот, %	1,5 – 6	1 – 6	1 – 3
Выходная импульсная мощность передающего канала, кВт	20 – 20	4,5 – 25	15 – 150
Длительность импульса, мкс	45 – 200	0,55 – 800	0,5 – 17
Связность	200	2,5 – 2	2,5 – 65
Уровень фазовых шумов в сигнале передающего канала, дБ/Гц	минус 90/2,5 мГц	минус 90/2 мГц	минус 90/1 мГц
Уровень частотных шумов в сигнале гетеродинного канала, дБ/Гц	–	минус 135/5 мГц	минус 90/2,5 мГц
Частота входного сигнала ПЧ, МГц	–	36 – 1000	36 – 1000
Количество рабочих частот	–	–	1 – 4

ПРИМЕНЕНЫ В ЗРК С-300В, "ТОР", "ТОР-1М", В БОРТОВЫХ РЛС СИСТЕМЫ "ЗАСЛОН", В РЛС МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ "ФОРУМ", "КИНЖАЛ".

Рис. 11. Комплексированные изделия на основе электровакуумных приборов СВЧ

Развитие полупроводниковых генераторных и усилительных СВЧ-приборов и плосковой гибридно-интегральной и гибридно-монолитной технологий привело к дальнейшей миниатюризации КИ СВЧ с од-новременным расширением их функциональных возможностей.

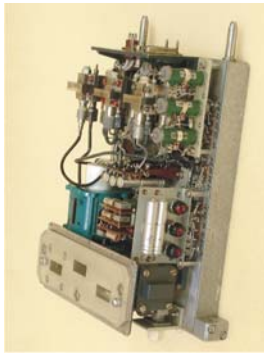
В состав КИ СВЧ на основе вакуумных приборов дополн-ительно вошли:

- полупроводниковые умножители частоты;
- смесители и преобразователи частоты;
- фильтры широкого назначения;
- регуляторы и оптимизаторы выходной мощности;
- переключатели рабочих частот и управляющих сигналов;
- устройства индикации параметров и защиты узлов от перегрузок и др.

КИ СВЧ выполняют следующие функции: генерация, переключение, умножение, преобразование, фильтрация, усиление, оптимизация, защита.

В результате в 3–5 раз увеличена средняя наработка КИ СВЧ, а также значительно снижено количество регламентных работ при эксплуатации СВЧ-части передатчиков РЛС.

Разработано 16 типов КИ СВЧ.



ЗАДАЮЩЕЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



МОЩНЫЕ УМНОЖИТЕЛЬНО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КИ СВЧ ДЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ



ЗАДАЮЩЕЕ МАЛОШУМЯЩЕЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ

Параметры	КИ для бортовой аппаратуры	КИ для мобильной аппаратуры
Рабочий диапазон, ГГц	8,0 – 14	8,5 – 16
Полоса рабочих частот, %	1 – 6	1 – 3
Выходная импульсная мощность передающего канала, кВт	0,002 – 25	0,3 – 65
Длительность импульса, мкс	0,5 – 200	0,5 – 60
Сквжность	5 – 300	3 – 140
Уровень фазовых шумов в сигнале передающего канала, дБ/Гц	Минус 90/1 кГц – минус 130/4 кГц	Минус 90/0,2 кГц
Уровень частотных шумов в сигнале гетеродинного канала, дБ/Гц	Минус 115/4 кГц	Минус 60/0,2 кГц
Частота входного сигнала ПЧ, МГц	600	28 – 1000
Количество рабочих частот	4 – 24	1 – 9
Время переключения частоты, с	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$



МОЩНОЕ ШИРОКОПОЛОСНОЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



ПЕРЕДАЮЩЕЕ КИ СВЧ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

ПРИМЕНЕНЫ В ЗРК С-300В, С-300ВМ, "ИМБИРЬ", В БОРТОВЫХ РЛС СИСТЕМ "РАВЕНСТВО", "ОКО".

Рис. 12. Комплектированные изделия на основе электровакуумных и твердотельных приборов СВЧ

Многофункциональные твердотельные модули разрабатывались для работы в участках диапазона частот от 2,7 до 15 ГГц. Были разработаны когерентные передающие, приемные и приемопередающие модули и блоки миллиметрового диапазона длин волн для применения в перспективных радиолокационных комплексах.

Таким образом, отечественная твердотельная СВЧ-техника охватывает все необходимые технические направления и в ряде из них имеет достижения, близкие к мировому уровню. Так, созданный образец малогабаритного трехканального СВЧ-приемника в гибридном исполнении для моноимпульсной обработки сигнала, входящего в состав антенного моноблока АРГС РВВ-АЕ (о нем подробнее будет рассказано дальше), по совокупности характеристик практически не уступает мировому уровню.

Параметры усилителей мощности, особенно в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн, заметно ниже мирового уровня. Основной причиной этого является состояние технологии производства мощных транзисторов и их основных исходных материалов. С целью повышения технического уровня отечественных мощных транзисторов СВЧ реализуется проект пилотной линии по производству монокристаллических СВЧ-микросхем с топологическими нормами 0,1...0,2 мкм и организации производства гетероструктур на основе арсенида и нитрида галлия. Проектируемые производственные мощности пилотной линии позволят удовлетворить потребности радиоэлектронной промышленности до 2010 года (рис. 13).

Надо отметить, что в США объем выпуска приборов на основе арсенида галлия в 2001 году превысил 3,5 млрд долл., причем применение этих приборов в аппаратуре промышленных средств связи составило более 60 %, а в военной аппаратуре – лишь 4 %. Широкое использование GaAs-технологии в промышленной аппаратуре обеспечивает полномасштабную ритмичную загрузку производственных мощностей твердотельной СВЧ-электроники. При этом резко повышается эффективность инвестиций в микроволновые технологии и существенно снижается себестоимость продукции, в том числе и военного назначения. В отечественной практике разработки и применения СВЧ электронных приборов проводились в основном (более 80 %) в интересах военной техники.

Развитие твердотельной СВЧ-электроники, подобно тому, как развитие больших интегральных микросхем способствовало широкой реализации цифровых методов обработки информации, открывает возможности широкого применения активных антенных фазированных решеток (АФАР).

Разработка АФАР имеет длинную историю, но практическая их реализация стала возможна только в последнее десятилетие в связи с успехами в создании монокристаллических (твердотельных) СВЧ-микросхем. Активные твердотельные антенные решетки позволяют радикально повысить эксплуатационные характеристики фазированных антенн (надежность, КПД, удобство обслуживания) и гибкость управления, достигаемую благодаря удобству их комплексирования с современными специализированными и универсальными цифровыми вычислительными устройствами. Практически мгновенное перемещение луча в пространстве и широкие возможности управления формой диаграммы направленности делают эти антенные системы незаменимыми при работе по малозаметным высокоскоростным целям, к которым относится современное высокоточное оружие. Однако широкое использование АФАР сдерживается их стоимостью, которая резко увеличивается с уменьшением длины волны. Поэтому создание больших антенн в коротковолновой части сантиметрового диапазона оказывается очень дорогим удовольствием, а в миллиметровом – просто разорительно.



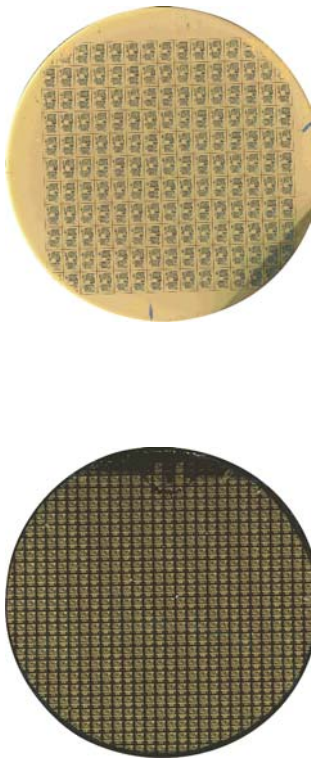
В настоящее время в НПП "Исток" используются технологии изготовления:

- гибридно-монокристаллических интегральных схем (ГИИС) на пластинках монокристаллического сапфира;
- малошумящих и мощных транзисторов с длиной затвора 0,5 мкм;
- металлизированных отверстий в арсениде галлия;
- "воздушных мостов" для межпересечений; резисторов, конденсаторов и индуктивностей для газовой части МИС СВЧ.

Для достижения паритета в развитии отечественной технологии монокристаллических СВЧ-микросхем разрабатываются:

- технология изготовления Т-образного затвора длиной 0,1 мкм;
- технология изготовления гетероструктур с высокой подвижностью электронов;
- чистые условия производства.

Рабочий диапазон частот, ГГц	$K_{\text{нп}}$ , дБ	$K_{\text{у}}$ , дБ	$P_{\text{max}}$ , мВт	Конструктив МИС ГМИС	Типы
<b>Монокристаллические интегральные схемы СВЧ</b>					
Усилители	1 – 18	2 – 4	10 – 20	50 – 1500	40
Преобразователи и смесители	1 – 15	10	0	15	7
Умножители и делители	1 – 18	–	0	20 – 80	8
Генераторы	4 – 12	–	–	25 – 125	19
<b>Транзисторы СВЧ</b>					
Малошумящие	1 – 40	1 – 3	6 – 10	5	2
Мощные	1 – 14	–	7 – 12	1000 – 2000	9



Для решения этих задач во ФГУП "НПП "Исток" в период 2002 – 2005 гг. будет построена первая в России пилотная линия по разработке и производству транзисторов и МИС СВЧ с разрешением 0,1 мкм и объемом выпуска 1 000 000 МИС СВЧ в год.

Создание этой линии решит задачу производства современных транзисторов типа HFET, pHEMT, nHEMT и МИС СВЧ на их основе в диапазоне 1–40 ГГц, что позволит удовлетворить самым высоким требованиями мирового уровня техники и обеспечить транзисторами и МИС СВЧ всех заинтересованных заказчиков.

ОБОРУДОВАНИЕ ПИЛОТНОЙ ЛИНИИ С РАЗРЕШЕНИЕМ 0,1 МКМ



Рис. 13. Твердотельные приборы и монокристаллические СВЧ-микросхемы

Фактор снижения стоимости становится одним из главных при проектировании современной АФАР. Он находится в противоречии с требованиями обеспечить высокие характеристики приемопередающего модуля (ППМ), в частности выходную мощность, усиление и плотность упаковки. Необходимо учесть, что большое влияние на стоимость оказывают ритмичность и объем выпуска однотипных модулей, а также использование унифицированных базовых технологий производства их элементов, и в первую очередь монолитных СВЧ-микросхем. Степень унификации и связанный с ней объем выпуска являются главными определителями цены ППМ. При этом нужно учитывать, что зависимость стоимости от объема выпуска не является линейной – она скачкообразна. Причем периодичность и высота скачков зависит как от унификации ППМ, так и от структуры технологического процесса, и степени автоматизации тестирования годной продукции.

Термин «унификация» применительно к элементам (СВЧ ППМ) и составным частям (группировки ППМ в антенной решётке) АФАР приобретает принципиально новое значение. Здесь нужно говорить не о привычной для нас конструктивной унификации, а о параметрической и технологической унификации. Без нее невозможно одновременное выполнение требований высокого потенциала, низкой стоимости и эксплуатационной надежности.

Параметрическая и технологическая унификация ограничивает сверху и снизу существующее конструктивное разнообразие элементов и составных частей АФАР и приводит к некоторым функциональным ограничениям в режимах ее работы. Тем не менее, между этими границами параметрической и технологической унификации остается достаточно пространства для конструктивных модификаций СВЧ ППМ и составных частей АФАР на их основе, которое позволяет результативно решать вопросы распределения СВЧ-сигналов, подводки первичного питания, цифрового управления и теплоотвода. Поэтому необходима тщательная проработка оптимальных путей построения АФАР в целом, ее элементов и составных частей.

Облик и параметры СВЧ-компонентов должны унифицироваться, исходя из структуры унифицированных СВЧ ППМ, их группировки в решетке и используемых в создаваемой пилотной линии базовых технологий МИС СВЧ и исходных материалов. Унификация рядов функциональных элементов ППМ без принятия решения об унифицированном облике и параметрах СВЧ ППМ и группировки в целом не решает проблемы. Возникающие ограничения в выборе конструктивного оформления должны быть приняты разработчиками АФАР как предельные рамки их свободы в выборе построения и характеристик АФАР в целом.

Особо следует отметить необходимость развития новых перспективных направлений отечественной твердотельной СВЧ-техники, и в первую очередь мощных транзисторов и МИС СВЧ на основе широкозонных полупроводниковых материалов. В этих актуальнейших направлениях интенсифицируются работы по инициативе министерства обороны США (программа WBGSTI под руководством DARPA) и по крупномасштабному многонациональному проекту KORRIGAN в Европе, в котором участвуют 7 стран: Франция, Италия, Голландия, Германия, Испания, Швеция, Великобритания. Руководителем проекта является французская фирма Thales Airborne Systems. Общая стоимость проекта – 40 млн евро. Согласно целям проекта, к 2009 г. планируется создать Единый европейский канал поставок, который обеспечит военную промышленность надёжными, отвечающими современному уровню развития GaN-приборами.

Следует отметить, что приведенный материал далеко не исчерпывает все направления твердотельной СВЧ-техники. В нем отсутствует раздел дискретных СВЧ-приборов  $L$ - и  $S$ -диапазонов, в которых головная организация НПП «Пульсар» имеет значительные достижения, не ус-

ступающие мировому уровню; не приведен обзор состояния ферритовой СВЧ-техники, которые, возможно, будут показаны в других разделах.

### РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АППАРАТУРА В ЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

После создания научного задела и разработок многофункциональных комплексированных изделий и твердотельных модулей СВЧ предприятия электронной промышленности, владеющие всем комплексом технических направлений СВЧ-техники и базовыми микроволновыми технологиями, вплотную подошли к проблемам СВЧ-системотехники и стали решать системные задачи в области создания радиотехнической аппаратуры.

В начале 1980-х годов к БРЛС истребительной авиации предъявили новые требования по обнаружению наземных целей и картографированию поверхности земли с разрешением 5...7 м на дальностях свыше 20 км. Одновременно с этим с 1976 года в США фирма «Хьюз» начала разрабатывать активную головку самонаведения для компактной ракеты класса «воздух–воздух» с миниатюрным автономным бортовым радиолокатором. Для решения этих задач и ликвидации назревающего отставания в техническом и технологическом уровне отечественной авиационной радиоэлектроники требовались не только создание новой элементной базы, повышение технологического уровня ее разработок и производства, но и поиск новых технических решений. Поэтому в июне 1980 года Комиссией Президиума СМ СССР по военно-промышленным вопросам был решен вопрос о начале научно-экспериментальной работы «Союз-Синтез» по созданию экспериментальных образцов БРЛС и активной головки самонаведения, не уступающих лучшим образцам авиационной техники США. Главной организацией-исполнителем научно-экспериментальной работы «Союз-Синтез» был назначен НИИ «Исток».

В ходе этой работы впервые в СССР были получены следующие результаты:

- разработана БРЛС с программируемой цифровой обработкой сигнала полностью на отечественной элементной базе;
- в ходе летных испытаний на летающей лаборатории подтверждена расчетная дальность обнаружения цели с ЭПР 5 м<sup>2</sup>, превышающая 200 км;
- проведено картографирование земной поверхности в реальном масштабе времени на дальностях 10...20 км с разрешением 7 м.

Для БРЛС были созданы многолучевые «прозрачные» ЛБВ и малошумящие малогабаритные электростатические усилители, не имеющие зарубежных аналогов. Отдельные технические решения и элементная база БРЛС использовались радиопромышленностью в последующих разработках РЛПК.

Успешно была закончена работа по активным радиолокационным головкам самонаведения (АРГС) (рис. 14) и продолжена в виде ОКР «Синтез 20» в составе ракеты «воздух–воздух» среднего радиуса действия. После проведения полного комплекса испытаний ракета с АРГС 50 была принята на вооружение в начале 1990-х годов.

С этого времени направление по разработке и выпуску АРГС стало одной из основных частей аппаратного направления НИИ «Исток», в котором достижения предприятия по миниатюризации и многофункциональности стали базой для получения успешного результата.

В период с 1998 по 2005 год выпущено и реализовано в виде экспортных поставок в составе ракеты РВВ-АЕ более 1500 изделий 50Э.

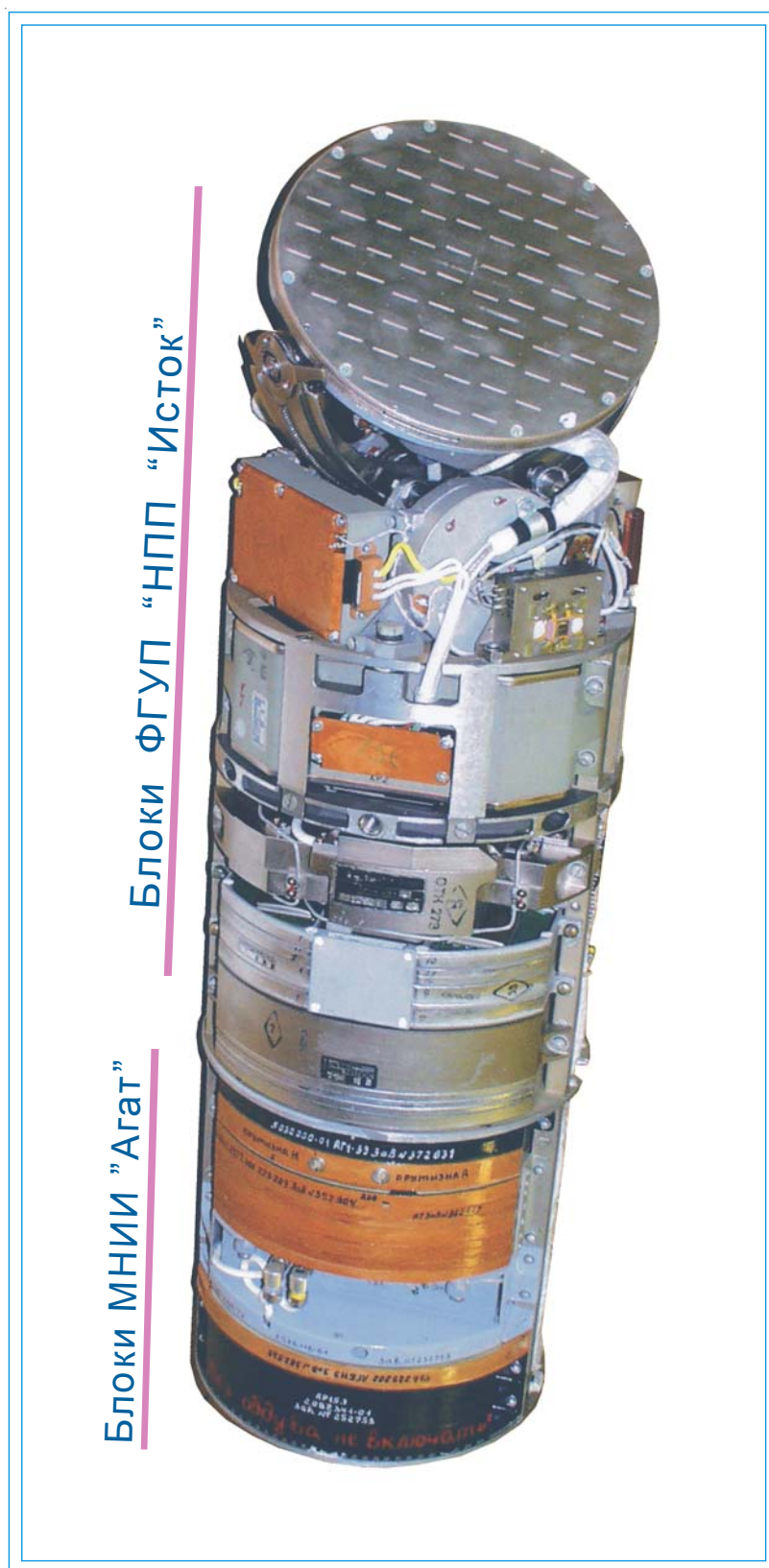


Рис. 14. Радиолокационная головка самонаведения 50Э (без обтекателя и корпуса)

АРГС типа 50Э обеспечивает:

- поиск, захват и сопровождение движущихся воздушных целей по целеуказаниям РЛС самолёта-носителя на начальном этапе полёта ракеты в инерционально-корректируемом режиме и активное самонаведение ракеты на цель на конечном этапе в любых метеоусловиях, при электронном противодействии противника, на фоне земной и водной поверхности (по принципу «пустил-забыл»);
- приём и дешифрацию сигналов по линии радиокоррекции от РЛС самолёта-носителя;
- самостоятельное измерение угловых координат и скорости цели, а также скорости сближения ракеты с целью;
- формирование и передачу по цифровой линии связи сигналов для систем управления полётом ракеты;
- активное самонаведение ракеты на цель с точностью, находящейся в пределах расчётного радиуса поражения цели боевой частью ракеты.

#### Тактико-технические данные АРГС типа 50Э

Дальность пуска (в составе ракеты РВВ-АЕ).....	до 100 км
Дальность захвата АРГС цели с ЭОП более 5 м <sup>2</sup> .....	не менее 16 км
Дальность действия ЛРК (с СУВ самолета типа МиГ-29)...	до 50 км

#### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СВЧ-ТЕХНИКИ

Микроволновые технологии и СВЧ-техника, основанная на их использовании, были, есть и остаются критическими базовыми технологиями, являющимися показателями принадлежности страны к самому высокому уровню технической цивилизации. Продукция этих технологий обеспечивает высокий уровень оборонной техники страны, ее информационных систем и гарантирует сохранение технического суверенитета. В связи с этим СВЧ-техника, безусловно, относится к наиболее приоритетным направлениям научно-технического и технологического развития отечественной элементной базы.

Корректный прогноз развития военной СВЧ-техники с поэтапной оценкой конкретных параметров становится возможным только при наличии прогнозных данных создаваемой на этих этапах перспективной аппаратуры в соответствии с будущей Государственной программой вооружения. В связи с отсутствием этих исходных данных можно провести лишь общий качественный анализ, ограничиваясь известными закономерностями научно-технического и технологического развития.

В основу анализа положена диаграмма областей применения современной СВЧ-техники в координатах «мощность–частота» в различных видах военной и гражданской радиоэлектронной аппаратуры (рис. 15) [1]. На рис. 16 приведены кривые предельно возможных потенциальных характеристик СВЧ-техники, полученные по результатам анализа закономерностей изменения во времени потенциальных коэффициентов  $P \cdot f^2$  (МВт·ГГц<sup>2</sup>) для всех известных классов СВЧ-техники. Потенциальный коэффициент физически представляет собой с точностью до постоянной удельную плотность мощности на основных узлах при-

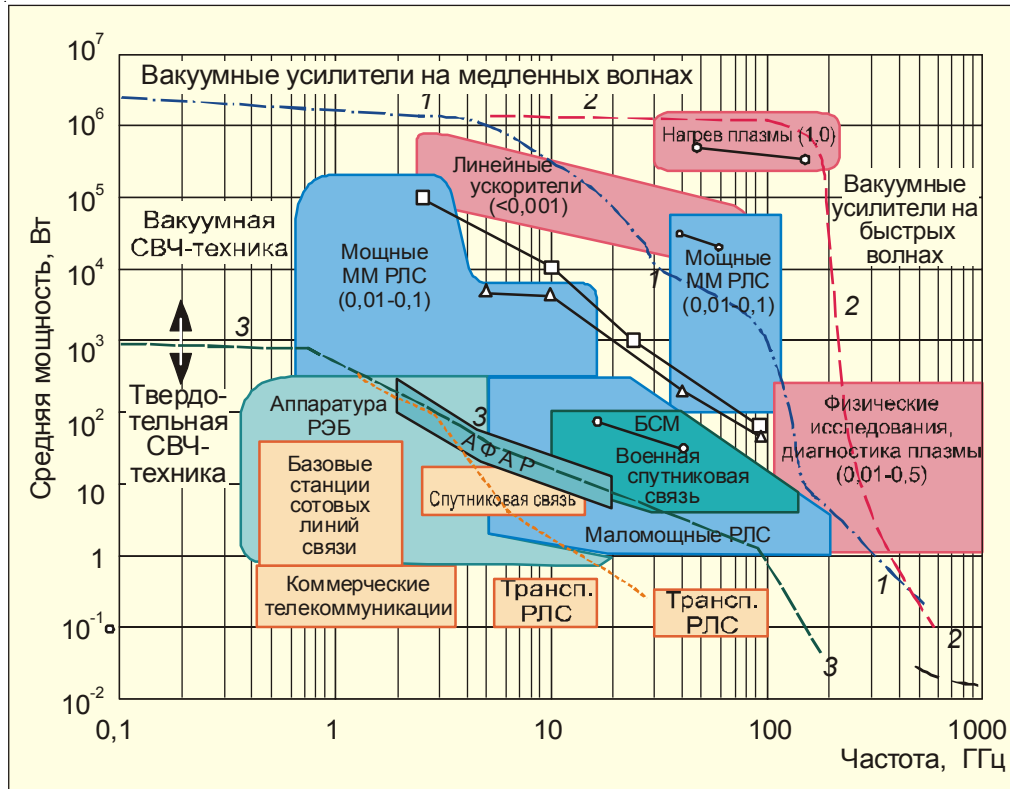


Рис. 15. Аппаратура и области применения современной СВЧ-техники (данные 2000 г.)

бора. В процессе совершенствования данного класса приборов увеличение  $P \cdot f^2$  происходит по S-образной кривой с резким ростом в начале и пологой частью, практически параллельной оси абсцисс, в конце этого процесса, указывающей на принципиальные ограничения дальнейшего повышения мощностей, вызываемые разрушением изделия в момент включения или в начальный период его работы.

Из рис. 16 следует, что в направлении мощных вакуумных усилителей на медленных волнах типа клистронов и ЛБВ уже в начале 1970-х годов достигнуты предельные потенциальные характеристики: соответственно  $70 \text{ МВт} \cdot \text{ГГц}^2$  для клистронов и  $20 \text{ МВт} \cdot \text{ГГц}^2$  для ЛБВ. Этим предельным характеристикам на рис. 15 соответствует штрихпунктирная линия 1 – «вакуумные усилители на медленных волнах». Очерченная этой линией область останется неизменной в ближайшее десятилетие.

Пунктирная линия 2 – «вакуумные усилители на быстрых волнах» – ограничивает на рис. 15 область потенциальных характеристик гироприборов и лазеров на свободных электронах. В 2000 г. величины  $P \cdot f^2$  достигли значений 20 000 для гироприборов и  $10^7$  для лазеров (рис. 16). Характеристики  $P \cdot f^2$  для этих приборов далеки от насыщения, что объясняется в первую очередь ростом рабочих частот с переходом в световой диапазон. А эта область выходит за пределы нашего анализа.

Наконец, пунктирная линия 3 в нижней половине диаграммы (см. рис. 15) ограничивает область потенциальных характеристик мощных транзисторов и МИС СВЧ на основе кремния и арсенида галлия.

Разработанные и выпускаемые промышленностью отечественные и зарубежные приборы имеют потенциальные характеристики, как правило, заметно уступающие предельным.

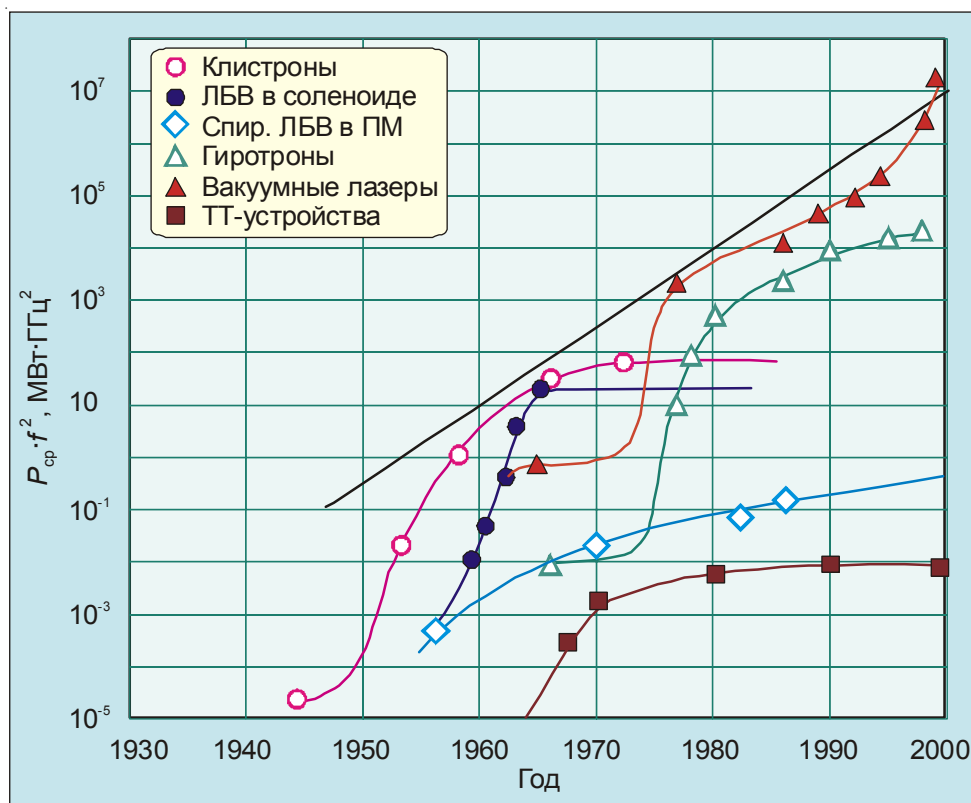


Рис. 16. Динамика изменений во времени потенциальных коэффициентов основных классов СВЧ-техники

Особенно это характерно для изделий военного назначения и космической аппаратуры в связи с необходимостью создания технически обоснованных конструктивных запасов, гарантирующих обеспечение высоких требований эксплуатационной надежности [2]. Поэтому реальные эксплуатационные значения потенциальных характеристик более чем на порядок ниже предельных физических ограничений. Остановимся подробнее на анализе основных областей применения современной СВЧ-техники в XXI веке и приведенных потенциальных характеристик.

#### МОЩНАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АППАРАТУРА В ДИАПАЗОНАХ 0,5...18 И 30...100 ГГц

Потенциальные характеристики радиолокационной аппаратуры и мощных вакуумных СВЧ-усилителей показаны в табл. 1 и на фрагменте диаграммы (рис. 17). Верхними сплошными линиями 1 и 2 показаны предельные значения потенциальных характеристик для приборов на медленных (кривая 2) и быстрых (кривая 1) волнах.

Выделенные области соответствуют зарубежной аппаратуре (по данным 1998–2002 гг.). Сплошной линией 3 с точками и величинами  $P_{2003}$  в табл. 1 показаны значения средних мощностей

Таблица 1

**Прогнозируемые потенциальные характеристики мощных клистронов и ЛБВ**

Диапазон, ГГц	Мощность	$F$ , ГГц	$P_{ср}$ , кВт
0,5-18	$P_{пред}$	0,5 18	2000 100
	$P_{2003}$	0,5 18	100 6
	$P_{2020}$	0,5 18	500 10
30-100	$P_{пред}$	30 100	10/20 1/5
	$P_{2003}$	30 100	2 0,1
	$P_{2020}$	30 100	5/10 0,5/2

современных отечественных усилительных клистронов, а пунктирной линией 4 – соответствующие характеристики мощных ЛБВ.

Средние мощности обеспечиваются одним мощным прибором с рабочими полосами частот до 5...8 % для клистронов и 10...15 % для ЛБВ при скважностях 10...20. Приборы обеспечивают многорежимную работу передатчиков, включая пачечные режимы с коротким импульсом при «бестоковом» управлении по сетке. В качестве фокусирующих систем приборов используются, как правило, соленоиды или постоянные магниты. Основная часть номенклатуры мощной вакуумной СВЧ-техники в диапазоне 0,5...18 ГГц разработана предприятиями ФГУП «НПП «Исток» и ФГУП «НПП «Торий».

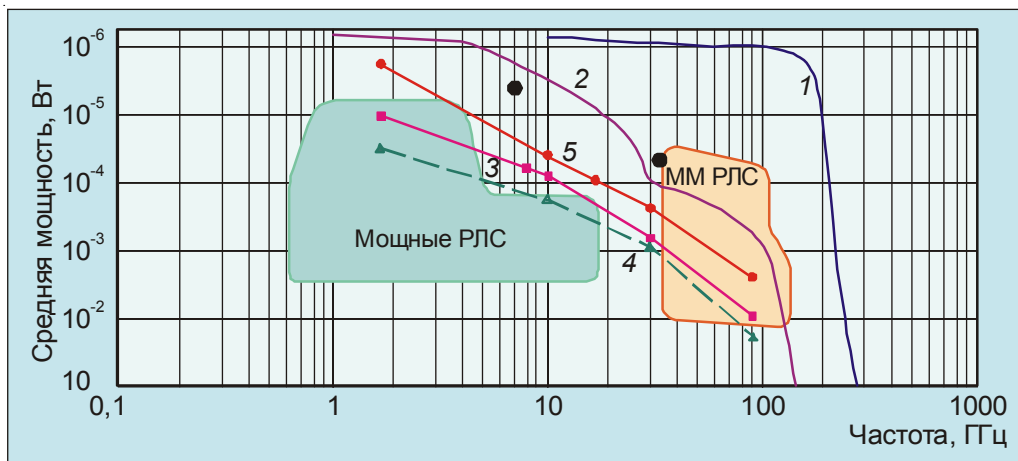


Рис. 17. Мощная радиолокационная аппаратура в диапазонах 0,5...18 и 30...100 ГГц



В диапазоне 1,5...3 ГГц предприятиями ВНИИРТ, МРТИ и ННИИРТ созданы РЛС, соответствующие и превышающие по своим характеристикам потенциал зарубежных станций. Они укомплектованы современной СВЧ-техникой, и есть все возможности дальнейшего увеличения их потенциальных характеристик, особенно при использовании активных решеток как на вакуумной СВЧ-технике (ОКБ «Тантал», НПП «Исток» и «Торий»), так и на твердотельной (ФГУП «Пульсар»).

В диапазоне 8...10 ГГц наивысшие потенциальные характеристики получены в известных системах С-300В, С-300П, созданных в НИЭМИ и МКБ «Алмаз». В этих системах использовались разработанные в НПП «Исток» мощные уникальные многолучевые клистроны и входные циклотронные усилители. Потенциальные возможности радиолокационной аппаратуры в этом диапазоне частот могут быть значительно увеличены при использовании пассивных ФАР с групповым питанием передающих каналов. В 1970-х годах на этом принципе была создана РЛС, использующая в субрешетке 24 многолучевых клистрона, с суммарной излучаемой средней мощностью свыше 200 кВт. Работа этой уникальной аппаратуры в течение десятков лет показала высокие эксплуатационные характеристики (крупная черная точка в С-диапазоне).

Сплошной линией 5 с круглыми точками (см. рис. 17) и величинами  $P_{2020}$  в табл. 1 показаны прогнозируемые потенциальные характеристики мощных клистронов в 2015–2020 гг. В диапазоне 30...100 ГГц они могут быть еще увеличены в 4–5 раз за счет применения сверхпроводящих магнитных систем с высокотемпературной сверхпроводимостью.

Потенциальные возможности аппаратуры миллиметрового диапазона могут быть также существенно повышены при использовании мощных усилителей на быстрых волнах. В 1980-е годы в НИИ «Радиофизика» на основе пассивной ФАР был разработан уникальный радиоэлектронный комплекс со средней мощностью 20 кВт в диапазоне 30 ГГц (правая крупная черная точка на диаграмме) с использованием гироклистрона, созданного в НПП «Торий» [3].

#### МАЛОГАБАРИТНАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АППАРАТУРА В ДИАПАЗОНЕ 10...100 ГГц

Малогобаритные РЛС (табл. 2 и рис. 18) охватывают обширную область применения бортовой радиолокационной аппаратуры, и в первую очередь высокоточного оружия, в частности, активных головок самонаведения различного класса ракет «воздух-воздух» и «воздух-поверхность».

Малогобаритные клистроны и ЛБВ для этой аппаратуры должны иметь максимально низкие питающие напряжения (не выше 2 кВ), массу (не более 1 кг) и размеры (менее 500 см<sup>3</sup>). Одним из главных условий миниатюризации является возможность размещения таких приборов в составе приемопередающего СВЧ-моноблока на подвижной части антенной системы, как это реализовано в АРГС РВВ-АЕ. Отказ от вращающихся соединений и гибких кабелей в выходном каскаде передатчика и СВЧ-приемнике позволяет на 3 дБ уменьшить вносимые потери, избежать фазовых сдвигов на всех углах прокачки и снизить помехи в диапазоне доплеровских частот при линейных перегрузках более 30г.

В НПП «Исток» в течение последних 15 лет с успехом ведутся работы по миниатюризации СВЧ-техники и ее источников питания для активных головок самонаведения «воздух–

Таблица 2

**Прогнозируемые потенциальные характеристики малогабаритных клистронов и ЛБВ и аппаратуры**

СВЧ-техника		$F$ , ГГц	$P_{cp}$ , Вт
Малогабаритные клистроны и ЛБВ	$P_{2003}$	10	150
		30	80
		100	10
	$P_{2020}$	10	750
		30	200
		100	50
Аппаратура (2000–2004 г.г.)		10	300
		100	20

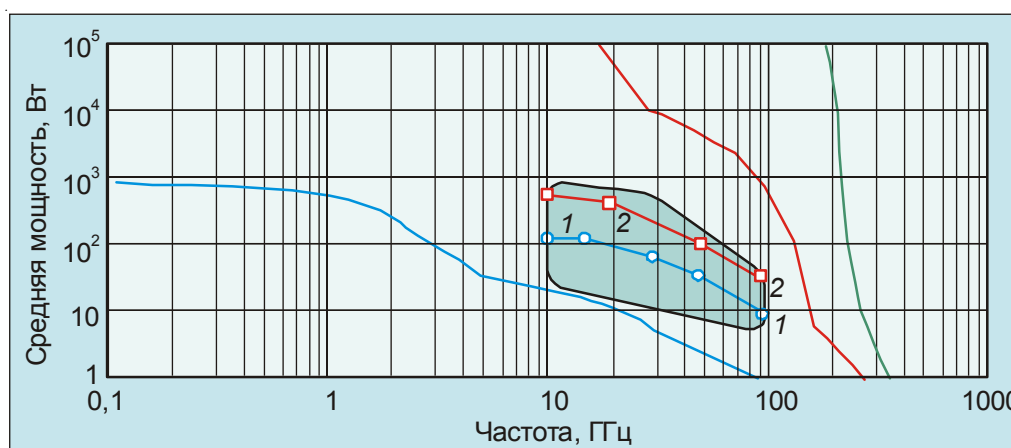


Рис. 18. Малогабаритная радиолокационная аппаратура в диапазоне 10...100 ГГц

воздух» [4]. В диапазоне 10...15 ГГц разработаны и выпускаются миниатюризированные клистроны и ЛБВ со средней мощностью 100...150 Вт при коэффициенте заполнения 0,3 с массогабаритными характеристиками, позволяющими располагать прибор на подвижной части антенны при перегрузках в пределах 30g. Типичные характеристики этих приборов показаны на рис. 18 линией 1 и величинами  $P_{2003}$  (см. табл. 2), а на период 2020 г. – линией 2 и величинами  $P_{2020}$ . При входном напряжении 20...30 В масса источника питания составляет 1,9 кг при объеме менее 1,5 дм<sup>3</sup> [5].

Прорывным направлением в технике электронных компонентов для малогабаритной аппаратуры локации, связи и радиоэлектронной борьбы являются мощные микроволновые модули (МРМ). Рекордный МРМ фирмы Nothrop (1999 г.) в диапазоне 6...18 ГГц имеет непрерывную мощность 100 Вт при объеме 150 см<sup>3</sup> и массе менее 150 г.

В России работы в этом направлении проводятся в НПП «Алмаз», г. Саратов.

**АППАРАТУРА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ  
В ДИАПАЗОНАХ 0,5...30 ГГц**

Потенциальные характеристики зарубежных средств РЭБ представлены на рис. 19 и в табл. 3. Отрезками прямых линий на рис. 19 и величинами  $P_{2003}$  в табл. 3 показаны рабочие полосы и непрерывная мощность основных отечественных сверхширокополосных ЛБВ, разрабатываемых и выпускаемых ФГУП «НПП «Алмаз», г. Саратов [6]. Линия 1 на рис. 19 и величины  $P_{2020}$  соответствуют прогнозируемым величинам мощности в тех же частотных пределах в 2015 г.

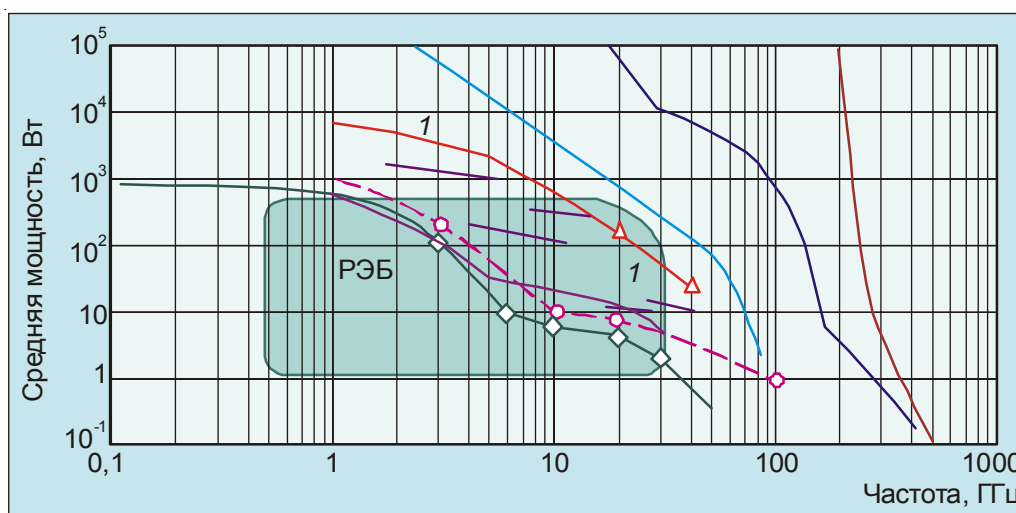


Рис. 19. Аппаратура радиоэлектронной борьбы в диапазонах 0,5...30 ГГц

Таблица 3

**Прогнозируемые потенциальные характеристики  
широкополосных ЛБВ и аппаратуры**

СВЧ-техника		$F$ , ГГц	$P_{ср}$ , Вт	$P$ , Вт
Широкополосные ЛБВ	$P_{пред}$	3	30	100
		10	3	20
		30	0,3	5
	$P_{2003}$	3	1,1	100
		10	0,25	5
		30	0,01	2
	$P_{2020}$	3	3	200
		10	0,75	10
		30	0,05	5
Аппаратура (2000-2010 гг.)		3	5	—
		10	1	—
		30	0,1	—

Потенциальные характеристики отечественных выпускаемых и прогнозируемых ЛБВ перекрывают всю верхнюю часть рабочей области зарубежных средств РЭБ, за исключением диапазона 20...40 ГГц. Трудности в этой области обусловлены приближением к физическим ограничениям спиральных ЛБВ. Поэтому разработка ЛБВ с полосой частот в одну и более октав при непрерывной мощности 100 Вт сопряжена с принципиальными трудностями в связи с возможным снижением показателей эксплуатационной надежности из-за малых конструктивных запасов. Необходимы поиски новых технологических путей решения проблемы, одним из которых, безусловно, является использование фокусирующих систем на основе высокотемпературной сверхпроводимости.

### ВОЕННАЯ И КОММЕРЧЕСКАЯ АППАРАТУРА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В ДИАПАЗОНАХ 3...100 ГГц

На рис. 20 и в табл. 4 показаны потенциальные характеристики зарубежной военной спутниковой связи (область ВСС), коммерческой спутниковой связи (область КСС) и область прямого спутникового вещания (ПС). Ломаной линией 1 с кружками на рис. 20 и величинами  $P_{2003}$  в табл. 4 показаны характеристики 12 типов отечественных спутниковых ЛБВ (ФГУП «НПП «Алмаз», г. Саратов), перекрывающие диапазон 3...18 ГГц с уровнем мощности 40...150 Вт. Приборы по своим параметрам соответствуют лучшим мировым достижениям (долговечность – 50...100 тыс. ч; КПД – 50...60 %).

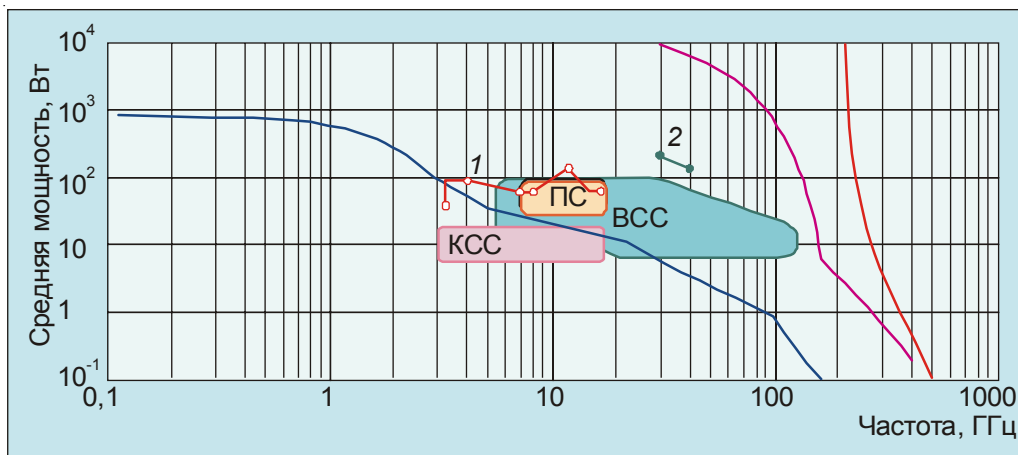


Рис. 20. Военная и коммерческая аппаратура спутниковой связи

Зарубежные спутниковые ЛБВ фирм США, Франции, Японии помимо указанного диапазона охватывают полосу частот 20...40 ГГц. На рис. 20 отрезком 2 в диапазоне 30...40 ГГц показаны параметры рекордных ЛБВ отделения EDD фирмы «Боинг» (США) с непрерывной мощностью 150...250 Вт. Отсутствие отечественных разработок в этой области частот объясняется отсутствием заказов.

Прогнозируемые потенциальные характеристики спутниковых ЛБВ и аппаратуры

СВЧ-техника		$F$ , ГГц	$P$ , Вт
Спутниковые ЛБВ	$P_{2003}$	3	80
		10	150
		30	–
		100	–
	$P_{2020}$	3	150
		10	150
		30	100
		100	100
Аппаратура (2000-2010 гг.)		3	100
		10	150
		30	200
		100	10

#### АППАРАТУРА НАЗЕМНОЙ КОММЕРЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Потенциальные характеристики аппаратуры наземной коммерческой связи, радиолокационных датчиков различных назначений, автомобильных радиолокаторов показаны на рис. 21. Линия 1 без точек и величины  $P_{2000}$  в табл. 5 – мировой уровень однокристалльных МИС СВЧ в 2000 году; линия 2 с точками и величины  $P_{2003}$  в табл. 5 – современный отечественный уровень; пунктирная линия 3 с точками и величины  $P_{2010}$  – отечественный уровень 2010 года.

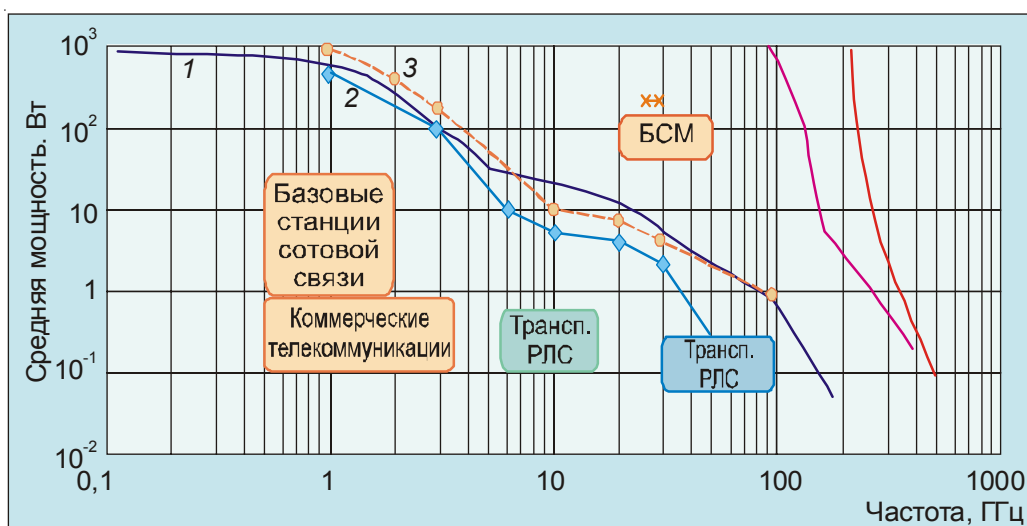


Рис. 21. Аппаратура наземной коммерческой связи

Заметно большие величины мощностей требуются для передатчиков базовых станций сотовых интерактивных телекоммуникаций миллиметрового диапазона, интенсивно развиваемых за рубежом (прямоугольник БСМ; точками над ним показана отечественная ЛБВ НПП «Исток», проектируемая для этой цели).

Таблица 5

**Прогнозируемые потенциальные характеристики транзисторов и ЛБВ для БСМ и аппаратуры**

СВЧ-техника		$F$ , ГГц	$P$ , Вт
Транзисторы и ЛБВ для БСМ	$P_{2000}$	1-2	750-300
		10	20
		30-100	5-1
	$P_{2003}$	1-2	400-200
		10	5
		30	2
$P_{2010}$	1-2	800-400	
	10	10	
	30-100	5-1	
Аппаратура (2000-2004 гг.)		0,5-2	200
		20-50	150
		30-100	0,1-0,5

**ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЕ МОДУЛИ ДЛЯ АФАР**

Потенциальные характеристики твердотельных приемопередающих модулей для АФАР (рис. 22) определяют облик военных радиоэлектронных систем 5-го поколения. На рис. 22 и в табл. 6 приведены прогнозируемые на 2010 г. основные параметры мощных отечественных

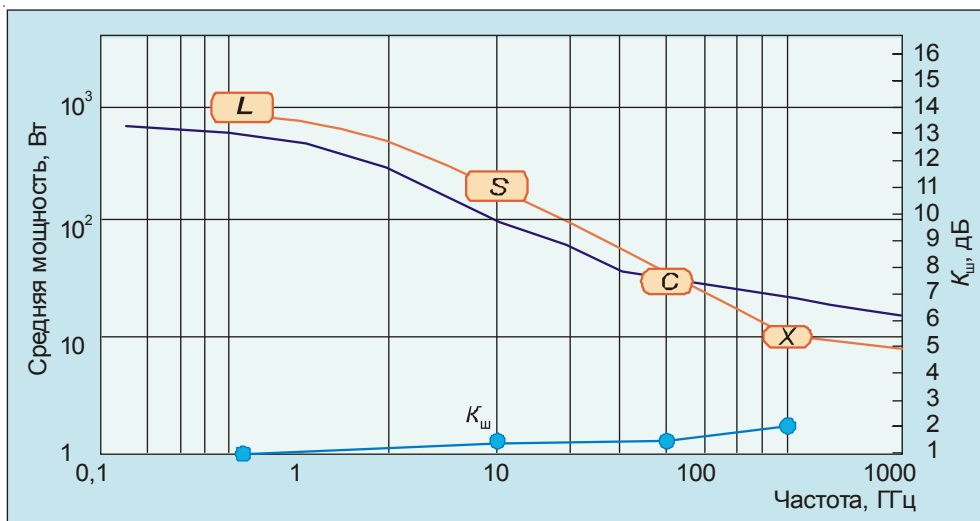


Рис. 22. Приемопередающие модули для АФАР

**Прогнозируемые потенциальные характеристики  
СВЧ МИС для ППМ АФАР на 2010 г.**

$F$ , ГГц	$P$ , Вт	$K_{ш}$ , дБ	КПД, %
1,17-1,43	300	1,0	40
2,7-3,3	250	1,2	40
5,6-6,4	15	1,2	40
9,0-10,0	10	1,5	35

СВЧ-микросхем в  $L$ -,  $S$ -,  $C$ - и  $X$ -диапазонах (желтая линия на диаграмме). В  $L$ - и  $S$ -диапазонах технический уровень отечественных полупроводниковых приборов близок к мировому. В коротковолновой части см-диапазона параметры отечественных МИС СВЧ на основе арсенида галлия в 2007 г. в лучшем случае достигнут зарубежного уровня 1998–2000 гг.

Следует отметить, что приведенные зарубежные и отечественные характеристики относятся к СВЧ-технике на основе кремния, арсенида галлия и гетероструктур на этих материалах. Прогноз СВЧ-техники на основе широкозонных полупроводников столь сложен, что выходит за рамки настоящей работы, а предварительные выводы следующие.

1. Потенциальные характеристики отечественной СВЧ-техники применительно к основным военным и гражданским системам радиоэлектронной аппаратуры по техническому уровню превышают потенциальные характеристики зарубежной аппаратуры, имея при этом существенно более низкие напряжения питания, улучшающие ее массогабаритные характеристики.

2. Прогнозируемые параметры основных классов приборов на период 2010–2020 гг. позволяют разработать новое поколение СВЧ-техники, обеспечивающее дальнейший рост потенциальных характеристик отечественных систем и комплексов ВВТ, что должно найти отражение в проектируемой Государственной программе вооружения.

3. Исключение составляет техника мощных твердотельных СВЧ-микросхем, где прогнозируемые на 2010 г. параметры в см-диапазоне частот в лучшем случае будут соответствовать зарубежному уровню 2000 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вакуумная электроника для XXI столетия // IEEE Microwave Magazine. – 2001. – No 3.
2. Ребров С. И. Конструктивный аспект надежности технологических процессов производства приборов СВЧ // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1973. – Вып. 8.
3. Толкачев А. А. РЛС ММДВ для обслуживания низкоорбитальных ИСЗ // Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления: материалы конференции. – Саратов, 2003.
4. Yuri Koslow, Sergei Rebrov. Military Electronics in Russia // Military Technology. – 1993. – No 5.
5. Результаты комплексного теоретического исследования и оптимизации передающих модулей на основе миниатюризированных многолучевых приборов / А.Н. Королев, С.А. Зайцев, А.С. Победоносцев и др. // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2004. – Вып. 1.
6. Бушуйев Н.А. Широкополосные ЛБВ // Электронная промышленность. – 2003. – № 1.

УДК 621.385.6(09)

**С. И. Ребров**

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

## ВОЕННАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В РОССИИ

Использование эффекта радиобнаружения подвижных объектов для военных целей началось в России в 30-е годы одновременно с такими странами, как Англия, Германия, США. Развитие радиолокации опиралось на оригинальные отечественные работы и изобретения ламп дециметрового диапазона с плоскими электродами, в том числе маячковых и металлокерамических СВЧ-триодов, многорезонаторных магнетронов и клистронных генераторов. Мощности излучения этих ламп превосходили полученные за рубежом.

Эти достижения позволили уже в 1934 г. создать первую РЛС класса СОН (станция орудийной наводки) для Главного артиллерийского управления и РУС-1 для Управления ПВО. РЛС типа СОН и РУС успешно применялись в финской войне 1939–1940 годов. РУС-2 позволяла обнаруживать самолеты на высоте 500 м на расстоянии 30 км, на высоте 7500 м на расстоянии 95 км (импульсная мощность – 50 кВт, длина волны – 3,5 м).

В период второй мировой войны значение радиолокации проявилось в полную меру. С целью концентрации усилий специалистов на разработке СВЧ-приборов для радиолокации, оперативного внедрения достижений теоретической физики в СВЧ-электронику, организации и промышленного выпуска СВЧ-изделий электронной техники в объемах, удовлетворяющих потребности обороны, Государственный комитет обороны организовал в июле 1943 года Научно-исследовательский институт № 160 с опытным заводом (сейчас ГНПП «Исток»). На базе этого предприятия, как головного в области СВЧ-техники, была развита подотрасль отечественной СВЧ-электроники в составе более 10 научных и промышленных предприятий различной специализации. Комплекс этих предприятий охватывает разработками и промышленным выпуском все известные направления электронной техники СВЧ, а также широким фронтом ведет работы в области поиска новых технологий и применения получаемых в оборонной технике, промышленности, медицине и сельском хозяйстве.

На развитие отечественной СВЧ-электроники в значительной степени влияла структура организации военно-промышленного комплекса (ВПК) страны, представляющая собой фактически диверсифицированную корпорацию, состоящую из автономных отраслей промышленности, специализирующихся в различных областях вооружения и военной техники (В и ВТ), а также производстве наукоёмкой продукции гражданского назначения. Связь между отраслями при проведении разработок систем В и ВТ и серийном выпуске продукции осуществлялась путем государственных заказов, формирующихся директивными органами управления ВПК по предложениям головных организаций, возглавляющих создание систем вооружения, включенных в Государственную программу.

Работа по заказам при жестком контроле со стороны представителей Минобороны породила специфические отношения заказчика и исполнителя, которые не могли не сказаться на развитии столь узкоспециализированной техники, к которой относится электроника СВЧ. Наиболее приоритетными требованиями при этом оказались эксплуатационные, к которым в первую



очередь относятся питающие напряжения, устойчивость к механическим и тепловым нагрузкам и показатели надежности. В целом развитие СВЧ-электроники в СССР по направленности соответствовало зарубежному, в частности развитию СВЧ-электроники в США, но появились новые направления, не имеющие аналогов за рубежом.

В 60-х годах после бурного периода прогресса ламп началось развитие дискретных полупроводниковых СВЧ-приборов, стимулирующее интенсивное развитие технологий гибридно-интегральных СВЧ-схем в 70-х годах и монолитных СВЧ-микросхем в конце 80-х годов. Нужно отметить, что в СССР падение удельного веса разработок вакуумных СВЧ-ламп при переходе к технике твердотельных СВЧ-приборов не было столь значительным, как, например, в США.

В частности, это было связано с тем, что приоритет эксплуатационных требований стимулировал разработки оригинальных конструкций вакуумных СВЧ-приборов, которые, как правило, не выходили за рамки лабораторных за рубежом. Этому способствовал широкий фронт поисковых исследований, благодаря созданной в 50–70-х годах высоко оснащенной материальной базе научно-исследовательских институтов, а также привлечению кадров высших учебных заведений и Академии наук.

Основной объем исследований и разработок отечественной СВЧ-электроники начиная с 60-х годов сосредоточивается на обеспечении создания современных систем:

- точного наведения ракет;
- зенитных ракетных комплексов;
- предупреждения о ракетном нападении;
- противоракетной обороны;
- радиоэлектронной борьбы;
- космической и наземной связи.

До середины 80-х годов предприятиями СВЧ-электроники были разработаны более 4000 типов вакуумных и твердотельных СВЧ-приборов и устройств, из которых более 700 освоены в серийном производстве для комплектации 220 систем вооружения и военной аппаратуры указанного выше назначения, в том числе:

- 110 типов усилительных клистронов;
- 170 типов ламп бегущей волны;
- 150 типов магнетронов и усилителей М-типа;
- более 50 типов резонансных разрядников;
- более 150 типов вакуумно-твердотельных суперкомпонентов и др.

Наибольшее распространение в бортовой и наземной радиолокационной аппаратуре в качестве выходных каскадов усилительных цепочек получили широкополосные многолучевые клистроны, в отличие от радиолокационных комплексов США, где для этих целей, как правило, используются лампы бегущей волны (ЛБВ). Существенным преимуществом многолучевых клистронов являются значительно сниженные (до 2-х раз), если сравнивать с ЛБВ, напряжения питания катода и коллектора при одних и тех же значениях мгновенной мощности излучения, а также более низкая стабильность напряжения катода.

Современные многолучевые клистроны перекрывают диапазоны от 3 см до 1,5 м. Характерными представителями этого класса приборов, используемых в приоритетных системах вооружения, являются следующие.

Усилительный клистрон, разработанный в начале 70-х годов:

Выходная мощность, кВт:	
импульсная.....	200
средняя.....	15
Напряжение катода, кВ.....	25
Число лучей.....	6

Усилительный клистрон, разработанный в конце 70-х годов:

Выходная мощность, кВт:	
импульсная.....	25
средняя.....	1,5
Полоса рабочих частот, %.....	6
Напряжение катода, кВ.....	14
Число лучей.....	7

Усилительный клистрон, разработанный в середине 80-х годов:

Выходная мощность, кВт:	
импульсная.....	1000
средняя.....	20
Полоса рабочих частот, %.....	8
КПД, %.....	45
Напряжение катода, кВ.....	35
Напряжение управления, кВ.....	7

Малогабаритный усилительный клистрон, разработанный в конце 80-х годов:

Выходная мощность, Вт:	
импульсная .....	300
средняя.....	100
Напряжение катода, В.....	1500
Напряжение управления, В.....	150
Масса, г.....	450
Число лучей.....	18

Широкополосность усилительных клистронов обеспечивается высоким первеансом многолучевой электронно-оптической системы, а также выходного активного двухззорного и связанного с ним пассивного резонаторов.

Перечисленные образцы усилительных клистронов применяются в доплеровских РЛС с когерентной обработкой сигнала и поэтому отличаются низким уровнем вносимых шумов. Семейство подобных усилительных клистронов насчитывает около 50 типов различных диапазонов частот и мощностей.

К оригинальным отечественным направлениям в электронике СВЧ относятся электронно-статические усилители (ЭСУ), используемые в качестве малошумящего входного каскада для

СВЧ-приемников РЛС. К основным преимуществам этого усилителя относится чрезвычайно высокая электрическая прочность, исключающая применение всех видов защитных устройств, при времени восстановления полной чувствительности менее 0,1 мкс.

Типовым представителем этого класса вакуумных СВЧ-приборов является ЭСУ, разработанный в конце 70-х годов и модернизированный в 80-х годах, с основными характеристиками:

Полоса рабочих частот, МГц.....	400
Коэффициент шума, дБ.....	4
Допустимая мощность на входе, Вт:	
импульсная.....	5000
средняя.....	500

Семейство приборов этого типа перекрывает диапазон длин волн 3...30 см с уменьшением коэффициента шума в районе 10 см до 2 дБ и повышением допустимой средней мощности на входе до 3 кВт.

Уникальные характеристики приборов позволяют использовать режимы высоких частот повторения в доплеровских РЛС с длительностью импульса 0,5 мкс и менее.

Развитие техники ЛБВ для РЛС в СССР по темпам вплоть до 1980 г. уступало зарубежному по указанным выше причинам. Однако требования многофункциональности бортовых радиолокационных прицельных комплексов самолетов-истребителей стимулировали разработки в этом актуальном техническом направлении. Используя все достижения технологии клистроностроения, передовые научные коллективы к середине 80-х годов создали и внедрили в производство образцы ЛБВ для РЛС, не уступающие лучшим зарубежным аналогам:

Полоса рабочих частот, МГц.....	1000
Коэффициент усиления, дБ.....	40
Выходная импульсная мощность, кВт:	
при скважности 5.....	6
при скважности 1,5.....	1
Длительность импульса, мкс.....	1-50
Напряжение катода, кВ.....	15

Особый интерес представляют многолучевые «прозрачные» ЛБВ, обеспечивающие чрезвычайно широкий набор режимов при сниженных напряжениях питания. На базе подобной ЛБВ был создан экспериментальный образец передатчика многофункциональной РЛС с общей массой 27 кг при выходной импульсной мощности в режиме обзора 5 кВт (скважность 3) и в режиме подсвета 1 кВт в длительном непрерывном излучении. Этот тип ламп отличается также очень низким уровнем шума в области доплеровских частот.

Начиная с 70-х годов широкое распространение получили ЛБВ средней мощности для спутников связи, выпускаемые серийно. Наибольшее количество разработок в направлении ЛБВ проводилось в области широкополосных ламп, предназначенных главным образом для аппаратуры постановки активных помех. Технология их изготовления и основные параметры близки к зарубежным аналогам.

Несмотря на развитие ламп О-типа и твердотельных СВЧ-приборов, отдельные направления магнетронов и усилителей М-типа сохраняют свою актуальность. К ним относятся малогабаритные импульсные магнетроны, используемые в качестве генераторов в передатчиках ракет, обладающих следующими типовыми характеристиками:

Выходная мощность, Вт	
импульсная.....	500-5000
средняя.....	5-50
Напряжение питания, кВ.....	1,5-5
Масса, кг.....	1-2

Миниатюризация этого типа ламп позволила довести массу синхронизируемого магнетронного усилителя до 100 г при уровне импульсной мощности 1 кВт и КПД порядка 50%, что делает подобный модуль вполне конкурентоспособным с лучшими образцами современных транзисторных генераторов.

По-прежнему находят применение в импульсных обзорных РЛС цепочки на основе ЛБВ в качестве промежуточного каскада и усилители М-типа в качестве выходного. В этом направлении в России созданы уникальные образцы передатчиков, например, на волноводном усилителе М-типа:

Выходная мощность, кВт:	
импульсная.....	5000
средняя.....	50
Полоса рабочих частот, %.....	5
Напряжение анода, кВ.....	25
КПД, %.....	35

Лампы М-типа находят все более широкое применение для промышленного нагрева, медицины и сельского хозяйства. Эти разработки проводятся на дискретных частотах 460, 915 и 2475 МГц при уровнях мощности от 0,3 до 100 кВт.

Особое внимание в электронике СВЧ уделялось освоению новых частотных диапазонов. Развитие перестраиваемых ламп обратной волны для измерительных целей позволило уже в 1978 году довести рабочие частоты перестраиваемых генераторов до 1250...1500 ГГц. В настоящее время в диапазоне 2...8 мм созданы комплексы СВЧ-приборов как для импульсных, так и для когерентных доплеровских РЛС и головок самонаведения. В диапазоне 8 мм созданы гируклистроны с выходной импульсной мощностью в сотни киловатт.

В 1970 году в СССР начало стремительно развиваться направление СВЧ-модулей на гибридно-интегральной технологии. В течение 10 лет было создано более 5000 типов схем различного назначения.

Использование технологии СБИС в СВЧ-технике позволило в конце 80-х годов перейти от гибридных СВЧ-схем к монолитным. В настоящее время это направление СВЧ-электроники является наиболее перспективным для аппаратуры как оборонного, так и бытового назначения. Развитие монолитной технологии обещает снижение габаритов, массы и, самое главное, стоимости изделий СВЧ-электроники в 5...10 раз. В настоящее время интенсивно ведутся разработки монолитных генераторов различного назначения, делителей частоты, смесителей,

фазовращателей, коммутационных матриц. Успехи в этом направлении позволяют перейти к монолитным СВЧ, аналогичным цифровым СБИС.

В отечественной технике СВЧ развиты и широко применяются невзаимные микрополосковые ферритовые приборы, а также все виды волноводных и микрополосковых устройств для измерительной техники, охватывающие все возможные назначения и диапазоны частот.

Принципиально новыми направлениями дальнейшего развития СВЧ-электроники являются монолитная электроника на основе поверхностно-активных и магнитостатических волн, использование свойств высокотемпературной сверхпроводимости и создание микровакуумных приборов на основе автоэмиссионных катодов, а также дальнейшее освоение мм- и субмм-диапазонов. Получаемые в этих поисковых направлениях результаты достаточно интересны, однако развитие работ сдерживается отсутствием финансирования.

Успешное развитие приборов и устройств СВЧ-электроники базируется на достижениях современной технологии и машиностроения, получаемых в организациях России, специализирующихся в области электронной техники. Их описание выходит за рамки настоящей статьи.

*Статья написана в 2003 г.*

---

УДК 621.38.002

С. И. Ребров

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

## СОСТОЯНИЕ КРУПНОСЕРИЙНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ И КРИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Крупномасштабное развитие электронной промышленности и её технологий началось в 50-х годах с созданием Государственного комитета и затем Отраслевого министерства в составе военно-промышленного комплекса (ВПК) СССР. С этого момента в течение более 20 лет отечественная электроника имела наивысшие в СССР темпы роста объёмов производства, в среднем около 15 % в год. Это означало удвоение объёма выпуска продукции практически за каждую пятилетку. Созданный к 1990 г. научно-промышленный потенциал базовой отрасли электронных компонентов, имеющей около 1 млн рабочих мест, своевременно удовлетворял как потребности оборонной промышленности, включая наивысший в мире объём продаж вооружений на мировом рынке, так и рынка наукоёмкой гражданской продукции. В отличие от других развитых стран мира, в военной и гражданской продукции нашей страны использовались исключительно отечественные электронные компоненты.

Динамика объёмов продаж продукции электронной промышленности в Российской Федерации за период 1960–1990 гг. показана на рис.1.

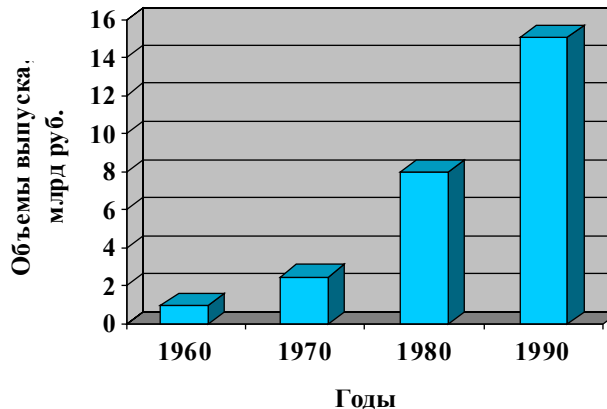


Рис. 1. Динамика объёмов продаж продукции электронной промышленности в Российской Федерации за период 1960–1990 гг.

Основные экономические показатели электронной промышленности РСФСР в базовом 1990 году приведены в табл. 1.

Таблица 1

Объемы продукции, млрд руб.	Доля по СССР, %	Численность, чел.
14,9	63,5	724 592

Либерализация цен и переход на так называемую «рыночную» экономику за последующий период до 1996 года привели к следующей картине рынка продукции крупносерийных технологий электронной промышленности России (табл. 2).

Таблица 2

Наименование	Количество, тыс. штук		%
	1990 г.	1996 г.	
Микросхемы	1 223 390,3	212 800	17,4
ПП-приборы	4 457 855,3	139 300	3,12
ЭВП	295 836	23 900	8,1
Кинескопы	9 905	911,7	9,2
Конденсаторы	5 536 571	157 900	2,9
Резисторы	8 368 817	259 800	3,1
Разъёмы	552 878	5 653	1,0
Радиокомпоненты	931 990	14 000	1,5
Спецматериалы	–	–	9,7
Специальное оборудование	–	–	3,9

Численность работающих в 1996 г. составила 216 275 человек, или 29,8 % от численности 1990 г. Диаграмма рынка продукции серийных технологий в 1996 г. по отношению к 1990 г. показана на рис. 2.

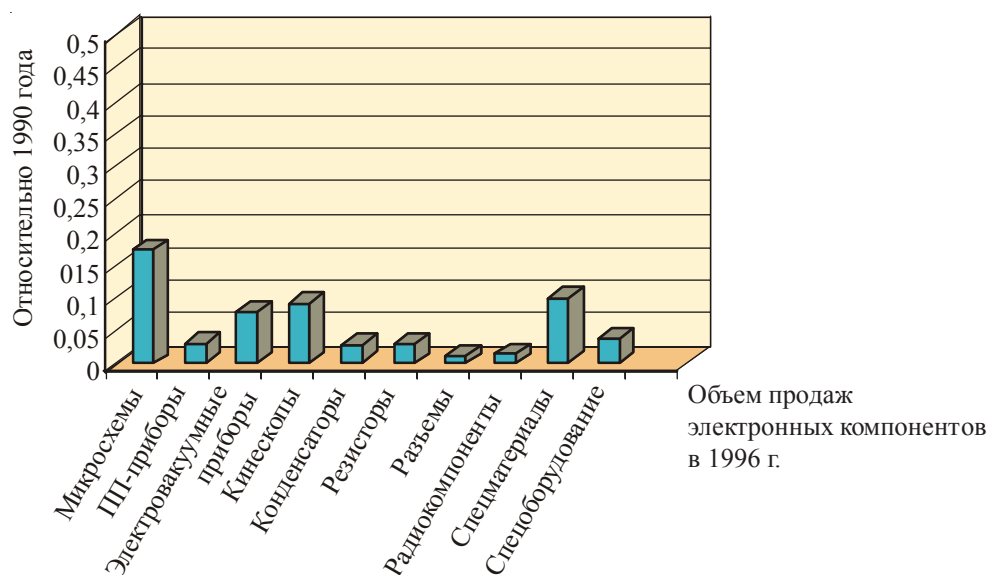


Рис. 2. Диаграмма рынка продукции серийных технологий

Катастрофический спад товарного рынка продукции крупносерийных технологий электронной промышленности в период 1990–1996 гг. не может быть объяснен действием случайных факторов. Подобные спады вызываются объективными системными причинами, имеющими общегосударственный характер. Применительно к оборонным отраслям промышленности эти причины в первую очередь определяются государственной оборонной доктриной, выработанной на её основе программой вооружений и сопутствующей ей программой конверсии. Не менее важное значение для состояния всех отраслей промышленности и экономики страны в целом имеет программа интеграции в мировой рынок.

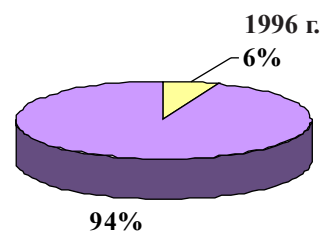
Материальным воплощением суверенитета и независимости России, провозглашенных в оборонной доктрине, является реформа армии, цель которой состоит в сокращении вооруженных сил при одновременном повышении их боеспособности в условиях как локальных, так и крупномасштабных конфликтов на основе принятой программы вооружений. Естественно, что в этом случае уровень оснащения армии новыми системами вооружения должен превышать 50 % с одновременным качественным повышением их тактико-технических характеристик до мирового уровня или с превышением его.

Являясь базовой отраслью военно-промышленного комплекса России, электронная промышленность поставляла Минобороны в 80-е годы в среднем 30 % продукции крупносерийных технологий, а по особо наукоемким, таким, в частности, как СВЧ-электроника, микроэлектроника, оптоэлектроника, 50 % и более. Годовой объем поставок электронных компонентов для Минобороны в Российской Федерации составлял в 1990 г. более 5 млрд руб. Несмотря на высокие темпы роста научно-промышленного потенциала отечественной электроники, военная промышленность требовала непрерывного увеличения объема поставок. Поэтому структура ведущих предприятий, стратегия и программа их развития были подчинены основному требованию: повышению выпуска военных электронных компонентов по крайней мере в 1,5 раза к 1995 году.

Либерализация экономики и скачкообразный переход к рыночным отношениям перевернули эти сложившиеся и устоявшиеся понятия, в том числе и в области военных поставок. В 1996 г. уровень закупок военных электронных компонентов составил около 6% по отношению к закупкам Минобороны в 1990 году (рис. 3).

В области наукоемких критических технологий закупки Минобороны составили в пределах от 7 до 10 %. Самый большой удельный вес закупок по мощным ЭВП СВЧ, тем не менее, составляет лишь 10 % от закупок в 1985–1990 гг. Эти показатели находятся в вопиющем противоречии с вышеуказанными целями оборонной доктрины и задачами реформирования армии. Почти полная ликвидация внутреннего рынка военных электронных компонентов обеспечила загрузку мощностей особо наукоемких критических технологий, и в первую очередь микроволновых и микроэлектронных, заказами, эквивалентными по потребности началу 60-х годов.

Рис. 3. Закупки электронных компонентов для Минобороны в 1990 г. и 1996 г.





Использовать всю массу военной продукции этих технологий непосредственно в зарубежных радиоэлектронных системах вооружения не представляется возможным, так как в момент их создания эта элементная база была недоступна. Более того, как показала практика последних 6 лет, подавляющее большинство стран предпочитает заказывать в России НИОКР с поставкой опытных образцов и затем воспроизводить у себя уникальные российские конструкции и прецизионные технологии. Повышенный интерес стран мирового рынка к микроволновым технологиям позволил временно уберечь их от неминуемого распада при ликвидации внутреннего военного рынка. Наиболее ценная часть российской СВЧ-электроники сохранилась на ведущих предприятиях лишь благодаря денежным поступлениям от экспортных заказов в пределах 30...50 % от полных объёмов НИОКР и поставок на внутренний рынок. Это позволило в известной степени сохранить наиболее квалифицированную часть старых кадров, но никоим образом не обеспечивало дальнейшее развитие микроволновых технологий по отношению к 1987–1990 гг. Таким образом, возникло и продолжает наращаться отставание по главным научно-техническим направлениям в базовых отраслях ВПК России.

Второй и, может быть, еще более значимой по своим последствиям причиной свертывания внутреннего рынка продукции базовых отраслей промышленности ВПК явилось отсутствие государственной программы интеграции в мировой рынок. Положение электронной промышленности ухудшалось при этом мифом о её значительном отставании от зарубежного уровня. Почему-то не принималось во внимание, что Россия является единственной в мире страной, использующей при создании и производстве вооружений и военной техники (В и ВТ) элементную базу только собственного изготовления. Причем технический уровень нашего вооружения всегда оценивался и продолжает оцениваться по целому ряду В и ВТ как один из самых высоких в мире.

Вместо того чтобы искать выгодные для общей и военной промышленности виды кооперации с мировым рынком электронных компонентов, закупая доступные компоненты и покупая лицензии, а может быть, и действующие технологические линии, в нашей стране в начале 90-х годов было сделано всё для разрушения отечественной электроники. России не хватало примерно 10 % зарубежной элементной базы для организации полномасштабного производства персональных компьютеров, отдельных марок дорогих телевизоров и некоторой бытовой радиоэлектроники. Вместо её разумной закупки, внутренний рынок России был завален не слишком высококачественной компьютерной и бытовой радиотехнической продукцией главным образом азиатского происхождения, похоронив внутренний рынок отечественной электроники, причём без всякой конкуренции с ней. Достаточно взять элементную начинку указанной выше массовой зарубежной продукции для сравнения с отечественными электронными компонентами начала 90-х годов, и мы убедимся, что не менее 90 % наших компонентов выигрывают по показателям цена-качество.

Таким образом, ликвидация внутреннего рынка электронной продукции и соответствующее этому 10-кратное свертывание её научно-промышленного потенциала произошли по причинам срыва задач государственной оборонной доктрины и отсутствия разумно обоснованной программы интеграции в мировое сообщество. Без построения заново этих доктрин с учётом положения, сложившегося в России и в её окружении, невозможно начать возрождение промышленного потенциала на национальной технологической базе. Это положение усугубляется крайне непродуманной программой конверсии, или, вернее, фактическим её отсутствием. Программа

конверсии должна стать главнейшей государственной директивной программой. Выделяемые ей необходимые бюджетные средства должны направляться в полной мере и в первую очередь на сохранение и развитие национальной технологической базы.

В заключение вернемся к рис. 1 и 2. В 1996–1998 гг. объём продукции крупносерийных и критических базовых технологий электронной промышленности соответствует уровню 1960 г. Есть ли отличия современного состояния отечественной электроники от состояния электроники начала 60-х годов и корректна ли постановка вопроса о её возрождении?

В мире нет развитых стран, у которых отсутствует рынок собственной электронной промышленности (см. рис. 4). Если Россия претендует на вхождение в их число, то последний вопрос сам собой отпадает.

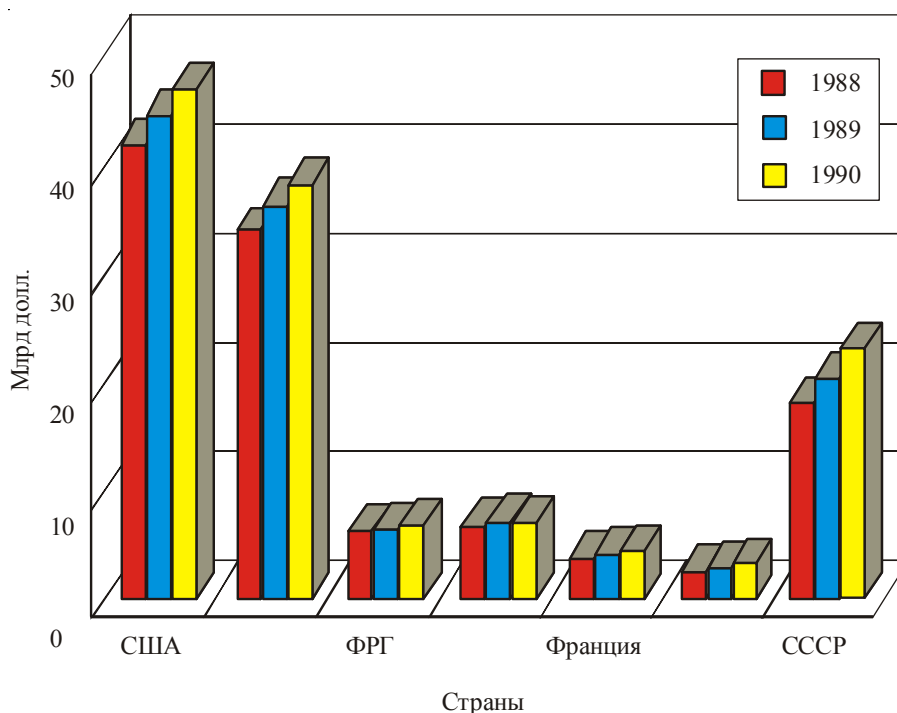


Рис. 4. Мировой рынок ЭКБ

Следует обратить внимание, что, несмотря на развитие и наполнение мирового рынка компонентами США и Японии, каждая из стран неуклонно развивает свою отечественную промышленность компонентов. Мировой рынок используется этими странами только в интересах наиболее эффективного развития по направленности собственного рынка. При этом не ставится вопрос о его сокращении или тем более ликвидации со ссылкой на огромный потенциал транснациональных электронных корпораций. Любая из цивилизованных стран не допустит подобного ради сохранения своего суверенитета.

Возрождение отечественной электроники, как и других отраслей оборонной промышленности, возможно лишь через восстановление российского рынка оборонной продукции, необходимой не для формального, а для полноценного реформирования армии и увеличения объёма продаж В и ВТ на внешнем рынке до показателей начала 80-х годов. Не менее важным, а эко-

номически более значимым является восстановление рынка промышленной и бытовой радиоэлектроники. При этом необходимо решение крайне сложной задачи создания отечественной промышленности обработки данных, в частности, крупносерийного производства персональных компьютеров. Без её решения Россия в XXI веке не войдет в число развитых стран.

Основой этого возрождения станут те базовые предприятия ВПК, которые сохранили в значительной степени свой научно-промышленный потенциал. При этом расходы на восстановление и реконструкцию крупносерийных промышленных технологий будут на порядки величин меньше затрат на их развитие в 1960–1990 гг. и быстро окупятся с восстановлением рынка. Это утверждение справедливо, если процесс восстановления начнется в течение ближайших 3–4 лет. Дальнейшая задержка будет вызывать увеличение затрат на реконструкцию в геометрической прогрессии.

Ведущими учёными военно-промышленного комплекса с привлечением ученых других общепромышленных отраслей, Российской академии наук и Высшей школы разработана программа развития высоких критических технологий с целью ликвидации отставания от развитых стран мира, сложившегося в последние 8...10 лет. Эти технологии являются базовыми и составляют основу национального технологического комплекса страны. Указанная программа получила название «Национальная технологическая база». Она прошла все экспертизы, была одобрена Государственной думой и в 1996 году включена в состав Президентских программ. Её реализация является главной составляющей возрождения отечественной промышленности.

Подъем технического уровня наукоёмких микроэлектронных, микроволновых, оптоэлектронных технологий, входящих в состав национальной технологической базы, потребует затрат, обоснованных в утвержденной программе «Национальная технологическая база». Однако без дальнейшего развития этих технологий не будет технического суверенитета России и места ей в числе развитых стран будущего XXI столетия.

*Статья написана в 1998 г.*

УДК 621.385.6

**С. И. Ребров**

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

## **ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СВЧ-ТЕХНИКИ\***

Проанализированы особенности развития современной электронной СВЧ-техники и ее базовых технологических процессов, в первую очередь, в области мощных электровакуумных приборов и монолитных СВЧ-микросхем, вызванные переходом к радиолокационной технике 5-го поколения и миниатюризацией бортовой аппаратуры. Показаны тенденции дальнейшего развития вакуумной СВЧ-техники и твердотельных СВЧ-приборов, оценены возможности пассивных и активных антенных решеток с точки зрения современной СВЧ элементной базы. В работе также кратко описаны последние достижения в отдельных направлениях СВЧ-электроники, применяемые в других областях техники.

За последние 15 лет в мировой радиоэлектронике значительно расширились области применения СВЧ-техники. Наряду с традиционными применениями, связанными с РЛС военного и гражданского назначения, системами РЭП, ракетами с активными головками самонаведения, аналоговыми системами связи, появились цифровые системы связи, локальные (LDMS) и распределительные системы связи, аппаратура с кодовым разделением каналов (CDMA), мобильные телефоны, разнообразные локационные датчики для транспортных средств и многое другое.

В аппаратуре военного назначения начался постепенный переход к радиолокационной технике 5-го поколения. Ее основные особенности обусловлены резким снижением отражающей поверхности высокоскоростных целей и необходимостью дальнейшего снижения массы, габаритов при повышении технического ресурса аппаратуры и других показателей надежности. Выполнение комплекса указанных требований возможно лишь при условии создания новых поколений электронной СВЧ-техники и соответствующих базовых технологических процессов, в первую очередь, в области мощных электровакуумных приборов и монолитных СВЧ-микросхем. Эти два фундаментальных направления СВЧ-техники остаются определяющими в дальнейшем развитии современной радиоэлектроники.

### **Вакуумная СВЧ-техника, приборы и устройства**

Наследие техники электровакуумных приборов бесценно, и она продолжает развиваться с появлением стремительно прогрессирующего современного программного обеспечения, новых материалов, оригинальных электромагнитных систем, новых конструктивных решений, обеспечивающих рекордные уровни параметров и надежности. Новые требования и к военной, и к гражданской аппаратуре заставляют непрерывно обращаться к этой технике для создания более совершенных СВЧ-компонентов.

---

\*Электронная промышленность. – 2003. – Вып. 1. – С. 3-12.

Потребность в компактных высокоэффективных приборах с высокими уровнями мощности в относительно широкой полосе частот послужила толчком для ряда изобретений, основанных на ранее известных классах усилителей. Примером одного из таких изобретений может служить многолучевой клистрон – низковольтный компактный клистрон со значительно более широкой полосой частот, чем у обычного однолучевого клистрона. В отдельных случаях мгновенная полоса многолучевых клистронов сравнима с полосой ЛБВ на связанных резонаторах. В обзоре ведущих специалистов США, опубликованном в IEEE Microwave Magazine, 2001, vol. 2, No 3, отмечено, что именно в России созданы многолучевые клистроны с количеством лучей от 6 до 60, усилением 40...45 дБ и КПД 30...45 % (табл. 1).

Таблица 1

**Характеристики многолучевых клистронов,  
разработанных в ФГУП «НПП «Исток»**

Диапазон рабочих частот	<i>L</i> (1-2 ГГц)	<i>S</i> (2-4 ГГц)	<i>C</i> (4-8 ГГц)	<i>X</i> (8-12,4 ГГц)		<i>Ku</i> (12,4-18 ГГц)	
Импульсная мощность, кВт	800	600	500	200	70	30	0,4
Средняя мощность, кВт	14	12	17	17	3,5	1,5	0,13
Анодное напряжение, кВ	32	31	29	26	13	14	2,5
Ширина полосы рабочих частот, %	10	6,0	3,5	0,7	6	2	0,27
Число лучей	36	36	24	6	24	15	18
Масса, кг:							
без магнита	32	25	20	12	–	–	–
пакетированные с магнитом	–	–	–	–	16	8	0,4

В последнем столбце табл. 1 приведены параметры одного из типов миниатюрных клистронов с удельной плотностью мощности 1 кВт/кг. В настоящее время этот подкласс насчитывает 7 типов приборов в диапазоне 9...17 ГГц, предназначенных для установки непосредственно на плоскость антенны в малогабаритной бортовой аппаратуре. Этому перспективному направлению вакуумной СВЧ-техники посвящена отдельная статья.

Продолжается совершенствование параметров спиральных ЛБВ с периодической магнитной фокусировкой (ППМ). Эти приборы служат надежной опорой для построения аппаратуры широкополосных систем связи и радиоэлектронной борьбы. Спиральная ЛБВ стала ключевым СВЧ-компонентом для быстро развивающихся коммерческих телекоммуникационных применений и бортовых спутниковых передатчиков. Современная пакетированная ЛБВ с массой около 1 кг имеет средние мощности от десятков до сотен ватт при усилении 50...60 дБ и общем КПД более 70 %.

Мощный прорыв за последние 10 лет был сделан в разработке гибридных модулей (МРМ), которые представляют собой класс малогабаритных усилителей, сочетающих достижения вакуумной и полупроводниковой технологий. Модуль обычно состоит из полупроводникового усилителя (в ГИС- или МИС-исполнении), подключенного к ЛБВ с небольшим усилением и

высоким КПД. Общее усиление модуля распределяется между твердотельным усилителем и ЛБВ так, чтобы можно было получить оптимальные параметры и стоимость. Параметры и габариты, достигаемые при сочетании этих технологий, значительно лучше тех, которые получают при использовании только одной из них.

Продолжает развиваться отечественное направление 2-каскадных ЛБВ в виде сочетания однолучевой спиральной ЛБВ с периодической магнитной фокусировкой и так называемой многолучевой «прозрачной» ЛБВ на ЦСР в постоянном магните. Такая комбинация позволяет отдельно оптимизировать функции обеих ЛБВ: высокий коэффициент усиления первого каскада и высокую мощность выходной лампы при относительно низком напряжении за счет многолучевой конструкции. При этом высоковольтное напряжение обеих ЛБВ выбирается равным, что значительно упрощает источник питания, снижает его габариты и массу. Подобные конструкции оправдывают себя на высоких частотах СВЧ-диапазона. В НПП «Исток» и НПП «Алмаз» созданы комплексированные устройства на 2-каскадных ЛБВ в диапазонах длин волн 3 см и 8 мм. Эти приборы отличаются от однокаскадных меньшим в 1,5...2 раза рабочим напряжением питания при одной и той же выходной мощности. Кроме того, конструктивные особенности многолучевой «прозрачной» ЛБВ позволяют в широких пределах изменять мгновенную мощность излучения и скважность, вплоть до перехода в непрерывный режим работы, сохраняя общий высокий КПД. Это обстоятельство способствует повышению числа функций бортовых радиоэлектронных комплексов. В диапазоне 8 мм были получены экспериментальные образцы 2-каскадных пакетированных ЛБВ с выходной импульсной мощностью 20 кВт и средней мощностью 2 кВт при рабочем напряжении 30 кВ, что превосходит высшие мировые достижения.

Таким образом, отечественная вакуумная СВЧ-техника развивается в направлениях, соответствующих общемировым тенденциям, сохраняя оригинальные технические решения, обеспечивающие ее высокий уровень по отношению к мировому. Сегодня эта техника состоит из новых поколений традиционных приборов (ЛБВ, клистронов, магнетронов, ЛОВ и др.) и появившихся недавно оригинальных классов приборов, использующих вторично-электронную эмиссию, взаимодействие на быстрой циклотронной волне и др. Электронно-статические усилители на быстрой циклотронной волне позволили решить в радиолокации проблему обнаружения малозаметных целей по скорости при малых скважностях и высоких (сотни киловатт) мгновенных мощностях излучения.

Одним из основополагающих разделов базовых микроволновых технологий, обеспечивающих быстрый прогресс в улучшении параметров СВЧ-приборов и создание принципиально новых конструкций, является стремительно прогрессирующее программное обеспечение, используемое для исследования и проектирования приборов. Наряду с обширной библиотекой программ расчета вакуумных приборов, разработанных ведущими предприятиями, в последние годы появились мощные трехмерные программы, позволяющие с высокой точностью решать сложные задачи электростатики, магнитостатики, электродинамики, взаимодействия электронов с электромагнитными полями, задачи теплопередачи и термоупругости, появляющиеся при исследовании и создании вакуумных приборов СВЧ.

Далее в статье остановимся на трех новых вакуумных приборах, при исследовании которых роль теории и компьютерного расчета была чрезвычайно велика.

В 1995–1999 гг. сотрудники НПП «Исток», используя опыт разработки многолучевых клистронов, создали мощные (60 и 40 кВт) многолучевые клистры для телевизионных передатчи-

ков дециметрового диапазона (470...810 МГц). Многолучевая конструкция оказалась привлекательной по нескольким причинам. Одна из главных – низкое напряжение, близкое к рабочему напряжению ТВ-клистронов, и отсюда более легкая замена клистронов на клистроды без существенного изменения в существующих источниках питания ТВ-передатчиков.

Один из наиболее ответственных узлов прибора – многолучевая катодная и сеточная структуры. С помощью двухмерной программы электронной оптики рассчитаны траектории электронов в одном из парциальных каналов многолучевой структуры. Полученные параметры многолучевого клистрода отличаются меньшим в 2 раза рабочим напряжением и повышенным на 2...3 дБ значением коэффициента усиления при выходной мощности 60 кВт.

В настоящее время возрастает интерес к проблемам беспроводной передачи энергии сфокусированным СВЧ-пучком и, как следствие, к вопросам обратного преобразования СВЧ-энергии в энергию постоянного тока, которые на сегодняшний день не имеют вполне удовлетворительного решения.

Весьма многообещающим по надежности и эффективности преобразования СВЧ-энергии в энергию постоянного тока является циклотронный преобразователь – мощный электровакуумный прибор, принцип действия которого основан на преобразовании энергии циклотронного вращения электронов в энергию их поступательного движения в спадающем магнитном поле и последующем торможении электронов в коллекторе. При этом полезная энергия выделяется на внешней нагрузке (Радиотехника, 1999, № 4).

На рис. 1 схематически показано устройство циклотронного преобразователя с кольцевым коллектором-рекуператором. В области максимальной предельной скорости электронов находится барьерный электрод с потенциалом, ниже потенциала коллектора. Барьерный электрод препятствует вылету вторичных электронов из коллектора. Преобразование вращательной компоненты энергии пучка в поступательную происходит за счет спадающего магнитного поля. На рис. 2 показаны расчетные трехмерные траектории электронного пучка на входе в кольцевой рекуператор. В экспериментальном макете преобразователя получен КПД около 65 % при выходной мощности 400 Вт, напряжении до 8 кВ в диапазоне 2,45 ГГц. В процессе разработки прибора уже удалось подтвердить ряд важных качеств, присущих преобразователю: способность выдерживать значительные СВЧ-перегрузки, работать при неоптимальной нагрузке в цепи постоянного тока, высокое выходное напряжение и расчетные значения КПД 85...90 %.

К оригинальным направлениям вакуумной СВЧ-электроники нужно отнести новый тип прибора на основе вторично-эмиссионного разряда (мультипактора), названный в ФГУП «НПП «Исток» аленотроном. Особенный интерес представляет использование одноэлектродного мульти-

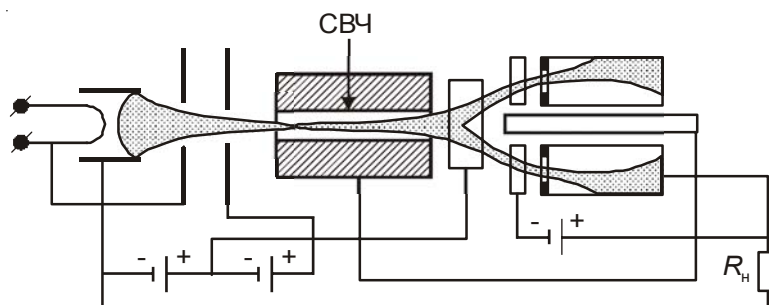


Рис. 1. Схема циклотронного преобразователя с кольцевым коллектором

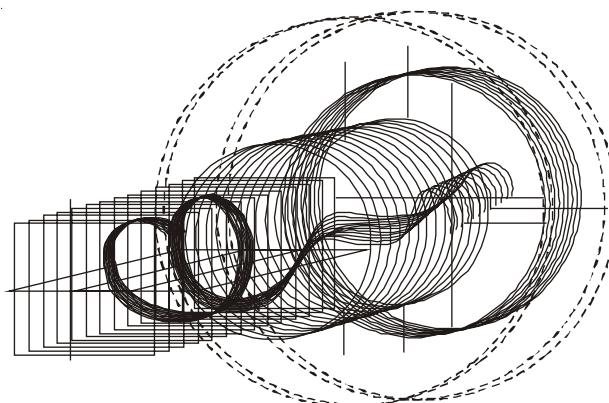


Рис. 2. Электронный пучок в рекуператоре циклотронного преобразователя

пактора для модуляции электронного потока и усиления СВЧ-колебаний (Радиотехника, 2001, № 2). Теоретические оценки показывают возможности создания вакуумного транзистора, объединяющего преимущества, присущие как вакуумным, так и твердотельным СВЧ-приборам.

### СВЧ-техника твердотельных приборов и устройств

Несмотря на продолжающееся развитие традиционных и новых направлений вакуумной СВЧ-электроники, создание перспективной радиоэлектронной аппаратуры 5-го поколения базируется, главным образом, на достижениях твердотельной СВЧ-техники, в частности на широком использовании монолитных СВЧ-микросхем.

Диапазон современной твердотельной СВЧ-техники охватывает большое число приборов и устройств: усилителей различных видов и применений, генераторов, стабилизированных и управляемых напряжением, смесителей, преобразователей, умножителей и делителей частоты, аттенуаторов, фазовращателей, ограничителей мощности и многих других. В табл. 2 представлены около 100 типов СВЧ-приборов и устройств, разработанных и выпускаемых ФГУП «НПП «Исток».

Таблица 2

Наименование	Количество типов
<b>СВЧ полупроводниковые приборы диапазона 6-40 ГГц</b>	
Транзисторы малошумящие, арсенидгаллиевые	8
Транзисторы мощные, арсенидгаллиевые	12
<b>СВЧ полупроводниковые устройства диапазона 0,3-18 ГГц</b>	
Усилители малошумящие, широкополосные с управляемым усилением	14
Усилители мощные, широкополосные с управляемым усилением	12
Усилительные модули с регулировкой усиления	15
Усилители корпусированные, мощные	22
Смесители	2
Монолитные активные арсенидгаллиевые 4-полюсники для генераторов	10
Делители частоты на 2, умножители частоты на 2	12



Каталог отечественных твердотельных приборов, включающий в себя продукцию НПП «Пульсар», «Салют», «Алмаз», АО «Светлана» и др., значительно шире показанного в таблице. На их основе создаются модули и блоки современной радиоэлектронной аппаратуры широкого применения, например малогабаритный синтезатор частот для активной головки самонаведения ракет РВВ-АЕ в гибридном исполнении с использованием активных элементов.

Таким образом, отечественная твердотельная СВЧ-техника охватывает все необходимые технические направления и в ряде из них имеет достижения, близкие к мировому уровню. Особенно следует отметить результаты поисковых исследований в области физики твердого тела, полупроводниковых материалов и гетероструктур.

Однако в производстве транзисторных усилителей в отечественном приборостроении сложилось определенное отставание. Оно незначительно в области входных усилителей, коэффициент шума которых уступает на 0,5...1,0 дБ лучшим зарубежным образцам. Созданный образец малогабаритного трехканального СВЧ-приемника в гибридном исполнении для моноимпульсной обработки сигнала, входящего в состав антенного моноблока АРГС РВВ-АЕ, по совокупности характеристик практически не уступает мировому уровню.

Параметры усилителей мощности, особенно в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн, заметно ниже мирового уровня. Основной причиной этого является состояние технологии производства мощных транзисторов и их основных исходных материалов. С целью исправления положения руководством Российского агентства по системам управления приняты необходимые меры по реализации проекта пилотной линии производства монолитных СВЧ-микросхем с топологическими нормами обработки 0,1...0,2 мкм и организации производства гетероструктур на основе арсенида и нитрида галлия. Проектируемые производственные мощности пилотной линии позволят удовлетворить потребности радиоэлектронной промышленности до 2010 г.

Надо отметить, что в США объем выпуска приборов на основе арсенида галлия в 2001 г. превысил 3,5 млрд долл., причем применение этих приборов в аппаратуре беспроводной связи составило более 60 %, а в военной аппаратуре – лишь 4 %. В отличие от отечественной практики, широкое использование арсенидгаллиевой технологии в промышленной аппаратуре обеспечивает полномасштабную ритмичную загрузку производственных мощностей твердотельной СВЧ-электроники. При этом резко повышается эффективность инвестиций в микроволновые технологии и существенно снижается себестоимость продукции, в том числе и военного назначения.

Разнообразие твердотельной СВЧ-техники не позволяет в этой статье проанализировать все направления радиоэлектронной аппаратуры, в которой она находит свое применение. Поэтому в дальнейшем изложении мы остановимся на наиболее важных проблемах, которые связаны с созданием радиоэлектронных систем и комплексов 5-го поколения. Основной отличительной чертой этих систем является использование в них активных антенных фазированных решеток (АФАР) со сложением излучаемой мощности в пространстве.

Разработка АФАР также имеет длинную историю, но появление твердотельных решеток стало возможным только в последние два десятилетия в связи с успехами в создании твердотельных элементов и монолитных СВЧ-микросхем. Активные твердотельные антенные решетки позволяют радикально повысить эксплуатационные характеристики фазированных антенн (надежность, коэффициент полезного действия, удобство обслуживания) и гибкость управления, достигаемую благодаря удобству их комплексирования с современными специализированными и

универсальными цифровыми вычислительными устройствами. Практически мгновенное перемещение луча в пространстве, широкие возможности управления формой диаграммы направленности и высокий потенциал делают эти антенные системы незаменимыми при работе по малозаметным высокоскоростным целям, к которым относится современное высокоточное оружие.

Широкому использованию АФАР препятствует их стоимость, которая быстро увеличивается с уменьшением длины волны. Поэтому создание больших антенн в коротковолновой части сантиметрового диапазона оказывается очень дорогим удовольствием, а в миллиметровом - просто разорительно. Учитывая экономические трудности России, которые носят длительный характер, и необходимость поддержания высокого уровня разработок в области радиоэлектронных средств, большое значение приобретает выработка экономически целесообразной доктрины сохранения и развития высоких технологий в этой области.

Ориентировочные количественные оценки целесообразности использования пассивных и активных ФАР приведены д.т.н. А. А. Толкачевым (ОАО «Радиофизика») на Нижегородском семинаре в сентябре 2001 года. На рис. 3 показаны ориентировочные величины стоимости 1 м<sup>2</sup> апертур активной и пассивной антенн при средней мощности 2 кВт. Если в диапазоне 20...30 см эти стоимости совпадают, то на длине волны 3 см стоимость 1 м<sup>2</sup> апертуры твердотельной активной решетки возрастает до 5 млн долл. и превышает стоимость апертуры пассивной почти в 100 раз. Надо учесть, что при этих расчетах А. А. Толкачев полагал стоимость активного модуля равной 1000 долл., что, в общем, близко к действительности по показателям первой серийной радиолокационной европейской станции обнаружения и подавления артиллерийских позиций «КОБРА».

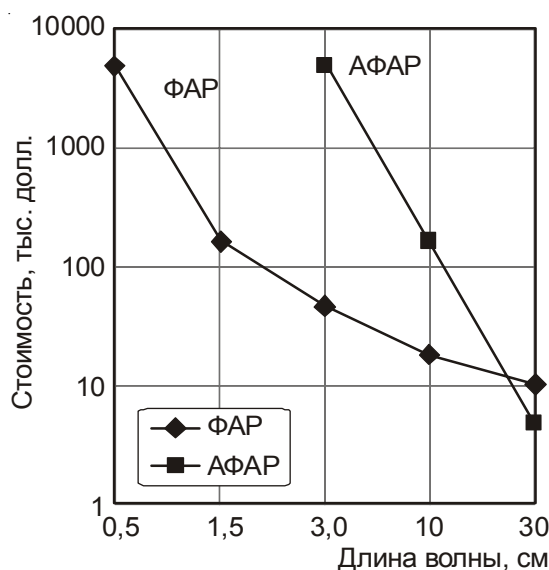


Рис. 3. Ориентировочные величины стоимости 1 м<sup>2</sup> апертур АФАР и ФАР при средней излучаемой мощности 2 кВт

Фактор снижения стоимости становится одним из главных при проектировании современной АФАР. Он находится в вопиющем противоречии с требуемыми высокими характеристика-

ми приемно-передающего модуля (ППМ), в частности с его выходной мощностью, усилением и плотностью упаковки. Необходимо учесть, что огромное влияние на стоимость оказывают ритмичность и объем выпуска однотипных модулей, а также использование унифицированных базовых технологий производства их элементов, и в первую очередь монолитных СВЧ-микросхем. Степень унификации и связанный с ней объем выпуска являются главными определителями цены ППМ. При этом нужно учитывать, что зависимость стоимости от объема выпуска не является линейной – она скачкообразна. Причем периодичность и высота скачков зависят как от унификации ППМ, так и от структуры технологического процесса и степени автоматизации тестирования годной продукции.

Термин «унификация» применительно к элементам (СВЧ ППМ) и составным частям (группировкам ППМ) АФАР приобретает принципиально новое значение. Здесь нужно говорить не о привычной для нас конструктивной унификации, а о параметрической и технологической унификации. Без нее невозможно одновременное выполнение требований высокого потенциала, низкой стоимости и эксплуатационной надежности.

Параметрическая и технологическая унификация ограничивает сверху и снизу существующее конструктивное разнообразие элементов и составных частей АФАР и приводит к некоторым функциональным ограничениям в режимах ее работы. Тем не менее, между этими границами параметрической и технологической унификации остается достаточно пространства для конструктивных модификаций СВЧ ППМ и составных частей АФАР на их основе, позволяющего результативно решать вопросы распределения СВЧ-сигналов, подводки первичного питания, цифрового управления и теплоотвода. Из этого следует необходимость тщательной проработки оптимальных путей построения АФАР в целом, ее элементов и составных частей.

Облик и параметры СВЧ-компонентов должны унифицироваться исходя из структуры унифицированных СВЧ ППМ, состава их группировки в решетке и используемых в создаваемой пилотной линии базовых технологий МИС СВЧ и исходных материалов.

Унификация рядов функциональных элементов ППМ без принятия решения об унифицированном облике и параметрах СВЧ ППМ и группировки в целом не решает проблемы. Возникающие ограничения в выборе конструктивного оформления должны быть приняты разработчиками АФАР как предельные рамки их свободы в выборе построения и характеристик АФАР в целом.

Следует отметить, что приведенный материал далеко не исчерпывает все направления СВЧ-техники. В нем отсутствует раздел дискретных СВЧ-приборов  $L$ - и  $S$ -диапазонов, в которых головная организация НПП «Пульсар» имеет значительные достижения, не уступающие мировому уровню. Не приведен обзор состояния ферритовой СВЧ-техники.

Продолжается развитие отечественной вакуумной СВЧ-техники, ее традиционных и принципиально новых направлений, не имеющих аналогов за рубежом. Технический уровень вакуумной электроники в основном соответствует зарубежному, а по некоторым видам приборов превосходит его.

*Создание перспективной радиоэлектронной аппаратуры 5-го поколения базируется, главным образом, на достижениях твердотельной СВЧ-техники, в частности на широком использовании монолитных СВЧ-микросхем. Диапазон отечественной твердотельной СВЧ-техники охватывает большое число приборов и устройств: усилителей различных видов и применений, генераторов, стабилизированных и управляемых напряжением, смесителей, преобра-*

зователей, умножителей и делителей частоты, аттенюаторов, фазовращателей, ограничителей мощности и многих других. Отечественная твердотельная СВЧ-техника включает в себя перечисленные технические направления и в ряде из них имеет достижения, близкие к мировому уровню. Однако в производстве транзисторных усилителей мощности в отечественном приборостроении сложилось определенное отставание, основной причиной которого является состояние технологии производства мощных транзисторов и их основных исходных материалов. Принимаются реальные меры к кардинальному решению этой проблемы.

Основной отличительной чертой радиоэлектронных систем 5-го поколения является использование в них активных антенных фазированных решеток со сложением излучаемой мощности в пространстве. Оценены перспективы построения и оптимальные границы применения АФАР и ФАР с учетом их технических характеристик, стоимости и возможностей реализации.

---

## ВОСПОМИНАНИЯ О С. И. РЕБРОВЕ

---

**В. М. Пролейко,**  
*начальник Главного  
научно-технического управления  
МЭП СССР  
с 1968 по 1985 годы,  
профессор кафедры НТР МАТИ*

### ЛИДЕР ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

В начале 1962 года, работая начальником отдела 1-го Главного управления ГКЭТ, я познакомился с Сергеем Ивановичем Ребровым при его утверждении директором НИИ-160.

Все последующие 45 лет, практически до его последних дней, и особенно в период от начала 60-х до середины 80-х, нас с Сергеем Ивановичем связывала совместная работа по развитию отечественной электроники и ее СВЧ-направления.

В начале 60-х годов НИИ-160 – один из старейших институтов электронного профиля, имевший уже тогда самую передовую научно-техническую школу, стратегически рассматривался организатором электронной промышленности министром Александром Ивановичем Шокиным как модель для организации всей отрасли.

Спецификой этой модели было развитие для разработки и производства электронных приборов собственного материаловедения и машиностроения, определяющее значение технологии производства, обязательное наличие для НИИ опытного завода.

Сергей Иванович Ребров развивал вверенный ему коллектив именно в указанных направлениях, уделяя при этом особое внимание сложным и разносторонним проблемам технологии.

Развивая наработки классиков электронной технологии С. А. Векшинского, С. М. Зусмановского, Н. В. Черепнина, С. И. Ребров эффективно сочетал при этом качества настоящего ученого и эффективного руководителя.

Инициативно поставленный и успешно руководимый им сквозной для всего института комплекс работ по теме «Операция» стал руководящим технологическим документом для СВЧ-отрасли и убедительной докторской диссертацией для автора.

Востребованность СВЧ-техники в 60-е годы привела к созданию в Москве, Ленинграде, Киеве, Саратове, Новосибирске, Нижнем Новгороде, Ростове, Полтаве, Владикавказе новой отрасли электроники. Модель НИИ-160 и усилия коллектива во главе с С. И. Ребровым вывели эту отрасль на передовые позиции в мире.

Тематика института охватывала электровакуумные, газоразрядные, полупроводниковые приборы, приборы квантовой электроники, медицинскую электронную технику, связную аппаратуру, новейшие технологии формообразования и обработки материалов.

Все это требовало от коллектива и его руководителя непрерывного углубления знаний, последовательности, настойчивости, целеустремленности. Сергей Иванович обладал этими качествами. По его инициативе институт НИИ-160 («Исток») приступил к разработке лазеров различных типов, он активно поддерживал разработку многолучевых электровакуумных СВЧ-приборов, до сего времени опережающих по уровню зарубежные аналоги.

Опыт головного в электронной промышленности НИИ-160 широко использовался при создании и развитии НИИ, КБ и заводов всей отечественной электроники. Министр А. И. Шокин высоко ценил этот опыт, часто посещая НИИ-160. Сергей Иванович пользовался высоким авторитетом у министра и аппарата управления отраслью, часто участвовал в заседаниях коллегии министерства и совещаниях у министра.

Особо необходимо отметить смелую, казалось, на начальном этапе рискованную инициативу Сергея Ивановича и его институтских коллег по комплексированным цепочкам СВЧ-приборов. Усложнение радиоаппаратуры оборонного направления приводило уже в 70-е годы к всё большему разногласиям между создателями электронных приборов и систем на их основе и, что хуже, к снижению эффективности систем.

Глубоко понимая физические, физико-химические, ресурсные и другие особенности электронных приборов, специалисты «Истока» взяли на себя ответственность за оптимизацию построения активной части радиоэлектронных комплексов.

Генеральному директору «Истока» С. И. Реброву досталась тяжелая роль убеждения системщиков в необходимости заменить постоянные претензии к комплектующим изделиям на равноправное участие со специалистами МЭП в создании эффективной и надежной радиоэлектронной аппаратуры.

Потребовалось несколько лет, пока общее понимание было достигнуто, а Сергей Иванович Ребров получил статус Генерального конструктора.

В начале 80-х годов я руководил от МЭИ программой совместных с Таганрогским радиотехническим институтом работ по разработке радиолокационных комплексов для самолетов МиГ.

ГНТУ собрало вокруг команды «Истока» во главе с С. И. Ребровым и ТРТИ во главе с ректором А. В. Каляевым необходимых специалистов отрасли, и я еще раз был свидетелем профессионализма Сергея Ивановича Реброва – Генерального конструктора.

Проблема, поставленная Главкомом ВВС П. С. Кутаховым, была решена в короткий срок, а «Исток» под руководством С. И. Реброва, продолжая работать уже совместно с радиопромышленностью над комплексными разработками, обеспечил себя заказами, которые помогли коллективу выжить в годы непродуманного (возможно, наоборот – продуманного) развала отечественной электроники.

Сергей Иванович тяжело переживал эти годы, с горечью говорил о планах новых руководителей отрасли переориентировать «Исток» на упрощенную и непрофильную продукцию. Он с обоснованной гордостью считал себя профессионалом и действительно был им не только в своей научной и служебной деятельности, но и в своих увлечениях фотографией, кино и электронной съемкой.

Он тщательно работал над своими научно-техническими статьями, которые постоянно с интересом изучались специалистами и всегда будут школой для новых поколений.

В 2003 году мне удалось убедить руководство Российского агентства по системам управления считать 1943 год годом создания отечественной радиоэлектроники. За основу этого было

взято Постановление Государственного комитета обороны от 4.07.1943 г. «О радиолокации», согласно которому были в том числе созданы три системных института: ЦНИИ-108, НИИ-160 и ПКБ-270.

Сергей Иванович с присущей ему энергией участвовал в подготовке юбилея, выступил с докладом, принял участие в создании DVD-фильма «60 лет отечественной радиоэлектронике», выпущенного НПК «Компьютер», генеральным директором которого я работаю с 1988 года.

Последние наши с ним контакты были связаны с его фундаментальным аналитическим обзором «Электронная СВЧ-техника» в книге «Динамика радиоэлектроники», выпущенной издательством «Техносфера» в 2007 г.

Изучение этого последнего труда Сергея Ивановича Реброва еще раз подтверждает его профессионализм и роль лидера отечественной СВЧ-электроники.

**Е. А. Федосов,**  
*генеральный директор  
ГосНИИАС,  
академик*

### **ИЗ ВОСПОМИНАНИЙ\***

...Однажды на авиакосмическом салоне в Ле-Бурже Томас Стаффорд, командир американского космического корабля «Аполлон», впервые в истории состыковавшегося с советским «Союзом», пригласил М. Н. Мишука на стенд фирмы «Хьюз». Этот стенд можно было посетить только по специальным приглашениям. Михаил Никитович взял с собой меня, а я взял со стенда рекламные проспекты радиолокационной станции APG-65 самолета F-18. Я привез их к себе в институт. Гидалий Моисеевич Кунявский, которого уволили с работы за неудачную разработку радиолокационной станции для МиГ-23 и которого я взял в наш институт, поскольку освободили его от должности, в частности, и с нашей подачи, очень внимательно изучил эти проспекты и быстро сообразил, по какому принципу строят свои новейшие станции американцы. Мы тут же вышли «в инстанции» с предложением разработать новое оборудование, не хуже американского, но и МиГ-29, и Су-27 уже были в последней стадии готовности к поступлению на вооружение, и нас остановили. Решили, что переработкой БРЛС следует заняться, модифицируя эти машины.

Минрадиопром вначале принял в штыки наши предложения, говоря, что подобная система обработки сигнала – дело невозможное, что это пахнет дезинформацией со стороны США... Этот вопрос рассматривался на ВПК. И тут, как ни странно, мы нашли поддержку в лице министра электронной промышленности Александра Ивановича Шокина, которому пришлось по душе идея создания БРЛС с обработкой сигналов на ПСП-процессорах. Для решения этой задачи, естественно, понадобилась бы новая элементная база, а это – шаг вперед в нашей электронике.

---

\*Федосов Е.А. Полвека в авиации. Записки академика. – М.: ООО «Дрофа», 2004. – С. 262-264.

В то время на фрязинском «Истоке» генеральным конструктором работал Сергей Иванович Ребров. Электронщики наши умели уже делать многие микросхемы высокой интеграции, но не могли найти им применение: радиопром просто не готов был их брать себе в разработки. Поэтому Ребров с энтузиазмом взялся за строительство радиолокационной станции на новой элементной базе. А. И. Шокин дал ему «добро» на то, чтобы он подключил к этой работе все нужные предприятия электронной промышленности для создания необходимого научно-технического задела по таким станциям. И наш институт вместе с «Истоком» взялись за эту работу, которая вошла в историю авиапрома как НИЭР «Союз» – научно-исследовательская экспериментальная работа «Союз». Наш институт создал летающую лабораторию на базе самолета Ту-134, и с ее помощью коллективы ГосНИИАС и «Истока» построили и отработали новую РЛС. Уже тогда, в середине 80-х, а это почти тридцать лет назад, она обладала теми же характеристиками, которыми обладает модернизированная станция, устанавливаемая сейчас на Су-30, и на ней мы получали те же режимы, к которым лишь подошли нынешние создатели РЛС.

Это была очень большая работа института – не бумажная, а экспериментально-доводочная, которая, к сожалению, не нашла в те годы своего логического завершения, поскольку началась «перестройка».

Должен сказать, что мы ощущали некое недоверие к идеям, которые воплощали в жизнь вместе с Ребровым, со стороны ряда заинтересованных лиц, и даже В. К. Гришина. И только когда он на одной из выставок увидел станцию шведской фирмы «Эрикссон», его неприятие нашей работы мгновенно испарилось. Шведы, в отличие от американцев, работавших на фирмах «Хьюз» и «Вестингауз» и секретивших свои изыскания по РЛС для F-16, F-18 и F-15, спокойно поделились с Гришиным своей информацией. По-моему, базирясь на ней, они создавали такую же станцию для «Виггена» и не считали ее каким-то большим секретом.

Только после этого сопротивление, которое мы ощущали, было сломлено, и П. С. Плешаков, и многие другие нас поддержали, и было заложено новое поколение РЛС. Станции «Копье», «Жук», «Барс», а также РЛС для Су-30 построены на наших с Ребровым заделах того времени. Принципы, по которым действуют эти изделия, были отработаны еще в середине 80-х, и ответственная планарная решетка для антенны БРЛС впервые была сделана С. И. Ребровым и коллективом «Истока». По тем временам ее изготовление потребовало применения сложнейших технологий, но наши электронщики с этой задачей справились блестяще.

В это же время – в начале 80-х годов – американская фирма «Хьюз эйркрафт» начала разрабатывать ракету класса «воздух – воздух» AMRAAM с активной головкой самонаведения. У нас же применялись полуактивные головки. Ракеты, оснащенные ими, были лучше американских, но появление активной головки резко меняло ситуацию в их пользу. Такая головка как бы «развязывает» самолет: ему не нужно больше придерживаться сектора облучения цели и можно вести воздушный бой по принципу «пустил – забыл». Не имея такой ракеты, мы сразу попадали в ранг проигрывающих.

И вот здесь нужно еще раз отдать должное С. И. Реброву. Он в рамках этой же НИЭР «Союз», работая над локатором, создал оригинальнейшую головку самонаведения и для наших ракет «воздух – воздух». В ней он тоже применил щелевую антенну, а излучающее устройство – клистрон – поставил прямо на нее. Ребров очень изящно сконструировал клистрон, уложившись в малые размеры, чего американцы не смогли сделать на своей AMRAAM. Они поставили передатчик отдельно и на этом потеряли потенциал головки.



Принципиальным отличием между нашим и американским изделиями явилось и то, что наш институт вместе с «Иостоком» объединил такие понятия, как головка самонаведения и система управления ракеты. Первую он использовал как чистый измеритель доплеровских характеристик цели, а выработку сигнала целеуказания, управление антенной и ракетой формировал единый вычислительный блок. В нем же был реализован и гироскопический режим. Ракета ведь имеет довольно продолжительный участок автономного полета, она должна идти по траектории, для чего и нужна бесплатформенная гироскопическая система. На конечном этапе полета вступает в действие активная головка самонаведения, которая осуществляет захват цели в тот момент, когда приходит в зону ожидания самолета противника.

Вот этот вычислительный блок был объединен с автопилотом ракеты в НИИП под руководством главного конструктора Б. Н. Гаврилина.

Таким образом, НИЭР «Союз» позволила нам создать и новый радиолокатор для модификации МиГ-29 и Су-27, и систему управления ракетой класса «воздух – воздух». Эти изделия прошли испытания на нашей летающей лаборатории Ту-134, и мы получили «картинки» земной поверхности, которые были, на мой взгляд, ничем не хуже тех, что выдают современные станции.

**А. А. Шокин,**  
*директор Конструкторского бюро  
полупроводникового машиностроения*

### **ОТРЫВОК ИЗ КНИГИ «МИНИСТР НЕВЕРОЯТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР»\***

В 1979 г. на очередную выставку в ЦНИИ «Электроника» Устинов привел с собой всю верхушку Министерства обороны.

Вскоре после этого посещения Главком ВВС П. С. Кутахов позвонил А. И. [Александр Иванович Шокин, министр электронной промышленности СССР] с необычной просьбой: взяться за создание для новых истребителей МиГ-29 и Су-27 радиолокационного комплекса. «От Минрадиопрома радиолокационного комплекса типа того, что делают американцы, я добиться не могу», – пояснил главком. Действительно, американцам для самолета F-18 удалось решить сложнейшую задачу, создав двухрежимный радиолокатор, который может работать и «по воздуху», и «по земле» и управлять оружием самолетов для задач как истребителя, так и штурмовика. Наши истребители уже имели РЛС, которая могла отслеживать воздушную цель на фоне земли, но наземные цели она не различала. Чтобы сделать это возможным, радиосигнал нужно было обработать в цифровой машине радиолокатора специальными тончайшими методами, с помощью преобразования Фурье. Американцы для этого совершили крупный скачок в микроэлектронике, разработав так называемые сигнальные процессоры. Кутахов прекрасно разбирался в технике и хорошо понимал, куда сдвигается центр тяжести в разработках радиоэлектронной аппаратуры, а поэтому и решил обратиться непосредственно в МЭП.

---

\*Шокин А.А. Министр невероятной промышленности СССР. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1999. – С. 346-348.

...А. И. поручил ГНТУ через соответствующие службы достать нужные сведения о радиолокационном комплексе фирмы Hughes. Информация была получена достаточно быстро и в довольно полном виде. Основой широких возможностей комплекса было включение в его состав быстродействующего преобразователя Фурье (БПФ) на основе компьютера со скоростью вычислений 100 миллионов операций в секунду.

Никаких откровений для электронщиков материал не содержал, и в целом задача оказалась понятной. Для достижения успеха при создании подобного комплекса требовалась технология интегральной СВЧ-электроники и микроэлектроники, и предприятия МЭП в должной мере ею владели. Кроме бортового радиолокационного комплекса должна была быть разработана головка самонаведения для ракеты, которой вооружался самолет.

Пожалуй, эту работу А. И. посчитал для себя самой важной – ведь в ней как бы концентрировались итоги всей его деятельности в областях и радиолокации, и микроэлектроники, и вычислительной техники. Хотя решение ВПК ставило задачу только по разработке образца с последующей передачей его производства вместе с соответствующими технологиями в МРП, но сама ее постановка в МЭП вызвала бурную реакцию Плешакова. Устинов в данном случае поддерживал А. И., но полностью погасить недовольство радистов и следовавшие как результат один за другим наскоки на МЭП он не мог. Но А. И. старался не обращать внимания.

Дело оставалось за малым: найти соответствующий состав электронных компонентов от мощных СВЧ-излучателей до всей гаммы транзисторов, резисторов, переключателей и пр. и создать команду людей, которая бы разрабатывала этот радиолокатор вместе с компьютером, а заодно и головку самонаведения для новой ракеты Р-77. Организацию, прикрытие и финансирование А. И. взял на себя.

Собственно радиолокатор и головку самонаведения было поручено вести «Истоку» во главе с С. И. Ребровым. Для создания сигнальных процессоров и компьютера с БПФ был привлечен Таганрогский радиотехнический институт им. В. Д. Калмыкова.

...В историю авиапрома эта работа вошла как НИЭР «Союз» – научно-исследовательская экспериментальная работа «Союз». ГосНИИАС создал летающую лабораторию на базе самолета Ту-134, на которой вместе с «Источком» построили и отработали новую РЛС.

Примерно через год весь комплекс был показан на выставке в ЦНИИ «Электроника». Впервые для Минэлектронпрома в закрытом секретном зале стоял полный комплекс бортового радиолокатора боевого самолета, включавший компьютер с БПФ и антенну, снабженную обтекателем и способную вращаться со многими степенями свободы, и тут же рядом лежала головка самонаведения для ракеты.

Демонстрация вызвала сдержанное одобрение Д. Ф. Устинова и несдержанную ярость конкурентов. П. С. Плешаков был страшно недоволен из-за того, что его знаменитый «Фазотрон» (сегодня ведущее предприятие) так и не смог подойти к чему-нибудь похожему, привычно прикрываясь по стандартной схеме: «Мы не можем сделать этот преобразователь из-за того, что МЭП не дает нам комплектацию» (хотя из этой истории видно, что причиной было все-таки непонимание задачи именно системщиками).

К судьбе разработки РЛС остается добавить судьбу головки самонаведения, тогда же разработанной «Источком». До сих пор она остается уникальной по своим характеристикам и в трудные годы хорошо поддержала это наше выдающееся, заслуженное предприятие на плаву за счет экспортных поставок.

**Б. Ч. Дюбуа,**  
*лауреат Государственной премии СССР,  
доктор физико-математических наук,  
профессор*

## **ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНОЛОГИИ – ОСНОВА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

Мысль, казалось бы, простая. Но в начале 70-х годов технологов в электронной промышленности рассматривали или как магов, в лучшем случае, или – в худшем, как «мальчиков для битья». На ранних этапах становления электроники такой подход, вероятно, был оправдан, но, когда эта отрасль техники начала играть заметную роль в развитии общества, его экономики, в его обороноспособности, наивность в оценке роли технологии в обеспечении надежности радиоэлектронных систем стала просто опасной. Необходимо было это понять, наметить конкретные меры, обеспечивающие становление технологии электронных приборов как науки, и мобилизовать волю на решение поставленных задач. Со всем этим Сергей Иванович Ребров блестяще справился.

Результаты исследований и разработок, посвященных аспектам конструктивно-технологической надежности электровакуумных приборов, изложены в книге С. И. Реброва «Повышение надежности электронных приборов СВЧ в процессе их производства». Методология решения этой проблемы применима и к полупроводниковым (твердотельным) приборам СВЧ.

Рискну высказать свое отношение к этому вопросу. По насыщенности технологическими проблемами электровакуумные приборы существенно превосходят твердотельные. Технология вакуумного прибора базируется на знаниях физико-химических свойств металлов, изоляторов, полупроводников, явлений адсорбции и адгезии, явлений термоэлектронной, вторично-электронной и полевой эмиссии, на знаниях металлургии, металловедения и сопротивления материалов и пр. Такая насыщенность, конечно, недостаток электровакуумных приборов, но технолог, прошедший школу вакуумных приборов, как правило, быстрее решает технологические проблемы твердотельных приборов.

Согласно С. И. Реброву, конструктивно-технологический аспект надежности включает в себя необходимость решения двух фундаментальных задач:

- выведение формул или разработка алгоритмов, позволяющих установить связь параметров приборов с заданным эксплуатационным режимом через конструктивные характеристики и константы использованных материалов;
- количественное определение влияния физико-химических процессов, протекающих во время работы прибора, на его параметры.

При идеальном состоянии технологического процесса решение этих двух задач позволит установить количественные связи между заданным режимом работы прибора и показателями надежности.

Однако в действительности если первая задача трудна, то вторая – просто непосильна. С развитием вычислительной техники решение первой задачи не вызывает принципиальных

ограничений. Что касается второй задачи, то уровень наших знаний о физико-химических процессах, происходящих внутри вакуумного прибора, до настоящего времени остается совершенно недостаточным для прогнозирования количественного влияния этих процессов на параметры приборов.

С учетом этих обстоятельств С. И. Ребров предложил проблему надежности решать расчетно-экспериментальным путем в процессе опытно-конструкторской разработки, для чего предлагалось использовать три категории запасов: конструктивные, эксплуатационные и производственные.

Для характеристики технологического процесса С. И. Ребров ввел понятие скрытый брак. Наличие этого вида брака является тем принципиальным отличительным признаком, который характеризует современное производство электронных приборов (вакуумных, вероятно, в большей степени, чем твердотельных) и приводит к неполной технической управляемости технологических процессов.

Нестабильность не полностью технически управляемых производственных процессов вызывается наличием неконтролируемых, произвольно меняющихся параметров операций, на которых возможно возникновение скрытого брака.

Не полностью технически управляемые процессы могут быть стабилизированы, т.е. доведены до такого состояния, которое характеризуется постоянным значением вероятности появления скрытого брака. Необходимым условием при этом является введение операционного контроля (желательно автоматизированного) всех возможных параметров технологического процесса.

Разработка операционного контроля наиболее сложных процессов производства электронных приборов и выяснение оптимальных средних значений и дисперсий параметров операций являются основными задачами научно обоснованной технологии.

Свои идеи, направленные на повышение надежности электронных приборов СВЧ, С. И. Ребров довел до их практической реализации в серийном производстве приборов. Под его руководством были разработаны методики контроля параметров технологических операций и качества полученной в результате их проведения продукции, оборудование, инструментарий и приспособления для проведения специфических для данного типа приборов операций, маршрутные, технологические и контрольные карты.

Проведенная работа охватывала огромное количество технологических операций производства катодов, керамики, пайки, сварки, финишной очистки деталей, откачки. И в каждой технологической операции С. И. Ребров стремился дойти до сути физико-химических процессов, лежащих в ее основе. Для этого он учился. Непрерывно и упорно. Крупный ученый всю свою жизнь остается учеником.

**С. А. Перегонов,**  
*ведущий научный сотрудник,  
кандидат технических наук,  
лауреат премии Совета Министров СССР*

## ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЧЕЛОВЕК

О существовании Сергея Ивановича я узнал в 1950 г., когда поступил в МЭИ. В общежитии среди третьекурсников выделялся энергичный, высокий, инициативный парень С. И. Ребров, активист и любитель баскетбола.

В связи с проявлением им «инициативности» мне вспоминается случай, который с высоты прожитых лет выглядит как невинная шалость прекрасной студенческой жизни. Дело в том, что по утрам, после подъема, первокурсники первым делом тащили на кухню чайники, ставили их на газ и бежали умываться, прибираться. Но некоторые из них стали замечать, что их чайники подозрительно долго не закипают. Продолжалось это до тех пор, пока «следствие» не установило, что «старшие товарищи», как люди опытные, приходили на кухню позже, забирали кипящий чайник, а вместо него ставили свой. Под «раздачу» за эти проделки на студсовете попал в том числе и Сергей Иванович.

Вплотную мне пришлось контактировать с Сергеем Ивановичем с 1963 по 1964 годы, когда у нас началась эпоха становления полупроводниковой СВЧ-техники, связанной с созданием активных монохроматических генераторов на ЛПД. Для того времени это был действительно прорыв мирового уровня. Ведь такие генераторы на Западе появились лишь через несколько лет.

Чтобы новинку представить руководству и потенциальным потребителям на должном уровне, необходимо было найти наглядную форму показа, или, как нынче говорят, «презентации», достижения.

А. С. Тагер предложил продемонстрировать это на примере линии связи в СВЧ-диапазоне. В его лаборатории был изготовлен передатчик в футляре от фотоаппарата, а меня он привлек к созданию приемника. Хотя дальность связи обеспечивалась только в пределах комнаты, но она демонстрировала направленность и была первым примером полностью полупроводниковой малогабаритной СВЧ-аппаратурой связи.

Сергей Иванович сразу оценил наглядность демонстрации возможностей ЛПД, и на ближайшей же выставке МЭП (в ЦНИИ «Электроника», весна 1964 г.) это достижение «Истока» было продемонстрировано министру А. И. Шокину. Чуткий ко всему новому, министр не ограничился простым знакомством, а дал указание о постановке темы по разработке более серьезных образцов связной аппаратуры и выразил предположение, что, скорее всего, в ней будут заинтересованы моряки, так как на море ничто не мешает распространению СВЧ-сигнала, а скрытность связи имеет большое значение.

К лету 1965 г. были созданы экспериментальные образцы СВЧ-радиостанции «Румб», которые не стыдно было демонстрировать морякам: дальность связи – до 2 км, ширина луча – менее 15 град, качество связи – как по телефону.

Сергей Иванович договорился о встрече с начальником Управления связи ВМФ адмиралом Г. Г. Толстолуцким. Григорий Григорьевич не просто проявил интерес, а пояснил, что связь между кораблями отряда в походах ведется в УКВ-диапазоне, что в связи с всенаправленностью их антенн и, как следствие, излучаемыми мощностями в 20...50 Вт является главным демаскирующим фактором. Высоко летающие самолеты «противника» обнаруживали излучение за многие десятки километров и появлялись над отрядом через короткое время.

Адмирал не только проявил интерес, а предложил испытать «Румб» через 1,5 месяца в Севастополе во время учебных стрельб кораблей.

Мы, конечно, волновались перед этими испытаниями: не забудут ли нас корабельные РЛС, не будем ли мы мешать их работе, каково будет качество связи?

Но все прошло отлично: четко продемонстрировалась направленность связи, взаимных помех не было, качество речи хорошее. Единственный недостаток – малая дальность (2 км), а надо не менее 10 км.

На этом романтика новизны закончилась, и начались суровые будни. К разработке ТЗ был подключен Институт связи ВМФ и представители Заказчика. Технические трудности тоже выглядели угрожающими. Соревноваться с УКВ-радиостанциями, имеющими мощности в десятки ватт и дальность связи 10...20 км при мощности ГЛПД 10 мВт, поначалу казалось невозможным.

Однако применение направленных антенн, специального вида модуляции и ряда других хитростей схемотехнического характера позволило преодолеть все трудности и создать малогабаритную СВЧ-радиостанцию, не имевшую зарубежных аналогов. Об уровне скрытности говорит такой факт: корабельные станции радиоразведки засекали ее работу на дальностях не более 300 м.

После успешных госиспытаний, включая реальные на кораблях, в 1970 г. РЛС была принята на вооружение. Возникла проблема: где организовывать производство? Вначале за дело хотели взяться моряки, но затем неожиданно для меня Сергей Иванович принял решение об организации производства у нас, для чего был специально создан цех 47. Через пару лет выпуск «Китов» был передан «Агату» (г. Кстово). Всего было выпущено около 3000 радиостанций. Ими было вооружено более 600 кораблей.

Мне рассказывали, что, когда во время ангольского кризиса к берегам Анголы подтянулись наши корабли и США, уровень преднамеренных взаимных помех в УКВ-диапазоне был таков, что только использование «Китов» обеспечивало осознанное взаимодействие наших кораблей.

Конечно, радиостанцию как техническое изделие создавали инженеры, техники, рабочие. Но на пути от ее зарождения до принятия на вооружение важнейшую роль сыграл Сергей Иванович, начиная от оценки ее потенциальных возможностей, пока она была игрушкой и когда определялась область ее применения и, наконец, когда решался вопрос о ее производстве.

Приведу еще один пример из области связи, который характеризует Сергея Ивановича как активного защитника интересов «Истока». В 1980 г. в «Истоке» разработали и начали выпускать цифровую радиорелейную станцию «Радан». РРС пользовались популярностью, и к 1985 г. у Минсвязи возникло желание заказать разработку двух новых модификаций с пропускной способностью 30 и 480 телефонных каналов в одном радиостволе. Мы как разработчики готовы были выполнить эту работу, однако С. И. Ребров согласия на ее проведение не давал, что нам было не понятно.

Минсвязи обращался в МЭП, С. И. Реброву приходили письма зам. министра связи, но он был тверд. Примерно через полгода Сергей Иванович согласился, но с одним условием: связисты введут в эксплуатацию второй телефонный кабель, проложенный вместе с первым еще в начальные годы существования НИИ-160, но не подключаемый из-за каких-то «дефектов», и дадут еще 100 московских номеров «Истоку». Минсвязи сдался.

Мы кроме номеров 485-86-XX получили дополнительно номера 465-88-XX, а связисты – РРС «Радан-МС» (сельский) и «Радан-МГ» (городской).

Наиболее ярко таланты Сергея Ивановича как руководителя и специалиста проявились в период проведения работ по программе «Союз» по созданию бортового радиолокационного комплекса для истребителей Су-27 и МиГ-29. Причина появления этой программы описана в книге «Министр невероятной промышленности СССР» А. А. Шокина и, в двух словах, заключалась в том, что разработчики отечественных РЛС в МРП не брались за создание бортовых РЛС истребителей, аналогичных по параметрам американской РЛС АРГ-65 самолета F-18, ссылаясь на отсутствие необходимых комплектующих.

Руководство Министерства обороны и, в частности, Главком ВВС П. С. Кутахов обратились к А. И. Шокину с необычной просьбой, чтобы МЭП взялся за создание такой РЛС и сопряженной с ней головкой самонаведения для ракеты «воздух – воздух» Р-77.

После некоторых раздумий и обсуждений с потенциальными участниками разработки А. И. Шокин согласился взяться за эту работу, назначив главным исполнителем «Исток», а главным конструктором С. И. Реброва, предоставив ему право на то, чтобы он подключал к этой работе все нужные предприятия электронной промышленности.

Специалисты «Истока» к этому времени уже имели значительный опыт разработки комплексов передающих, приемных и других СВЧ-блоков для РЛС, но новая задача на порядок была сложнее и масштабнее всего, что до этого делалось истоковцами.

Начать с того, что у нас не было системщиков, представлявших во всех аспектах работу такой станции, способных с ходу сформулировать требования к выбору параметров излучаемых сигналов в зависимости от работы РЛС в режимах «воздух – воздух», выделения целей на фоне земли, выделения наземных целей и работе в режиме картографирования.

Из решения этой исходной задачи должны формулироваться требования к структуре РЛС, параметрам передатчика и приемника, СВЧ-приборам, гетеродинам, вычислительным средствам. Не менее сложными были вопросы разработки программного обеспечения работы РЛС. А обеспечение эффективного взаимодействия всех участников этой программы, в которую втягивались предприятия Таганрога, Воронежа, Минска, Саратова, Москвы, Ленинграда и многих других, тоже требовало немалых организаторских способностей от главного конструктора.

В течение нескольких месяцев каждую неделю в кабинете Сергея Ивановича собирались ведущие участники программы «Союз», чтобы вначале изучать имеющиеся материалы по АРГ-65, затем, по мере роста понимания проблемы, формулировать требования к структуре, составу, блокам, узлам, конструкции. В обсуждениях и спорах решались вопросы параметров СВЧ-приборов, что выбрать в качестве выходного прибора передатчика, входного малошумящего усилителя, как обеспечить уникальные характеристики антенны и многочисленного ряда узлов, характеристики, технологии, конструкции и стыки между всеми этими составляющими РЛС, одной из вершин технических достижений электроники.

Это был настоящий мозговой штурм единомышленников, это была не только научно-техническая школа для участников, но и школа воспитания взаимодействия людей, объединенных единой целью. И не случайно в прощальных речах звучали признания многих о том, что они считают Сергея Ивановича своим учителем.

И всем этим процессом дирижировал Сергей Иванович, ставил задачи, участвовал в обсуждениях, разрешал споры оппонентов, устанавливал сроки и требовал исполнения.

Будучи постоянным участником этих обсуждений, я ловлю себя на мысли: где вы, писатели и драматурги? Вот невыдуманный процесс рождения нового творения человеческого разума, настоящее творчество, воплощающее в металл и программы знания своих творцов!

Не часто человек соединяет в себе качества лидера, владеющего способностями организатора, и отличные знания в той области, которой он руководит. Такие люди рождаются и оказываются востребованными для решения масштабных задач, опирающихся на опыт и идеи своих предшественников. Именно это отличало выдающихся руководителей первых пятилеток, военного времени и послевоенного восстановления. Таким был и отец Сергея Ивановича, который в послевоенные годы был заместителем Главы правительства Киргизской ССР.

Думаю, я не ошибусь, если скажу, что помимо способностей, вложенных в Сергея Ивановича природой, свои качества Государственного человека он унаследовал и от тех строителей нашей Родины СССР.

**О. И. Обрезан,**  
*начальник отдела,  
кандидат технических наук,  
почетный радист СССР*

## **О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ И СЛУЧАЙНОСТЯХ**

Случайные закономерности или закономерные случайности – это то, что сопровождает нас всю жизнь. Закономерность или случайность, что я в 1954 г. из Киевского политехнического института попал на работу в г. Фрязино, в «Исток», в отдел применения ИЭТ; случайность или закономерность, что в 1977 г. возвратился в отдел применения СВЧ-приборов после работы в разрабатывающем подразделении. Случайность или закономерность, что в 1962 г. директором ведущего предприятия электронной промышленности – «Истока» был назначен С. И. Ребров, в то время еще вполне молодой человек, но уже проявлявший личные качества: амбициозность, целеустремленность, твердую волю, которые определили его формирование на посту руководителя предприятия как личности выдающейся и, как следствие, противоречивой. Именно он возвратил меня в 1977 г. туда, откуда я начинал свой путь в 1954 г.

С. И. Ребров был одним из нескольких встретившихся на этом пути людей, которые оказывали и оказывают на меня и формальное, и неформальное воздействия. От него эти воздействия исходили, в первую очередь, в сфере производственно-технической – решение проблем обеспечения надежности изделий СВЧ на этапах производства и стыковки изделий с аппаратурой.



Эти проблемы решались и решаются, как правило, в конфликтных ситуациях; в конфликты часто втягиваются различные уровни вертикали управления производством изделий и отношениями с потребителями, а в центре водоворота оказываются руководители предприятий. Далее располагаются те, на кого руководители в таких случаях и оказывают формальные и неформальные воздействия.

Период с середины 50-х до середины 60-х годов был периодом интенсивного вакуумного СВЧ-приборостроения: выполнялось большое количество ОКР, главным образом ЛБВ и приборов М-типа. Разработки велись методом проб и ошибок, количество экспериментальных образцов в процессе ОКР исчислялось многими десятками – производственная база позволяла это осуществлять. Поставки выполнялись в относительно небольших объемах, многие образцы «доводились до кондиции» вручную. Генеральная линия состояла в том, чтобы освоить уровень параметров, который рекламировали зарубежные фирмы, – догнать зарубежную СВЧ-электронику; до системного решения проблем конструктивной и эксплуатационной надежности «руки не доходили», хотя конфликтные ситуации уже складывались. Достаточно вспомнить процесс внедрения в аппаратуру комплекта СВЧ-приборов «Салют» – пятикаскадной усилительной цепочки в составе ЛБВ и четырех амплитронов – или магнетрона «Альбатрос», прибора, в котором впервые была реализована идея сложения мощностей от нескольких источников.

К середине 60-х годов объем производства ЭВП для поставок потребителю возрос, возросла и необходимость обеспечения их ритмичности. Эти обстоятельства объективно требовали решения задач повышения конструктивной, производственной надежности как одного из условий обеспечения приемлемой эксплуатационной надежности ЭВП СВЧ. В 1966–1968 гг. С. И. Ребров с группой ведущих специалистов предприятия выполняет ОКР «Операция», в которой сформулированы и разработаны конструктивный и технологический аспекты надежности ЭВП СВЧ с использованием понятий конструктивно-технологических и эксплуатационных запасов изделий и контролируемости технологических операций. Документированным результатом выполненных исследований явилось руководство «Повышение надежности электронных приборов СВЧ в процессе их производства», но, по существу, в результате выполнения ОКР на техническом уровне была реализована концепция: надежность изделий закладывается на этапе разработки, обеспечивается на этапе производства и реализуется в процессе эксплуатации. Это Руководство, во-первых, стало настольной книгой для разработчиков ЭВП СВЧ и специалистов служб качества и военной приемки и, во-вторых, дало толчок многочисленным разработкам научно-технической документации по нормированию и контролю КТЗ и производственных запасов по параметрам в плане обеспечения качества и надежности выпускаемой продукции вообще, а не только ЭВП СВЧ.

И сейчас, 40 лет спустя, основные положения и проблемы, сформулированные в Руководстве: КТЗ как основа конструктивной надежности, контролируемость технологических процессов и производственные запасы по параметрам как основа обеспечения надежности выпускаемой продукции, эксплуатационные запасы как условие обеспечения работоспособности в аппаратуре при эксплуатации, остаются актуальными. Но изменились времена и выпускаемые изделия, и концепция Руководства нуждается в адаптации к современным изделиям СВЧ и условиям их разработки и производства.

В ОКР «Операция» создавалась основа для решения задачи обеспечения конструктивной и производственной надежности изделий СВЧ. Стыковка изделий СВЧ с аппаратурой была и

остаётся актуальным этапом реализации их производственной надёжности на этапе эксплуатации в составе аппаратуры в условиях комплексного воздействия внешних факторов.

Этой проблеме С. И. Ребров в 1960–1980-е годы уделял серьёзное внимание, как к проблеме, возникающей практически неизбежно на этапе заводских испытаний аппаратуры, «когда прибор устанавливают в промышленный образец аппаратуры» (это его слова. – *О.О.*). В 1973 г. Сергей Иванович организует отдел применения СВЧ-приборов, основной задачей которого как раз и была работа на стыке «изделие СВЧ – аппаратура». Работа состояла не только в выездах в составе бригад на испытательные полигоны РЭС, но и в обследовании электрических режимов и характеристик СВЧ-приборов в составе функциональных блоков аппаратуры на базе предприятия «Исток». Для этого в отдел поступали блоки аппаратуры, в составе которых исследовались причины нестыковки, которые чаще всего лежали в области различий испытательных и эксплуатационных режимов из-за несовершенства измерительных средств, технической документации и произвольной трактовки требований документации потребителями изделий.

Но бывали более сложные случаи, когда для устранения нестыковки приходилось производить существенную доработку как приборов, так и аппаратуры и процесс стыковки занимал длительное время, сравнимое с продолжительностью ОКР. В середине 80-х годов для аппаратуры РЛС «Тор» был разработан многолучевой импульсный двухрежимный клистрон «Антрацит» (главный конструктор Ю. А. Ковалев). На этапе заводского изготовления первого образца передающего устройства в 1985–1986 годах подавляющее большинство клистронов в составе передатчика не обеспечивало требуемых выходных параметров, наработка их до отказа не превышала десятков часов. Исследование причин неудовлетворительной работы клистрона «Антрацит» в аппаратуре и их устранение продолжалось более четырёх лет: потребовалось изменить схему питания клистрона и порядок введения его в режим при первом включении и после срабатывания защиты в передатчике; доработать схему защиты от пробоев в клистроне и СВЧ-тракте в части повышения быстродействия; разработать и внедрить измеритель амплитуды импульсов управляющего электрода; доработать испытательное оборудование в цехе – изготовителе клистронов; доработать клистрон в части повышения стойкости его коллектора к термомеханическим перегрузкам в режиме длинных импульсов; решить целый ряд технологических проблем обеспечения электрической прочности мощных высоковольтных клистронов.

Эта работа потребовала от С. И. Реброва привлечь и организовать взаимодействие большого числа специалистов предприятия при решении разнообразных технических задач. И это в условиях пристального «внимания» со стороны руководства МЭП, Минрадиопрома и Минобороны. Немало неприятных ощущений проблема «Антрацита» подарила Сергею Ивановичу, главному конструктору клистрона, руководству научно-производственного комплекса, и в первую очередь Э. А. Гельвичу, но затрачена энергия была не зря, в конце концов проблема стыковки была решена, были награды. Приобретенный в этой работе опыт зримо или незримо присутствует и сейчас при разработке предприятием мощных ЭВП СВЧ.

Исследования совместной работы мощного клистрона «Антрацит» и передатчика РЛС определили и обострили целый ряд типовых проблем стыковки ЭВП СВЧ с аппаратурой. И в 1990 г. по инициативе С. И. Реброва было разработано и утверждено в установленном порядке руководством МЭП и в/ч 25580 «Положение о порядке проведения работ по стыковке изделий СВЧ с аппаратурой», целью которого было установление порядка обеспечения стыковки изделий СВЧ и аппаратуры начиная с ранних этапов ОКР.

Приходилось ощущать воздействие С. И. Реброва и при выполнении НИР «Обоснование и разработка номенклатуры, величин и методов контроля конструктивно-технологических запасов (включая эксплуатационные) ИЭТ СВЧ» в рамках программы «Процесс», сформулированной как 2-й этап НИР «Операция», и при разработке РДВ «Изделия электронной техники СВЧ. Основные требования и содержание работ по обеспечению надежности изделий при эксплуатации» (11.0942-95), при работе по изделиям «10» и «20» и в других случаях. Не всегда встречи с этим требовательным человеком были «усыпаны розами», но всегда оставляли ощущение, что у С. И. Реброва была не просто точка зрения, а был кругозор.

Не мне давать оценку С. И. Реброву как ученому и руководителю крупнейшего предприятия электронной промышленности. Я лишь вспомнил о некоторых событиях из жизни этого предприятия, неотъемлемой частью которого, его формальным и неформальным лидером был Сергей Иванович и частичкой которого я считаю и себя.

**М. Ф. Воскобойник,**  
*кандидат технических наук,  
почетный радист СССР*

### ПАМЯТИ С. И. РЕБРОВА

Когда тебе за 70, самое время обернуться назад, на прошедшие годы: лучший где? По счастью, у меня их было несколько и всегда они были связаны с встречами с интересными людьми. Но сегодня мы вспоминаем Сергея Ивановича Реброва, и о нем несколько слов.

Его имя практически сразу после вступления в должность генерального директора стало «на слуху»: обширная тема «Операция» затронула все научно-производственные подразделения предприятия; преобразования шли как внутри предприятия, так и за его забором.

Первое знакомство с Сергеем Ивановичем Ребровым произошло у меня на заседании партийного комитета предприятия в начале 70-х годов. Очень скоро я увидел государственный ум этого человека, вникавшего во все дела и предприятия, и города. Более 10 лет работы в парткоме только укрепили первые впечатления.

В начале 80-х набирала обороты, пожалуй, самая масштабная работа в «Истоке» – знаменитая тема «Синтез», и в 1981 году Сергей Иванович доверил мне испытательный отдел в составе НПК-1 по теме «Синтез-1».

Началась напряжённейшая работа по созданию безэховой камеры, стыковке блоков станции на стапеле, доведению их параметров. Пришлось тесно взаимодействовать с замечательными специалистами по радиотехнике, схемотехнике, цифровой технике. Потом были испытания на полигоне в г. Жуковском и завершающие полеты на летающей лаборатории Ту-134 во Владимирке, под Астраханью.

И все это под постоянным, технически конкретным и безупречным организационным руководством Сергея Ивановича Реброва.

Многолетняя эпопея «Синтез-1» завершилась успешной отработкой режима картографирования местности (впервые в СССР). А ведь под руководством С. И. Реброва шла в тот же период

работа «Синтез-2» (по головке самонаведения). И никто не снимал с его плеч работу по управлению огромным научно-производственным коллективом «Истока». Работоспособность этого человека была поразительной.

Я безмерно благодарен Сергею Ивановичу за те напряженные годы труда, озаренные знакомством с десятками высококлассных специалистов, со многими из которых поддерживаю добрые отношения до сих пор.

**А. Б. Киселев,**

*доктор физико-математических наук*

### **ГЕНЕРАЛЬНЫЙ КОНСТРУКТОР\***

Да, Сергей Иванович Ребров – это эпоха отечественной электроники, время её расцвета. Доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной и Ленинской премий, Герой Социалистического Труда, более четверти века генеральный директор головного предприятия СВЧ-электроники – фрязинского «Истока», затем Генеральный конструктор этой отрасли. Сложная, неоднозначная, но яркая личность, способная брать на себя ответственность за принятие решения и проведение его в жизнь, ломая догмы, а иногда и людей, сопротивляющихся его перестройке, сопротивляющихся даже порой разумно, но чаще неразумно, ибо решение вынашивалось долго, обсуждалось со всех сторон, продумывалось и рассчитывалось проверенными на прочность специалистами. Сергея Ивановича вполне можно поставить в один ряд с такими выдающимися организаторами отечественной техники, как И. В. Курчатов, С. П. Королёв, И. А. Лихачев, А. П. Завенягин...

Действительно, что такое электроника сверхвысоких частот? Кто-то из ведущих специалистов однажды сказал, что если бы вдруг отказали все работающие на этот час электронные приборы, разработанные во Фрязино, то в стране остановились бы все электростанции, в том числе и атомные, не смогли бы подняться в воздух самолеты, а взлетевшие не смогли бы сесть, ослепла бы оборона страны, потухли бы телевизионные экраны, прекратилась бы связь и можно было бы только обсуждать, но абсолютно свободно, наличие коррупции в высших эшелонах власти. Конечно, обсуждать, тем более свободно, – это не вкалывать за чертежной доской, не искать технических решений в дебрях противоречий между требованиями Заказчика и возможностями Науки на день поиска. Да ещё под жёстким взглядом Реброва.

О этот жёсткий взгляд! Его не забывают те, которые под него попадали. Но сейчас, удивительное дело, вспоминают не жёсткость, а атмосферу работы, творческой работы, результаты работы, зачастую на уровне мировых стандартов, а нередко и выше, вспоминают о жарких спорах на научных конференциях, о статьях, диссертациях, о строительстве жилья для сотрудников предприятия, о заводских базах отдыха на Черном и Московском морях, о пионерском лагере, куда к детям приезжали космонавты, о профилактории и т. д. Конечно, всё это было создано не только благодаря жёсткому взгляду, но и не без него.

---

\*Генеральный конструктор (К юбилею Сергея Ивановича Реброва) // ИЗМ. – 1999. – № 1(21). – С. 145-147.

Но поговорим о перестройках, проведенных под руководством С. И. Реброва. Первая осуществлялась в 60-х годах, называлась она «Операция». Смысл её заключался в том, что внедрялась система, при которой каждой операции изготовления электронного прибора ставилась в соответствие необходимость контроля этой операции. (И надо же, контроль, никакой свободы!) Разумность такой системы очевидна: при изготовлении электронного прибора имеют место несколько сотен, а то и тысяч операций, следующих в строго определенной последовательности, и сбой в одной операции неминуемо аукнется на выходе изделия или его параметрах. Благодаря глубокому пониманию роли технологии в разработке, освоении и массовом выпуске изделий электронной техники, Сергеем Ивановичем был не только выработан научный подход к анализу такой системы, не только созданы необходимые методики и службы контроля качества, но проведена в жизнь система мероприятий, обеспечившая как переход техники электронных приборов на новый, более высокий уровень надёжности и безотказности, так и возможность видеть перспективу – прогнозировать и оперативно планировать развитие производства в целом, по крайней мере, на ближайшие 5 лет. Таким образом, внедрялась не монетаристски обукрашенная свобода трёпа, базара и криминала, а свобода выбора технических решений на прочной базе уже достигнутого, с возможностью коррекции и базы, и самих технических решений.

Интересно заметить, что одним из следствий «Операции» было приглашение на должность главного инженера предприятия В. Н. Батыгина, кандидата технических наук, лауреата Ленинской премии, технолога. Обычно такую должность представляют специалисту по выходным изделиям предприятия, а здесь – именно технологу, правда, знакомому (и не понаслышке) с выходными операциями изготовления практически каждого изделия предприятия. Обеспечив прочный тыл, можно и ввысь рваться.

Второй перестройкой С. И. Реброва был «Синтез». Восьмидесятые годы. «Исток», как предприятие, рассчитанное на выпуск комплектующих изделий, был вздыблен для выпуска готового продукта, ранее собираемого из этих комплектующих другими конструкторами, далеко не всегда учитывающими возможности исходных «кубиков». И понятно, многим такая перестройка не нравилась. А в результате были созданы не только новые принципы конструирования, не только новые производственные мощности, но и разработаны новые уникальные изделия. Во-первых, бортовая радиолокационная станция с широкими функциями и разведки, и противодействия, и наведения ракет на цель, и навигации, и фотографирования местности под углом, короче, мечта военных. В силу разных причин именно это устройство в серию не пошло, но опыт его создания был учтен, в том числе теми, кто подобными изделиями занимается «по служебным обязанностям». Во-вторых, была создана головка самонаведения ракет класса «воздух – воздух». Американцы подобные системы головок (называемые у них AMRAAM) опробовали в Ираке. К сожалению, успешно.

«Синтез» показал новые пути развития крупных электронных предприятий типа «Истока» – выходить на рынок с крупными готовыми изделиями, учитывая и назначение изделия, а следовательно, его окончательную цену, и возможности своих комплектующих, а значит, себестоимость изделия. Путь «Истока» – превращение в концерн, разрабатывающий и выпускающий изделия, так сказать, «в сборе», а не россыпью. Россыпь можно изготавливать на сравнительно небольших, быстро перестраиваемых, легко управляемых «дочерних» предприятиях, в кото-

рые превращались и свои подразделения, и специально организованные (например, в Горьковской области или Полтаве) для серийного роботизированного изготовления деталей.

Талантливая личность талантлива во всём. За время работы в государственной экспертизе изобретений мне приходилось встречать немало авторов – руководителей предприятий, подписывающихся под любой заявкой своего предприятия. Сергей Иванович – соавтор всего в 13 изобретениях (при подававшихся ежегодно от «Истока» нескольких сотен заявок в то, еще «несвободное, недемократическое» время). Однако никто из соавторов Сергея Ивановича не сказал, что творческое участие его в этих изобретениях ничтожно. Наоборот, все вспоминали о дотошности, с которой Ребров относился к каждому аргументу, к каждому слову заявки, как сердился, подобно любому изобретателю, на непонимание экспертизы. А выступление фрязинской команды КВН по ЦТ? Казалось бы, отвлечение молодых специалистов от работы, расходы профкома на команду, небольшие, но всё же расходы, должны были бы встретить серьёзное противодействие (что и отмечалось некоторыми начальниками подразделений), но директора это не только не беспокоило, а наоборот – было встречено полной поддержкой. «Ребята! Вы не представляете, какую экономическую пользу предприятию вы принесли своей победой, – сказал он, поздравляя команду. – Это утверждение необходимых кредитов в министерстве, упрощение договоров с поставщиками, это реклама». Все участники получили благодарности, Почетные грамоты, а капитан команды – аж квартиру, вне очереди.

Спортсмен, заядлый рыбак, художник, фотограф – даже не верится, что это совмещается в докторе технических наук...

**Э. В. Погорелова,**  
*ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук*

## **С. И. РЕБРОВ – ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА**

Среди огромной, поистине титанической деятельности С. И. Реброва его работа на посту председателя диссертационного совета кажется незначительной: о ней даже не упомянули в перечислении его заслуг. Между тем для любого человека фраза «он более 20 лет возглавлял совет по защите докторских и кандидатских диссертаций «Истока» – уже визитная карточка его квалификации, научного кругозора, признание его научных заслуг.

С. И. Ребров стал председателем специализированного, а ныне диссертационного совета в 1986 году, в бытность директором предприятия. С тех же пор я стала ученым секретарем совета, и наша совместная работа продолжалась до последних дней его жизни. Работа диссертационного совета того времени сильно отличалась по интенсивности от нынешней. Только за полтора года (с мая 1987 г. по декабрь 1988 г.) защитилось 14 человек. Именно тогда стали кандидатами наук Темнов А. М., Ершова Т. Н., Мелешкевич П. М., Шульга Н. В., Снегирев В. П., Савченко В. П., Сазонов Б. В., Федоров А. С., Федоров Ю. И. и другие, а позже защитили докторские диссертации Лопин М. И. и Победоносцев А. С. Разнообразна была и тематика диссертаций: вакуум, технология, твердое тело, радиосистемы. С. И. Ребров был одинаково

компетентен во всех этих проблемах, причем знал их до мелочей. Его вопросы к соискателю всегда были грамотны, точны, вскрывали самую суть явления, а заключительное выступление в конце заседания являлось украшением стенограммы, настолько аргументировано и емко в нем давалась оценка всей работы и ее место в создании электронной продукции. В первую очередь С. И. Реброва интересовал вопрос, а что та или иная диссертация уже дала и может дать предприятию, отрасли, стране? Он был человеком государственного мышления, всю свою жизнь посвятил улучшению обороноспособности страны и требовал от других того же. Халтуры в науке он не признавал, был к ней абсолютно нетерпим, его многие побаивались, но профессионально сделанную работу он высоко ценил и не боялся хвалить, продвигать. Была у него и еще одна хорошая черта: если был неправ, всегда признавал свои ошибки.

Все 20 лет совместной работы я видела его доброжелательное, заинтересованное отношение к соискателям, будь это заседание комиссии по приему в аспирантуру, председателем, а потом заместителем председателя которой он был все эти годы, беседа перед приемом диссертации к защите или сама защита. Он никогда не был мелочным, придирчивым. К работе исполнителей относился с большим доверием, практически не вмешивался в текущие дела. С удовольствием вспоминаю нечастые, но очень интересные беседы с ним о судьбе страны, оборонки, предприятия. Мне они много дали для понимания того, что происходит в нашей жизни. Однажды Сергей Иванович заметил, что, если хочешь узнать больше о стране, ее быте, нравах, читай детективы. После этого я неоднократно убеждалась в его правоте.

Авторитет диссертационного совета «Истока», в том числе и благодаря его председателю, был настолько высок, что, когда наступили тяжелые времена, не было годами защит и ВАК применяла санкции к другим советам, нам давали возможность продолжать работу. Конечно, такая ситуация нас всех тревожила. Неоднократно Сергей Иванович встречался с бывшими аспирантами и их научными руководителями, обсуждались причины, препятствующие выходу на защиту. Такая забота многих поддерживала, настраивала на скорейшее завершение диссертационной работы. Итогом этого стала защита четырех диссертаций за последний год.

Не могу не отметить еще одну черту деятельности Сергея Ивановича – его обязательность. Нагрузка у него всегда была большая, но если он договаривался о встрече, то всегда в назначенное время был доступен, а если приходилось переносить – всегда информировал. Даже будучи директором, он не пропустил ни одного заседания диссертационного совета. Последние документы для ВАК мы готовили, когда он был уже тяжело болен, и подписывал он их буквально после обезболивающих уколов 24 июля у себя дома, куда приезжал из больницы.

В настоящее время подготовленный им вариант диссертационного совета проходит утверждение в ВАК в соответствии с новым Положением о совете по защите докторских и кандидатских диссертаций. В нем будет две специальности:

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoelectronика, приборы на квантовых эффектах, по техническим наукам;

05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника, по техническим наукам.

Из-за отсутствия пяти собственных докторов наук по технологии нам пришлось отказаться от специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Хочется верить, что традиции, заложенные Сергеем Ивановичем Ребровым, будут жить долго. На защиту выйдут наши ведущие специалисты, на смену нынешнему поколению придет новое поколение докторов и кандидатов, которое продолжит научную славу «Истока».

**Е. И. Черненко,**  
кандидат технических наук

## ФРЯЗИНСКИЙ ЗУБР

Несомненно, Сергей Иванович Ребров относится к этой, четко обозначенной Д. Граниным категории или породе людей, сделавших советскую науку и технику тем, что она есть. Пусть созданное им в жизни не очерчено такими определёнными контурами, как Космическая эпопея у другого Зубра, у С. П. Королёва, но масштабы содеянного сопоставимы. Ребров вывел на высокую орбиту «Исток», то есть военную СВЧ-электронику. Это был действительно Генеральный конструктор целой отрасли – электроники СВЧ. И нам здорово повезло: мы были не только его современниками, но и сотрудиниками!

Мне же лично повезло десятикратно: Он был моим Учителем. А конкретнее – научным руководителем диссертационной работы. Произошло это так. Летом 81-го я замещал начальника отдела во время отпуска. Нужно было подписать у Генерального накопившиеся бумаги, и я с этим к Нему напросился. Среди тех бумаг находился и подготовленный мною отзыв нашего НИИ на диссертацию со стороны.

– Черненко, почему вы не проставили перед своей фамилией звание и степень? И не вы один такой. Безобразия! Стыдитесь вы все, что ли, своих регалий?

– Сергей Иванович, так я же не кандидат наук.

Ребров нахмурился:

– Черт знает что! В Институте полно недоношенных кандидатов. А вы наворотили в микрополосковой технике столько, что на десять диссертаций станет. И всё не можете сесть и накапать «длинное заявление на большую зарплату»! Так, кажется, шутники это называют?

– Сергей Иванович, по новым требованиям, руководитель соискателя кандидатской должен быть доктором наук. Никак не могу найти руководителя.

– Да, да. Это так.

Его рука вдруг потянулась к затылку, но на полдороге Он решительно ею махнул.

– А! была не была! Найду и на вашу долю времечко. Скажите в аспирантуре, пусть запишут меня вашим научным руководителем. Берите отпуск и немедленно принимайтесь за дело.

Разумеется, заинтересованность здесь сложилась обоюдная: профессорский статус Реброва требовал от него руководства аспирантами. И всё же теплая волна благодарности, возникшая тогда у меня где-то около сердца, и через четыре десятка лет возвращается вживе. Ведь могла же аспирантура «нарисовать» Ему хоть десяток аспирантов! Но липа не была Его любимой древесиной. А ещё – он просто по-человечески вошел в мою ситуацию, хотя возни впереди это сулило ему немало...

Иметь такого покровителя, каким я нежданно обзавёлся, – это, я вам доложу, хорошая палка о двух концах. Все мои «бумаги» в аспирантуре не шли, а летели по зелёной улице, как современный депутатский «бумер» с мигалкой. То же самое было и с отзывами официальных и неофициальных оппонентов как на «Истоке», так и в сторонних «заинтересованных» организациях. Стоило назвать волшебное слово «Ребров», и всё свершалось мигом... Года не прошло, я стал кандидатом технических наук. Ровно через одиннадцать месяцев после памятного выхода к Генеральному с бумагами.



Но следует отметить, что и второй конец означенной выше палки хорошо походил по моим ребрам и лопаткам. Собеседования наши были нечастыми и, как правило, недолгими. Профессор Ребров моментально входил в суть моих «научных положений», не оставлял от моих построений камня на камне, и я, как тот несчастный древний грек, что и поныне очередной раз вкатывает свой камень к вершине Олимпа, отправлялся перестраивать всё заново. Особенно доставалось мне за язык моего научного труда.

– Романы тебе писать, а не диссертации! – не единожды кричал на меня Профессор. И я, умывшись, тащился вымарывать одни эпитеты и сравнения, чтобы в следующем куске текста «нарожать» свежих. То, что он стал обращаться ко мне на «ты», честно признаться, мне до чертиков льстило...

Кстати, так-то оно и выйдет, как предположил Сергей Иванович... Через четырнадцать нелёгких лет я позволю ему, чтобы сообщить, что вышел из печати мой роман из жизни учёных «Звёздное вещество». И услышу:

– А я тебе что говорил! Ну, тащи сюда свою книжку с дарственной надписью. Прочту обязательно.

Надо ли говорить, что Его оценки я ждал с трепетом? Действие романа я поместил в вымышленный подмосковный город Синявино. Мои герои, занимающиеся «мирным термоядом», ездят во Фрязино в гости и в служебные командировки. Разумеется, это была «уловка», вроде хорошей мины при плохой игре. Ведь мои герои срисованы с живых людей! Правда, такое и у Льва Толстого, и у Чехова бывало сплошь и рядом. Так и скандалы же у них случались! Того и гляди, кто-нибудь потащит тебя в суд и потребует компенсации за моральный ущерб...

И в производственных коллизиях, и в сюжетных ходах романа было полно аналогий с только что успешно завершённой ребровской «Двадцаткой». Да что там греха таить, генеральный директор Синявинского НИИ Бердышев был прямо срисован с Реброва! Вдруг примет за карикатуру – да по сусалам, по сусалам, как на Руси водится! Я услышал от Него вот что:

– Жаль, Евгений Иванович, что ты мне рукопись до печати не показал. Генерального директора ты представил «удельным князем»... Вот это мне не понравилось...

«Ага, – хотелось мне сказать, – знаем мы, Сергей Иванович, как Вам рукописи-то показывать!» Но я смолчал...

Бердышев в моём романе, сын крупного партийного деятеля, получает должность директора подмосковного НИИ как «вотчину» от высокопоставленного родителя. Но в целом персонаж этот положительнейший, выписан мною с большою симпатией. Как же я ещё мог бы относиться к литературному аналогу своего дорогого Учителя?

– К твоему сведению, писатель, директором я стал не по родительской протекции, а по предложению министра электронной промышленности Шокина... Ладно, проехали! Ты мне скажи, зачем ты нагородил этот фантастический «термояд», почему не стал писать о создании головки самонаведения, как дело было?

– Сергей Иванович, это же писалось десять лет назад. Секретность какая была! А я расписку давал о неразглашении...

– Жаль. Вот написать бы действительно всё, что нами пережито в «Двадцатке»!

В своих заметках-воспоминаниях о Сергее Ивановиче я умышленно не прикасаюсь к этому пласту. Моё личное участие в этой работе очень и очень скромное. Мне в ту пору довелось внедрять в производство свои прежние разработки... Пусть об эпохе «Двадцатки» расскажут те, кто плечом к плечу с Ребровым был на «передовой».

Я расскажу о другом... Однажды, уже в конце 90-х меня вызвал начальник 7-го отделения Александр Дмитриевич Родионов. (Светлая ему Память!) Сказал:

– Реброву – семьдесят. Нужны хорошие стихи в адрес.

Отказаться было немислимо. Но попробуй эти «хорошие стихи» сделай! С неделю я маялся, ища хоть какой-нибудь зацепки. И вдруг вспомнилось, как однажды во времена «Двадцатки» Генеральный на очередном совещании в Большом кабинете давал нам «и в хвост и в гриву» за какой-то срыв. Он гневно ходил мимо «репарационных» германских щкафов с резными валькириями на их фасадах. После обвинения в «должностных преступлениях» вдруг затих и смягчился, взял со своего письменного стола большеформатную 100-листовую тетрадь и швырнул ее на большой стол, за которым сидели мы, «преступники»... Батюшки! Тетрадь была исписана мелким почерком. Это был конспект по радиолокации и теории самонаведения ракет. Негромко Он сказал:

– Я Генеральный, на мне предприятие, безопасность, экология, на мне, честно сказать, весь город – и я даю себе труд не дремать и как следует разобраться в проблеме! А вы? Вам не стыдно за детский лепет, который вы порой несёте?

Стыдно было почти невыносимо. Но тут он ещё смягчился и даже улыбнулся:

– Вообще-то, я Ребров, и мне всё удаётся, что на «эр» начинается. Рыболовство, рыбоводство, рисование... Ну, и, само собой, радиолокация.

Воспоминание о той ребровской тетради запустило в моей башке долгожданную цепную реакцию стихотворчества. Вот что получилось и пошло в поздравительный адрес:

Однажды Вы шутя сказали,  
что Вам даётся всё на «эр»:  
Радар и Рыба, например.  
Да, Вы, умея Рисовать,  
еще умели Рисковать,  
Решать умели и Решиться,  
При неудачах не сломиться,  
а будто заново Родиться,  
И сгоряча Ругнуть – не грех!  
И Режиссировать успех,  
когда казалось нам: «Где ж он?»  
Растратчику, Рвачу и Рохле  
Могли устроить Вы Разгон.  
Ракетка и Ракеты гладко,  
Послушно к Вашим шли рукам,  
и перед Вашею «Двадцаткой»  
нишкнул надменный АМРААМ!  
«Истоком» Вы Рулить умели,  
Растить любой живой Росток!  
Лишь тем, что Вы взрастить успели,  
Еще и жив родной «Исток».

Вскоре после юбилея Ребров вызвал меня к себе.

– Спасибо за стихи! – сказал Он. – Да и книжка у тебя вышла недурная. «Звёздное вещество». Зря я на тебя по первочтению-то напустился. Недавно потянуло перечитать. Здорово у тебя процесс научного поиска отображён. Вот эта самая психология творчества... Но, знаешь, получилась лирика. А наши дела эпоса требуют! Сколько раз мы с Бункиным да Ефремовым у американских макнамар сладкий сон отбивали. Напиши об этом эпопею, как у Шолохова – «Тихий Дон».

– Да, – отшутился я, – и назовём мы четырёхтомную эпопею «Тихая Любосеевка».

Ребров насупился:

– Напрасно шутишь! За эти полвека, пока шла «холодная война», на берегах нашей скромной и запущенной речки дела творились вполне сравнимые по историческим масштабам с тем, что было на Дону в гражданку. Жаль, ты видишь всё снизу, так сказать, из окопов. Но я тебе готов дать любые интервью, чтобы ты увидел картину и с Командного Пункта...

Кажется, у меня именно тут впервые сбилось дыхание, потому что увиделся мне одновременно ветровой простор этой предполагаемой книги. И не «Тихий Дон» уже был ей аналогом, а гранинский великолепный «Зубр» – крепкий сплав документальности и художества. Ибо не лихой чубатый казак Гришка Мелехов, что и умеющий в жизни, так это рубить острой саблей лозу и не её одну, сидел передо мной по ту сторону своего рабочего стола. Героем будущей книги был именно Зубр. То, что, в отличие от Тимофеева-Ресовского, это был не академический учёный, а могучий практик, руководитель многотысячного творческого коллектива, снимало малейший оттенок подражательности Гранину. Мой Зубр будет иной. Это особый, фрязинский Зубр. Другого такого не может быть, как нет на свете другого Фрязина...

То было восемь лет назад. Несколько раз при встречах по дороге на работу близ родной нашей Любосеевки я напоминал ему об интервью. Он смеялся:

– Интервью, конечно, я тебе дам, только без магнитофона, чтобы ты часом не записал, когда я крепко выражусь. Но не сегодня. Я тебе сам позвоню.

Потом и он, и я почти одновременно пережили самое страшное в жизни – болезнь и смерть наших жён. А потом...

Иногда мне кажется: ничего еще не потеряно, можно написать такую книгу, как было задумано. Собрать интервью у всех, кто близко пересекался с ним. Глубоко черпануть фрязинской истории. А взять сюжетом непременно эпопею создания «Двадцатки», которая свершалась на моих глазах. Но трезвея понимаю: только Он мог дать такие детали и эпизоды, которые отразили бы в себе собственное Его существо. Только он знал незримые для нас движения «высших сил» Государства, то соединение Долга и человеческих амбиций, которое творило «замысловатые сюжеты», как это получилось хоть бы с той же «Двадцаткой»... Такое не придумаешь! Невольно придётся дополнять всё вымыслом. Может быть, и получится неплохой роман, но не новый «Зубр». Грустно, почти больно!

**Р. М. Попов,**  
начальник лаборатории  
научно-информационного отдела

## ГРАНИ ТАЛАНТА

Сергея Ивановича Реброва можно по праву поставить в один ряд с такими известными деятелями науки и техники, создателями различных систем вооружения, как В. М. Чоломей (конструктор МБР и ракет для подводных лодок), П. В. Грушин (конструктор ракет «земля – воздух»), А. А. Расплетин и Б. В. Бункин (создатели систем зенитно-ракетных комплексов). И этот список далеко не полный. Долгие годы Сергей Иванович работал в одной связке с этими людьми, являясь директором предприятия, на котором, ведя общее руководство, он был еще и главным конструктором многих СВЧ-приборов.

Я не буду останавливаться на научной и производственной деятельности Сергея Ивановича, о значительности которой говорят многочисленные награды и звания. Это дело его соратников по разработкам. Более полувека он трудился на нашем предприятии, из них 26 лет был его руководителем. Когда Сергей Иванович уходил с должности генерального директора, оставаясь главным конструктором, весь зал встал и устроил ему овацию в благодарность за то, что он сделал для предприятия и нашего города.

Лично для меня Сергей Иванович является примером того, как талантливый человек может добиться успехов не только в области науки и техники, но и искусства. В 1966 году я пришел работать в отдел 100. В то время для показа достижений электронной промышленности широко использовались различные выставки, на которых каждое предприятие старалось как можно лучше представить свои разработки, так как от этого зависело дальнейшее финансирование, производственное и городское строительство и многое другое. Поэтому, несмотря на большую занятость, Сергей Иванович держал все вопросы, связанные с организацией таких выставок, под личным контролем, уделяя особое внимание их оформлению. Он старался представить разработки нашего НИИ в более наглядной и доходчивой форме. В этом деле Сергею Ивановичу не было равных. Он на лету схватывал основную идею показа изделия, компоновку планшета, ракурс при фотосъемке объекта, его тональное решение, каким шрифтом и как делать пояснительные надписи. Он вникал во все тонкости этого сложного дела и нередко сам брал кисть, карандаш, фломастер, ретушировал фотопланшеты, делал фотографии и т.д. Это увлечение, если хотите – хобби, вероятно, позволяло Сергею Ивановичу хоть на время уйти от груза повседневных проблем. А груз был огромный. В иные годы на предприятии велось до 600 НИР и ОКР, разрабатывалось до 200 типов ЭВП СВЧ. Его увлечение, мне кажется, было отдушиной, которая помогала Сергею Ивановичу выдюжить в этой сложной ситуации. Не было такого случая, чтобы экспозиция нашего предприятия на выставках или подготовленные для показа планшеты, графики, диаграммы не одобрялись.

Спустя много лет в одной из книг я прочитал, как С. П. Королев, создатель космических кораблей, готовил материалы для докладов вышестоящему начальству. Он считал, что «уровень популяризации должен быть нижайшим: никаких чертежей, графики самые простые. Все должно быть на уровне средней школы – просто и ясно. И еще: плакаты должны быть обязательно красивы, от этого в немалой степени зависел успех доклада». Королев был очень придирчив к плакатам, долго объяснял непосредственным исполнителям, как, где, в каком

масштабе и даже каким цветом, что требуется нарисовать, а потом долго все сам проверял и нередко заставлял переделывать.

Такой тщательный подход к подготовке материалов связан с тем, что в то время решения зачастую принимали не специалисты, а партийные деятели и чиновники, слабо разбирающиеся в вопросах науки и техники. Сергей Иванович придерживался точно таких же принципов, как и Королев, и постоянно внушал это всем исполнителям, заставляя их буквально «вылизывать» каждое слово, каждый планшет, каждую фотографию. Он знал: даже малая чисто техническая неточность в планшете может загубить весь доклад и всё обсуждение развернется так, что выправить положение будет очень трудно.

Сергей Иванович очень тонко разбирался во всех хитростях оформительского дела и обладал безукоризненным вкусом. Далеко не каждый научный работник имеет такой творческий потенциал, художественное чутье, большие знания в области искусства.

Сергей Иванович фактически открыл и довел до совершенства новое направление в фотоискусстве, которое я бы назвал фотоживописью. Он сумел из черно-белого изображения с помощью специальных приемов получить цветное. Не подумайте, что это просто раскрашивание фотографии. Это особая, сложная технология, разработанная и освоенная Сергеем Ивановичем, применение которой позволяет получить живописные фотополотна. И если вы не знаете, что за основу была взята фотография, то никогда об этом не догадаетесь. В основном Сергей Иванович работал с портретом, да так мастерски, что люди на них выглядят как живые.

И еще в одной области фотографии он достиг совершенства – в фотомонтаже, где Сергею Ивановичу удавалось совместить в принципе несовместимое. Он брал части различных изображений и соединял их в единое целое, придавая новое звучание привычным вещам. Для своей работы Сергей Иванович скрупулезно собирал различные художественные материалы. Он прекрасно разбирался в живописи, посещал все художественные выставки, где снимал на слайды понравившиеся ему картины. В результате у него образовалась большая слайдотека.

Разумеется, овладеть сложной техникой фотоживописи и фотомонтажа невозможно без специальных приспособлений и технологических процессов. На качество фотографии влияет много факторов: это и аппаратура, и фотоматериалы, и проявляющие растворы. Сергей Иванович прекрасно разбирался во всем этом. Он проводил испытания различных фотопленок и в результате добился, кажется, невозможного: получил полутоновое изображение на сверхконтрастной для штриховых изображений пленке. Для этого ему пришлось много «похимичить», опробовать массу проявляющих растворов и режимов обработки, создать свои оригинальные рецепты.

Если фототехника чем-то не удовлетворяла его и не способствовала качественному выполнению его творческих замыслов, он смело переделывал ее: разбирал, собирал, вставлял в нее новые, им же разработанные детали и даже целые узлы. Однажды он сконструировал и изготовил специальную кассету для фотоаппарата «Салют», которую Киевский завод «Арсенал» смог освоить только через три года.

Сергей Иванович всегда находился в творческом поиске, не стоял на месте. Кажется, чего проще – освоил одно направление и действуй. Но нет! Он все время искал что-то новое, еще не изведенное, и когда находил, то шел вглубь проблемы, чтобы дойти до самой сути.

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

## «СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.  
Компьютерная верстка Земскова Л.А.  
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

---

Подписано к печати	Усл. п. л. 14,5	Формат 60×90 <sup>1/8</sup>
1.12.2008 г.	Уч.-изд. л. 15	Тираж 1000
Заказ № 7853	Индекс 36292	16 статей

---

ФГУП «НПП «Исток» 141190, г.Фрязино, Московская обл., ул.Вокзальная, 2а  
Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12  
E-mail: [istok-info@flexuser.ru](mailto:istok-info@flexuser.ru)

Отпечатано в ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ»,  
140010, г. Люберцы Московской обл., Октябрьский пр-т, 403.  
Тел. 554-21-86