



АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ
ПОПОВ

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

*Посвящается 100-летию
со дня рождения
А. С. Попова*

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

А. М. Кугушев

16 марта 1959 г. исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося русского физика Александра Степановича Попова (1859—1906). Занимаясь вслед за Генрихом Герцем экспериментальным изучением электромагнитных волн на основе работ Максвелла и Фарадея, А. С. Попов пришел к изобретению беспроволочного телеграфирования.

Можно считать, что с изобретением беспроволочного телеграфирования зародилась новая область науки и техники, которая в настоящее время получила распространенное название—радиоэлектроника.

В результате быстрого развития радиоэлектроника стала всеобъемлющей областью, так что определение ее научного и технического содержания оказывается весьма затруднительным.

Еще недавно радиотехника определялась как раздел электротехники — токи высокой частоты — с одним единственным практическим применением в виде радиосвязи. Современная радиоэлектроника занимается изучением и многочисленными практическими применениями электрических колебаний весьма широкого спектра от сверхнизких частот, до частот, соответствующих миллиметровому диапазону электромагнитных волн.

Научным содержанием современной радиоэлектроники являются три основных раздела: изучение вопросов излучения, передачи и распространения радиоволн, т. е. электромагнитных волн длиной от нескольких миллиметров до сотен километров; изучение взаимодействия электромагнитного поля со свободными электронами и молекулами; преобразование электрических колебаний в линейных и нелинейных цепях из одного вида сигнала в другой и прохождение электрических сигналов через такие цепи.

Многие области техники создаются как результат применений достижений физики. Развиваясь, техника, в свою очередь, обеспечивает дальнейшее развитие физики, предоставляя ей технические средства для проведения новых экспериментов и ставя перед ней новые, более сложные задачи. Пожалуй ни одна отрасль техники за последние два-три десятилетия не обеспечила такого блестящего развития современной физики, как техника радиоэлектроники. Примером тому служит величайшее достижение современной физики: изучение строения атома и осуществление ядерных реакций. Другим примером являются радиоастрономия

и радиоспектроскопия. Можно сказать, что радиолокационная техника и техника сверхвысоких частот создали эти новые отрасли физики.

Технические средства, создаваемые на основе радиоэлектроники, неограниченно расширяют человеческие возможности восприятия окружающего мира и подчинения сил природы интересам человека.

Радиофикация, включая электроакустику во всех ее видах, телеграфная и телефонная радиосвязь по всему земному шару, телевидение и фототелеграфирование, радиолокация и радионавигация, радиогеодезия и радиометеорология, радиоастрономия, исследование вселенной и радиоспектроскопия — изучение микромира, электронная автоматика и быстродействующие вычислительные машины, облегчающие не только физический, но и умственный труд человека, ускорители атомных частиц и управление ядерными процессами, радиогеология — исследование недр земли и высокочастотный нагрев в технологических процессах, изучение биологических процессов и применение электроники в медицине — вот далеко не полный перечень всего многообразия научных и практических применений современной радиоэлектроники.

Многие современные технологические процессы были бы вовсе неосуществимы без применения радиоэлектронной аппаратуры. Это относится к атомным реакторам, полету реактивных самолетов и т. п.

Развитие современной радиоэлектроники можно разделить на три главнейших этапа. Первым этапом является период от работ Попова до 1918 г. Этот этап отличается использованием только длинных радиоволн и единственным практическим применением — беспроводным телеграфированием. Без электронных ламп дальность радиосвязи ограничивалась сотнями и в лучших случаях тысячами километров.

Второй этап (1918—1940) характеризуется возникновением радиоэлектроники, т. е. применением радиоламп, созданием радиотелефонирования и освоением коротких радиоволн. Дальность радиосвязи на этом этапе резко возрастает и перекрывает все возможные на Земле расстояния. Бурно развивается радиопромышленность, возникает много новых практических применений радио, и в том числе звуковое кино.

Современный этап радиоэлектроники характеризуется освоением диапазона ультракоротких волн и импульсной техники, развитием телевидения и возникновением новейших применений радиоэлектроники, в том числе электронной автоматики — автоматики высшего типа. Этот этап характеризуется успехами в изучении взаимодействия электронов и радиоволн, а также исследованием твердых тел. На основе этих достижений сейчас решаются задачи генерирования самых коротких радиоволн и создания электронных приборов из полупроводниковых, сверхпроводниковых, магнитных и диэлектрических материалов, способных заменить вакуумные приборы. Развитие этих достижений изменит облик современной радиоэлектронной аппаратуры, сделает ее более надежной, более долговечной и более простой в эксплуатации.

ТРУДЫ А. С. ПОПОВА И ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИОТЕЛЕГРАФА

А. С. Попов, заинтересовавшись опытами Г. Герца, начал экспериментировать, совершенствуя методику, и создал более эффективные приборы. Весной 1889 г. он читает свою первую лекцию на тему: «Новейшие исследования о соотношении между световыми и электрическими явлениями». Эту лекцию А. С. Попов закончил словами: «Человеческий организм не имеет такого органа чувств, который замечал бы электромагнитные волны в эфире; если изобрести такой прибор, который заменил

бы нам электромагнитные чувства, то его можно было бы применять к передаче сигналов на расстояние».

Хотя Бранли и Лодж были близки к изобретению радиосвязи, однако, для ее осуществления не хватало важных элементов, изобретенных А. С. Поповым, а именно: антенны, автоматического восстановления исходного состояния кохерера, электромагнитного усилителя — позволивших осуществить радиосвязь на практически ценных расстояниях.

7 мая 1895 г. А. С. Попов демонстрировал изобретенный им радиоприемник, на который он принимал электромагнитные колебания, возникающие при грозовых разрядах (в то время не было иных «радиокорреспондентов»).

Автоматическое встряхивание кохерера осуществлялось молоточком электрического звонка. При действии электрического звонка его молоточек одновременно ударял по кохереру и слегка встряхивал его. Вследствие этого кохерер после воздействия на него предыдущего радиосигнала автоматически был готов к приему нового радиосигнала.

Первый радиопередатчик А. С. Попова состоял из искрового разрядника, включаемого между антенной и заземлением. К разряднику присоединялось высокое напряжение от вторичной обмотки спирали Румкорфа. Телеграфный ключ включался в первичную цепь спирали последовательно с приемателем.

В течение последующих лет А. С. Попов вместе с П. Н. Рыбкиным (1864—1948) усовершенствовал приемную и передающую аппаратуру. В частности, в 1899 г. им был введен прием на телефон, а в 1900 г. кохерер был заменен контактным детектором с парой уголь—сталь. В 1899—1900 гг. радиотелеграф был впервые использован для практических целей.

ТЕХНИКА РАДИО И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ

В результате дальнейшего развития техники радио в России и за рубежом были сделаны новые усовершенствования радиопередатчиков радиоприемников затухающих колебаний. В частности, были созданы новые конструкции разрядников — вращающийся и многодисковый Ви-

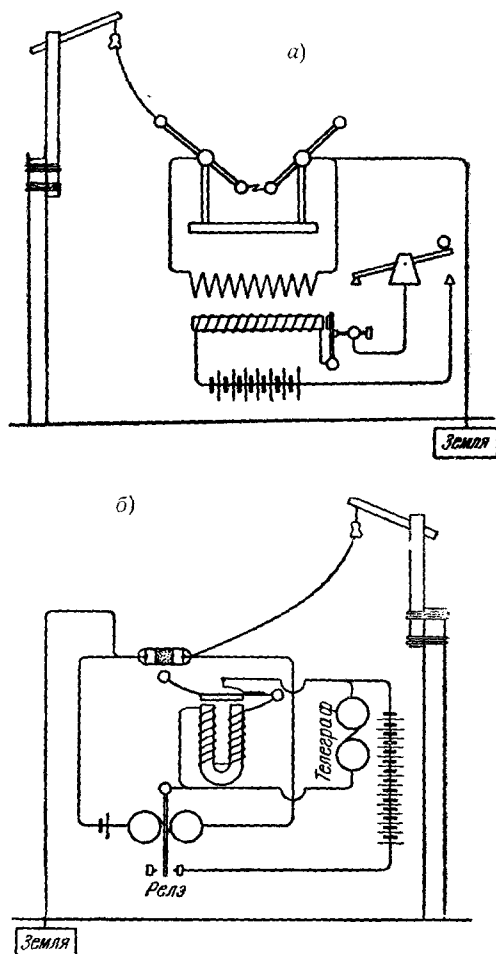


Рис. 1. Передающая и приемная радиостанция А. С. Попова.

на, — обеспечивающие ударное возбуждение, при котором искра сравнительно быстро гасла, в результате чего колебания в промежуточном контуре быстро затухали, уменьшая потери.

Дальность надежной радиосвязи достигала тысячи и более километров. В 1901 г. Г. М. Маркони осуществил радиосвязь через Атлантический океан.

Перед первой мировой войной для радиотелеграфирования начали применяться незатухающие колебания, что давало ряд преимуществ



Леонид Исаакович Мандельштам.

и открывало перспективу осуществления радиотелефона. Для получения незатухающих колебаний первоначально использовались дугвые генераторы, а впоследствии машинные генераторы индукторно типа.

Дуговой генератор удовлетворительно работает лишь на длинны волнах, и при этом амплитуда и период генерируемых колебаний не достаточно стабильны. Все это не позволило применить дуговой передатчик для радиотелефонирования. Радиостанции с дуговыми генераторами строились мощностью до 1000 *квт* и диапазоном радиоволн 7000 ÷ 25 000 для международных радиосвязей.

В 1908 г. Гольдшмит, в 1912 г. В. П. Вологдин и другие создали индукторные машины повышенной частоты, которые с трансформаторами-умножителями частоты стали применяться на мощных радиостанциях.

бы нам электромагнитные чувства, то его можно было бы применять к передаче сигналов на расстояние».

Хотя Бранли и Лодж были близки к изобретению радиосвязи, однако, для ее осуществления не хватало важных элементов, изобретенных А. С. Поповым, а именно: антенны, автоматического восстановления исходного состояния кохерера, электромагнитного усилителя — позволивших осуществить радиосвязь на практически ценных расстояниях.

7 мая 1895 г. А. С. Попов демонстрировал изобретенный им радиоприемник, на который он принимал электромагнитные колебания, возникающие при грозовых разрядах (в то время не было иных «радиокорреспондентов»).

Автоматическое встряхивание кохерера осуществлялось молоточком электрического звонка. При действии электрического звонка его молоточек одновременно ударял по кохереру и слегка встряхивал его. Вследствие этого кохерер после воздействия на него предыдущего радиосигнала автоматически был готов к приему нового радиосигнала.

Первый радиопередатчик А. С. Попова состоял из искрового разрядника, включаемого между антенной и заземлением. К разряднику присоединялось высокое напряжение от вторичной обмотки спирали Румкорфа. Телеграфный ключ включался в первичную цепь спирали последовательно с прерывателем.

В течение последующих лет А. С. Попов вместе с П. Н. Рыбкиным (1864—1948) усовершенствовал приемную и передающую аппаратуру. В частности, в 1899 г. им был введен прием на телефон, а в 1900 г. кохерер был заменен контактным детектором с парой уголь—сталь. В 1899—1900 гг. радиотелеграф был впервые использован для практических целей.

ТЕХНИКА РАДИО И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ

В результате дальнейшего развития техники радио в России и за рубежом были сделаны новые усовершенствования радиопередатчиков и радиоприемников затухающих колебаний. В частности, были созданы новые конструкции разрядников — вращающийся и многодисковый Ви-

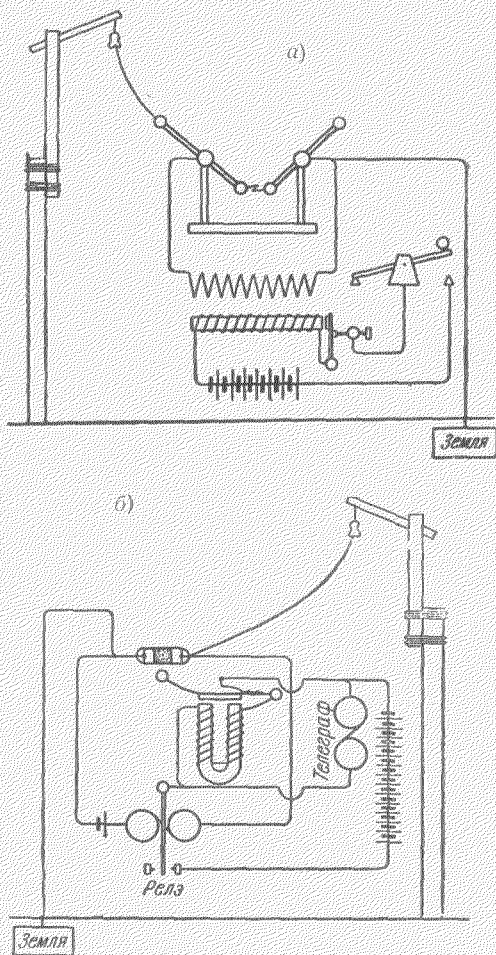


Рис. 1. Передающая и приемная радиостанция А. С. Попова.

Несмотря на применение умножения частоты, не удается создать удовлетворительной конструкции машинного генератора на волны короче 3000 м, вследствие этого машинный генератор также оказался непригодным для радиотелефонирования. Было построено несколько мощных радиостанций у нас и за границей с машинными генераторами для международных связей. Диапазон радиоволн этих станций 5000–30 000 м, мощность в антенне — до 500 *квт*.

В приемниках для приема незатухающих колебаний включались электромеханические прерыватели, так называемые тикеры.



Михаил Александрович Бонч-Бруевич.

Применение электронно-ионных ламп в радиотехнике до 1918 г. было весьма ничтожно. Хотя Флеминг в 1904 г. и Ли-де-Форест в 1905 г. создали диод и триод, а Майснер в 1913 г. изобрел схему автогенератора с триодом, однако, до 1918 г. были сконструированы только ламповые усилители низкой частоты и гетеродины для приемников. Усилители включались в детекторную цепь и повышали чувствительность приемников. Гетеродин — маломощный генератор — служил для приема незатухающих колебаний, заменяя тиккер, при этом тон звучания точек и тире определялся разностью частот колебаний гетеродина и принимаемых колебаний.

Для всех первых практических применений радиоприборы Попова строились в Кронштадтских мастерских. Но для дальнейшего развития этого дела в России в то время не было достаточной производственной базы.

Только благодаря трудам инженеров М. В. Шулейкина (1884—1939), Н. Н. Циклинского (1884—1938), В. П. Вологодина (1881—1955) в 1912 г. в Петербурге начал работать русский радиозавод; на этом заводе была создана прекрасная исследовательская лаборатория, завод стал выпускать более совершенную радиоаппаратуру, чем филиалы иностранных заводов «Сименс» и «Робтит».

В развитии русских теоретических работ по радио ведущую роль сыграли А. А. Петровский (1873—1942), С. К. Лебединский (1868—1937) и Л. А. Рожанский (1882—1936).

ВТОРОЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ РАДИОТЕХНИКИ

Создание радиотелефонирования и практическое освоение диапазона коротких радиоволн, характеризующих второй этап развития современной радиоэлектроники, возможно было только на базе крупнейших тех-

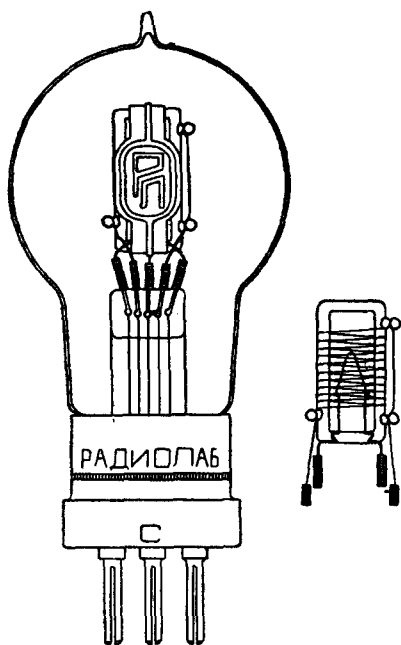


Рис. 2. Приемно-усилительный триод ПР-1. Разработка Нижегородской радиолaborатории в 1918—1919 гг.

нических достижений в области теории конструирования и производства радиоламп. Выдающаяся роль в этом деле принадлежит Нижегородской радиолaborатории, созданной в 1918 г. по решению правительства, тогда совсем еще молодого социалистического государства, и являвшейся первым радиотехническим институтом, в котором собирались крупнейшие радиоспециалисты того времени—М. А. Бонч-Бруевич (1888—1940), В. П. Вологдин, В. К. Лебединский, Д. А. Рожанский, А. Ф. Шорин (1890—1941), В. В. Татарinov (1878—1941) и др. Через пять лет там было разработано и изготовлено пять тысяч приемных радиоламп и был поставлен первый мировой рекорд дальности радиотелефонной передачи.

Первая приемная радиолампа ПР-1 (пустотное реле-1) являлась триодом с вольфрамовым катодом, с сеткой из никелевой проволоки диаметром 0,2 мм, с алюминиевым плоским анодом и анодным напряжением 80—120 в. Обезгаживание электродов достигалось прокаливанием сетки путем пропускания тока. Создание этой лампы было основано на глубоком теоретическом и инженерном анализе работы электронного вакуумного прибора, созданного М. А. Бонч-Бруевичем.

В изумительно короткий срок для условий того времени (1919—1920) в Нижегородской радиолaborатории М. А. Бонч-Бруевичем были разработаны и доведены до эксплуатационной пригодности генераторные радиолампы с отдаваемой мощностью до 2 кВт в режиме непрерывных колебаний. В этих радиолампах впервые была реализована идея охлаждения анода проточной водой. Они были применены на первой радиотелефонной станции (Москва, 1922).

Вслед за этим (1922—1926) в Нижегородской радиолaborатории были разработаны генераторные радиолампы с наружным медным анодом, охлаждаемым водой, мощностью в 25 кВт и 100 кВт. Они послужили

основой создания всех современных мощных радиоламп и позволили осуществить разработку и строительство первых мощных радиотелефонных и радиотелеграфных станций в СССР.

После 1923 г. стали доступны для создания генераторных и усилительных радиоламп тугоплавкие металлы — молибден, тантал и др. В результате этого в Нижегородской радиолaborатории было разработано и поставлено массовое производство радиоламп средней мощностью от 150 до 500 *вт*, обеспечивших создание радиовещательных станций при областных центрах.

Дальнейшее успешное развитие техники и производства радиоламп за границей (Лангмюр, Шотка) и у нас (М. М. Богословский, С. А. Векшинский, С. А. Зусмановский и др.) шло по двум путям. С одной стороны, создавались конструкции с более совершенными характеристиками в виде тетрода и пентода, в которых уменьшается связь между управляющей сеткой и анодом и устраняется динаatronный эффект в области

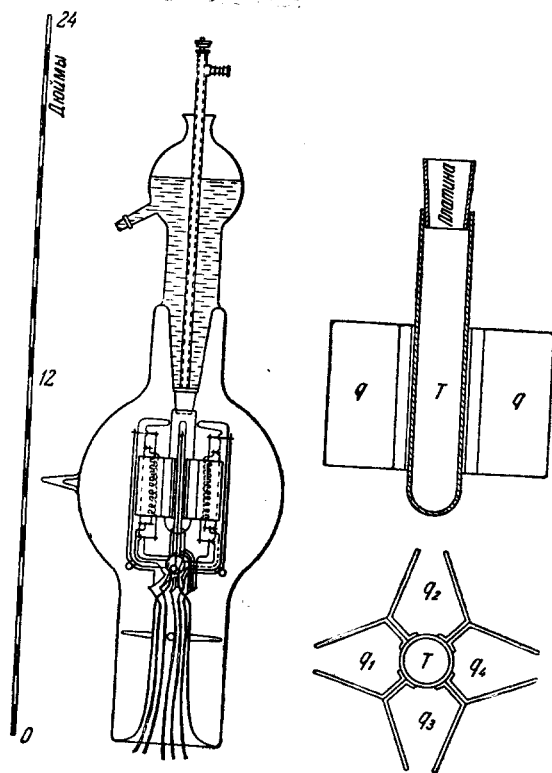


Рис. 3. Генераторная радиолампа 1,2 *квт*. Разработка Нижегородской радиолaborатории 1919—1920 гг.

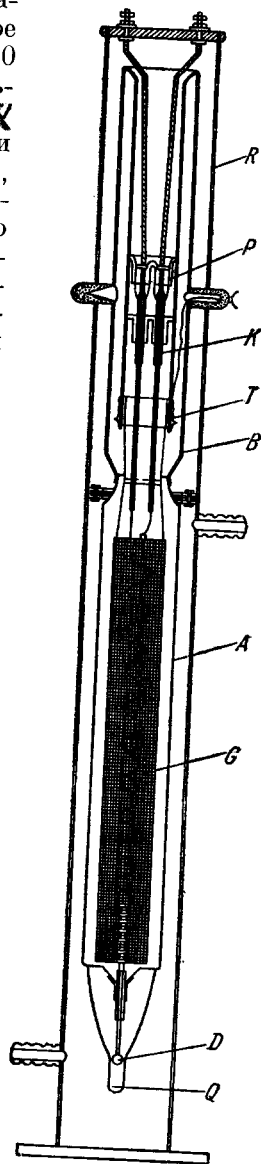


Рис. 4. Генераторная радиолампа 25 *квт*. Разработка Нижегородской радиолaborатории 1923—1924 гг.

экранирующей сетки и анода. С другой стороны, совершенствовалась электровакуумная технология, позволявшая, в частности, создавать приемно-усилительные лампы в металлическом баллоне. Одновременно с этим

совершенствовались теория, конструкция и производство других электронно-ионных вакуумных приборов — электронно-лучевых трубок, кенотронов, газотронов.

Как только мощная электронная лампа была успешно разработана, радиотелефонирование вышло из стен лаборатории. В 1922 г. Нижегородской радиолaborаторией была построена первая радиовещательная станция в Москве (им. Коминтерна) мощностью 12 *квт*. Эта станция явилась первой в Европе и наиболее мощной в мире.

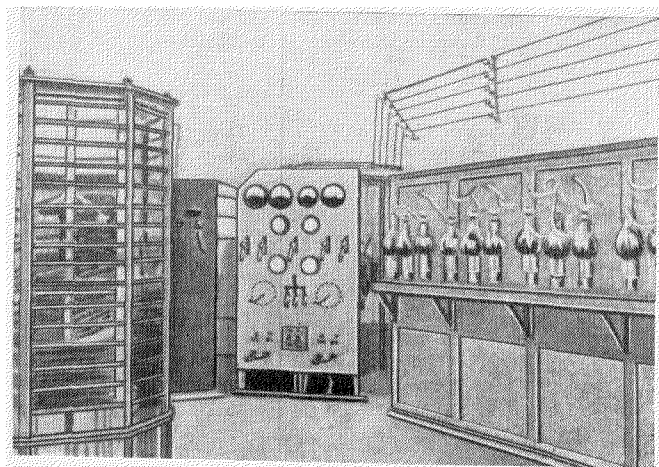


Рис. 5. Радиотелефонная станция им. Коминтерна в Москве (мощность 12 *квт*).

В последующие годы в Нижегородской радиолaborатории был разработан радиотелефонный передатчик мощностью 1,2 *квт*, впервые с питанием полностью от трехфазной сети переменного тока, и построены многие областные радиовещательные станции.

В 1925—1927 гг. в Нижегородской радиолaborатории под руководством М. А. Бонч-Бруевича был разработан радиотелефонный передатчик с 25 *квт* лампами. Он был применен на новой радиовещательной станции (Москва, Шаболовка) с мощностью излучения 40 *квт*. При этом впервые были решены такие сложные вопросы, как осуществление высококачественной модуляции на большой мощности, подавление излучения гармоник с помощью промежуточного контура и др. Генератор радиопередатчика с независимым возбуждением состоял из трех каскадов, из которых оконечный имел три лампы с водяным охлаждением номинальной мощностью 25 *квт* каждая. Модуляция осуществлялась на анод, и мощный модуляторный каскад состоял из подобных же трех 25-ти киловаттных радиоламп. Анодное питание радиоламп осуществлялось от шестифазного выпрямителя с Г-образным фильтром. Это был первый опыт постройки высоковольтного ртутного выпрямителя, надежно работающего с таким фильтром.

Ввиду отсутствия в то время многосеточных радиоламп, усиление звуковой частоты для мощного модуляторного каскада представляло трудную задачу. Ее, однако, удалось успешно решить с помощью оригинальной схемы, в которой был использован принцип частотной модуляции. Этот принцип, как известно, сейчас широко применяется.

Дальнейшее развитие техники радиотелефонирования было осуществлено под руководством А. Л. Минца и достигло в нашей стране высокого

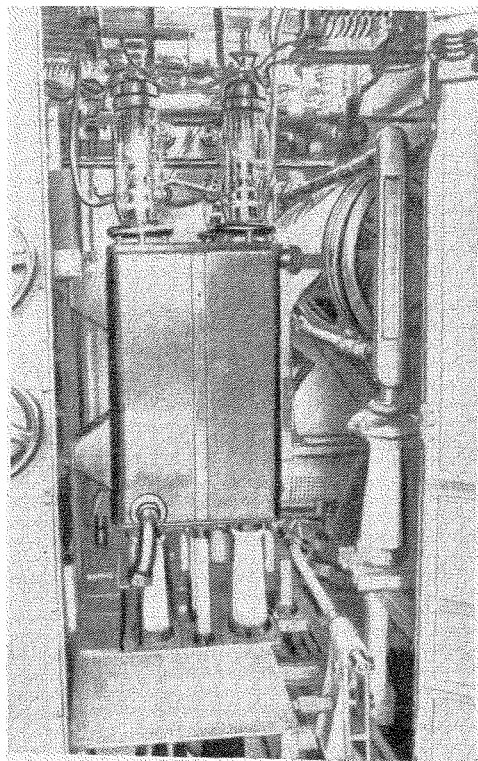


Рис. 6. Мощный каскад, современного радиопередатчика.

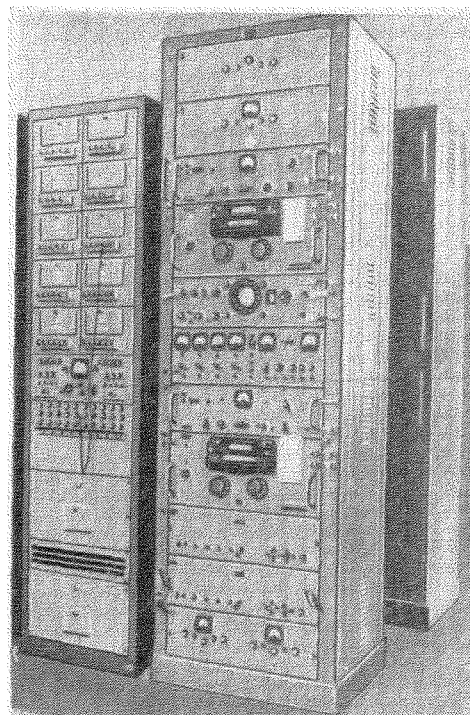


Рис. 7. Магистральный радиоприемник.

уровня. К концу тридцатых годов были разработаны и построены радиотелефонные станции мощностью от 100 до 1200 *квт* при высоком качестве частотных и амплитудных характеристик передаваемого звука (нелинейные искажения при глубине модуляции 95% менее 2% в полосе до 50—10 000 *гц*) и высокой стабильности, несущей частоты порядка 10^{-4} . Схема радиопередатчиков многокаскадная, с анодной модуляцией, обеспечивающая повышенный коэффициент полезного действия (к. п. д.) до 45÷50%.

Теория и инженерные методы расчета ламповых радиопередатчиков трудами М. А. Бонч-Бруевича, М. В. Шулейкина, А. Л. Минца, А. И. Бер-

га и других советских и зарубежных ученых достигли высокого совершенства и позволили проектировать радиопередатчики длинноволнового и коротковолнового диапазонов без значительных экспериментальных разработок.

Внедрение в радиотехнику электроники очень резко сказалось на совершенствовании радиоприемника. Переход с детекторного приемника, усовершенствованного после А. С. Попова введением промежуточного контура и регулируемой связи, на «ламповый» приемник увеличило не только чувствительность, но значительно улучшило и другие важнейшие характеристики — избирательность и помехозащищенность. Первые приемники массового типа разрабатывались еще в Нижегородской радиолaborатории. Там же был создан О. В. Лосевым детекторный гетеродин-усилитель (кристадин), дальнейшее развитие которого можно видеть в современных кристаллических триодах.

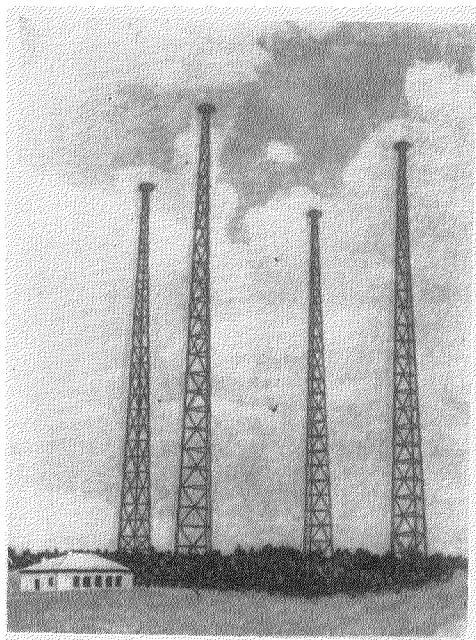


Рис. 8. Антенна радиостанции мощностью 1200 *квт*.

Применение радиоламп привело к созданию новых схем и, в частности, регенеративного и супергетеродинного приема. Благодаря трудам В. И. Сифорова, В. И. Котельникова и других советских и зарубежных ученых радиоприемная техника к началу сороковых годов достигла весьма высокого уровня развития. Эти труды позволили также перейти к инженерным методам создания приемников. Высокая стабильность частоты гетеродинных приемников, доведенная до порядка 10^{-5} , применение ферритовых антенн со статическим экранированием и полосовых фильтров, в том числе электромеханических фильтров с полосой пропускания меньше одного процента при ослаблении по соседнему каналу до 40 *дб*, позволили резко повысить помехоустойчивость и избирательность радиоприемника. Применение ферритов, специальной радиокерамики и других материалов позволило также резко улучшить конструктивные и технологические характеристики современных радиоприемников.

Развитие антенно-фидерной техники в период 1920—1940 гг. базировалось на работах М. В. Шулейкина, М. А. Бонч-Бруевича, И. Г. Кляцкина, В. В. Татаринова, А. А. Пистолькорса, М. С. Неймана, Г. З. Айзен-

берга и других советских и зарубежных ученых. Были проведены уточнения методов расчета сопротивлений и емкости длинноволновых антенн; были разработаны коротковолновые антенны направленного действия в виде систем синфазных полуволновых вибраторов и дана теория расчета сопротивления излучения их. Для удовлетворения требований, возникавших при строительстве мощных радиовещательных станций средневолнового диапазона, были разработаны антенные конструкции в виде изолированных башен и мачт.

Хотя уже на первом этапе развития радиотехники было понятно, что распространение радиоволн на большие расстояния обусловлено наличием ионизированных верхних слоев атмосферы, тем не менее в это время стремились для дальней радиосвязи применять длинные радиоволны (10—20 км), при которых имеет сравнительно большое значение дифракция при распространении за выпуклость Земли. Благодаря работам А. Зоммерфельда, ван-дер-Поля, М. В. Шулейкина и Б. А. Введенского были установлены инженерные формулы для дифракционного распространения.

Техническое освоение и практическое использование диапазона коротких радиоволн началось в двадцатых годах: М. А. Бонч-Бруевич,

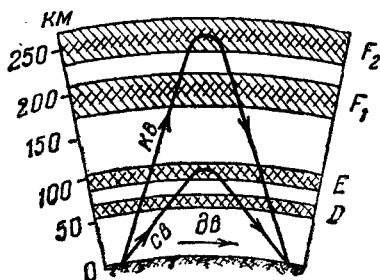


Рис. 9. Ионосферные слои.

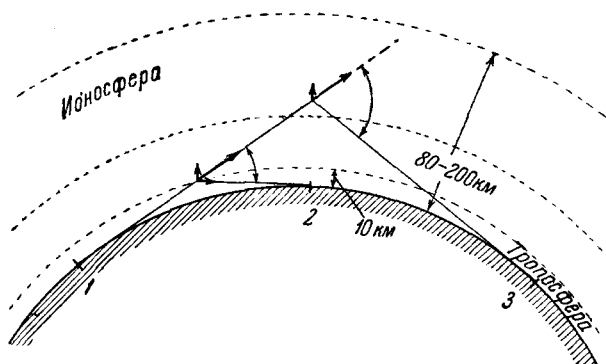


Рис. 10. Дальнее распространение УВЧ за счет диффузного рассеяния.

В. В. Татаринов и др. провели в то время изучение коротких радиоволн, изучили «капризы» их распространения, предложили способ работы на двух волнах для дневной и ночной радиопередач, разработали первые коротковолновые антенны направленного действия и создали первые линии на коротких волнах: Москва—Ташкент, Москва—Владивосток.

К концу тридцатых годов короткие волны стали не только основным диапазоном магистральных линий связи, но получили широкое использование и для радиовещания.

В эти же годы проводились большие экспериментальные и теоретические работы по ионосферному распространению радиоволн. Работами М. В. Шулейкина, М. А. Бонч-Бруевича, А. Н. Щукина и других советских и зарубежных ученых было установлено наличие нескольких ионизированных слоев (D, E, F₁ и F₂) с постепенно увеличивающейся

плотностью ионизации на высотах от 50 до 250 км, определяющих условия распространения длинных (3000–20 000 м), средних (200–3000 м) и коротких (10–200 м) радиоволн. Были также установлены причины, обуславливающие различное состояние этих слоев и сложных процессов, возникающих в них (горьковско-люксембургский эффект и др.). Была в основном также решена важнейшая практическая задача прогнозирования прохождения различных волн коротковолнового диапазона в различное время года и суток и в том числе «дневных» и «ночных» радиоволн. Экспериментальные исследования высоты слоев с различной плотностью ионизации велись методом радиоэхо на ионосферных станциях, специально создаваемых для этой цели.

Изучение распространения ультракоротких волн метрового диапазона, способных проникать через ионизированные слои атмосферы, а потому обеспечивающих дальность радиосвязи около Земли в пределах прямой видимости с учетом влияния рефракции, были начаты в двадцатых годах Б. А. Введенским. Им была выведена так называемая «отражательная» формула, в которой поле в точке приема определялось как сумма поля прямого луча и поля отраженного луча. Эта и другие работы по изучению распространения ультракоротких волн имеют весьма большое практическое значение для самолетной радиосвязи, зародившейся в то время радионавигации и первоначального развития телевидения.

Второй этап развития радиоэлектроники отличается большим развитием не только научных работ, но и является периодом, когда получила большое развитие подготовка научных и инженерных кадров в области радио. В университетах начали создаваться специальности и факультеты радиофизики, а в высших технических учебных заведениях — радиотехнические факультеты. В настоящее время число их сильно возросло, как и общий ежегодный выпуск радиоспециалистов с высшим образованием.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На первом этапе своего развития радиотехника основывалась на электродинамике. Излучение электромагнитных волн проводником с током и распространение их в свободном пространстве и около Земли изучалось с помощью уравнений Максвелла в классической дифференциальной форме. Вместе с тем рассмотрение процессов в цепях переменного тока производилось также с помощью классических дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, причем (поскольку длины волн были велики по сравнению с линейными размерами цепей) установившийся режим электрических колебаний в них определялся интегральными законами Ома и Кирхгофа.

Использование в технике электронных вакуумных приборов, сверхвысоких частот и импульсных колебаний сложной формы потребовало привлечения нескольких разделов физики и различных математических методов. Прежде всего пришлось решать задачи о нелинейных цепях и, в частности, задачи об устанавливающемся и установившемся режимах триодного автогенератора. Создание методов приближенного решения нелинейных дифференциальных уравнений радиофизики обязано трудам Л. И. Мандельштама (1879—1944), Н. Д. Папалекси (1880—1947), Ю. Б. Кобзарева и других советских, а также зарубежных ученых.

Разработка электронно-ионных вакуумных приборов и особенно электронных приборов для генерирования и усиления колебаний сверхвысоких частот основывается на электронной классической (не квантовой)

теории. Уравнения движения электронов в электромагнитном поле, находящиеся в согласии с теорией относительности, используются для расчета мощных ускорителей заряженных частиц.

Анализ линейных и нелинейных цепей при сложной форме электрического колебания, в частности при коротких импульсах и частотной модуляции, сейчас основывается на преобразовании Лапласа, интеграле Фурье, операционном исчислении Хевисайда. При решении задач прохождения электрического сигнала в сложных линейных цепях, в частности во многосвязных фильтрах, используется математический метод матриц.

Сравнимость линейных размеров радиоцепей с длиной волны сделало необходимым рассмотрение установившихся режимов в них с помощью уравнений Максвелла. При этом приходится применять векторный анализ, облегчающий использование этих уравнений в технике линейных цепей сверхвысоких частот. Применение в цепях сверхвысоких частот элементов с нелинейными материалами, электромагнитные параметры которых зависят от величины и поляризации поля, потребовало использования тензорного анализа. В частности, таким способом решаются задачи инженерного расчета ферритных вентилях, фазовращателей и перестраиваемых резонаторов.

Техника электронных приборов из твердого тела — полупроводниковых триодов, сверхпроводниковых усилителей, молекулярных усилителей, магнитных и диэлектрических усилителей — основывается на современных достижениях физики твердого тела и квантовой физике. Здесь можно найти наиболее яркие примеры плодотворного взаимодействия физики и техники, о котором уже говорилось.

Одной из особенностей современной радиофизики и радиоэлектроники является изучение и использование статистических процессов. Сюда входит и изучение радиоизлучения небесных тел, и изучение собственных шумов радиоцепей, и вопросы обнаружения слабых радиосигналов, и вопросы надежности действия радиоэлектронной аппаратуры, и многое др. В связи с этим в радиоэлектронике сейчас широко используются методы математической статистики и теории вероятностей.

Требования к повышению качества радиосвязи как в отношении скорости, так и в отношении помехоустойчивости, вызвали создание теории связи и теории информации. Эта математическая дисциплина занимается количественной оценкой информации, содержащейся в каких-либо данных, изучением процессов ее хранения и передачи. Она в большей степени является разделом теории вероятностей и, в частности, решает такие практические задачи, как передача большого количества информации на минимальной полосе частот.

Создание электронной автоматики, электронных вычислительных машин породило новое научное направление — кибернетику, — которая занимается изучением процессов в автоматических устройствах и в живых организмах. В число этих процессов входит накопление, хранение, преобразование и передачи информации, вследствие чего теория информации и математическая логика являются математическими основами кибернетики.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ИЗЛУЧЕНИЕ И КАНАЛИЗАЦИЯ РАДИОВОЛН В СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Как уже говорилось, современный этап развития радиоэлектроники характеризуется широким использованием диапазона ультракоротких радиоволн, который условно определяется длинами волн от 10 м до 1 мм. В связи с этим экспериментальные и теоретические исследования по рас-

пространению радиоволн ведутся сейчас главным образом в этом диапазоне.

Очень важно подчеркнуть, что осуществить передачу информации о быстро протекающих процессах (телевидение, радиолокация и т. п.) возможно только на ультракоротких волнах. Ультракороткие волны (УКВ) позволяют применить новые методы модуляции — импульсную (ИМ) и частотную (ЧМ), которые ставят радиосвязь на новую ступень развития как в отношении помехоустойчивости, так и в отношении скорости передачи информации.

УКВ отличаются от коротких и длинных волн тем, что они не отражаются (за исключением волн длиннее 5—7 м) верхними ионизированными слоями атмосферы и почти не огибают выпуклости Земли вследствие дифракции. По этой причине радиосвязь на УКВ вокруг Земли без ретрансляции в естественных условиях неосуществима. По этой же причине только на УКВ возможна радиосвязь в пределах мирового пространства.

Практикой радиолокации в годы второй мировой войны было обнаружено распространение УКВ далеко за горизонт, дальность которого определяется рефракцией. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что это явление вызывается резким убыванием диэлектрического коэффициента атмосферы ϵ с высотой h , а следовательно, возрастанием «эффективного» радиуса Земли, определяемого выражением

$$R_{\text{эф}} = \frac{R}{1 + R \frac{d(\sqrt{\epsilon})}{dh}},$$

в котором R — действительный радиус Земли.

При некоторых условиях температуры и влажности в приземном слое атмосферы может возникать даже немонотонный характер убывания диэлектрического коэффициента, и тогда происходит волноводное распространение ультракоротких волн, превышающее в несколько раз дальность горизонта, определяемого «нормальной» величиной эффективного радиуса Земли

$$R_{\text{эф}} \approx \frac{4}{3} R.$$

В самые последние годы обнаружено диффузное распространение УКВ далеко за горизонт за счет рассеяния на глобальных неоднородностях атмосферы — явление, которое можно назвать как «радиозарево», подобное видимому зареву, обусловленному рассеянием световых лучей облаками. В тропосфере происходит рассеяние метровых (короче 3 м), дециметровых и сантиметровых радиоволн (100—10 000 мГц), а в ионосфере — метровых волн (20—60 мГц). Неоднородности в тропосфере создаются неравномерностью движения потоков воздуха с различной температурой и влажностью. Неоднородности кучевого характера в ионосфере со сравнительно большой плотностью ионизации создаются главным образом при пролете метеоров, полярным сиянием и другими процессами. (При влете метеора в земную атмосферу со скоростью от 10 до 70 км/сек вследствие сильного нагревания образуется ионизированный столб воздуха — метеорный след, отражающий радиоволны указанного диапазона.)

Опытами установлено, что диффузное распространение УКВ, а также отражение метровых волн диапазона частот от 6 до 75 мГц от метеорных следов может быть использовано для осуществления сверхдаль-

ней радиосвязи при применении мощного радиопередатчика, высокочувствительного приемника и антенны с высокой направленностью.

Характерной особенностью сантиметровых, миллиметровых и, отчасти, дециметровых волн является рассеяние облаками и поглощение их в нижних слоях атмосферы. Явление отражения от дождевых облаков и дождевых фронтов используется в метеорологии. Поглощение в атмосфере радиоволн, соответствующих резонансным частотам молекул водяного пара, кислорода и азота, исключает применение для радиолокации ряда волн миллиметрового диапазона.

За последние годы новым в исследовании ионосферы, а следовательно в области изучения распространения длинных и коротких радиоволн, является использование высотных ракет и искусственных спутников Земли с радиоэлектронной автоматической аппаратурой на борту. Таким способом удается уточнить характер распределения плотности ионизации в верхних слоях атмосферы. В частности, обнаружено, что уже на высоте

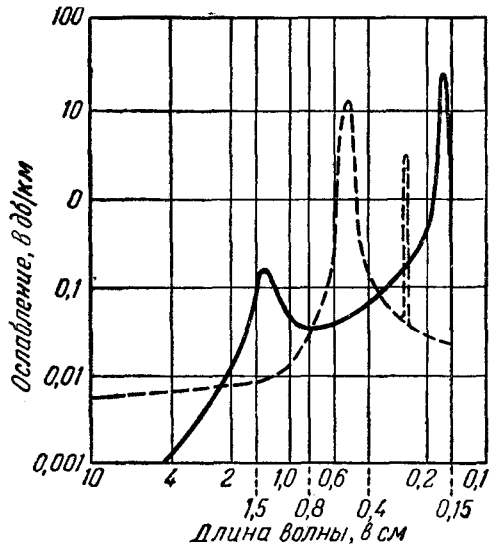


Рис. 11. Поглощение сантиметровых волн в кислороде атмосферы (пунктир) и в водяном паре (сплошная кривая).

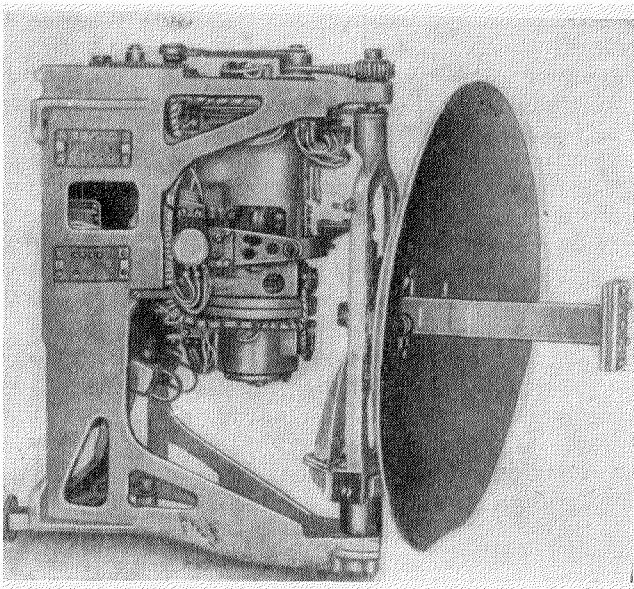


Рис. 12. Антенна трехсантиметрового диапазона волн с качанием луча⁹¹.

20 км существует сильно ионизированный слой, а на высоте 40 км существует слой с большой концентрацией мезонон и быстрых электронов

Успехи ракетной техники и производства искусственных радиоактивных изотопов позволяют ставить задачу создания искусственных ионизированных объемов в атмосфере и изучать их влияние на распространение радиоволн.

Следует отметить, что поскольку сверхдальняя современная радионавигация использует длинные волны, а при ядерных взрывах и полетах больших ракет возникают сверхдлинные радиоволны, в настоящее время продолжаются теоретические и экспериментальные работы по распространению радиоволн, относящихся к этому диапазону. Здесь следует отметить работы В. А. Фока, решившего задачу дифракционного распространения с учетом нормальной рефракции для сферической Земли в наиболее полном и строгом виде. Ведутся также теоретические работы по рассмотрению волноводного механизма распространения сверхдлинных волн, соответствующих частотам 1—20 кГц в пространстве, ограниченном сферической Землей и ионосферой, в котором импеданс считается отличным от импеданса свободного пространства.

Представляют интерес научные и практические вопросы распространения на большие расстояния сверхдлинных волн в поверхностных слоях Земли и в воде. Кроме того, сейчас представляют интерес также и вопросы распространения коротких и ультракоротких волн в толще снежного покрова.

Важным вопросом в распространении радиоволн, помимо дальности, является определение скорости движения электромагнитной волны вблизи Земли и в свободном пространстве. Точное определение скорости является необходимым для радионавигации, радиогеодезии и других практических применений; оно важно также и для проблем современной физики.

Работами Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси установлено, что скорость электромагнитных волн над однородной земной поверхностью совпадает со скоростью в свободном пространстве с точностью до четвертого десятичного знака. Теоретическое и экспериментальное изучение влияния неоднородностей поверхности Земли и неровностей почвы показывает, что направление распространения и фазовая скорость нарушаются только вблизи границ неоднородностей и неровностей, а по мере дальнейшего распространения вновь восстанавливаются. С помощью интерферометра на волне около 4 мм определена величина скорости электромагнитной волны в вакууме, равная $299\,792,5 \pm 0,1 \text{ км/сек.}$

Научные и технические задачи канализации токов высокой частоты, соответствующих длинным и коротким волнам, за исключением каких-либо специальных случаев (передача очень большой мощности сравнительно длинным фидером), решаются сравнительно легко.

Канализация токов ультравысокой частоты встречает большие затруднения, обусловленные паразитным излучением, поверхностным эффектом тока и частичным отражением энергии нагрузкой в случае линии, длина которой больше или сравнима с длиной волны. Правда, эти затруднения в известной мере преодолеваются применением коаксиальной и волноводной конструкции фидеров.

Эти затруднения особенно возрастают на миллиметровых волнах, т. е. при частотах выше 30 000 мГц . Для иллюстрации можно указать, что к. п. д. проводникового (медного) волновода длиной 20 м при волне 5 мм равен всего лишь 0,01%. В настоящее время ведутся¹⁹ разработки конструкций в виде однопроводной линии, полосковой линии, диэлектрического волновода и т. д. Особенно перспективной конструкцией является спиральный волновод, представляющий собой плотно намотанную цилиндрическую спираль из изолированной медной проволоки.

В таком волноводе может поддерживаться волна типа H_{01} , при которой в волноводе нет продольных токов и потери в меди с увеличением частоты уменьшаются. В результате этого затухание в таком волноводе может быть примерно в 10 раз меньше, чем в прямоугольном волноводе.

Весьма большие успехи имеет современная техника ультракоротковолновых антенн как направленного, так и ненаправленного действия.

Коэффициент полезного действия УКВ антенны значительно выше к. п. д. длинноволновых антенн; в настоящее время могут быть созданы ультракоротковолновые антенны направленного действия, имеющие ширину радиолуча менее одного градуса, вследствие чего точность измерения угловых координат на ультракоротких волнах становится сравнимой с точностью оптических измерений⁸⁴. В современных специальных антеннах применяется быстрое качание (сканирование) радиолуча с частотой 10 и более раз в секунду. Имеются большие успехи в области создания широкополосных и невыступающих антенн (дифракционные, диэлектрические, поверхностные, линзовые и др.).

В радиолокации применяются надувные параболические антенные зеркала с жесткой фермой диаметром в несколько метров. С той же целью повышения транспортабельности разрабатываются системы, в которых

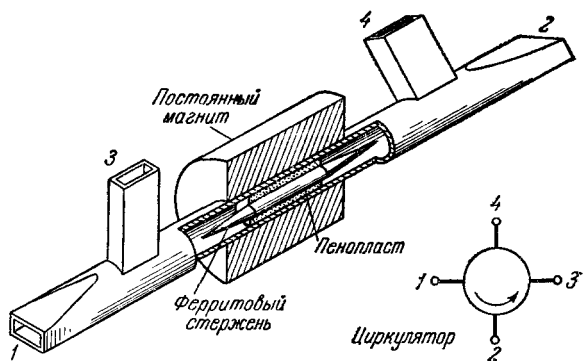


Рис. 13а. Ферритовый циркулятор, использующий эффект Фарадея.

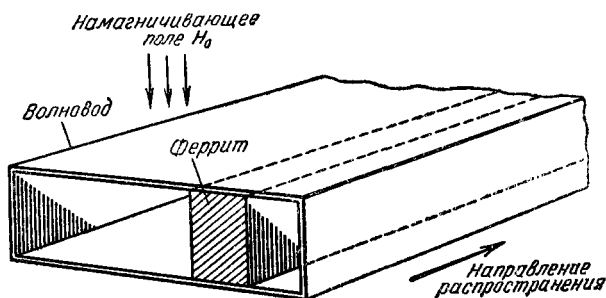


Рис. 13б. Ферритовый вентиль.

в качестве антенны используется сильно ионизированный рентгеновскими лучами или радиоактивными элементами столб воздуха⁸⁴. Широкое распространение получает применение малогабаритных ферритных антенн в приемниках¹²⁷.

Применяемый для приемной антенны длинных волн феррит обычно имеет вид стержня диаметром 1—2 см, длиной 20—30 см, на котором в один или в два слоя навита обмотка. Таким образом, получается малогабаритная приемная рамка с ферритовым сердечником, у которого магнитная и диэлектрическая проницаемости значительно больше, чем у воздуха, вследствие чего действие такой рамки эквивалентно действию простой рамки с большими геометрическими размерами. В диапазоне

сантиметровых волн ферритные антенны состоят из ферритовых стержней, излучающих энергию вдоль своей оси. Применяя подмагничивание стержней переменным током, можно качать радиолуч в пространстве с частотой до нескольких сотен периодов в секунду.

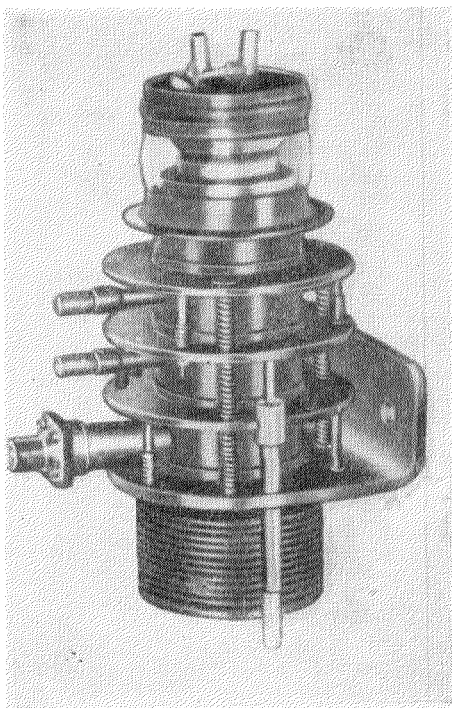


Рис. 14. Трехрезонаторный мощный кли-строн УВЧ.

В диапазоне ультракоротких волн в большой степени проявляется эффект вращения плоскости поляризации при намагничивании ферромагнитных тел, через которые проходит электромагнитная волна. Используя это явление, в настоящее время с применением феррита осуществляются схемы и конструкции практически безинерционных переключателей в виде управляемых поляризационных фильтров, вентиля для потока электромагнитной энергии, циркуляторов, позволяющих отвести отраженную энергию в другом направлении по сравнению с падающей, быстроперестраиваемых резонаторов и другие элементы цепей ультравысокой частоты.

Следует подчеркнуть, что применение в цепях УВЧ ферритных элементов, обладающих вентиляльным действием для потока электромагнитной энергии, по существу есть практическое использование электрических цепей, не под-

чиняющихся принципу взаимности. Этот новый этап в развитии теории и практики электрических цепей исключительно богат важными практическими применениями.

ГЕНЕРИРОВАНИЕ И УСИЛИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

При генерировании переменного тока ультравысокой частоты (УВЧ) с помощью триодов возникают технические затруднения, вызываемые инерцией электронов, а также индуктивностью и емкостью электродов. В связи с этим в настоящее время разработаны специальные конструкции УВЧ триодов. Примером является штабельная металлокерамическая радиолампа, которую можно монтировать как простую радиодеталь. Миниатюрный триод⁴⁴ такой конструкции диаметром 8 мм и высотой 10 мм может работать усилителем на частоте 1000 мггц со сравнительно большим коэффициентом усиления и даже при температуре до 700° С.

Характерным современным направлением является также создание «безнакальных» керамических радиоламп¹²⁸. Оксидный катод этих ламп дает необходимую эмиссию за счет общего нагрева всей лампы до 500÷700° С тепловыми потерями самой радиоаппаратуры или другого оборудования. Все другие электроды такой лампы во избежание электронной эмиссии из них делаются из чистого тантала, что способствует также поглощению газов, выделяющихся в вакууме при высоких температурах.

Такие лампы могут работать также и без источника сеточного смещения вследствие положительной контактной разности потенциалов между катодом и сеткой. Все это дает около 80% экономии энергии по сравнению с обычными лампами, имеющими электрический накал катода.

Для мощного генерирования дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн в настоящее время созданы и совершенствуются новые типы электровакуумных приборов: резатроны, клистроны и магнетроны с фиксированной и перестраиваемой волной^{35-49а}.

Весьма ярким примером успехов в этой области служит многорезонаторный клистрон и мощный широкополосный генератор с независимым возбуждением магнетронного типа. В отличие от двухрезонаторного клистроны новый клистрон имеет промежуточные резонаторы, которые имеют высокую добротность и, следовательно, повышают к. п. д.

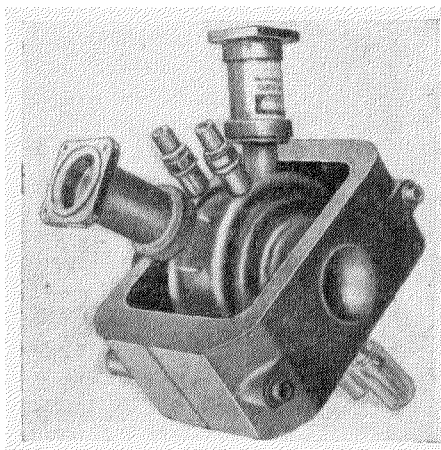


Рис. 15а. Генератор-усилитель магнетронного типа 800 *квт* в импульсе.

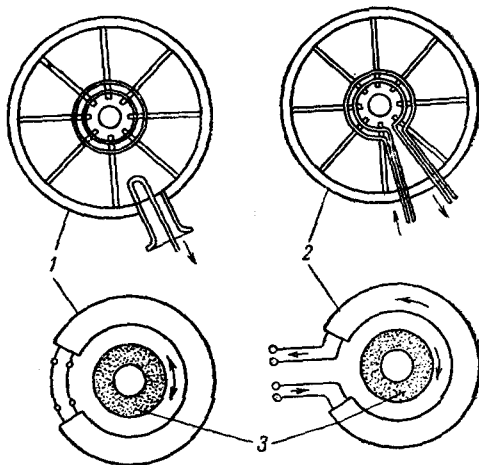


Рис. 15б. Схема конструкций: 1—магнетрон с самовозбуждением; 2—усилитель магнетронного типа; 3—электронное облако.

и коэффициент усиления; этому способствует также фокусировка электронного пучка. Уже созданы многорезонаторные клистроны-генераторы с выходной мощностью в несколько десятков киловатт в дециметровом диапазоне, имеющие к. п. д. около 50% и коэффициент усиления порядка 1000 и более. Такие высокие качества с помощью тетродов не удастся получить даже в диапазоне длинных волн. Импульсный клистрон³⁷ такого типа уже создан на мощность более 20 000 *квт* при средней мощности 50 *квт*.

Недостатком многорезонаторного клистроны является его узкополосность. Этого недостатка не имеет генератор-усилитель магнетронного типа, который способен усиливать колебания в сравнительно широкой полосе частот в пределах 10% и более, при неизменном режиме электропитания и постоянстве магнитного поля, правда, с меньшим коэффициентом усиления, чем клистрон. В настоящее время уже созданы дециметровые широкополосные усилители магнетронного типа⁴⁵ с импульсной мощностью порядка 1000 *квт*, к. п. д. $\sim 50\%$ и коэффициентом усиления ± 10 в полосе частот $\pm 5\%$.

Для генерирования и усиления УВЧ, соответствующих волнам 300—10 *мм* и короче, разработаны и совершенствуются новые электровакуумные приборы — ЛБВ (лампа бегущей волны) и ЭВЛ (электронноволновая лампа). В них взаимодействие потока электронов с электромагнитным полем происходит на большой длине, вследствие чего коэффициент

усиления такой лампы значительно больше, чем у триода или пентода, работающих к тому же только на более низких частотах. В настоящее время имеются усилители УВЧ на ЛБВ и ЭВЛ с коэффициентом усиления порядка 100 для повышения чувствительности приемников и коэффициентом усиления порядка 100 000 для приемно-передающих устройств радиорелейных линий. Этим лампы имеют также весьма ценное свойство: не пропускать сильный сигнал. Замечательным свойством их является широкая диапазонность и практически безынерционная перестройка

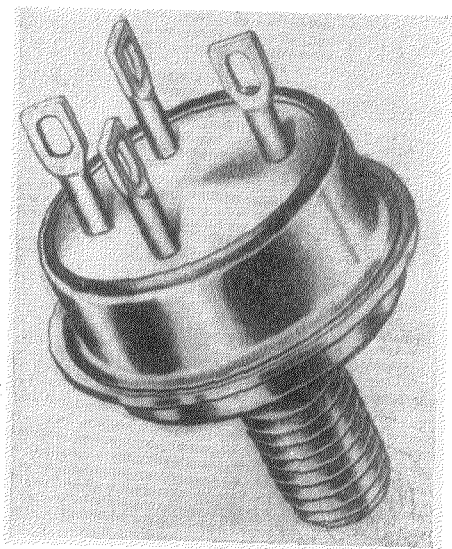


Рис. 16. Германиевый тетрод 10 амл
28 вт.

в пределах почти целой октавы, путем изменений анодного напряжения (так называемая электронная перестройка).

Генератором УВЧ с электронной перестройкой в широких пределах является лампа обратной волны (ЛОВ), в которой в отличие от ЛБВ, взаимодействие электронного пучка происходит с отраженной волной, т. е. волной, двигающейся навстречу электронному пучку. Примером ЛОВ является корцинонотрон, в котором резонаторной системой служит ребристая поверхность, вдоль которой движется электронный пучок. Изменением анодного напряжения можно изменять частоту, например, от 1600 до 2400 мГц при мощности в несколько сот вт и к. п. д. порядка 30%.

В ЭВЛ применяются полые электронные пучки; формирование таких пучков, а также буквоизображающих пучков и пучков, поворачиваемых на 180° , служит доказательством больших

достижений современной электроники. К достижениям ее относятся также успехи создания экономичных катодов с большой плотностью эмиссии, доходящей до ампер с квадратного сантиметра нагретой поверхности.

Успехи создания электронных приборов позволяют сейчас строить радиопередатчики на любую практически требуемую мощность и приемники, позволяющие принимать сигналы с потоком мощности порядка 10^{-20} вт/см². Следует отметить, что причиной, ограничивающей создание сверхмощных передатчиков УКВ, является недостаточность электрической прочности воздуха около отверстия антенного облучателя. Чувствительность же приемника УКВ ограничивается собственными и внешними шумами.

Несмотря на успехи в совершенствовании электронных вакуумных приборов современные требования к радиоэлектронной аппаратуре диктуют замену вакуумных электронных приборов приборами из твердого тела. В ближайшие годы маломощные вакуумные электронные приборы будут, видимо, полностью вытеснены полупроводниковыми и другими электронными приборами из твердого тела.

Малая потребляемая мощность, высокий к. п. д. и малые размеры электронных полупроводниковых приборов могут быть иллюстрированы многими примерами. К числу их относятся: приемники для приема дальних радиостанций, питаемые энергией излучения местных радиостанций, сверхминиатюрный радиопередатчик, который для медикодиагностических целей может проглатываться человеком, карманная телевизионная ка-

мера на полупроводниковых электронных приборах, потребляющая всего лишь 50 *вт* и многое др.

В установках большой мощности полупроводниковые диоды вытесняют ртутные и другие вакуумные выпрямители. Весьма богаты

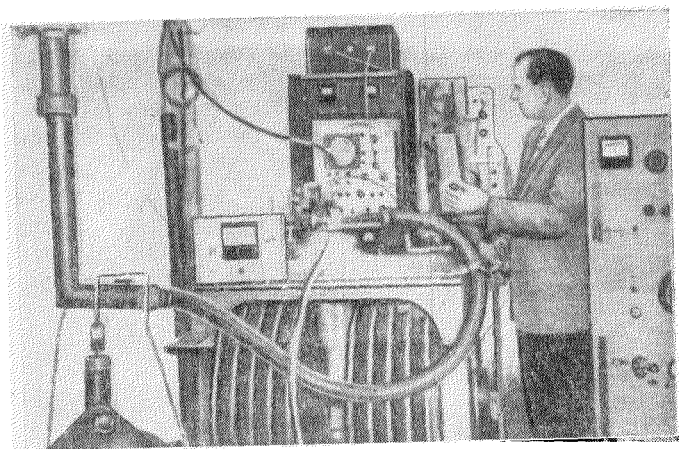


Рис. 17а. Молекулярный усилитель сантиметрового диапазона (экспериментальная установка)⁶²⁻⁶⁵.

перспективы их применения в промышленности и на транспорте при создании безколлекторных электромашин постоянного тока и выпрямителей как высоковольтных на сотни *кв*, так и на низковольтных на сотни тысяч ампер.

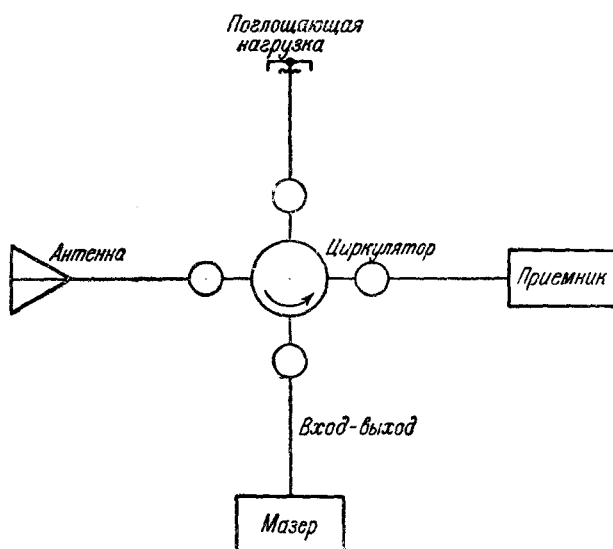


Рис. 17б. Схема включения молекулярного усилителя с ферритным циркулятором.

Особо следует подчеркнуть перспективность полупроводниковых усилителей с собственным источником питания — с использованием современных дешевых радиоактивных материалов. Техника полупроводниковых приборов достигла сейчас такого уровня, когда становится

возможным создание полупроводниковых приборов, объединяющих в себе функции: триодов, конденсаторов и источников питания. Так, небольшое твердое тело может быть сделано усилителем без источника питания.

Следует отметить, что в полупроводниках в сотни миллионов раз сильнее проявляется эффект Холла. Это явление может быть использовано для создания вентильных элементов постоянного тока, аналогичных ферритным вентилям СВЧ и различных преобразователей (датчиков).

В настоящее время еще не созданы практически пригодные полупроводниковые триоды для генерирования и усиления УВЧ в диапазоне

свыше 100 мГц. Однако в результате ведущихся в этой области работ уже имеются экспериментальные образцы полупроводниковых маломощных генераторов-усилителей^{75,78} для частоты до 3000 и даже 10 000 мГц.

Следует отметить также успехи создания нового типа твердого генератора-усилителя квантовомеханического, иначе молекулярного генератора-усилителя*), в котором усиление происходит в результате взаимодействия электромагнитного поля с внутренней энергией атомов молекул в отличие от вакуумного и полупроводниковых приборов, в которых происходит взаимодействие со свободными электронами. Искусственно увеличивая число частиц — «населенность» — более верхнего энергетического уровня введением электромагнитного поля более высокой частоты, создаются условия для усиления сигнала с меньшей частотой.

Молекулярный твердый генератор-усилитель состоит из кристалла парамагнитного вещества,



Рис. 18. Антенна радиостанции, использующей диффузное распространение в тропосфере.

помещенного внутрь резонатора ультравысокой частоты с постоянным магнитным полем. Для увеличения разности «населенности» уровней, а следовательно для увеличения коэффициента усиления, применяется охлаждение парамагнитного кристалла до температур близких к 0° К, вследствие чего он обладает очень малым уровнем собственных шумов.

В настоящее время уже имеются лабораторные образцы молекулярных усилителей для сантиметрового и дециметрового диапазонов радиоволн, в которых используются два или три энергетических уровня. В трехуровневых образцах для усиления частот порядка 3000 мГц, применяется частота возбуждения порядка 9000 мГц с мощностью в несколько десятков милливольт; при входном сигнале 10^{-11} — 10^{-10} вт, в этом случае получается коэффициент усиления 10—30 дБ. Будучи использован в качестве предварительного усилителя, молекулярный усилитель может повысить

*) В заграничной литературе применяется условное название MASER, образованное из начальных букв: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

в тысячу раз чувствительность радиолокационного приемника; при этом легко осуществляется перестройка частоты в достаточно широких пределах изменением напряженности постоянного магнитного поля⁶²⁻⁶⁵.

Молекулярный усилитель на волну 21 см, используемый в радиотелескопе, предполагается, позволит решить вопрос о наличии «водородных облаков» между галактиками.

Включение молекулярного усилителя между антенной и входом радиоприемника требует применения циркулятора, в частности ферритного, поскольку вход и выход усиленного сигнала в нем совмещены.

В связи с развитием техники сверхнизких температур в настоящее время разрабатываются и уже находят практическое применение сверхпроводниковые приборы, способные выполнять в радиоэлектронных схемах многие функции полупроводниковых триодов. В частности, сверхпроводниковый прибор — криотрон — состоит из куска танталовой проволоки, находящейся при температуре -240°C , сверхпроводимость которой может уничтожаться магнитным полем, возникающим при пропускании слабого тока в тонкой обмотке из ниобия, окружающей отрезок танталовой проволоки.

Сейчас еще не ясны перспективы создания электронных полупроводниковых и других приборов из твердого тела для генерирования и усиления мощных колебаний всего диапазона радиочастот, включая ультравысокую частоту. На пути осуществления таких приборов имеются еще нерешенные задачи создания необходимых материалов, рациональных конструкций и преодоления технологических трудностей. Не найдено еще путей создания твердых электронных приборов, могущих заменить вакуумные электронно-лучевые трубки. Однако современное развитие физики твердого тела позволяет предполагать, что в ближайшем будущем будут решены и эти задачи.

В настоящее время достигнуты большие успехи в области создания нелинейных магнитных и диэлектрических материалов, позволяющие создавать мощные безламповые усилители низкой, высокой и ультравысокой частоты. Замечательным достижением в этой области является создание магнитно-диэлектрического материала — феррита, о применении которого уже упоминалось. Этот материал, обладая ферромагнитными свойствами, однако, не является проводником. По этой причине в нем отсутствуют потери на вихревые токи, ограничивающие применение обычных ферромагнитных сердечников в цепях высокой и ультравысокой частоты.

Другим замечательным достижением в этой области является разработка ферроэлектрика — диэлектрического материала. Конденсатор с диэлектриком из ферроэлектрика способен сохранять остаточный заряд,

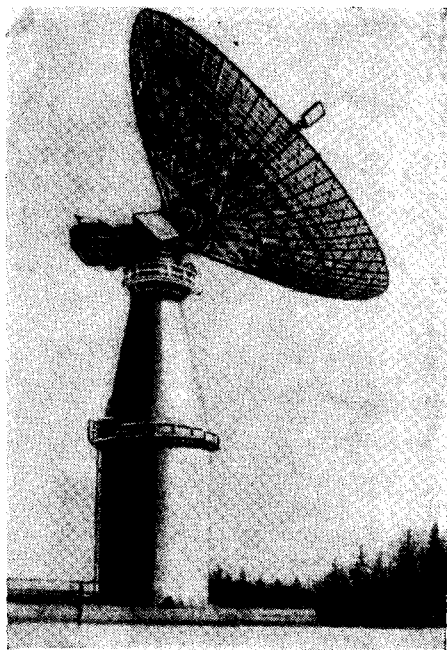


Рис. 19. Радиолокатор сверхдальнего действия дециметрового диапазона⁹³⁻⁹⁴.

если даже его пластины будут замкнуты накоротко. При изменении знака прикладываемого напряжения остаточный заряд образует прямоугольную петлю гистерезиса.

Следует подчеркнуть, что проблема повышения надежности действия радиоэлектронной аппаратуры в настоящее время приобрела исключительно большое значение. Это объясняется большим распространением радиоэлектронной аппаратуры и важностью ее функций. В связи с этим сейчас возникла новая дисциплина, изучающая вопросы надежности действия радиоэлектронной аппаратуры, использующая теорию вероятностей.

Важнейшей проблемой в области конструирования радиоэлектронной аппаратуры в настоящее время является также проблема миниатюризации ее. Для повышения надежности действия радиоэлектронной аппаратуры и ее миниатюризации необходима не только замена вакуумных электронных приборов невакуумными, но и совершенствование радио-деталей. В последние годы в этом направлении имеются большие достижения. Печатные схемы и новые радиоматериалы позволяют создавать надежно действующую малогабаритную электронную аппаратуру, детали которой — сопротивления, конденсаторы, трансформаторы, сельсины и т. п. — могут работать даже при температуре $600\div 800^\circ\text{C}$. Важной проблемой является также и создание радиопрозрачных материалов для антенных колпаков обтекаемой формы и для носовых частей ракет — материалов, обладающих температурной стойкостью свыше 1000°C .

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

1. Современная радиосвязь отличается успехами сверхскоростного радиотелеграфирования. Используя специальную электронно-лучевую трубку, можно передавать до 100 000 слов в минуту. Работа такой трубки подобна процессу типографского набора: она преобразовывает кодированные сигналы, поступающие, например, с ленты магнитной записи в резко очерченные буквы и цифры на экране.

Дальняя радиосвязь на УКВ имеет исключительно богатые перспективы. Техническими средствами ее являются: радиорелейные линии и станции, использующие диффузное распространение УКВ. Преимуществами дальней радиосвязи на УКВ являются: надежность действия в любое время суток и года, достигающая 99,9% времени, в течение которого отношение $\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} \gg 1$, большая помехоустойчивость, большая пропускная способность, обеспечивающая много каналов телефонной связи и каналы телевизионных передач. Комбинированная система из радиорелейных линий и линий, использующих диффузное распространение, в недалеком будущем, вероятно, будет основным средством связи, а на долю КВ и ДВ останется вспомогательная роль.

В системе связи за счет диффузного распространения в ионосфере применяются передатчики с мощностью 20—50 *квт* и антенны с направленным излучением в угле $5\div 20^\circ$, обеспечивающие дальность до 2000 *км*.

При мощности передатчика 1 *квт* и антенны с малой направленностью на метровых волнах осуществляется радиосвязь за счет отражения от следов метеоров, существующих от миллисекунд до нескольких секунд⁸⁶. Длина следа (обычно около 10 *км*) обеспечивает дальность радиосвязи до 2000 *км*. Дефети предварительно записываются на магнитную ленту и автоматически передаются с весьма большой скоростью (несколько тысяч слов в минуту) во время возникновения метеорного следа. Так как ежедневно возникают сотни метеоров, такая радиосвязь оказывается весьма

производительной. При весьма малой длительности следа, передача соответствующей части депеши автоматически повторяется.

При использовании диффузного распространения в тропосфере применяются клистронные передатчики мощностью 1—10 *квт* с ЧМ. Антеннами служат параболические отражатели диаметром до 20 *м*; дальность связи достигает приблизительно 600 *км*⁹⁻⁹⁴.

Диффузное распространение дециметровых волн позволяет также увеличить дальность действия радиосвязи самолет—земля. Так, например, при высоте полета 5000 *м* можно осуществить такую радиосвязь на расстоянии около 700 *км*.

Многочисленны успехи современного телевидения. Высокочувствительные передающие трубки типа ортikon и суперортikon позволяют вести передачи из студий без специального мощного освещения и осуществлять внестудийные телепередачи при обычном освещении. Другие, более высокочувствительные передачи трубки типа «видикон» и «эбикон», в которых используется изменение проводимости полупроводниковой мишени, позволяют осуществлять телепередачи даже при слабом лунном освещении.

Создана электронно-лучевая трубка, совмещенная с лампой бегущей волны и выполняющая функции приемника сантиметрового диапазона. Такая трубка приключается непосредственно к антенне и имеет весьма высокую чувствительность при сравнительно малом уровне собственных шумов.

Совершенствуются конструкции и технология цветной приемной трубки. В частности, создается приемная трубка с экраном из чередующихся вертикальных полосок люминофоров основных цветов; такая трубка проще в изготовлении, чем трубка с экраном из регулярно расположенных зерен люминофоров основных цветов.

В настоящее время намечаются пути создания плоского телевизионного экрана в виде диэлектрической пластины, покрытой слоем люминофоров, способного светиться в электрическом поле. Слой такого люминофора помещается между тонкими параллельными проводниками, расположенными взаимно перпендикулярно по обе стороны пластины; светящаяся точка на ней возникает в месте пересечения двух проволок к которым в данный момент подается видеосигнал с выхода телевизионного приемника.

В связи с успехами использования для дальней радиосвязи диффузного распространения УКВ, а также в связи с развитием строительства радиорелейных линий, в ближайшее время будут осуществляться телевизионные передачи в международном масштабе.

Телевидение в настоящее время находит весьма широкое применение в промышленности, атомной технике, при подводных работах, в военной аппаратуре и т. п. Телевизионная аппаратура уже применяется для показа образцовых производственных процессов, для показа хирургических операций и т. п.

Особенно незаменимо телевидение в опасных технологических процессах и при подводных работах. В настоящее время созданы подводные телепередающие камеры, могущие работать при погружении до 1000 *м*.

Для обслуживания дистанционного манипулирования в опасных технологических процессах может применяться стереоскопическая телевизионная установка, позволяющая судить о расстояниях между «руками» манипулятора и объектом.

2. Современные радиолокационные установки работают на дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волнах. Определение координат с помощью современных радиолокаторов осуществляется

с относительной ошибкой менее 10^{-4} , что недостижимо другими техническими средствами⁹¹⁻⁹⁴.

Многие типы современных радиолокаторов позволяют измерять угловые координаты с ошибкой менее 2—4 угловых минут. Радиопеленгационные устройства специального назначения, в частности, для радиоастрономических наблюдений, позволяют измерять угловые координаты с ошибкой в несколько угловых секунд. Это уже точность оптических приборов.

Весьма велика и разрешающая способность современных радиолокаторов, достигающая в радиолокаторах миллиметрового диапазона с применением импульсов длительностью порядка сотых долей микросекунды, единиц метров.

Дальность действия наиболее совершенных современных радиолокаторов благодаря применению больших антенн, мощных передатчиков

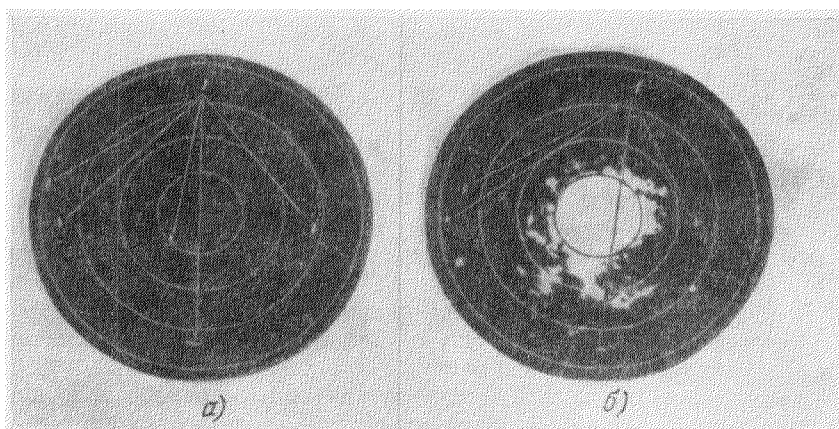


Рис. 20. Изображение на индикаторе радиолокатора с селекцией движущихся целей (а) и без нее (б): 1—сигналы от самолета.

и чувствительных приемников, может достигать нескольких тысяч километров. Для повышения чувствительности радиолокационных приемников применяются методы интегрирования и молекулярные усилители с низкой температурой собственных шумов.

Используя явление Доплера, в радиолокаторах осуществляется селекция подвижной цели из фона отражений от облаков, местных предметов и искусственных помех.

В настоящее время радиолокационная аппаратура широко применяется для управления движением самолетов в районе аэропорта, для «слепой» посадки и для регулирования движения самолетов на аэродромах. Весьма многочисленны другие применения радиолокационного управления на транспорте и в том числе имеются примеры применения радиолокаторов для регулирования движения автомобильного транспорта.

Особенно характерным в современной радиолокации является применение электронных вычислительных устройств, заменяющих визуальное индикаторное устройство и работу оператора-человека. В некоторых военных и гражданских применениях радиолокационной техники информация, вырабатываемая радиолокатором, настолько сложна и настолько быстро накапливается, что ее изучение и использование — выработка на основе ее соответствующих решений — не могут быть выполнены человеком в практически приемлемое время.

С помощью комплекса радиолокатор—электронное вычислительное устройство можно осуществлять: автоматическое наведение на атакующий объект своего истребителя или управляемого снаряда, управление ракетами дальнего действия и космическими ракетами.

Следует подчеркнуть, что радиотелемеханическое управление, как таковое, зародилось вскоре же после изобретения беспроводного телеграфирования. Однако только развитие радиолокации, позволяющей «видеть» (наблюдать) управляемый объект на расстояниях, превосходящих возможности человеческого зрения, сделало радиотелеуправление движущимися объектами практически используемым.

Уже недалеко то время, когда радиолокация и радиотелеуправление позволяют осуществлять полеты космических ракет с электронной автоматической аппаратурой на борту, обеспечивающей человеку на Земле полную возможность изучения явлений в мировом пространстве. Можно утверждать в связи с этим, что присутствие человека в мировом пространстве по крайней мере для целей исследования космоса становится ненужным.

Радионавигационная аппаратура в настоящее время достигла большого совершенства. На основе принципов радиолокации в современной радионавигации широко используется дальномерная система, обладающая по сравнению с угломерной значительно большей точностью и дальностью.

В «импульсной круговой системе» местоположение корабля или самолета определяется посредством измерения расстояний до двух наземных радиопередатчиков. При работе на ультракоротких волнах дальность действия достигает 500 км, а ошибка в определении местоположения — около 20 м. В «импульсной гиперболической системе» местоположение определяется по разности расстояний до трех наземных передающих станций, излучающих синхронизированные импульсы высокочастотных колебаний, принимаемые на корабле или самолете. При работе длинными и короткими волнами дальность действия достигает нескольких тысяч километров, а ошибка около 20 км и менее. Измерение фазы несущей частоты позволяет повысить точность определения координат, уменьшая ошибку до величины менее 100 м.

В результате стремления сделать радионавигационную систему автономной, т. е. без наземных станций, в настоящее время создается система с использованием доплеровского эффекта. Эта система состоит из самолетного радиолокатора, излучающего радиоволны по трем направлениям¹⁰²⁻¹⁰⁵. Сравнивая частоту отраженных сигналов с частотой излучения, можно определить путевую скорость с точностью порядка $\pm 1\%$ и угол сноса с точностью порядка $\pm 0,5\%$, а по этим данным — определять местоположение самолета и кратчайший курс к месту назначения. Все эти расчеты могут производиться автоматически электронной аппаратурой, в результате чего летчик визуально наблюдает все навигационные данные на индикаторе управления самолетом.

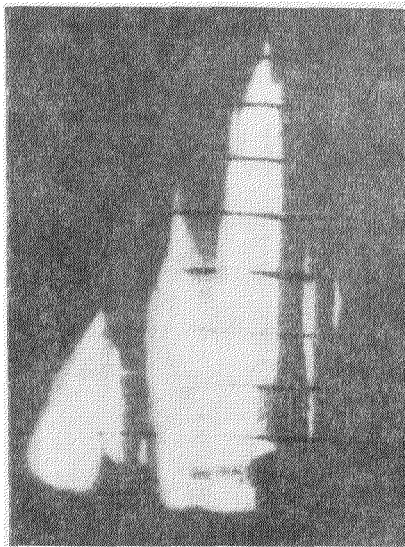


Рис. 24. Изображение на индикаторе метеорадиолокатора при очень сильной грозе.

В недалеком будущем для радионавигации самолетов и кораблей, вероятно, будут использоваться искусственные спутники Земли. Радиосигналы трех таких спутников позволят определять местоположение на Земле сравнительно простыми радиосредствами, с большой точностью и при любой погоде.

Методы точнейшего измерения расстояний, разработанные в радиолокации, находят свое применение и в геодезии. При проведении геодезических и картографических работ радиолокационная аппаратура

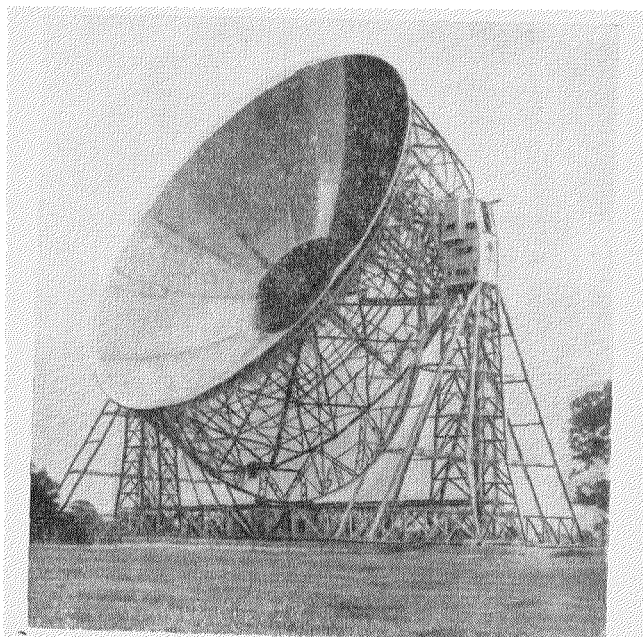


Рис. 22. Радиотелескоп диаметром ~ 75 м.

применяется для точного определения положения самолета, производящего аэрофотосъемку, или вывода его в нужный район.

Измерение расстояний порядка 30—50 км между двумя точками земной поверхности может производиться сравнительно легкими радиолокаторами переносного типа, работающими на волне порядка 10 см с непрерывным излучением при модуляции несколькими частотами от 9 до 10 мГц. Измеряя сдвиг фаз модулирующих частот, можно определять расстояния с весьма высокой точностью (ошибка порядка ± 5 см).

Для измерения сравнительно коротких дистанций применяется импульсная светолокация, которая основана на том же принципе, что и радиолокация, но с использованием диапазона оптических волн. При современных достижениях импульсной техники, позволяющих генерировать электрические импульсы длительностью меньше 0,01 мкс светолокационная аппаратура дает возможность измерять расстояние с ошибкой менее дециметра¹⁰⁰.

Следует подчеркнуть, что применение радиолокации позволяет упростить сложные геодезические съемки, сокращая в десятки раз время геодезических съемок больших малоисследованных площадей.

Для радиолокации дождевых облаков и туч применяются радиолокационные станции сантиметрового диапазона волн с круговым обзором и вертикальным сканированием; на экране индикаторов таких станций

можно наблюдать образование и перемещение грозových фронтов на площади в десятки тысяч квадратных километров. Лишь с помощью электронных быстродействующих вычислительных машин метеорологи могут использовать все то большое количество информации, которое им дают метеорадиолокаторы.

Заканчивая раздел о радиолокации, отметим технические возможности в осуществлении так называемой «пассивной» радиолокации, по физическому принципу схожей с тепlopеленгацией¹²⁹. При сравнительно низких температурах — $20 \div 30^\circ \text{C}$ в спектре теплового излучения заметную величину составляет радиоизлучение на волнах сантиметрового и миллиметрового диапазона. Так как радиолокационный приемник этого диапазона может быть сделан более чувствительным, чем детектор инфракрасных и тепловых лучей,

и так как радиоволны меньше поглощаются в атмосфере, то, оказывается, во многих случаях возможно обнаруживать некоторые объекты радиолокатором без собственного передатчика, т. е. по существу пеленгатором теплового радиоизлучения. Так, например, такой радиопеленгатор диапазона $0,8 \div 3 \text{ см}$ может обнаруживать объекты при кажущейся разности их температур в $2\text{--}3^\circ \text{K}$. Это дает, в част-

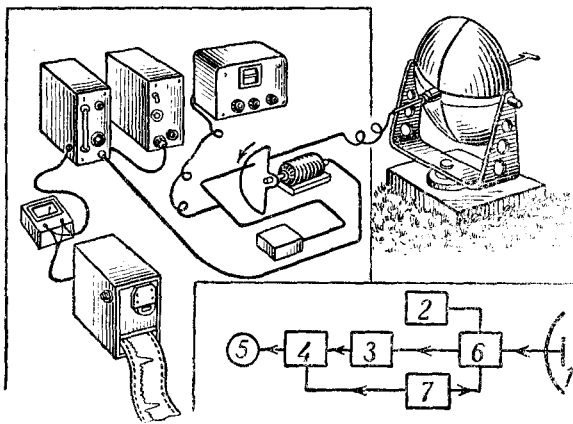


Рис. 23. Схема радиометра.

ности, возможность «видеть» путь кораблей, поскольку в их кильватере вода более теплая, чем окружающая, или с высоты 2000 м при густом тумане «видеть» береговую линию. Разумеется, разрешающая способность такого радиопеленгатора значительно ниже, чем тепlopеленгатора, а дальность его действия менее дальности радиолокатора с собственным передатчиком. Тем не менее можно полагать, что этот, вновь зарождающийся метод радиообнаружения может найти широкое практическое применение.

3. Так как ультракороткие волны проникают через ионосферу и практически не поглощаются в нижних слоях атмосферы, то используя ультракоротковолновый приемник с направленной антенной, можно принимать радиоизлучение небесных тел. Наблюдение радиоизлучения небесных тел позволяет получить много новых данных, которые не могут быть получены с помощью оптических приборов.

В виду малой плотности потока мощности радиоизлучения небесных тел ($\sim 10^{-18} \text{ вт/кв м}$), приходится применять антенны больших размеров (100 кв м и более). Но даже и при этом мощность на входе приемника оказывается много ниже уровня собственных шумов современного высокочувствительного приемника, обычно рассчитанного на прием кратковременных сигналов. Методом же радиометра, пригодного лишь для приема длительных сигналов, удается регистрировать и измерять слабое радиоизлучение небесных тел.

Несмотря на свою молодость, радиоастрономия уже имеет много научных и практических достижений. Так, обнаружено радиоизлучение Луны на волнах $8,6 \div 12 \text{ мм}$ и Марса на волне 30 мм , которое позволяет судить о природе и температуре верхнего слоя поверхности этих планет.

Обнаружены мощные радиосигналы, излучаемые несколькими источниками на Юпитере в диапазоне $18 \div 20$ мкГц с длительностью от долей секунды до нескольких секунд. Энергия при излучении этих сигналов в 100 000 раз больше энергии сильного грозового разряда в атмосфере Земли.

Открыто радиоизлучение Галактики и Метагалактики, причем обнаружено много отдельных источников излучения («радиотуманностей»), не обладающих видимым излучением.

Обнаружено также радиоизлучение на волне около 21 см, источником которого является межзвездный газ — сильно разреженный водород.

Возможны измерения распределения интенсивности радиоизлучения по солнечному диску и регулярные наблюдения радиоизлучения внешней короны Солнца, в то время как оптические наблюдения внешней короны возможны только во время полных солнечных затмений.

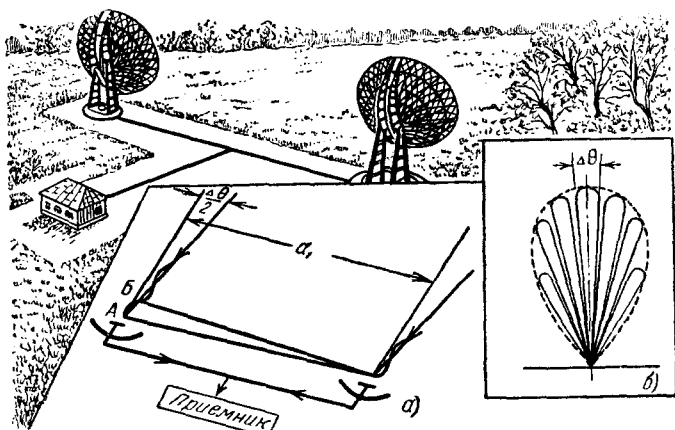


Рис. 24. Радиотелескоп интерференционного типа.

На волнах 3,2 см и 8,7 мм измерена эффективная температура земной атмосферы при солнечной и облачной погоде при различных углах места. На волне 3,2 см она изменяется в пределах $90 \div 50^\circ$ К, а на волне 8,7 мм — $40 \div 200^\circ$ К.

Возможность радиоастрономических наблюдений позволяет создавать навигационные приборы — радиосекстанты, т. е. приборы для определения положения корабля или самолета по радионаблюдениям небесных тел (Солнца, Луны).

Радиолокационные наблюдения метеорных следов осуществимы в любое время суток и при любой погоде сравнительно несложными радиолокаторами.

К настоящему времени проведено уже сравнительно большое число радиолокационных наблюдений Луны на различных волнах в диапазоне от 2 м до 10 см. Для этого приходится применять сравнительно мощные и чувствительные радиолокаторы. Результаты этих наблюдений, помимо точного измерения расстояния до Луны, дают сведения об отражательных свойствах лунной поверхности, о ее либрации и об электронной концентрации в ионосфере. В частности, этими наблюдениями установлено, что УКВ отражаются главным образом только центральной областью лунного диска, равной примерно $\frac{1}{3}$ радиуса Луны, с коэффициентом отражения — альбедо, — равным примерно 0,1. На основе этих данных можно сделать заключение, что использование отражения от Луны для радиосвязи между удаленными наземными пунктами возможно лишь

оптического диапазона, но позволяет изучить детальное строение молекул. Благодаря применению радиоэлектронных схем, позволяющих осуществить генерирование и усиление монохроматических электрических колебаний, радиоспектроскопия по точности измерений и разрешающей способности значительно превосходит спектроскопию, использующую оптические и инфракрасные лучи.

Избирательное поглощение радиоволн молекулами различных веществ используется также для стабилизации частоты генераторов миллиметровых и сантиметровых волн.

Изучение строения молекул методом радиоспектроскопии позволило создать новый метод генерирования и усиления электрических колебаний ультравысокой частоты — молекулярный генератор-усилитель. Выше уже упоминалось о твердом молекулярном генераторе-усилителе. В газовом молекулярном генераторе миллиметрового и сантиметрового диапазонов молекулярный пучок аммиака пропускается в вакууме через сильное электрическое фокусирующее поле; при этом происходит отделение молекул, обладающих более высоким энергетическим уровнем, и введение их в объемный электрический резонатор, в котором они возбуждают колебания на резонансной частоте. Большое практическое значение такого генератора заключается в том, что он, обладая весьма высокой стабильностью частоты — порядка 10^{-12} , может применяться в качестве эталона частоты, а следовательно, в качестве прибора измерения промежутков времени с исключительно высокой точностью.

Построенные на этом принципе молекулярные часы позволяют измерять время с точностью лучшей, чем 10^{-11} сек. Используя молекулярные часы в дальней радионавигационной системе, можно определять местонахождение с ошибкой в несколько десятков километров на расстоянии в несколько тысяч километров от базы.

Высокая стабильность частоты молекулярных генераторов открывает новые возможности при исследовании различных физических явлений и, в частности, дает возможность экспериментально проверить общую теорию относительности, поскольку гравитационный сдвиг частот в поле Земли вблизи ее поверхности равен

$$10^{-10} \gamma \frac{h}{R},$$

где h — вертикальное расстояние между источниками, а γ — частота излучения.

4. Радиоэлектронная аппаратура является сейчас совершенно необходимой в различных применениях атомной физики и техники. В настоящее время очень широко используется для различных анализов метод «меченых» атомов. Регистрация излучения последних осуществляется специальными электронными схемами, производящими амплитудный и частотный анализы электрических импульсов, возникающих в них при радиоактивном излучении.

Мощное радиоэлектронное оборудование представляют собой ускорители заряженных частиц. В них энергия высокочастотного электромагнитного поля переходит в энергию движущихся зарядов, т. е. происходит процесс, обратный по сравнению с процессом в электронном генераторе высокой частоты, в котором энергия постоянного тока переходит в энергию переменного тока. Примером мощного ускорителя является наш отечественный синхрофазотрон на 10 миллиардов эв, имеющий диаметр магнита 60 м и мощность питания всего оборудования — 150 000 квт. В настоящее время в СССР ведется разработка еще большего ускорителя — на 50 миллиардов эв. Длина кольцевой орбиты ускоряемых частиц в этом синхрофазотроне будет около 1,5 км.

В настоящее время начаты разработки методов превращения энергии выделяемой в ядерной реакции непосредственно в энергию переменного тока. Выделяемые атомным реактором электроны и протоны с помощью электромагнита могут группироваться в потоки частиц, направление которых периодически меняется, вследствие чего в электрической цепи индуцируется переменный ток.

Здесь также следует отметить ведущиеся разработки преобразования тепловой энергии в электрическую путем использования термоионной эмиссии¹¹. В лабораторных образцах генераторов такого рода, состоящих из баллона с двумя электродами, имеющими различную величину работы выхода, и заполняемого ионизированной средой, уже получен к. п. д. около 10%, при этом предполагается, что в дальнейшем он может быть значительно повышен. Как известно, при использовании термолар к. п. д. преобразования тепла в электроэнергию 1%. Отсутствие механического контакта между электродами термоионного преобразователя позволяет поддерживать большую разницу их температур, что и обеспечивает более высокий к. п. д. преобразования.

В противоположность управляемой ядерной реакции, осуществляемой в атомных реакторах с использованием химической технологии и механики, управляемая термоядерная реакция может быть осуществлена с использованием электронной техники. Уже выполнены первые работы в этом направлении: для достижения температур, необходимых для осуществления термоядерной реакции, применяется импульсный электрический разряд в газе огромной мощности при сильном магнитном поле, сжимающем разряд в тонкий шнур, чем обеспечивается его термоизоляция. Не исключено, что применение электромагнитного поля ультравысокой частоты при подходящей схеме и конструкции термоядерного реактора позволит осуществить и необходимый нагрев, и необходимую термоизоляцию плазмы, в которой будет происходить реакция синтеза.

Применение электроники в атомной энергетике позволяет решать проблему создания космических ракет с дальностью полета не только в пределах нашей солнечной системы, но и за ее пределы. В настоящее время разрабатываются проекты ионных и фотонных ракет, основанных на использовании истечения ионов и фотонов. Так, например, проектируется ракета¹⁴, движение которой будет осуществляться реакцией «струи» ионов со скоростью 200 км/сек. В этой ракете тепло, создаваемое атомным реактором, будет преобразовываться в электрическую энергию для ионизации паров цезия. Образующиеся ионы под действием сильных электрических полей будут выходить из сопла с указанной выше скоростью.

В настоящее время широкое распространение в промышленности получило применение токов высокой частоты для технологических нагревов. Так как с увеличением частоты переменного поля поглощение энергии диэлектриком возрастает, то применение ультравысокой частоты для нагрева неметаллических деталей и материалов оказывается весьма эффективным. При этом оказывается возможным осуществить преимущественный нагрев внутренней части нагреваемого предмета. Индукционный высокочастотный нагрев применяется и для нагревания металлических тел, которые для этого помещаются в магнитное поле. В этом случае из-за наличия поверхностного эффекта индукционный нагрев металлических тел происходит лишь в наружных слоях и при быстром воздействии внутренние слои не успевают нагреться за счет теплопроводности. Это явление используется для осуществления поверхностной закалки.

Высокочастотный способ нагрева нашел ценное применение в медицине, где получил название коротковолновой и ультракоротковолновой терапии. Сейчас почти нет лечебных учреждений, где не было бы

радиоэлектронного оборудования, применяемого для самых различных целей диагностики, анализа и лечения.

В настоящее время трудно назвать такую область производства, где бы не применялась автоматизация управления и контроля за технологическими процессами, основанная на преобразовании неэлектрических величин в электрические различными датчиками — емкостными, индуктивными, из омических сопротивлений, электрохимическими, фотоэлементами и с применением телевизионной техники.

Электронные тензометры с проволочными датчиками позволяют измерять напряжение в различных узлах крупных машин. Электронные схемы позволяют поддерживать автоматически заданную температуру печи с большой точностью, измерять ничтожно малые смещения и осуществлять массовый химический анализ в процессе непрерывного производства.

Для непрерывных измерений толщины ленты при прокате применяются электронные устройства, регистрирующие β - или γ -лучи радиоактивных изотопов, помещенных около измеряемой ленты. Для регулирования влажности бумаги в процессе производства применяются электронные влагомеры, основанные на изменении выходного напряжения высокочастотного генератора, возникающего при изменении емкости контура этого генератора.

Исключительно велико оснащение радиоэлектронной аппаратурой полиграфического производства, кинофабрик и т. д. Автоматические заводы по производству массовых деталей, бетона и многого другого работают с помощью управления электронной аппаратурой. Начинает широко внедряться радиотелеуправление подъемными кранами и другими мощными строительными агрегатами.

Электронная аппаратура широко применяется в геологии для разведки ископаемых. Ведутся опыты по применению быстрого высокочастотного нагрева для разрушения крупных глыб полезных пород.

5. Современные требования, предъявляемые к облегчению умственного труда человека, и требования, выдвигаемые управлением сложными технологическими процессами и задачами военной техники, могут быть удовлетворены только лишь средствами электронной автоматики — автоматики высшего типа, отличающейся применением обратной связи и элементов запоминания как заданной программы, так и результатов, получающихся в процессе ее выполнения. Примером электронного автоматического устройства является электронная вычислительная (цифровая) машина, позволяющая выполнять сложные математические и логические операции с весьма большой скоростью, а также позволяющая осуществлять непрерывный контроль и управление сложным технологическим процессом с большим совершенством.

Во многих областях науки и техники имеются вычислительные задачи, требующие на свое выполнение десятки лет непрерывного труда большого числа одновременно работающих вычислителей. Электронная вычислительная машина, способная выполнять десятки тысяч арифметических действий в секунду, может решать такие задачи за несколько часов с любой требуемой точностью. Однако все новые и новые требования, вытекающие из современного развития науки и техники, заставляют в настоящее время разрабатывать электронные вычислительные машины, могущие выполнять до двух миллионов сложений или 500 000 умножений 12—15-значных чисел в секунду¹³⁰.

В принципе простые электронные схемы обладают изумительными свойствами. Создание коротких импульсов — это есть процесс включения

и выключения тока в цепи с малой постоянной времени; запоминание информации — это есть импульсный заряд миниатюрного конденсатора или импульсное намагничивание миниатюрного сердечника; логическая операция умножения — это есть возникновение импульса на анодах параллельно включенных вентилях, когда одновременно подаются положительные импульсы на их катоды. В результате все это дает возможность создать выдающееся достижение современной науки и техники — электронное устройство, выполняющее функции умственного труда человека.

В электронной цифровой машине все операции производятся с помощью отсчета электрических импульсов длительностью порядка микросекунд и меньше. Использование двоичной системы в электронной машине обеспечивает устойчивость и большую скорость ее работы; при полмикросекундном импульсе электронная машина запишет миллиардное число примерно за 30 микросекунд, т. е. в 200 000 раз быстрее ручной записи по десятичной системе.

Общая структурная схема электронной цифровой машины состоит из следующих основных частей: входного устройства, арифметического устройства, запоминающих устройств, управляющего устройства и выходного устройства. Во входном устройстве программы вычислений и исходные данные, первоначально записанные в виде числовой таблицы, переписываются по двоичной системе на перфокарты.

Перевод числовой таблицы на систему отверстий в перфокартах может осуществляться автоматически с помощью электронногочитающего автомата. Разрабатываемые в настоящее время такие автоматы способны считывать более 100 цифровых знаков (от 0 до 9) в секунду и тем самым обеспечить более полную загрузку быстродействующей вычислительной электронной машины. Принцип действиячитающего автомата основан на разложении читаемого знака световым лучом на несколько элементов, в каждом из которых превалирует или черный или белый цвет; в результате этого от каждой цифры с помощью фотоэлемента вырабатывается группа электрических импульсов, которая с помощью специальной схемы преобразуется в один импульс на соответствующем выходном проводе устройства. Число выходных проводов равно числу распознаваемых цифр, т. е. десяти.

Для повышения производительности быстродействующей цифровой машины выходные данные печатаются и одновременно размножаются с большой скоростью при помощи электронной автоматической аппаратуры, в основе устройства которой используется электронно-лучевая трубка с буквенной индикацией. Перевод букв и других знаков на бумагу производится методом серографической печати. Такое автоматическое устройство может работать со скоростью воспроизведения свыше двух тысяч букв в секунду.

Основными частями арифметического устройства являются электронные схемы сложения, вычитания и умножения. Основными элементами этих схем являются схемы основных логических операций: отрицание («не»), логическое умножение («и») и логическое сложение («или»). В частности, электронная схема, называемая схемой совпадения, осуществляет логическое умножение.

Следует отметить, что в современных больших электронных вычислительных машинах внутренние запоминающие устройства, осуществляемые с помощью электронно-лучевых трубок или ферритных сердечников, могут запоминать до нескольких тысяч чисел, записывая и выдавая любое из них в любой последовательности. Внешние запоминающие устройства с применением магнитной записи на ленту в больших

машинах обладают емкостью до нескольких миллионов чисел; однако здесь выборка чисел может осуществляться лишь в определенной последовательности.

Как уже отмечалось, электронные цифровые машины позволяют осуществлять автоматическое управление сложными процессами, например управление станками, электростанциями, полетом самолета, полетом ракеты и снаряда.

В автоматически управляемом фрезерном станке профиль обработки деталей задается числами в виде отверстий на перфоленте. Электронная вычислительная машина по этим числам вырабатывает команды в виде электрического напряжения, поступающего на электродвигатели сервомеханизмов, приводящих в движение режущий инструмент и деталь. В процессе управления станком электронное устройство быстро выполняет большую вычислительную работу, сравнивая получающиеся размеры с заданными и вырабатывая на основе этого сравнения управляющие сигналы. Автоматическое управление фрезерным станком с помощью электронной вычислительной машины почти в три раза сокращает время обработки сложных деталей по сравнению со способом управления по копировальному устройству. Кроме того, замена копировального устройства перфолентой резко снижает продолжительность и стоимость подготовительных работ.

При применении электронной цифровой машины для автоматического управления полетом самолета машина управляет взлетом, выравнивает самолет на заданной высоте, направляет его по заданному курсу, приводит к заданному пункту и управляет посадкой. Программа полета заранее рассчитывается и записывается на перфоленту. Электронное вычислительное устройство сравнивает данные о местонахождении самолета, даваемого навигационными приборами, с программой полета и по отклонениям корректирует полет, а при встрече с опасными грозowymi образованиями, информацию о которых дает специальный радиолокатор, заставляет самолет обойти их по наимыгоднейшему пути.

Электронная цифровая машина способна выполнять операции, из которых состоит процесс решения логической задачи, т. е. операции запонинания заданной информации, сравнения с ней получаеомой информации и выдачи ответа на основании этого сравнения. Благодаря этому, например, электронная машина может выполнять перевод текста с одного языка на другой, давая на выходе перевод в виде отпечатанного текста.

В дальнейшем возможно создание электронных цифровых машин для автоматического перевода речи одновременно на несколько других языков и радиопередача переводов на индивидуальные приемники массовой аудитории. Кроме того, современное состояние радиоэлектроники позволяет ставить задачу создания электронного читающего автомата, воспроизводящего текст акустически на одном из заданных языков, а также автомата, записывающего человеческую речь на пишущей машинке на другом, наперед заданном, языке.

Применение электронных цифровых машин для игры в шашки или шахматы, создание самообучающихся машин и т. п. являются экспериментальными исследованиями кибернетики. Эти исследования имеют исключительно большое значение для развития биологии и в том числе для изучения процессов высшей нервной деятельности. Все это позволяет не только полнее изучать живой организм и улучшать его жизнеспособность, но и создавать более совершенные автоматические устройства, пригодные для выполнения более сложных функций человеческого умственного труда.

Гидравлический насос, управляемый электронной вычислительной машиной, учитывающей состояние крови и другие физиологические реакции, может заменить сердце в живом организме на время сложной операции. Ультразвуковой локатор, выходной сигнал которого анализируется быстродействующей электронной вычислительной машиной и после преобразования подается в виде электрических импульсов в соответствующие чувствительные точки, может служить поводом для слепого.

Изучая электрические колебания — биотоки, — возникающие в живом организме в процессе деятельности его мозга, в принципе возможно анализировать и синтезировать не только физиологические процессы, но и процессы мышления. Если, например, будут найдены и расшифрованы электрические импульсы, возникающие в мозгу как в процессе воспроизведения речи вслух, так и в процессе воспроизведения ее про себя, т. е. беззвучно, то, вероятно, станет возможным с помощью радиоэлектронной аппаратуры записывать свои мысли, не прибегая к помощи своих рук. Вероятно, таким же путем может решаться важнейшая практическая задача — облегчение памяти и работы человеческого мозга в процессе его многообразной творческой деятельности.

В настоящее время уже возможно создание быстродействующих научных, технических, медико-диагностических и других электронных справочников, которые позволяют резко увеличить производительность умственного труда. Это тем более необходимо, так как объем человеческих знаний непрерывно растет и для восприятия их, очевидно, необходимо прибегать к применению технических средств. Точно так же с помощью электронных цифровых машин можно осуществлять автоматизацию процессов административно-хозяйственного управления и даже управления боевыми действиями^{115, 124, 126}.

В общем технически возможно создание электронной машины для выполнения любой сложной функции, которую она может выполнять лучше человека-конструктора, создавшего эту машину; но этой функцией все же и будет ограничена ее способность — таков неорганический «усилитель мышления».

Однако бесплодна и неосновательна идея создания неорганической машины, эквивалентной «по способностям» человеческому мозгу во всем его многообразии творческой деятельности и способности саморазвития в процессе этой деятельности. Если попытаться спроектировать даже из самых совершенных в перспективе электронных запоминающих систем вычислительную машину с таким же числом элементов памяти, каким обладает человеческий мозг, то получится конструкция, которая по своим огромным габаритам и по огромной потребляемой электроэнергии окажется технически неосуществимой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вначале было сказано о трудности определения научного и технического содержания радиоэлектроники как весьма всеобъемлющей области знаний нашего времени. Еще труднее определять дальнейшие перспективы ее развития и новые практические применения ее, если тем более не касаться сугубо конкретных и частных вопросов. Разумеется, это относится и к любой другой большой области науки и техники.

Однако можно твердо предполагать, что эти перспективы богаты и неисчерпаемы. Дальнейшее развитие радиоэлектроники, решение ее новых научных и практических проблем будет служить дальнейшему прогрессу и улучшению жизни человечества.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Под редакцией А. И. Б е р г а, Изобретение радио А. С. Поповым, Сборник документов и материалов, Изд. АН СССР, 1945.
2. А. А. П е т р о в с к и й, Научные основания беспроводной телеграфии, С.-Петербург, 1913.
3. Н. А. Н и к и т и н, Нижегородская Радиолaborатория им. Ленина, Связьтехиздат, 1954.
4. М. А. Б о н ч - Б р у е в и ч, Сборник трудов, Изд. АН СССР, 1956.
5. Под редакцией А. Д. Ф о р т у ш е н к о, 60 лет радио, Научно-технический сборник, Связьиздат, 1955.
6. «Радиотехника и электроника», 11, 1319, 1344, 1360, 1375, 1390, 1413, 1435, 1451 (1957).
7. Б. А. В в е д е н с к и й и А. Г. А р е н б е р г, Дальнее тропосферное распространение ультракоротких волн, Радиотехника, № 1, № 2 (1957).
8. Г. П. Г р у д и н с к а я, Распространение УКВ, Госэнергоиздат, 1957.
9. Д. М. В ы с о к о в с к и й, Некоторые вопросы дальнего тропосферного распространения УКВ, Изд. АН СССР, 1958.
10. G. H. M i l l m a n, Atmospheric effects of VHF and UHF propagation, Proc. IRE, 46, № 8, 1492 (1958).
11. An artificial ionosphere, Brit. Comm. and Electronics 5, № 2, 117 (1958).
12. К. И. Г р и н г а у з, Ракетные измерения электронной концентрации в ионосфере, ДАН СССР 120, № 6, 1234 (1958).
13. Г. С. К е р б л а й, Радиопрогнозы и их составление, Связьиздат, 1958.
14. Я. Л. А л ь п е р т, Некоторые вопросы физики ионосферы, УФН LXI, 423 (1957).
15. Об электромагнитных излучениях при ядерных взрывах и при полете ракет, Aviation Week 68 № 19, 26, 1958.
16. Об измерении скорости света в пустоте, Nature 181, № 4604, 258, 1958.
17. О распространении радиоволн в толще снега, Новости зарубежной электроники, № 4, 31, 1957.
18. P a r c D a v i d, Planar transmission lines, IRE Franç. Microwave Theory and Techn., № 3—5, 1955.
19. О спиральном волноводе, The bell System Technical Journ 35, № 6, 1347 (1956).
20. Г. З. А й з е н б е р г, Антенны УКВ, Связьиздат, 1957.
21. R. C. H o n e y, E. M. T. J o n e s, Versalite Multipart Biconical Antenna, Proc. IRE, X 45, № 10 (1957), 1374.
22. В. Г. М ы ш к и н, Электродинамическая теория цилиндрических линз Люнеберга, Изв. высш. учебн. завед. (радиофизика), № 1 (1958), 14.
23. H. A. W h e e l e r, Fundamental relations in the design of a VLF transmitting antenna, Trans. IRE on Antenna and Propagation, B. AP-6, № 1 (1958), 120.
24. W. I. P o l y d o r o f f, Magnetic field antenna, Electronics Industries 17, № 13 (1958), 66.
25. F. R e g g i a and oth., Designing ferrite-rod antennas for X-band operation, Electronics 30, № 6, Bagers'Guide Issue (1957), 49.
26. В. И. Т а л а н о в, Возбуждение поверхностных волн открытым концом плоского волновода, Журн. техн. физики 28, № 6, 1275 (1958).
27. B. A n s k e r-J o h n s o n and J. J. R o w l e y, Mixed garnets for nonreciprocal devices at low microwave frequencies, Proc. IRE 46, № 7, 1421 (1958).
28. Round table discussion on design limitations of microwave, Trans. IRE on Microwave Theory and Techniques MTT-6, № 1, 104 (1958).
29. B. L a x, The status of microwave applications of ferrites and semiconductors, Trans IRE on Microwave Theory and Techniques MTT-6, № 1, 5 (1958).
30. А. Д. Ф о к с, С. Е. М и л л е р, М. Г. В е й с, Свойства ферритов и их применение в диапазоне cbr, Изд. Советское радио, 1956.
31. Л. А. М и к а э л я н, Некоторые применения ферритов в волновой технике, Изд. Советское радио, 1958.
32. А. А. К о с ы р е в и д р., Новые ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса, Радиоэлектроника 18 (1957), 22.
33. I. A. R a j c h m a n, Ferrite Apertured Plate for Random Access Memory, Proc. IRE 45, № 3, 325 (1957).
34. C. F. P u l v a r i, Ferroclectrics and their Memory Applications, IRE Trans. on comp. parts. CP-2, № 1 (1956).
- 34а. Родинон В. М., Развитие генераторной радиолампы. Труды Ин-та Истории Естествознания и техники АН СССР т. 2, стр 72 (1957).
35. М. С. Н е й м а н, Триодные и тетродные генераторы сверхвысоких частот, Изд. Советское радио, 1950.
36. В. Ф. К о в а л е н к о, Введение в электронику сверхвысоких частот, Изд. Советское радио, 1950.
37. Е. Д. У м е н к о (под редакцией), Клитроны, Изд. Советское радио, 1952.

38. В. Т. О в ч а р о в (под редакцией), Лампа с бегущей волной, Изд. Советское радио, 1952.
39. Р. Г. М е р и м а н о в, О некоторых проблемах генерации миллиметровых и субмиллиметровых волн, Вестн. АН СССР V, № 5 (1958), 88.
40. J. H o l o h a n, New tread of microwave tubes spurs radar, ECM, scatter designs, Aviation Age 29, № 4, 22 и др. (1958).
41. А. В а н - д е р - З и л, Флуктуации в радиотехнике и физике, Госэнергоиздат, 1958.
42. E. B. T u c k e r and oth., The resnatron as a 200-MC power amplifiers, Proc. IRE 46, № 8 (1958), 1483.
43. H. D. D o o l i t t l e, The Design and life of planar microwave, Transmitting tubes, Trans. IRE PG VC-4, 31 (1957).
44. Сверхминиатюрный триод, Electronic Industries 17, № 4, 2 (1958).
45. Импульсный магнетрон большой мощности, Trans. IRE ED-4, № 2, 161 (1957).
46. W. C. B r a w n, Description and operating characteristics of The Platinotron—a New Microwave Device, Proc. IRE 45, № 9, 120 (1957).
47. Сверхмощный клистрон, Signal XI, № 5, 74 (1957).
48. Усилительный клистрон, Proc. IRE 45, № 3, 141 (1957).
49. ЛБВ и ЛОВ дециметрового и метрового диапазона, Trans. IRE ED-4, № 3, 246, 1957.
- 49a. Новая электронная лампа УКВ, Aviation Week 69, № 9, 64 (1958).
- 49б. Ш е в ч и к. В. Н., Основы электроники сверхвысоких частот, Изд. Советское радио, 1959 г.
50. Высокочувствительная передающая телевизионная трубка типа суперортрикон, RCA Review XVIII, № 3, 425 (1956).
51. P. W. K a s e m a n, A new image orthicon employing a multi-alkali photocathode for color cameras, Proc. of the National Electronics Conference 13, Chicago, 1957.
52. Передающая телевизионная трубка «EBIcon», Electronics 29, № 11, 208 (1956).
53. L. R. B l o o m, The Wamoscope—a new Microwave Display Device, Proc. National Electronics Conference XIII, 818 (1957).
54. C. D u F o u r, Les Tubes cathodiques a Mémoire Electrostatique et leur Applications, Annales de Radioélectricité XI, № 45, 200 (1956).
55. V. E. S t r a u g h a n and E. F. M a y e r, High speed printing of cathode-ray tube information by electrostatic photography techniques, Proc. of the National Electronics Conference 13, Chicago (1957).
56. Ю. М. К у ш и р и др., Применение электронно-оптического преобразователя в электронном микроскопе, Приборы и техника эксперимента, № 3, 73 (1958).
57. Б. Н. П о п о в, А. В. Д р у ж и н и н, Высоковакуумный эмиссионный электронный микроскоп, Радиотехника электроники 3, № 8, 1081 (1958).
58. Н. Г. Б а с о в, А. М. П р о х о р о в, О молекулярном генераторе, УФН 57, 485 (1955).
59. A. V a n d e r Z e i l, Solid State physical electronics Englewood Cleffs Prentice—Halle, 1957.
60. Symposium on the role of solid-state phenomena in electric circuits, New York, 1957, Proc. Brooklyn. N. Y. XVI, 1957.
61. M. P. G. C a p e l l i, An Atomic Reference Oscillator, British Comm. and Electronics 5, № 2, 100 (1958).
62. H. E. D. S c o v i l, The Three-Level Solid-State Maser, Frans. IRE on Microwave Theory and Techniques I, 29 (1958).
63. J. W. M e y e r, The Solid-State Maser—A Supercooled Amplifier, Electronics engineering edition, 66, 1958.
64. F. R. A g a m s and G. K r a y e r, Design Considerations for Circulator Maser Systems, Proc. IRE V, 912 (1958).
65. E. W. H e r o l d, Future Circuits Aspects of Solid-State Phenomena, Proc. IRE 45, № 11, 1463, (1957).
66. О радиоэлектронике сверхнизких температур, British Comm. and Electronics 5, № 4, 270 (1958).
67. Р. А. Ч е н ц о в, Сверхпроводниковый усилитель-криотрон, УФН LXIV, 193 (1958).
68. В. М. Ф а й н, Квантовые явления в радиодиапазоне, УФН 64, № 2, 273 (1958).
69. Н. Г. Б а с о в и А. М. П р о х о р о в, Молекулярные генераторы и усилители, Природа, № 7, 24 (1958).
70. S. B l o o m and K. K. C h a n g, Parametric amplification using low-frequency pumping, J. Appl. Phys. 29, № 3, 594 (1958).
- 70a. Международный конгресс по физике твердого тела, British Comm. and Electronics 5, № 8, 612 (1958).
71. Л о у и др., Основы полупроводниковой электроники, Изд. Советское радио, 1958.
72. И. Г. Г у р е в и ч и И. М. С и м к и н, Кристаллический триод и его применение, Изд. АН БССР, Минск, 1957.

73. J. Stewart, Metal Power Rectifiers, Electroplating and Metal Finishing 9, № 7, 212 (1956).
74. W. Wolfgang Gartner, Design Theory for Depletion Layer Transistors, Proc. IRE X, № 10, 1392 (1957).
75. H. Statz and R. A. Pucel, The Spacistor—a new class of highfrequency semiconductor Devices, Pros. IRE, № 3, 317 (1957).
76. Полупроводниковый прибор «гаусистор», Trans IRE, ED-3, № 3, 133 (1956).
77. C. W. Mueller and J. Hilibrand, High-Speed Switching Thyristor, Trans. IRE on Devices, VED-5, № 1, 2 (1958).
78. Eg. Milh, Le Tectnétron, triode solid pour hautes fréquences, Toute la Radio, № 233, 47 (1958).
79. The transistor 1948—1958. Ten years of progress..., Bell. Labor. Record 36, № 6, 190, (1958).
- 79a. Полупроводниковый диод-усилитель сантиметрового диапазона, Bell. Labor. Record 36, № 7, 250 (1958).
80. Limman, Neue Halbleiter und ihre Schaltungen, Funkchau, № 11, 283 (1958).
- 80a. B. Kazan, An Improved High-Gain Panel Light Amplifier, Proc. IRE, № 10, 1358 (1957).
81. L. W. Stammerjohn, Magnetic amplifiers: basic principles and applications, Bell. Labor. Record 36, № 1, 16 (1958).
82. Солнон-электрический преобразователь, British Comm. and Electronics 4, № 10, 617 (1957).
83. Надежность наземного радиоэлектронного оборудования, Изд. Советское радио, 1957.
84. Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры, Вопросы радиолокационной техники, № 2 (38), 1957. № 5 (41), 1957.
85. Н. И. Калашников, Радиорелейная система связи «Весна» с автоматизированными промежуточными станциями, Вестник связи, № 6, 3 (1958).
86. Радиосвязь за счет отражения от метеорных следов, Proc. IRE 45, № 12, 1642 (1957).
87. Microwave Communications, Electronics Engineering 30, № 363 (1958).
88. В. И. Сардыков, Промышленные телевизионные установки, Техника кино и телевидения, № 8, 27 (1958).
89. О плоском телевизионном экране, Wireless World, 2—3, January 1957.
90. О стереоскопической телевизионной установке, Electronics and Radio Engineering, № 5, 174 (1957).
91. Радиолокационная техника, Изд. Советское радио, 1949.
92. Ф. М. Вудворт, Теория вероятности и теория информации с применениями в радиолокации, Изд. Советское радио, 1955.
93. Radar in antiaircraft defence, Interavia, № 1, 55 (1956).
- 93a. Radar Meets Space Challenge, Electronics 31, № 14, 14 (1958).
94. О системе радиолокационного обнаружения ракет, British Comm. and Electronics 5, № 4, 224 (1958).
95. П. И. Евдокимов и др. (под редакцией), Сборник по радиотелемеханике. Москва, 1955.
96. А. С. Локк, Управление снарядами, Гостехиздат, 1957.
97. G. J. Cassidy, Radio Doppler measurements on the Russian satellites at the National Standards Laboratory, Proc. IRE Australia 19, № 3, 105 (1958).
98. P. A. Castruccio, Communications and Navigation Techniques of Interplanetary Travel, Trans. IRE ANE-4, № 4, 216 (1957).
99. H. E. Prew, Space Exploration—The New Challenge to the Electronics Industry, Trans. IRE, MIL 1, № 2, 43 (1957).
100. Применение радиолокации в геодезии, The Engineering 203, № 5280, 538 (1957).
101. F. W. Ruppert, I. M. Smith, Airborne Weather radar uses isoecho circuit, Electronics 29, № 2, 147 (1956).
102. Пассивная радиолокация, Вестник зарубежной радиоэлектроники 10, 9 (1957).
- 102a. Новая радионавигационная система, Вопросы радиолокационной техники, № 2 (1957).
103. Система ТАКАН, Вопросы радиолокационной техники, № 2 (1957).
104. W. R. Principles and performance analysis of Doppler navigation systems, Trans. IRE on Aeronautical and Navigational Electronics ANE-4, 176 (1957).
105. E. W. Anderson, Inertial navigation systems, J. Inst. Navig. 11, № 3, 231 (1958).
106. И. С. Шкловский, Радиоастрономия, Гостехиздат, 1953.
107. R. Hanbury Brown and A. C. B. Lovell, The exploration of space by radio, London, 1958.
108. О радиоастрономии, Proc. IRE 46, № 1 (1958).
109. И. С. Джигити и М. Е. Жаботинский, Некоторые новые разделы радиоэлектроники, Радиотехника 12, № 10, 85 (1957).

110. А. А. Маненков, А. М. Прохоров, Радиоспектроскоп для наблюдения электронного парамагнитного резонанса, Радиотехника и электроника 1, № 4, 469 (1956).
 111. Л. А. Арцимович, Исследования по управляемой термоядерной реакции в СССР, УФН LXVI, 545 (1958).
 112. О непосредственном превращении ядерной энергии в электрическую, Military Review 36, № 6, 66 (1956).
 113. О непосредственном превращении тепловой энергии в электрическую, RCA Review XIX, № 2, 214 (1958).
 114. Проект ионной ракеты, 2 Missiles and Rockets 2, № 6, 72 (1957).
 115. А. И. Китов, Электронные цифровые машины, Изд. Советское радио, 1956.
 116. К. Э. Шеннон и Дж. Маккарти (под редакцией), Автоматы, Изд. ИЛ, 1956.
 117. П. П. Кайзер, Техническая кибернетика, Госэнергоиздат, 1958.
 118. Н. Винер, Кибернетика и общество, Изд. ИЛ, 1958.
 119. И. А. Полетаев, Сигнал, Изд. Советское радио, 1958.
 120. Н. Винер, Кибернетика, Изд. Советское радио, 1958.
 121. О машинах, управляемых голосом, Bell. Labor. Record, № 2, 281 (1957).
 122. Л. Л. Мясников, Говорящие, читающие и слушающие автоматы, Ленинград, 1957.
 123. Electronic Reading Automation, The Engineer. 203, № 5277, 414 (1957).
 124. Н. Т. Rowe, The IBM computer AN/FSQ-7 and the electronic air defense system sage, Computers and Automat 5, № 9, 6—9, 12.
 125. Д. Ю. Панов, Автоматический перевод, Изд. АН СССР, 1956.
 126. О большой вычислительной машине, Electronische Rundschau, № 12, 340 (1956).
 127. «Новости зарубежной радиоэлектроники» № 1, 1957.
 128. Вопросы радиолокационной техники № 2 (38), 1951
 129. Aviation Week. № 26, 62 (1957)
 130. Новости зарубежной радиоэлектроники № 6 (1957)
-