

К ТРИДЦАТИЛЕТИЮ СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ

СОВЕТСКАЯ РАДИОФИЗИКА ЗА 30 ЛЕТ

Б. А. Введенский и М. И. Пономарёв

Радиотехника является одним из наиболее ярких примеров технической дисциплины, сохранившей весьма тесный контакт с физикой. Это объясняется прежде всего тем, что по своей сущности радиотехника имеет непосредственно дело и с электродинамикой (вопросы излучения и распространения), и с электроникой и электронной оптикой (электронные лампы, лампы со вторичной эмиссией, электронно-лучевые приборы), и с молекулярной физикой (газонаполненные приборы, вопросы ионизации верхних слоёв атмосферы). Почти всегда процессы, с которыми приходится встречаться в области радио, — это процессы электрических (нередко сопровождаемых механическими) колебаний, как, например, колебаний сосредоточенных контуров или колебаний распределённых систем и ограниченных металлическими стенками объемов, колебаний, распространяющихся вокруг всего земного шара в сложных условиях особенностей его поверхности и атмосферы. В ряде важных случаев радиотехнике, так же как и другим отраслям техники, приходится покидать давно привычную почву линейных колебаний и заниматься — главным образом при колебаниях электронных приборов — колебаниями нелинейными. Наконец, ряд задач приводит к применению таких систем, в которых одновременно имеют место колебания и электрические и механические (электроакустика, область пьезоэлектричества).

Решение таких задач требует, помимо значительной физической эрудиции, ещё и умения пользоваться соответствующим математическим аппаратом. Эти и подобные им обстоятельства привели к выделению из физики некоторой отраслевой дисциплины, называемой радиофизикой, которая является своего рода соединительным звеном между физикой и радиотехникой. Некоторые области радиофизики обособились в свою очередь; такие разделы, как, например, электроакустику, вопросы телевизионной, было бы нерационально включать в данный очерк. Равным образом вопрос об электронных и ионных приборах в целом также представляет ныне самостоятельную область. Наконец, приходится, естественно, разграничивать область радиофизики и

радиотехники. Не имея в виду систематического изложения достижений советской радиотехники, мы всё же указываем в дальнейшем некоторые моменты из её истории, когда это вызывается требованиями связности изложения.

Термин «радиофизика» вряд ли насчитывает и два десятка лет; но по существу радиофизика родилась с работами Герца, т. е. ещё до появления на свет термина «радио» и самой радиотехники, или «беспроводной телеграфии». Благодаря работам изобретателя радио А. С. Попова родиной радио, по справедливости, должна считаться Россия; но радиофизика и радиотехника в дореволюционной России развивались слабо. В частности, рост радиофизики в старой России весьма сильно тормозился дореволюционной зависимостью от иностранного капитала, которая в вопросах радио была очень сильной. Только Морское ведомство в лице своего завода в Галерной гавани представляло некоторое отрадное исключение, поддерживая, иногда достаточно плодотворно, славные традиции А. С. Попова.

Некоторое, и пожалуй даже значительное, оживление работы по радиофизике началось в разгаре мировой войны 1914—1918 гг. Здесь нельзя не вспомнить некоторые технические новшества, осуществлённые в России в ту эпоху, как, например, установление радиотелефонной связи под Петроградом в конце 1914 г.; радиопеленгационные станции, в частности по пеленгации самолётов, радиосвязь с подлодками; изготовление первых термоионных приборов и даже создание начальной теории лампового генератора (Н. Д. Папалекси, М. В. Шулейкин и др.). В 1916 г. М. В. Шулейкин уже опубликовал первое математическое выражение боковых полос при модуляции, В. П. Вологдин ещё с 1911 г. начал свои работы по машинам высокой частоты, которые позволили впервые осуществить радиосвязь между СССР и США, а ныне с успехом применяются для целей высокочастотной закалки стальных изделий. Известная книга А. А. Петровского «Научные основания беспроводной телеграфии» появилась в 1913 г.

К моменту Великой Октябрьской социалистической революции в стране было очень мало молодых специалистов в области радио, хотя и существовал уже некоторый научно-педагогический центр в Электротехническом институте Петрограда, позднее возглавленный И. Г. Фрейманом. Слабой и уже устаревшей была техническая база в виде немногих радиостанций (Ходынка, Детское село) и лабораторий (Петроград, Одесса). Радиопромышленность только зарождалась.

Поэтому советскому радио пришлось развиваться если и не с самого начала, то во всяком случае с невысокого уровня. Однако здоровые ростки, существовавшие к 1917 г., дали при советской власти быстрый и обильный всход.

Ленин и Сталин уже в начале Великой Октябрьской социалистической революции широко применяли радиосредства, обращаясь к солдатам и матросам; это было прообразом нашего современного радио-

вещания. Всё развитие радио в Советском государстве неразрывно связано с именами Ленина и Сталина.

Благодаря повседневной и любовной поддержке Советского правительства и, особенно, самого В. И. Ленина уже к 20-м годам, к великому изумлению Западной Европы, в Советской стране стали появляться технические достижения, не уступавшие, а в ряде случаев даже и превосходившие иностранные. Возникли и стали быстро расти и собственные молодые кадры.

Гений В. И. Ленина, конечно, не мог не заметить исключительных возможностей радиотехники и её значения для строящегося социализма. Крылатые слова Владимира Ильича о «газете без бумаги и без расстояний» и о «митинге с миллионной аудиторией» известны каждому советскому радиотехнику. Советское правительство окружило исключительным вниманием организованную по личному поручению Владимира Ильича Нижегородскую радиолaborаторию под научным руководством М. А. Бонч-Бруевича. Выпуск М. А. Бонч-Бруевичем при энергичном участии П. А. Острякова первых ламп уже полусовременного типа, как приёмных, так и генераторных, построение радиотелефонных радиостанций на мощных лампах оригинальной конструкции и ряд других работ сделали Нижегородскую лабораторию им. В. И. Ленина ведущей на период 1918—1926 гг., что и было отмечено Советским правительством двойным награждением Лаборатории орденом Трудового Красного знамени (1922—1924 гг.).

Возникают радиотехнические или радиофизические центры и в других городах. Так, в 1919 г. М. В. Шулейкин основывает при тогдашнем Высшем техническом училище (ныне Московский энергетический институт им. В. М. Молотова) кафедру радиотехники. В 1920 г. Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси организуют подобный же центр в Одессе, а А. А. Чернышёв — радиолaborаторию в Ленинграде при Политехническом институте. С 1923 г. в Ленинграде возникает Центральная радиолaborатория при участии Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси, Д. А. Рожанского, М. А. Бонч-Бруевича, А. Ф. Шорина, В. П. Вологодина и др.

Конец второго десятилетия нашего века был эпохой борьбы электронной лампы за ведущую роль в радиотехнике. В этой связи особенно важно, что производство электронных ламп, кроме Нижегородской лаборатории, начало осваиваться в Одессе (Н. Д. Папалекси, Е. Я. Щёголев, К. В. Стахорский) и в Ленинграде (М. И. Богословский; там, в частности, начинал свою деятельность С. А. Векшинский, имя которого неразрывно связано с последующим развитием советской электронной лампы). Кроме того, в ряде мест успешно изготовлялись (в небольших количествах) электронные лампы для специальных целей. Эта работа не могла бы быть успешной, если бы ей не предшествовала глубокая проработка вопросов получения вакуума, охлаждения ламп, в частности водяного, развитие стекловых навыков и др. К этому же периоду относятся первые опыты

по громкоговорению, по различным способам модуляции, по исследованию распространения длинных волн, а также и по вопросам ультракоротких волн.

Примерно с середины 20-х годов начинается, параллельно с возникновением и ростом советской радиопромышленности, также и более чёткое разграничение радиотехники и радиофизики, получивших затем последовательное развитие в Сталинских пятилетках. Описанный момент является моментом начала радиофикации страны. Радиофикация шла прежде всего путём постройки отдельных вещательных радиостанций связи. Уже первая советская радиостанция, построенная в 1922 г. Нижегородской радиолaborаторией благодаря большой помощи В. И. Ленина, была по тому времени самой мощной в мире.

С тех пор Советский Союз неизменно удерживает мировое первенство по мощным радиовещательным станциям. В деле развития этих станций особенно велики заслуги М. А. Бонч-Бруевича, А. Л. Минца и др. В. П. Вологдин является создателем первых мощных ртутных выпрямителей, обеспечивших питание этих станций; ему же принадлежит и развитие теории выпрямительных устройств. Существенное значение в создании советских мощных ртутных выпрямителей имели также работы М. А. Спицына и А. М. Кугушева.

Сталинские пятилетки создали советскую радиопромышленность. Благодаря исключительно большой помощи Иосифа Виссарионовича Сталина советское радиостроительство получило громадное развитие. Создаётся ряд советских радиозаводов, которые изготовляют большое количество вещательных и связных радиоприёмников из отечественных материалов. Страна покрывается сетью радиопунктов.

Трудно переоценить роль советской радиопромышленности в Великой Отечественной войне, когда наша радиопромышленность в значительной мере способствовала превращению Советской Армии в самую маневренную армию в мире, после того как товарищ Сталин определил роль радио как наиболее надёжного средства связи в условиях современной маневренной войны.

Ко времени возникновения советской радиопромышленности электронная лампа уже решительно завоевала себе ведущую роль в радиотехнике; поэтому организовавшийся тогда Трест слабого тока обратил серьёзное внимание на серийный, стремящийся к массовому, выпуск электронных ламп, от приёмных до мощных генераторных с водяным охлаждением. В 1925 г. советская промышленность уже была способна взять на себя постройку Тегеранской радиостанции. Примерно с этого же года Нижегородская радиолaborатория начинает заниматься короткими волнами, включаясь этим в разгоравшееся тогда в мировой радиотехнике единоборство между длинными и короткими волнами. Год спустя начинаются работы по кварцевой стабилизации. И примерно с этого же периода обилие чисто акустических вопросов в деле электросвязи вызывает к жизни техническую акустику и электроакустику как отдельную дисциплину.

Принцип радиопередачи покоится на электромагнитном излучении (радиации), откуда и само название «радио». Но излучать электромагнитную энергию способны только системы проводников, в которых имеют место электромагнитные колебания. Таким образом, учение об электромагнитных колебаниях является в известной мере более первичным. Далее, излучённая электромагнитная, т. е. колебательная, энергия должна достигнуть приёмника, распространяясь вдоль поверхности земного шара: отсюда учение о распространении радиоволн. Этими соображениями и определяются основные разделы радиофизики; так построено и дальнейшее изложение.

КОЛЕБАНИЯ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ КОНТУРОВ

На первых шагах развития радио применялись исключительно затухающие колебания: это были почти всегда линейные колебания, обладающие тем свойством, что их амплитуда целиком зависит от начальных условий, от «толчка», вызвавшего эти колебания.

Линейные колебательные системы («контуры») состоят из сочетания ёмкостей и индуктивностей и неизбежно присутствующего сопротивления. Если ни ёмкость, ни индуктивность не изменяются со временем, то весь процесс подчиняется простому и хорошо изученному линейному дифференциальному уравнению. Поэтому теория линейных колебаний сравнительно давно существует в весьма полном виде, её выводы доведены до предельной ясности, доходчивости и технического удобства и уже давно с большой полнотой излагаются в курсах, как, например, в книгах И. Г. Фреймана, М. А. Бонч-Бруевича, А. И. Берга, Б. П. Асеева и др.

Но линейные колебания в радио, так же как и в любой другой области, являются в сущности только некоторой абстракцией, к которой реальные — нелинейные — колебания только в некоторой степени приближаются. Так, колебания самого обычного маятника уже нелинейны, если иметь дело с конечными (а не с исчезающе малыми) амплитудами. Равным образом нелинейны и электрические колебания, если в цепи имеются катушки с железом; принципиально нелинейны системы, генерирующие незатухающие колебания с помощью дуговых генераторов, электронных ламп и аналогичных приборов.

Нельзя думать, что радиотехники беспомощно останавливались перед решением нелинейных задач. Путём приближённых расчётов, состоящих из более или менее искусного соединения моментов элементарной теории и прямого опыта, строились и строятся (и весьма удачно) и мощные генераторы, и сложные приёмники, и многие другие радиоустройства. Однако всему этому весьма ценному собранию технических «рецептов» не доставало объединяющей идеи. К вопросу создания теории нелинейных колебаний в радиотехнике подошли голландский исследователь ван дер Поль, а также английский — Эпплтон. Полученные ими результаты и выводы ценны и плодотворны, но всё же они оставляют желать многого в отношении

строгости (а следовательно, и убедительности), ибо интуитивные моменты играют в их рассуждениях большую роль.

Советским физикам, главным образом школы Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси, объединившей и возглавившей работы, выполнявшиеся в ряде научных учреждений, удалось внести полную ясность в эту проблему. Последнему значительно способствовали труды Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова, Ю. Б. Кобзарева и др.

А. А. Андронов показал, насколько хорошо вопросы нелинейных колебаний исследуются с помощью методов, разработанных для иных целей А. М. Ляпуновым и Анри Пуанкаре. Полученные таким образом геометрические представления (кривые состояния в «фазовой плоскости») и метод приближённого решения нелинейных дифференциальных уравнений с помощью разложения по некоторому «малому параметру», связанному с константами системы, оказались весьма мощным инструментом не только для решения ряда нелинейных задач, но и для предсказания новых явлений в данной области.

Была получена строгая теория ряда интересных и важных нелинейных явлений, как то: явлений «захватывания» или принудительной синхронизации колеблющейся нелинейной системы внешней электродвижущей силой, явления «затягивания» (А. А. Андронов и А. А. Витт, 1930), прерывистой генерации (Г. С. Горелик, В. А. Кузовкин, 1932), ранее исследованной С. Н. Ржевкиным и Б. А. Введенским (1921), и др. Открыто явление «резонанса n -го рода» или, иначе, «автопараметрического резонанса». Из предшествовавших работ следовало, что в нелинейных системах могут наступать периодические колебания также и с частотой, меньшей (в целое число раз) частоты внешней возбуждающей силы. С точки зрения радиофизики, это явление было обнаружено, исследовано и оценено по существу Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси и в работах М. А. Дивильковского, С. М. Рытова, М. И. Филиппова, Э. М. Рубчинского, А. Б. Меликьяна, В. В. Мигулина. Так как выяснились весьма ценные свойства автопараметрических резонансных кривых (резко ограниченные края и существование «порога» и «потолка» для амплитуды внешней э. д. с.), то были построены и испытаны «автопараметрические фильтры». Резонанс n -го рода в системах с двумя степенями свободы был теоретически исследован С. М. Рытовым. Весьма замечательно, что явления автопараметрического резонанса оказались в тесной связи с так называемым «параметрическим возбуждением» некоторой цепи. Последнее имеет место, если индуктивность или ёмкость цепи периодически и с определённой, зависящей от параметров цепи, частотой изменять на некоторую величину (зависящую от затухания цепи). Это возбуждение имеет место также при частоте возбуждения не только равной, но вдвое и т. д. меньшей собственной частоты системы. Сравнение с автопараметрическим возбуждением показало глубокое сходство обоих явлений: при автопараметрическом воздействии на нелинейную систему происходит также

по сути дела периодическое изменение некоторого параметра этой системы.

При воздействии параметрического возбудителя на некоторую нелинейную систему в последней устанавливаются определенные устойчивые амплитуды колебания (аналогично обычному ламповому генератору), причём имеет место особого вида резонанс, названный гетеро-параметрическим. На этом явлении Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси основали новый тип электрической машины «параметрического генератора». В разработке этой машины принимали участие В. А. Лазарев, А. Г. Рзынкин и др.

Г. С. Горелик разработал общую теорию резонанса в линейных системах как с постоянными, так и с периодически меняющимися параметрами.

Н. М. Крылов, Н. Н. Боголюбов, Ю. Б. Кобзарев дали методику решения нелинейных задач с помощью так называемых «квазилинейных» приёмов, представляющих значительный интерес благодаря своей сравнительной простоте. К. Ф. Теодорчик плодотворно развил эту методику на основе энергетического принципа. В части этих работ содержится исследование вопроса о зависимости частоты лампового генератора от его режима, что весьма важно для вопроса о бескварцевой параметрической стабилизации частоты генератора. Сюда же относятся работы Б. К. Шембеля, А. П. Скибарко, Г. М. Михайлова и Б. А. Введенского.

В последнее время С. М. Рытовым, А. М. Прохоровым, М. Е. Жаботинским дана новая нелинейная теория стабилизации.

Математики в лице Л. С. Понтрягина, А. А. Маркова и др. также внесли много весьма ценного для выяснения вопроса о нелинейных колебаниях.

Достижения теории начали своё проникновение и в чисто технические круги, чему много способствовало появление книги А. А. Андропова и С. Э. Хайкина «Теория колебаний» а также (в последнее время) книг Б. П. Асеева «Нелинейная радиотехника», К. Ф. Теодорчика «Автоколебательные системы».

Последние работы А. А. Андропова и его учеников показали, что методы нелинейной теории, применяемые в радиофизике, с успехом могут применяться к решению задач теории регулирования.

К вопросу о колебаниях имеет ближайшее отношение задача о модуляции колебаний. Из более ранних работ по амплитудной модуляции следует отметить работы И. Г. Кляцкина и А. Л. Минца о сеточной и анодной модуляциях и работы П. В. Шакова. В последние годы большое внимание было обращено на частотную и фазовую модуляции, в ряде случаев дающие значительные преимущества в смысле освобождения от помех. В этой области следует отметить (в исторической последовательности) работы А. М. Кугушева, Пестрякова, Г. А. Левина, Ю. М. Гадиева, В. И. Сифорова, Е. Г. Момота и др. В монографии С. М. Рытова глубоко и обобщённо рас-

смотрен вопрос о модуляции. Вопросы радиоприёма плодотворно рассматриваются в работах В. И. Сифорова, П. И. Куксенко, Н. Н. Крылова, Л. Б. Слепяна, В. А. Котельникова, Е. Г. Момота и др.; Г. С. Горелик дал теорию суперрегенеративного приёма отчасти совместно с Г. Гинцом. Работы В. Л. Грановского, В. И. Бунимовича и др. по шумам в электронных приборах имеют самое непосредственное отношение к радиоприёму, особенно в спектре ультравысоких частот.

КОЛЕБАНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В изложении предыдущего раздела мы молчаливо полагали, что протяжённость колеблющихся систем составляет лишь очень малую долю длины той волны, которой (в воздухе) соответствует частота колебаний в этой системе. В этом случае ещё не обнаруживается ясно основное для вопросов радиотехники явление, именно, явление излучения или радиации. Для достижения заметного излучения колеблющиеся системы должны быть достаточно протяжёнными по отношению к длине излучаемой волны. В этом случае ток и напряжение не одинаковы по всей длине системы: система становится «распределённой». Современная радиотехника применяет в различных случаях самые разнообразные излучающие системы: от длинноволновых сетей (антенн), подвешиваемых на мачтах во много десятков метров высотой, до сложных, состоящих из целой решётки вибраторов, «остро направленных систем». В последнее время стали широко применяться параболические и иные направляющие зеркала (наподобие обычных прожекторов), а также рупорные системы, наподобие применяемых в акустике, так называемые щелевые антенны, антенны диэлектрические и др. Поэтому усилия многих исследователей направлены на создание наиболее действенных методов расчёта таких систем.

В качестве подчинённой выявляется задача подведения колебательной энергии к различным излучателям от генератора или от принимающих систем к приёмнику. Нормально это подведение осуществляется с помощью «фидеров» в виде линий из двух или большего числа параллельных проводов или в виде концентрического кабеля. При наиболее коротких волнах в последнее время применяются и просто полые металлические трубы соответствующего сечения («волноводы»). Возникает необходимость установления правил конструирования таких систем в разных условиях. Наконец, так как в конечном счёте всякая излучающая система, сама по себе линейная, непременно связана с некоторой нелинейной системой, будь то генератор или приёмник, то возникает ещё и задача нелинейной трактовки распределённых систем. При наиболее коротких волнах часто и сами колебательные контуры представляют собой распределённые системы.

Возникновение советского радио восходит к временам расцвета длинноволнового диапазона, когда наибольшее, а практи-

чески — единственное, развитие имели мощные антенные сети с подвеской на высоких мачтах, с заземлениями, противовесами, с их малым сопротивлением излучения и относительно весьма большой ролью их ёмкости и активного сопротивления. Этим вопросам и был посвящён ряд работ М. В. Шулейкина и его сотрудников. В начале 20-х годов Д. А. Рожанский, а также Бриллюэн, выставили принцип подсчёта сопротивления излучения путём учёта обратного действия поля, создаваемого излучающей системой, на самую эту систему («метод наведённых эдс»). Советские учёные первыми оценили значение этого принципа, что и проявилось не только в пионерской работе Д. А. Рожанского, но особенно в работах И. Г. Кляцкина, А. А. Пистолькорса. Последний даёт на этой основе расчёт сопротивления излучения многовибраторных направляющих систем, которые начали развиваться по мере развития коротковолнового диапазона.

Теорией направленности таких систем, а также канализацией энергии, занимались М. А. Бонч-Бруевич и В. В. Татаринов. Последний дал особенно много для технической теории действия таких систем и подвода энергии к ним. Его книга «Коротковолновые антенны», а также аналогичные книги А. А. Пистолькорса, М. С. Неймана, Б. П. Асеева сыграли большую роль в развитии этого вопроса. В этой же области известны работы С. И. Надененко, в частности, по вопросу о диапазонности таких антенн. Однако до сих пор не существует действительно строгой и в то же время отвечающей запросам практики теории излучающих систем достаточно общего типа. Существенные результаты в направлении создания строгой теории однопроводного излучателя были получены В. Н. Кессенихом, А. Е. Сузантом в его работах о колебаниях эллипсоида под действием внешней силы, А. Г. Аренбергом, рассмотревшим колебания сферы в этих условиях (в этом случае задача решается до конца), И. И. Вольманом, М. И. Пономарёвым. Важные результаты относительно «достаточно тонких» антенн получены М. А. Леонтовичем и М. Левиным.

Значительное число работ было посвящено исследованию некоторых интересных специальных типов антенн, например, ромбических, в том числе двоянных, антенн-башен с верхним питанием (Г. З. Айзенберг) и др., фидерных линий с изменяющимися параметрами, причём А. Р. Вольперту удалось получить достаточно общее решение. Было исследовано также искажение, вносимое длинными линиями в форму передаваемых по ним импульсов и влияние неоднородностей в коаксиальном кабеле (Л. А. Жекулин), что важно для телевизионных устройств.

Производились и производятся исследования в области ультракоротковолновых и дециметровых антенн различного типа, в том числе зеркальных и рупорных (М. А. Бонч-Бруевич и В. В. Татаринов, Н. А. Петров, С. Я. Турлыгин и М. И. Пономарёв, Б. А. Введенский, Е. Н. Майзельс, А. И. Узков); М. А. Бонч-Бруевич и, независимо, М. С. Нейман почти одновременно (1938 г.) предложили новый тип антенн, в которых вместо обычных вибраторов применяются отверстия

или щели в замкнутом колеблющемся объеме (например, трубе). М. С. Нейман предложил для этих антенн название «диффракционных».

Значительное число работ было посвящено освоению телевизионных антенн ультракоротковолнового диапазона (А. Р. Вольперт, Г. З. Айзенберг, Л. В. Грузинский, Б. И. Молодов). В области теории щелевых антенн принципиальное значение имеют недавние работы А. А. Пистолькорса и Я. Н. Фельда. Л. А. Вайнштейн рассчитал излучение системы двух полубесконечных параллельных плоскостей.

Весьма интересный вопрос о возможности получения остро направленного излучения с антенн небольших (относительно длины волны) размеров развил А. З. Фрадин, выяснивший принципиальную невыгодность малогабаритных антенн ввиду их весьма малого к. п. д. (не говоря уже о чисто технических трудностях). М. С. Нейман и В. И. Бунимович провели весьма интересные и обстоятельные исследования в области теории и технического применения колебаний, возбуждаемых в замкнутых металлических объемах, например, шарах, круглых цилиндрах и др., названных М. С. Нейманом «эндовибраторами».

Колебания таких систем имеют большое значение для стабилизации частоты ультракоротковолновых и дециметровых генераторов; соответствующие исследования были произведены М. С. Нейманом и В. И. Бунимовичем независимо от аналогичных иностранных исследований и появились в печати практически одновременно с последними.

Достижения радиотехники весьма высоких частот, соответствующих дециметровым и сантиметровым волнам, послужили толчком к изучению распространения радиоволн в трубах («волноводах»). Ряд работ Е. М. Студенкова, А. Драбкина, Г. В. Кисунько, Н. Н. Малова, И. И. Вольмана, П. Е. Краснушкина, А. С. Беркмана и Д. И. Маша, С. Я. Брауде и др. позволил значительно развить теорию волноводов. Б. А. Введенским и А. Г. Аренбергом выпущена монография, суммирующая основные, главным образом довоенные, работы по волноводам.

Следует отметить ещё работы по возбуждению системы параллельных проволок нелинейным генератором (Ю. Н. Шеин, С. П. Стрелков и др.).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

При распространении радиоволн весьма большую роль играют электрические свойства почвы (диэлектрическая проницаемость и электропроводность), неровности и, в первую очередь, шарообразность Земли, наконец, состояние верхних, а для ультракоротких волн и нижних слоев атмосферы.

Благодаря двум физическим явлениям: дифракции при огибании неровностей почвы и при преодолении кривизны Земли и преломлению или рефракции при прохождении волн через неоднородную атмосферу, траектории волн направляются примерно вдоль шарообразной поверхности Земли, что и делает возможным огибание

радиоволнами земного шара. В зависимости от дальности радиопередачи получает перевес одно из этих явлений. При передаче на очень большие расстояния (порядка тысяч километров) мы практически имеем дело только с рефракцией и именно с рефракцией в верхних слоях атмосферы, ионизированных действием световой, а также корпускулярной радиации солнца. Если же мы ограничиваемся рассмотрением распространения на близкие расстояния, то на первое место выступают одновременные действия дифракции и рефракции.

Наиболее ранние советские исследования касаются распространения радиоволн в ионосфере. Начало этим работам было положено М. В. Шулейкиным, который пришёл к необходимости принятия сложной структуры ионизированной атмосферы ранее зарубежных авторов. В середине 20-х годов в радиоотделе ВЭИ производились исследования по проверке известной эмпирической формулы Аустина. Но наиболее существенны исследования, относящиеся к области распространения коротких волн. Первые опыты (М. А. Бонч-Бруевич, В. В. Татарinov, 1924 г.) привели к организации линии радиосвязи Москва — Ташкент и положили начало развитию коротковолновой связи в Союзе. Систематические наблюдения над прохождением коротких волн организуются около 1927 г. Министерством связи (тогда — Наркомпочтелем) параллельно с развитием радиомагистральной сети Союза. А. Н. Щукин обобщает в 1932 г. накопившийся к тому времени экспериментальный материал в своём методе расчёта напряжённости поля коротких волн; иностранные методы расчёта (Эккерслея, Намба-Цукада) появились значительно позднее.

Ионосфера является изменчивым агентом, ибо её ионизация зависит от солнечной радиации. А сама интенсивность солнечной радиации меняется не только в зависимости от времени года и суток, но и от эпохи цикла солнечной деятельности (от так называемого «одиннадцатилетнего» солнечного цикла). Так как степень ионизаций определяет собой ту волну, которой следует пользоваться для радиосвязи на том или ином расстоянии и в тех или иных географических широтах и долготах, то возникает не только необходимость знания состояния ионизации на всём земном шаре, но и знание её на возможно больший промежуток времени вперёд.

Примерно с 1926 г. исследование ионосферы стало повсеместно проводиться известным методом «радиоэхо»; стали возникать специальные «ионосферные станции», систематически наблюдающие и регистрирующие состояние ионосферы. Вероятно, первыми опубликованными ионосферными исследованиями в СССР являются исследования, произведённые в связи с Интернациональным полярным годом (1932—1933 г.) в Мурманске М. А. Бонч-Бруевичем. В 1932 г. действовала экспериментальная ионосферная установка А. Н. Казанцева и Я. Л. Альперта. Вскоре начались аналогичные работы В. Н. Кесениха и его группы в Томске; около середины 30-х годов начал

регулярно действовать ряд других советских ионосферных станций. С этого времени начинается планомерное исследование ионосферы, уже в прямой связи с практической эксплуатацией радиoliniй. Очень скоро непрерывно растущие требования эксплуатации решительно выдвинули постановку работ по радиопрогнозам (составление календарного расписания рабочих волн на известные сроки вперёд), каковые работы и были организованы в системе Министерства связи К. М. Косиковым и в системе Академии Наук СССР М. В. Шулейкиным и А. Н. Казанцевым.

По данным ионосферных станций всего мира был составлен атлас «карт ионизации» для целого ряда лет, служащий ныне для составления радиопрогнозов. Ввиду решающей роли Солнца и его радиации для поведения ионосферы, а следовательно, и для радиосвязи, в дело составления радиопрогнозов стали плодотворно включаться астрономы; в силу существования тесной взаимной связи между ионосферными и геофизическими (геомагнитными и др.) явлениями начали укрепляться связи и с геофизиками. Академией Наук в 1934 г. был сделан первый опыт объединения усилий исследователей этих областей путём организации конференции по изучению стратосферы. Затем эта задача стала решаться Научным советом по радиофизике и радиотехнике АН СССР, первым председателем которого был Л. И. Мандельштам, вторым — Н. Д. Папалекси.

Своеобразный вид помех, когда при приёме некоторой станции прослушивается модуляция другой, расположенной на пути распространения, несмотря на то, что несовершенство приёмного устройства исключено, был совершенно независимо открыт в СССР в г. Горьком. С. М. Рытов (1939 г.) исследовал этот вопрос (и некоторые смежные проблемы) теоретически. Отметим ещё исследования Л. А. Жекулина (1940 г.) и В. Л. Гинзбурга (1942 г.) об искажении формы радиоимпульса при прохождении через ионосферу, ионосферные исследования, проведённые под общим руководством В. Н. Кессениха и др.

Изучение распространения на близких расстояниях или, точнее, на таких расстояниях и в таких случаях, когда влиянием ионосферы можно пренебречь, практически важно в ряде случаев. При особо малых расстояниях можно отвлечься и от влияния кривизны земного шара. К 1917 г. теория этого вопроса казалась стоящей уже на вполне твёрдой почве. Однако В. А. Фок (1926 г. и детальнее 1933 г.) отметил и исправил существенные неточности в существовавших основных выводах. Был пересмотрен весь вопрос о так называемых «поверхностных волнах», и существующий закон зависимости напряжённости электромагнитного поля от расстояния, как в отношении амплитуды, так и в отношении фазы, получил правильное выражение. Из формул В. А. Фока 1926 г. получались, между прочим, весьма важные формулы распространения, которые были в иностранной литературе опубликованы ван дер Полем и Ниссенем только в 1930—

1931 гг.; в полном виде работа В. А. Фока появилась в 1933 г. Необходимо отметить, что формула, почти совпадающая с формулой ван дер Поля 1931 г., была получена и опубликована М. В. Шулейкиным ещё в 1923 г.

Во всех исследованиях такого рода всё внимание практически уделялось лишь амплитуде электромагнитного поля, в то время как вопрос фазы затрагивался лишь попутно. Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси обратили внимание именно на вопрос распространения фазы, чем по существу открылась новая глава учения о распространении радиоволн. В качестве ближайшего практического приложения было предложено весьма действенное применение к вопросам радио интерференционного принципа обычной оптики и как развитие — измерение расстояний этим методом. Радиоволна, излучаемая некоторой радиостанцией, принимается и вновь излучается второй радиостанцией на другой частоте (составляющей, во избежание помех, например, $\frac{2}{3}$ основной). На первой станции обе волны сравниваются по фазе, и сдвиг фазы даёт возможность вычислить расстояние. Советский приоритет в этом вопросе весьма знаменателен.

П. А. Рязин дал теоретическое исследование поля вертикальной антенны, помещённой над плоскостью, именно с точки зрения распространения фазы. Оказалось, что скорость распространения, которая по прежней теории (опровергнутой В. А. Фоком — см. выше) должна сильно отличаться от скорости света, фактически очень мало от неё отличается, что и было экспериментально подтверждено в ряде случаев с помощью специальной аппаратуры, разработанной Е. Я. Щёголевым (1940 г.). Модификация этой аппаратуры дала «радиодальнмер». С помощью аналогичной аппаратуры В. В. Мигулин и Я. Л. Альперт (1940 г.) изучали фазовую структуру поля и действие неровностей почвы как вблизи поверхности земли; так и при подъёме на аэростатах.

Работы Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси в этой области были в 1942 г. удостоены Сталинской премии.

Из других работ, имеющих отношение к проблемам плоской Земли, отметим введение Г. А. Гринбергом (1940 г.) нового метода трактовки вопроса (всего рода обобщение метода операторного исчисления путём замены трансформации Лапласа некоторой иной); этот метод допускает и учёт рефракции. В. А. Фок, М. А. Лесников, Г. А. Гринберг и Е. А. Фейнберг (1941—1942 гг.) разработали теоретически вопрос так называемой «береговой рефракции»; т. е. изменения фронта волны при переходе её с моря на берег (или обратно), что важно для радиопеленгации. М. А. Лесников и, особенно, Е. А. Фейнберг в недавнее время подробно разобрали весьма важный вопрос о влиянии неровности почвы.

Собсто следует отметить роль советских физиков в установлении и уточнении вопроса о принципе взаимности, играющего в радиотехнике весьма крупную роль. Л. И. Мандельштам сформулировал

теорему взаимности для точечного источника ещё в 1914 г. М. Свешникова исправила некоторые неточности, существовавшие в иностранной литературе, и дала строгий вывод как для точечных диполей, так и для антенн конечных размеров.

Ультракоротковолновый диапазон вошёл в радиотехнику позже всех других, хотя волны именно этого диапазона применялись Г. Герцем в его основных опытах, а А. С. Попов проводил свои первые опыты радиосвязи также именно в этом диапазоне. Законы распространения ультракоротких волн (укв) стали поэтому изучаться сравнительно недавно. В первых высказываниях по этому вопросу, относящихся ко второй половине 20-х годов, проводился взгляд, что укв распространяются только до горизонта («квазиоптичность» укв), и этот взгляд держался очень долго. В Советском Союзе количественные опыты по изучению законов распространения волн метрового диапазона были организованы как для наземных станций, так и на самолётах и аэростатах в 1926—1928 гг. Б. А. Введенским с А. Г. Аренбергом и А. В. Астафьевым. Тогда уже Б. А. Введенский установил первый закон распространения укв на близкие расстояния, согласно которому в силу интерференции «прямого» и отражённого от земли «лучей» убывание напряжённости поля над сухой почвой идёт гораздо быстрее (в первом приближении — квадратично с расстоянием), чем для длинных волн, и находится в сильной зависимости от высот. (Эта закономерность была опубликована в иностранной литературе только на 4—5 лет позднее.) Равным образом и закон дифракционного распространения укв за горизонтом был также получен в СССР в 1933 г. и опубликован в 1935—1937 гг. (работы Б. А. Введенского). Последующие работы иностранных авторов (ван дер Поль, Т. Эккёрслей и др.) внесли дополнения только в смысле большей точности выводов, но не в количественном отношении. Наиболее полная и строгая теоретическая работа в области дифракционного распространения выполнена в последние годы В. А. Фоком (1943—1945 гг.), который слил в единую общую теорию случаи плоской и сферической Земли. Эта работа В. А. Фока удостоена Сталинской премии.

Работы о влиянии «невозмущённой» или «линейно-неоднородной» тропосферы при распространении радиоволн приводят, по крайней мере для пунктов, расположенных «близко» от поверхности земли, к возможности решать задачу так, как если бы лучи оставались прямыми (несмотря на преломление в тропосфере), но Земля была бы более плоской. Это находится в согласии с работами Б. А. Введенского и М. И. Пономарёва по геометрической оптике рассматриваемых процессов и более строго показано, по предложению Б. А. Введенского, М. И. Пономарёвым с позиций электродинамики для лучей, «прижатых к земле». Особенно строго и убедительно это показано позднее в новой работе В. А. Фока, проведённой со строгих позиций классической электродинамики.

П. Е. Краснушкин исследовал вопрос о влиянии слоистых неоднородностей тропосферы, исходя из представлений и образов теории распространения в волноводах. Эти работы гораздо более строги, чем аналогичные зарубежные.

Законы распространения уков в различных условиях изучались экспериментально в СССР многими исследователями в системе Министерства связи, а также в системе других министерств (Н. А. Петров и др.). Изучался вопрос по уков-связи в городах, в горных местностях; последнее — в работах комплексной Эльбрусской экспедиции АН СССР (А. Щетинин и Н. Каминский, 1934—1936 гг.).

Значительное влияние на развитие в СССР вопроса о распространении радиоволн сыграли монографии М. А. Бонч-Бруевича (главным образом об ионосферном распространении, 1934 г.), Б. А. Введенского — по распространению в однородной атмосфере (1934 г.), А. Н. Шуйкина — по распространению уков (1938 г.) и общий курс для вузов, Б. А. Введенского и А. Г. Аренберга — специально по распространению уков (1934 и 1938 гг.) и более ранние — Н. А. Петрова и Е. С. Арцимовича — по распространению уков.

В последние годы большое внимание стали уделять вопросу о радиоизлучении звёзд (особенно их скопления в Галактике) и Солнца. Экспедицией Академии Наук СССР во время солнечного затмения 20 мая этого года в Южной Америке были произведены интересные наблюдения (С. Э. Хайкин) над радиоизлучением солнца.

Физика колебаний сверхвысоких частот по существу начала развиваться сейчас же после опытов Герца. В дореволюционной России П. Н. Лебедев и его школа уделили много внимания этим вопросам, причём П. Н. Лебедевым были получены волны в 6 мм. После Октябрьской революции В. К. Аркадьев и А. А. Глаголева-Аркадьева в Москве и М. А. Левицкая в Ленинграде пошли очень далеко в получении возможно коротких электромагнитных волн (получены волны значительно короче 1 мм). Это были затухающие колебания.

Генерирование незатухающих электромагнитных волн дециметрового диапазона получило в СССР весьма значительное развитие. Ещё в дореволюционный период А. Л. Минц и Н. К. Щдро получали незатухающие колебания малой длины волны с помощью дуговых генераторов. С. Л. Зилитинкевич самостоятельно получил волны в несколько дециметров длиной по методу «тормозящего поля» (т. е. баркгаузеновского типа) почти одновременно с получением их на Западе. Затем колебаниями этого типа плодотворно занимались Н. А. Капцов, А. И. Данилевский, М. Т. Грехова, В. М. Бовшев-Евров, С. Д. Гвоздовер, В. И. Калинин и др.

Первые опыты по радиосвязи на уков-диапазоне начались с волн порядка 3 м, генерируемых обычным способом трёхэлектродными лампами (Б. А. Введенский и А. И. Данилевский, 1922 г.), затем вопрос был поставлен на более техническую почву С. Я. Турлыги-

ным, М. И. Пономарёвым и А. В. Астафьевым в Москве и Н. А. Петровым в Ленинграде (около 1925 г.).

В бывшей лаборатории укв ВЭИ под руководством Б. А. Введенского начиная с 1928 г. производились опыты радиотелефонной связи на укв с аэростатами и самолётами и исследовалось распространение укв (А. Г. Аренберг и А. В. Астафьев). В 1930 г. там же некоторое время функционировала опытная укв вещательная радиостанция (А. В. Астафьев, В. И. Черенков). Несколько позднее в той же лаборатории М. Т. Грехова и В. М. Бовшеверов производили опыты с остро направленной связью на волнах порядка 15 см между Москвой и Люберцами, а в 1933 г. на Чёрном море М. А. Слиозбергом, Е. Н. Майзелем, В. И. Пейсиковым, Е. А. Селиным под руководством Б. А. Введенского испытывалось распространение волн в 60 см на расстояниях порядка 100 км. Последняя работа производилась с помощью разрезных магнетронов, которые в СССР были введены независимо и примерно одновременно с Западом (1932—1933 гг.) (А. А. Слуцкий, М. А. Слиозберг и др.). На основании работ этой экспедиции вскоре было создано несколько образцов советской дециметровой аппаратуры (на магнетронах), в своё время применявшейся на практике.

В дальнейшем были построены вполне устойчивые разрезные магнетроны, дававшие на дециметровом диапазоне мощности в несколько киловатт и применявшиеся для медицинских исследований. Для тех же целей мощные генераторы на метровом диапазоне были в своё время разработаны А. М. Кугушевым, П. Н. Андреевым и их сотрудниками. Н. Ф. Алексеевым и Д. Д. Маляровым под руководством М. А. Бонч-Бруевича был впервые применён принцип многокамерных магнетронов для генерации сантиметровых волн.

Волны метрового и дециметрового диапазона применялись также для исследования диэлектрических свойств различных веществ М. А. Дивильковским, М. И. Филипповым, Д. И. Машем, тогда как Д. А. Рожанский с сотрудниками занимался методами измерений диэлектрической проницаемости и проводимости, а В. В. Татаринov разрабатывал методику электрофизиологических исследований. Сюда же примыкает часть работ Н. Н. Малова.

Вопросы пьезокварцевой стабилизации начали разрабатываться в СССР (Н. Д. Папалекси, Л. Д. Рожанский, Ю. Б. Кобзарев и др.) почти немедленно после появления зарубежных работ в этой области. Впоследствии, благодаря работам А. В. Шубникова и его сотрудников, Н. Г. Ковалёнка и других, советские кварцевые стабилизаторы из отечественного сырья достигли весьма высокой степени совершенства. Значительное число работ было посвящено стабилизации, основанной на принципе магнитной подстройки контуров (Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси).

Большие успехи по вопросам советского радиолампостроения, радиоматериалов, радиотехнологии и далее по вопросам геологоразведки,

электрофизиологии, а также электронной оптики и некоторым другим, мы считаем выходящими за рамки настоящего очерка.

Кончая наш краткий обзор, мы должны подчеркнуть, что он никоим образом не претендует на исчерпывающую полноту. Многие весьма важные радиофизические работы по ряду причин не затронуты. Однако и из приведённого выше видно, что основные направления радиофизики нашли себе в работах советских радиофизиков энергичное и успешное отражение. Почти всюду советские исследования стоят на уровне достижений мировой науки, а во многом и опережают их.

Советская радиофизика безусловно сыграла и продолжает играть значительную роль в организации и научном оснащении советской радиопромышленности, которая благодаря неустанным заботам партии и Советского правительства приходит к славному тридцатилетнему юбилею Советского государства с большими успехами.

У советской радиофизики также имеются значительные достижения, из которых многие достойны включения в сокровищницу подлинной передовой сталинской науки.

Призыв товарища Сталина «...не только догнать, но и превзойти в ближайшее время достижения науки за пределами нашей страны...» воодушевляет советских радиофизиков, как и других советских учёных — патриотов Советской страны, на новую, ещё более плодотворную работу.
