

Часть II

Очерки истории создания и развития статистической теории связи

*Перед чем останавливаешься и замираешь
в священном трепете и безмолвном
уважении – так это перед миром мысли.
Ибо мир мысли – это единственная
реальность в том водовороте привидений
и призраков, который зовется реальным
миром.*

Иво Андрич

Глава I. Развитие статистической радиотехники

§ 1. Предыстория

Предысторию статистической радиотехники следует отсчитывать от 1918 г., когда немецкий ученый В. Шоттки теоретически предсказал [1], что дробовый шум в электронных лампах, работающих в режиме насыщения, испытывает случайные флуктуации, имеющие спектральную плотность

$$S(f) = 2eI,$$

где I — средний ток, а e — заряд электрона.

Спустя десять лет американский ученый **Г. Найквист** теоретически установил и обосновал свою знаменитую формулу [2], определяющую спектральную плотность случайного напряжения на резисторе с сопротивлением R ,

$$S(f) = 4kTR(hf/kT)/(e^{hf/kT} - 1),$$

где f — частота, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, T — температура сопротивления, $h = 6,62 \cdot 10^{-21}$ Дж·с — постоянная Планка. В том же году эта формула получила экспериментальное подтверждение в работе еще одного американца Дж. Джонсона.

К середине 30-х гг. ученые уже отчетливо понимали, что решение проблем теории передачи и приема сигналов невозможно без учета статистического характера многих процессов, связанных со случайными изменениями уровня принимаемого сигнала (его замираниями) и флуктуационными шумами.

Начало теоретических исследований эффективности приема, основанных на применении методов теории вероятностей, относится к 30-м гг. [3]. Первые работы в этом направлении были выполнены известными учеными — англичанином Т.Л. Экерслеем и советскими специалистами **В.И. Сифоровым**, **В.А. Котельниковым**, **Н.И. Шумской** и **А.Н. Шукиным**.

Однако только в годы Второй мировой войны в связи с бурными темпами развития радиолокационной техники, широко применявшейся в военных операциях, началось становление нового научного направления — статистической радиотехники. В те годы одной из важнейших проблем была проблема максимального увеличения чувствительности локационных приемников, работающих в условиях действия случайных шумов. Это должно было увеличить дальность действия радиолокаторов, что повышало эффективность их применения в боевых действиях. Острота этой проблемы стимулировала теоретические исследования, связанные с обработкой случайных сигналов в приемных устройствах, содержащих как линейные фильтры, так и нелинейные элементы, такие как детекторы, частотные дискриминаторы, ограничители и т.д. Для решения данной проблемы в США, России и Великобритании были привлечены крупные ученые и инженеры.

В США над этими проблемами в 40-х гг. работали такие выдающиеся ученые, как **Н. Винер**, Дж. Г. Ван Флек, **Д. Миддлтон**, **С.О. Райс**. В нашей стране подобные исследования в эти же годы выполнялись **В.И. Бунимовичем**, **Р.Л. Стратоновичем**, **В.И. Тихоновым**, **Б.Р. Левиным** и др.

Проблемы, которые относятся к статистической радиотехнике, связаны с созданием методов решения специфических вероятностных задач, возникающих при проектировании устройств обработки сигналов, принимаемых на фоне помех. Данная область привлекла внимание многих ученых всего мира и интенсивно развивалась на протяжении всего XX в.

Статистическая радиотехника базируется на математическом аппарате теории вероятностей и случайных процессов. В ней рассматриваются задачи, связанные с определением спектров мощности и распределением вероятностей случайных процессов на выходе линейных или нелинейных элементов различных трактов обработки случайных сигналов. Кроме того, исследуются статистические характеристики выбросов случайных процессов, и разрабатываются методы анализа нелинейных искажений разного рода случайных сигналов. Особый круг задач, связанных с проектированием различных следящих систем, приводит к сложным в математическом отношении задачам анализа срыва слежения.

Пользуясь разработанным математическим аппаратом, можно исследовать самые сложные алгоритмы обработки как аналоговых, так и цифровых сигналов и расчетным путем определять качество приема. Статистическая радиотехника дает мощное средство для проектирования современных систем.

Вальтер ШОТТКИ

Знаменитый немецкий ученый, один из основателей радиофизики, Вальтер Шоттки родился 23 июля 1886 г. в Цюрихе (Швейцария) однако всю свою сознательную жизнь провел в Германии. Его отец Фредерик Шоттки преподавал математику в университете Марбурга, а затем — в Берлине. В 1904 г. В. Шоттки поступил на физический факультет университета им. Гумбольдта в Берлине. В 1912 г. он защитил докторскую диссертацию, которая была посвящена развитию специальной теории относительности, открытой А. Эйнштейном в 1905 г. Научным руководителем В. Шоттки был выдающийся ученый Макс Планк — нобелевский лауреат по физике, заложивший основы квантовой физики. После получения докторской степени В. Шоттки переехал в Йену (Германия), где стал работать в лаборатории Йенского университета, возглавляемой известным немецким физиком Вином. Здесь он начал свои исследования взаимодействия электронов и ионов в вакууме и в твердом теле, которым он посвятил всю свою жизнь. В 1920—1923 гг. В. Шоттки читал лекции в Вюрцбургском университете, а в 1923—1927 гг. стал профессором Ростокского университета и вел научные исследования совместно с Вином, получившим в 1911 г. Нобелевскую премию по физике за открытие законов излучения энергии «черного тела».



Преподавательскую деятельность в 1916–1919 гг. и с 1927 г. Шоттки совмещал с работой в лабораториях фирмы «Сименс и Гальске» — одного из крупнейших производителей радиооборудования, где он работал постоянно до выхода на пенсию в 1958 г.

Исследования В. Шоттки относятся к физике твердого тела, вакуумной электронике, статистической физике, электронике и физике полупроводников. В 1913 г. в Йене В. Шоттки открыл основной закон, определяющий зависимость тока в электронной лампе от напряжения между анодом и катодом.

Он выполнил основополагающие исследования природы двух основных видов шумов (теплового и дробового), возникающих в электронных устройствах и ограничивающих возможности приема слабых электрических сигналов. Дробовый шум был открыт им в 1914 г., когда он учился в Берлине у знаменитого физика М. Планка. В. Шоттки установил, что такой шум возникает вследствие случайности скорости электронов, попадающих на анод вакуумных ламп. Им экспериментально и теоретически были определены закономерности дробового шума, что позволило конструировать такие радиолампы, в которых уровень этого шума был минимальный. В. Шоттки опубликовал полученные результаты в своей знаменитой статье в 1918 г., за десять лет до того, как подобные результаты независимо были получены американскими учеными — сотрудниками Белл-лаборатории Г. Найквистом и Дж. Б. Джонсоном.

В. Шоттки был не только выдающимся физиком, но и изобретателем. Его изобретения оказали существенное влияние на прогресс радиотехники и электроники. Работая в фирме «Сименс и Гальске», он изобрел в 1919 г. тетрод — первую в мире многосеточную радиолампу, позволяющую создавать стабильно работающие высокочастотные усилители с большим коэффициентом усиления. В 1918 г. независимо от известного американского инженера Е. Армстронга он изобрел супергетеродинный приемник, а в 1924 г. совместно с Эрвином Герлахом — ленточный микрофон и ленточный динамик.

В 1929 г. В. Шоттки приступил к исследованиям в области полупроводниковой электроники и добился значительных результатов. В своей книге «Термодинамика», изданной в 1929 г., он был одним из первых, кто отметил существование электронных «дырок» в валентной зоне полупроводников. В 1938 г. им была разработана теория, позволившая объяснить детекторный эффект контакта металл–полупроводник тем, что на поверхности между двумя контактами появляется барьерный слой. Созданные на основе этой теории элементы называют барьерным диодом Шоттки. Такие диоды нашли широкое применение при создании высокочастотных смесителей с низким коэффициентом шума и быстродействующих коммутирующих цепей.

Вальтер Шоттки скончался 4 марта 1976 г.

В память о выдающемся ученом Немецким обществом физиков учреждена премия имени В. Шоттки, которую присуждают за научные достижения в области физики твердого тела.

§ 2. Прохождение сигналов и шумов через линейные и нелинейные устройства

Первой фундаментальной работой, в которой были рассмотрены основные задачи статистической радиотехники, и она оформилась как самостоятельное научное направление, явились статьи американского ученого **С.О. Райса** [4], опубликованные в 1944 и 1945 гг. В этих статьях, получивших мировую известность

и стимулировавших многочисленными научными исследованиями в данном направлении учеными многих стран, последовательно изложена общая теория флуктуационных шумов.

В упомянутых статьях есть важный раздел, в котором приведены методы определения корреляционной функции $R(\tau)$ (и, следовательно, энергетического спектра мощности $S(\omega)$) процесса, действующего на выходе нелинейного безынерционного устройства, на вход которого поступает случайный процесс $V(t)$. В этом разделе рассмотрены конкретные примеры определения $R(\tau)$ для случаев, когда $V(t)$ представляет собой гармоническое колебание и гауссовский шум, а нелинейное устройство — детекторы с произвольной характеристикой детектирования (в том числе линейной и квадратичной). Для решения подобных задач **С.О. Райс** предложил эффективный метод характеристических функций, суть которого в том, что для определения $R(\tau)$ вначале находится преобразование Фурье от нелинейной характеристики устройства $F(\omega)$. Тогда, представляя нелинейную характеристику интегралом Фурье и зная характеристическую функцию $\Phi(\omega_1, \omega_2, \tau)$ процессов $V(t)$ и $V(t + \tau)$, можно определить $R(\tau)$ в виде двухмерного интеграла, под знаком которого стоит функция $\Phi(\omega_1, \omega_2, \tau)F(\omega_1)F(\omega_2)$. Данный метод впоследствии широко применяли многие исследователи для решения разнообразных практических задач.

В середине 40-х гг. XX в. подобные задачи рассматривались и известным отечественным ученым **В.И. Бунимовичем**, который, как и С.О. Райс, является одним из тех, кто заложил основы статистической радиотехники. В 1951 г. В.И. Бунимович издал одну из первых в мире книг [5], в которой было дано систематическое изложение широкого круга вопросов в области статистической радиотехники.

Другой крупной фигурой в данной области является выдающийся американский ученый **Д. Миддлтон**, который также в середине 40-х гг. получил оригинальные научные результаты, а в начале 60-х — выпустил фундаментальную монографию [6], обобщающую все основные результаты, полученные им и другими учеными в этой области. Д. Миддлтоном были решены задачи по определению $R(\tau)$ и $S(\omega)$ для многих важнейших элементов передающих и приемных устройств (модуляторов, преобразователей частоты, детекторов и т.п.).

В 1949 и 1950 гг. Д. Миддлтон определил корреляционные функции и энергетические спектры мощности сигналов, модулированных по амплитуде, фазе или частоте случайными процессами. Кроме того, в это же время он разработал важную для практики энергетическую теорию детектирования ЧМ-сигналов, которая позволила, в частности, теоретически определить энергетический спектр мощности шума на выходе частотного дискриминатора и пороговый уровень сигнала. При снижении уровня принимаемого ЧМ-сигнала ниже порогового качество приема на выходе ЧМ-дискриминатора резко уменьшалось. Подобные результаты были независимо получены и другими учеными — Н.М. Блэкманом и Ф.Л. Стумперсом в 1948 г.

Следует отметить, что в частном случае, когда уровень принимаемого ЧМ-сигнала намного выше порогового, помехоустойчивость приема была исследована еще за десять лет до Миддлтона [3]. Соответствующие результаты были получены отечественными и американскими учеными: **В.И. Сифоровым** — в 1936 г., В.Б. Пестряковым — в 1938 г., М.К. Кросби — в 1937 г., Г. Родером — в 1937 г., Дж. Р. Карсоном и Т.К. Фраем — в 1937 г.

Значительное развитие статистическая радиотехника получила в фундаментальных работах П.И. Кузнецова, **Р.Л. Стратоновича** и **В.И. Тихонова** [7–9], опубликованных в 1954 и 1960 гг., где было предложено случайные процессы представлять в виде кумулянтных и квазимоментных функций. Такое представление на входе произвольного инерциального нелинейного устройства дает возможность определять статистические характеристики процесса на его выходе.

Предложенные идеи получили значительное развитие в работах отечественных и американских ученых: М.Л. Дашевского и Р.Ш. Липщера (1965 и 1967 гг.), А.Н. Малахова (1973–1978 гг.), Р. Кубо (1962 г.), Н.Г. Ван Кампена (1974 г.), Р.Ф. Фокса (1974 г.) и др. В книге А.Н. Малахова [10] приведены оригинальные результаты автора и других ученых в данном направлении. Методы кумулянтного анализа [10] позволяют определить преобразования кумулянтных и моментных функций случайных, в общем случае негауссовских процессов (в том числе и марковских) при произвольных инерциальных нелинейных преобразованиях. Определив кумулянты процесса на выходе нелинейного устройства, можно находить аппроксимации распределений вероятностей случайных процессов, действующих на их выходе, в виде ряда Эджворта.

§ 3. Методы анализа нелинейных искажений

Можно выделить два круга технических задач, в которых возникает необходимость исследования нелинейных искажений сигнала. Первый связан с проектированием устройств, в которые поступает модулированный полезным сообщением сигнал, представляющий собой случайный процесс $S(t)$. При этом сигнал на выходе может быть представлен в виде $W(t) = S(t) + \varepsilon(t)$, где $\varepsilon(t)$ — продукт искажения сигнала. Анализ нелинейных искажений сигналов в разных устройствах связан с определением корреляционной функции или спектра мощности процесса $\varepsilon(t)$.

К первому виду задач относятся многочисленные задачи анализа нелинейных искажений в системах связи с ЧМ. В этих системах искажения возникают при прохождении ЧМ-сигналов через линейные цепи передающих и приемных трактов, в дискриминаторах и т.д. Системы с ЧМ в XX в. были самым распространенным видом систем, таких как многоканальные радиорелейные и спутниковые системы связи, системы подвижной связи и звукового радиовещания. Анализ нелинейных искажений в таких системах посвящено очень много исследований.

К первому виду задач относятся и задачи анализа искажений, возникающих в узлах передающего тракта из-за амплитудно-фазовой конверсии, которая возникает во многих радиотехнических устройствах: в ограничителях, в преобразователях частоты и разного рода усилителях сигналов — усилителях на лампах бегущей волны, в передатчиках ВЧ и СВЧ и т.д. Такие искажения возникают, в частности, в бортовых ретрансляторах спутниковых систем связи и ограничивают полное использование мощности бортовых передатчиков, так как для уменьшения таких искажений приходится заметно снижать уровень усиливаемого в ретрансляторе сигнала и, следовательно, мощность сигнала, излучаемую со спутника.

Ко второму виду задач относятся задачи, связанные с проектированием радиоприемных устройств, принимающих полезный сигнал на фоне сильных помех от систем, работающих в соседних частотных каналах. Из-за нелинейности отдельных элементов

приемного тракта (усилительных каскадов, преобразователей частоты и др.) в приемнике возникают искажения принимаемого сигнала. Эти искажения связаны с эффектом блокирования (уменьшение коэффициента передачи приемного тракта для полезного сигнала из-за действия помехи), перекрестными искажениями (паразитной модуляцией полезного сигнала помехой), интермодуляцией (взаимодействия в нелинейном тракте двух или более помех, в результате чего появляются новые спектральные составляющие помехи, лежащие в полосе пропускания приемника) и т.п. Такие искажения приводят к снижению помехозащитности приемных устройств и уменьшают пропускную способность каналов связи.

Фундаментальные исследования искажений ЧМ-сигналов со случайной модуляцией [3] были выполнены С.В. Бородичем, В.А. Смирновым, Р.Г. Медхарстом и основоположником статистической радиотехники **С.О. Райсом**. Оригинальный метод анализа ЧМ-искажений, который с 1950 г. развивался С.В. Бородичем, изложен в его монографии [11].

Общий подход к описанию прохождения сигнала через элементы нелинейного тракта, в котором возникают искажения, состоит в том, что преобразования сигнала представляют некоторым нелинейным функционалом, который описывается в общем случае нелинейным интегродифференциальным уравнением. Такие преобразования называют иногда инерциальными нелинейностями или нелинейными преобразованиями с памятью. При сравнительно небольших уровнях сигнала функционал может быть представлен рядом Вольтерра — аналогом полиномиального ряда Тейлора. Ряды Вольтерра, названные так в честь известного итальянского математика конца XIX в., одного из создателей теории линейных интегральных уравнений, получили широкое применение при анализе нелинейных искажений в различных устройствах связи.

Первой публикацией, в которой были рассмотрены нелинейные преобразования случайных процессов общего вида, в том числе полиномиальные и представляемые рядом Вольтерра, явилась статья П.И. Кузнецова, **Р.Л. Стратоновича** и **В.И. Тихонова** [12] (1953 г.).

Следует отметить, что **Н. Винер** использовал эти ряды для описания поведения нелинейных устройств еще в 1942 г. [13], решая задачи, связанные с оборонной тематикой. Однако данный подход был опубликован им лишь в 1958 г. [14], где теория Винера применялась для решения ряда проблем, в том числе и проблемы определения спектра ЧМ-сигнала, модулированного случайным процессом.

Одним из первых, кто обратил внимание на то, что предложенный Винером метод исследования нелинейных преобразований случайных процессов носит весьма общий характер и пригоден для анализа широкого класса нелинейных систем, в том числе и систем с обратной связью, был американский ученый Р. Деч. В 1955 г. он выступил на конференции Американского института радиоинженеров (IRE) с докладом, где рассмотрел применение этого метода к анализу нескольких нелинейных устройств, в которых в цепях обратной связи установлены фильтры. Позднее эти результаты он включил в свою книгу [15], изданную в 1962 г.

В 1966 г. в журнале *Proceeding IEEE* (№ 4 и 10) появилась публикация румынского ученого А. Мирча [16, 17], применившего ряды Вольтерра для анализа нелинейных искажений, возникающих при прохождении ЧМ-сигналов через линейные цепи передающего и приемного трактов. Результаты А. Мирча, к сожалению, оказались незамеченными

специалистами, и в 1968 г. они были вновь независимо получены крупными американскими учеными Е. Бедросяном и **С.О. Райсом**, статья которых [18] приобрела широкую популярность и явилась отправной точкой многих исследований в данном направлении. Эти ученые провели еще ряд фундаментальных исследований, которые создали предпосылки для широкого использования аппарата рядов Вольтерра для решения многих задач связи. В 1971 г. они опубликовали статью [19] о подходе к определению спектра мощности процесса на выходе нелинейного инерциального устройства такого вида, когда на его входе действует сумма гауссовского сигнала и нескольких гармонических.

В 1973 г. М.А. Быховский в статье [20] предложил комбинированный метод анализа линейных и нелинейных искажений ЧМ-сигналов, объединяющий достоинства квазистационарного метода и метода, основанного на применении рядов Вольтерра. В работах [21, 22] описано, как с помощью рядов Вольтерра были исследованы линейные и нелинейные искажения, возникающие в различных системах обработки ЧМ-сигналов. Ряды Вольтерра применялись для анализа искажений сигнала в каналах связи с АМ-ФМ-преобразованием **Д. Миддлтоном** [23] и Е. Бедросяном [24]. Одной из первых работ, в которых эти ряды были применены для анализа нелинейных искажений сигналов в транзисторных усилителях, используемых в радиоприемных устройствах, стала статья американского ученого С. Нарайанана [25]. Это направление активно развивалось в последующие годы многими отечественными и зарубежными учеными. Данную проблематику не обошел своим вниманием и основоположник статистической радиотехники С.О. Райс, который одну из своих работ посвятил исследованию искажений сигналов в преобразователях частоты [26].

В начале 70-х гг. в Ромском научно-исследовательском центре ВВС США были исследованы нелинейные эффекты, возникающие в каскадах радиоприемных устройств из-за действия радиопомех. Результаты этих исследований в 1974 г. опубликованы в фундаментальной статье Дж. Буссганга, Л. Эрмана и Дж. Грейама [27]. В ней рассмотрены методы получения решений нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение нелинейных узлов радиоприемных устройств, в виде рядов Вольтерра; правила нахождения таких рядов для систем, представляющих собой каскадное соединение нелинейных ступеней; вопросы построения канонических моделей нелинейных устройств, а также приведены результаты экспериментальных исследований конкретных приемных устройств, показавшие высокую эффективность применения рядов Вольтерра для анализа нелинейных эффектов, возникающих из-за воздействия радиопомех.

Значительное развитие в нашей стране получил метод нелинейных функционалов для анализа устройств радиосвязи в работах профессоров Б.М. Богдановича, А.А. Ланнэ и Л.В. Данилова, выполненных ими совместно со своими учениками и сотрудниками. Эти исследования начались в начале 70-х гг., и полученные результаты были опубликованы в 1974–1990 гг. в ряде монографий [28–31]. Были разработаны методы анализа нелинейных электрических цепей с использованием теории функционалов, предложены методы аппроксимации нелинейных функционалов при больших уровнях воздействующих сигналов.

Важным направлением в области исследований искажений сигналов в нелинейных системах является синтез таких систем, в которых эти искажения были бы минимальны. Пионерской работой в этом направлении была докторская диссертация **Г. Ван Триса** [32], которая была издана в Массачусетском технологическом институте (МТИ) в 1962 г.

Эти идеи получили дальнейшее развитие [28–31], и в начале 80-х гг. были разработаны методы синтеза трактов передачи сигналов с высокой линейностью, основанные на включении в них дополнительных линейных и нелинейных корректирующих цепей. Кроме того, был разработан пакет прикладных программ для анализа нелинейных электрических цепей. В США также вышел ряд книг, в которых излагались теория Вольтерра–Винера и ее применение к разнообразным задачам теории связи [33].

В настоящее время методы анализа нелинейных искажений сигналов в системах и устройствах разного назначения являются развитым разделом теории связи.

§ 4. Теория выбросов случайных процессов

Определение статистических характеристик выбросов случайных процессов (их пересечений с заданной кривой), таких как распределение числа выбросов за определенный промежуток времени, длительности между соседними пересечениями, распределение максимумов (минимумов) случайных процессов и т.п., необходимо для решения многих практических задач. В радиотехнике эти задачи часто связаны с анализом работы различного рода следящих устройств в условиях, когда уровень полезного сигнала соизмерим с уровнем воздействующих на такие устройства шумов. К ним относятся также задачи, связанные с определением распределения длительности замираний уровня полезного сигнала, которые всегда сопровождают прием сигналов, передаваемых по радиоканалу. Знание этого распределения необходимо для исследования помехоустойчивости приема сигналов в таких каналах.

Начало исследованиям выбросов случайных процессов было положено **С.О. Райсом**, опубликовавшим в 1939 г. статью о распределении максимумов случайного процесса. Другой важной ранней работой, посвященной этой теории, явилась работа американского математика М. Каца, опубликованная в 1943 г. В 1945 г. в знаменитой теоретической работе С.О. Райса [4] для нескольких видов случайных процессов были получены формулы для определения среднего числа выбросов и распределения максимумов, а также разработан приближенный метод определения плотности распределения вероятности для длительностей выбросов. В отечественной литературе первой публикацией в данном направлении стала работа **В.И. Бунимовича** и **М.А. Леонтовича** [34].

В своем научном творчестве Райс еще дважды обращался к этой тематике и получал важные научные результаты. В 1948 г. он рассмотрел статистические свойства случайного процесса, представляющего собой сумму гармонического колебания и случайного гауссовского шума. Этот процесс является, в частности, математической моделью замираний сигнала на линиях радиосвязи, и распределение длительности выбросов огибающей данного процесса дает распределение длительности замираний сигнала на таких линиях. В 1963 г. он разработал теорию, позволяющую определить среднее число импульсов, возникающих в течение одной секунды на выходе частотно-детектора, на входе которого действует ЧМ-сигнал. Результаты этой работы широко использовали многие специалисты при анализе пороговых характеристик приема ЧМ-сигналов.

В последующие годы выбросы случайных процессов рассматривались в ряде теоретических и экспериментальных работ. Теория выбросов случайных процессов получила развитие в работах крупных американских и отечественных ученых. В США важные исследования были выполнены А. Дж. Сигертом (1951 г.), К.В. Хелстромом (1968 г.), **Д. Слепяном** (1959 и 1962 гг.), Дж. Рейналом (1968 и 1987 гг.) и др. Значительный вклад в теорию выбросов случайных процессов внесли отечественные ученые П.И. Кузнецов, **Р.Л. Стратонович**, **В.И. Тихонов** [35] (1954 г.).

В одной из основополагающих книг Р.Л. Стратоновича [36] по статистической радиотехнике теории выбросов посвящена одна из глав. Он разработал ряд оригинальных методов определения среднего числа выбросов и распределения вероятности их длительности на основе теории процессов Маркова, теории сглаженных случайных процессов и теории коррелированных случайных точек.

Теория выбросов получила развитие в работах В.И. Тихонова и его учеников. В 1970 и 1987 гг. им были изданы две уникальные книги [37, 38], посвященные теории выбросов, которым в мировой литературе не было равных. В них обобщены все наиболее важные результаты теоретических и экспериментальных исследований в данной области, полученные многими учеными.

Эффективный метод решения задач теории выбросов случайных процессов, основанный на их временной дискретизации и названный авторами методом опорных импульсов, был предложен **Б.Р. Левиным** и его аспирантом А.Я. Фоминым. Этот метод изложен в первом томе монографии Б.Р. Левина [39].

§ 5. Методы анализа срыва слежения

Нелинейные следящие устройства широко используют на практике в различных системах связи, навигации и в других областях техники. Специфичным для таких устройств, которые во многих случаях представляют собой разновидности фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), является то, что они часто работают в условиях воздействия на них флуктуационных шумов. Эти шумы не только ухудшают точность работы следящего устройства, но и могут вызвать нарушение самого режима слежения, т.е. его срыв. При проектировании необходимо выбрать параметры устройств таким образом, чтобы они обеспечивали минимальные значения ошибки слежения и вероятности срыва слежения. Задачи, связанные с анализом работы подобного рода устройств, часто возникают на практике. Эти весьма сложные в математическом отношении задачи в течение последних десятилетий привлекали внимание многих крупных ученых.

Одной из первых основополагающих работ в этом направлении явилась опубликованная в 1933 г. статья Л.С. Понтрягина, А.А. Андропова и А.А. Витта [40], в которой впервые было предложено использовать математический аппарат марковской теории случайных процессов для определения статистических характеристик процессов, действующих на выходе динамической системы. Успеху такого подхода способствовали работы академика **А.Н. Колмогорова** [41], в которых был дан строгий вывод уравнений Фоккера—Планка. В 50-х гг. в США были разработаны методы анализа проблем срыва слежения на основе теории марковских случайных процессов [42].

Дальнейшее развитие таких методов в значительной степени связано с именами отечественных ученых **Р.Л. Стратоновича** [36], исследовавшего в 1958 г. синхронизацию автогенератора при наличии помех, и **В.И. Тихонова** [43], выполнившего в 1959 г. работу по статистической динамике ФАПЧ.

Первые исследования анализа срыва слежения в системах автоматического регулирования были выполнены в 1959 г. А.М. Васильевым [44] и И.А. Большаковым [45].

Важное значение в развитии статистической радиотехники, в том числе и данного направления, сыграла монография Р.Л. Стратоновича [36], в которой была систематически изложена теория марковских случайных процессов и даны примеры ее применения для решения ряда практических задач. В.И. Тихоновым и его учениками были выполнены обширные теоретические и экспериментальные работы по исследованию процессов срыва слежения в системах ФАПЧ с разными фильтрами в цепи обратной связи.

Позже исследования в этом направлении вели многие ученые. В нашей стране анализом статистических характеристик системы ФАПЧ занимались В.И. Тихонов (1956–1965 гг.), В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховский [46] (1961–1972 гг.), Г.В. Обрезков и В.Д. Розевиг [47] (1972 г.) и др.; в США фундаментальные исследования проводили **Э.Д. Витерби** [48] (1963 г.), В.К. Линдсей [49] (1972 г.) и др.

Система ФАПЧ, как показывает теория оптимального приема аналоговых сигналов, является оптимальным демодулятором сигналов с частотной модуляцией. Этот вид модуляции широко применялся во второй половине XX столетия для передачи сигналов в радиорелейных, спутниковых и других системах связи. Частотная модуляция является нелинейным видом модуляции, и приему сигналов с ЧМ принципиально присущ порог — при уменьшении уровня принимаемого сигнала ниже порога качество приема полезного сообщения резко падает. Во многих случаях при проектировании таких систем необходимо обеспечить низкий пороговый уровень принимаемого сигнала. На основе методов исследования срыва слежения в системе ФАПЧ (см. [50]) были разработаны теоретические основы проектирования следящих демодуляторов ЧМ-сигналов, обладающих пониженным порогом.

§ 6. Монографии и учебники по статистической радиотехнике

Количество публикаций по статистической радиотехнике необозримо. С 1950 г. начинают издаваться монографии и учебники, в которых в систематизированном виде излагаются основные методы исследования и полученные результаты. Эти работы сыграли огромную роль в коренном изменении подхода к подготовке специалистов в области связи. Если ранее образование таких специалистов ограничивалось такими предметами, как приемная, передающая и антенная техника, линии дальней связи, теория электрических цепей, распространение радиоволн и т.п., то с середины XX в. существенное значение приобретает преподавание статистической радиотехники, основанной на теории вероятностей и случайных процессов.

Первая подобная монография [51] была издана в США в 1950 г. и содержала результаты, относящиеся к повышению чувствительности приемных устройств, работающих в присутствии гауссовского случайного шума.

В 1951 г. вышла фундаментальная монография **В.И. Бунимовича** [5], в которую были включены как его оригинальные результаты, так и результаты основоположника этой области **С.О. Райса**. В 1957 г. в СССР вышли еще две замечательные монографии по статистической радиотехнике **Б.Р. Левина** [52] и **В.С. Пугачева** [53], сыгравшие значительную роль в распространении идей в этой области и подготовке отечественных специалистов. В последующие годы выходили дополненные и переработанные издания этих книг.

В 1958 г. в США вышли две книги по статистической радиотехнике Дж. Бендата [54] и В.Б. Давенпорта, В.Л. Рута [55], которые вскоре были переведены на русский язык и также имели существенное значение в распространении знаний и в постановке образования в этой области.

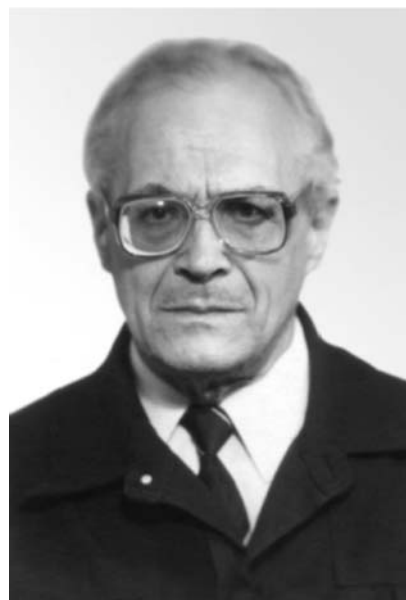
Важную роль в развитии статистической радиотехники играли фундаментальные работы **Д. Миддлтона** [6], в которых были отражены основные результаты статистической теории связи, полученные многими учеными, а также оригинальная монография профессора МГУ **Р.Л. Стратоновича** [36], содержащая новые методы решения ряда задач статистической радиотехники, получившие развитие в последующие годы.

Значительный вклад в подготовку методически совершенных учебников, охватывающих весь спектр вопросов статистической теории связи, внес отечественный ученый профессор Военно-воздушной инженерной академии (ВВИА) им. проф. Н.Е. Жуковского **В.И. Тихонов**. В области статистической радиотехники им были изданы две книги [56, 57] и задачник [58].

Все эти книги являются научным фундаментом, на котором построена система подготовки специалистов в области связи и других смежных областях науки и техники.

Владимир Семенович ПУГАЧЕВ

Владимир Семенович Пугачев родился 25 марта 1911 г. в Рязани. Он один из крупнейших отечественных специалистов в области теории управления, механики и прикладной математики. Важную роль в становлении статистической радиотехники сыграла монография В.С. Пугачева «Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления», вышедшая в 1957 г. и явившаяся одной из первых книг по статистической радиотехнике. В этой монографии были изложены методы решения ряда задач статистического анализа и синтеза линейных и нелинейных систем, впервые была представлена теория канонических разложений случайных функций и



даны практические методы их получения. Было показано, что каноническое разложение является мощным инструментом при исследовании различных стохастических систем и синтезе оптимальных систем обработки сигналов.

Теория канонических разложений была создана В.С. Пугачевым в конце 40-х гг. независимо от исследований французского и финского ученых М. Лозва и К. Карунена, которыми было доказано (соответственно в 1945 и 1946 гг.), что случайный процесс может быть разложен в ряд по функциям, которые определяются видом корреляционной функции этого процесса, а коэффициенты ряда являются некоррелированными случайными величинами. В научной литературе такое разложение часто называют рядом Карунена—Лозва. Теория канонических разложений, созданная М. Лозвом, К. Каруненом и В.С. Пугачевым, является важным разделом теории случайных функций.

Продолжая работы А.Н. Колмогорова, Н. Винера, Л.А. Заде, Дж. Р. Рагазини, В.С. Пугачев разработал общую теорию оптимизации линейных систем по критерию минимума среднего квадрата ошибки. Он был одним из первых ученых, исследовавших проблемы оптимизации многомерных линейных систем и линейных систем с распределенными параметрами. К концу 70-х гг. внимание В.С. Пугачева было сосредоточено на теории оптимальной фильтрации, и он предложил принципиально новый подход к синтезу оптимальных фильтров и решил задачу нелинейной фильтрации.

Монография «Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления» была переиздана в 1960 г. В нее дополнительно были включены некоторые новые результаты В.С. Пугачева по теории выбросов случайных процессов. В частности, были приведены формулы математического ожидания и дисперсии числа выбросов на данном интервале времени. В 1971 г. В.С. Пугачевым получена общая формула для моментов числа выбросов всех порядков.

Существенный вклад В.С. Пугачев внес в теорию марковских случайных процессов. В 1944 г. им впервые получено уравнение для одномерной характеристической функции случайного процесса, определяемого стохастическим дифференциальным уравнением, которое теперь называют уравнением Пугачева. В работах 80-х гг. В.С. Пугачев вывел уравнения для всех конечномерных характеристических функций случайного процесса, определяемого стохастическим дифференциальным уравнением, и дал решение этих уравнений.

В.С. Пугачевым совместно со своими учениками И.Е. Казаковым, Д.И. Гладковым, Л.Г. Евлановым, С.В. Мальчиковым, А.Ф. Мишаковым, В.Д. Седовым и В.И. Соколовым были написаны монографии под общим названием «Основы автоматического управления». В этих монографиях, изданных в 1963, 1968 и 1974 гг., даны основы теории оптимальных линейных и нелинейных систем.

В монографии «Стохастические дифференциальные системы» (1985 г.), написанной В.С. Пугачевым совместно с И.Н. Сеницыным, выведены основные формулы и уравнения теории оптимальной фильтрации. Подробно рассмотрены оптимальные линейные и субоптимальные нелинейные фильтры. Дано полное изложение разработанной им теории условно-оптимальной фильтрации, экстраполяции и оценивания параметров в стохастических дифференциальных системах.

В.С. Пугачев внес значительный вклад в статистическую теорию автоматических систем. Он автор фундаментальных работ в области прикладной математики, статистической динамики автоматических систем, авиационной науки и техники. Он был выдающим-

ся педагогом и создал в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского ряд научных школ. Среди его непосредственных учеников свыше 30 профессоров и докторов наук, более 100 кандидатов наук.

В 1958 г. В.С. Пугачеву было присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, в 1966 г. он был избран членом-корреспондентом по отделению механики и процессов управления (автоматическое управление) АН СССР, а в 1981 г. — академиком по отделению механики и процессов управления (теория управления, вычислительная техника).

Его научные заслуги отмечены престижными премиями. Он лауреат двух Государственных премий (1948 и 1976 гг.). В 1990 г. он стал лауреатом Ленинской премии за работы по созданию статистической теории процессов управления.

Скончался Владимир Семенович Пугачев 25 марта 1998 г. в Москве.

§ 7. Хронология развития статистической радиотехники

1. Определение спектральной плотности дробового шума (1918 г. — В. Шоттки).
2. Открытие формулы, определяющей спектральную плотность мощности теплового шума на резисторе (1928 г. — Г. Найквист) и ее экспериментальное подтверждение (1928 г. — Дж. Джонсон).
3. Разработка метода анализа срыва слежения на основе математического аппарата марковской теории случайных процессов (1933 г. — Л.С. Понтрягин, А.А. Андронов и А.А. Витт).
4. Определение спектра мощности на выходе частотного дискриминатора для случая, когда уровень принимаемого сигнала выше порогового (1936 г. — В.И. Сифоров, 1937 г. — М.К. Кросби, Г. Родер, Дж. Р. Карсон и Т.К. Фрай, 1938 г. — В.Б. Пестряков).
5. Первые исследования статистических характеристик выбросов случайных процессов (1939 и 1945 гг. — С.О. Райс, 1943 г. — М. Кац, 1946 г. — В.И. Бунимович и М.А. Леонтович).
6. Разработка математического аппарата статистической радиотехники (1944—1945 гг. — С.О. Райс, В.И. Бунимович).
7. Определение порогового уровня при приеме ЧМ-сигнала (1948 г. — Н.М. Блэкман и Ф.Л. Стумперс).
8. Создание энергетической теории детектирования сигналов с разными видами модуляции (1950 г. — Д. Миддлтон).
9. Развитие теории выбросов случайных процессов (1951 г. — А. Дж. Сигерт, 1954 г. — П.И. Кузнецов, Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов, 1959 и 1962 гг. — Д. Слепьян, 1961 г. — Р.Л. Стратонович, 1968 г. — К.В. Хелстром, 1968 и 1987 гг. — Дж. Рейнал).
10. Метод анализа нелинейных преобразований случайных процессов, основанных на их представлении рядами Вольтерра (1953 г. — П.И. Кузнецов, Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов, 1958 г. — Н. Винер, 1955 г. — Р. Деч).
11. Разработка методов анализа искажений ЧМ-сигналов со случайной модуляцией в линейных цепях (фильтры, волноводы и т.п.) (1955 г. — С.О. Райс, 1956 г. — В.А. Смирнов, 1958 г. — Р.Г. Медхэрст, 1962 г. — С.В. Бородич).

12. Разработка метода определения статистических характеристик случайных процессов на выходе произвольного инерциального нелинейного устройства, исходя из их статистических характеристик случайного процесса (задаваемого кумулянтными и квазиомментными функциями), действующего на входе (1954 и 1960 гг. — П.И. Кузнецов, Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов).
13. Исследование проблем срыва слежения разных следящих устройств (в автогенераторах, синхронизируемых при воздействии помех: 1958 г. — Р.Л. Стратонович, в устройствах фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ): 1959 г. — В.И. Тихонов; в системах автоматического регулирования: 1959 г. — А.М. Васильев, И.А. Большаков).
14. Развитие методов исследования статистических характеристик системы ФАПЧ (1959—1965 гг. — В.И. Тихонов, 1961—1972 гг. — В.В. Шахгильдян, 1963 г. — Э.Д. Витерби, 1969 и 1972 гг. — Г.В. Обрезков и В.Д. Розевиг, В.К. Линдсей).
15. Развитие метода описания статистических характеристик случайных процессов, действующих на входе и выходе нелинейных устройств, с помощью кумулянтных и квазиомментных функций (1962 г. — Р. Кубо, 1965 и 1967 гг. — М.Л. Дашевский и Р.Ш. Липцер, 1973—1978 гг. — А.Н. Малахов, 1974 г. — Н.Г. Ван Кампен, Р.Ф. Фокс).
16. Развитие метода анализа нелинейных преобразований случайных процессов, основанных на их представлении рядами Вольтерра (1966 г. — А. Мирча, 1968 г. — Е. Бедросян и С.О. Райс, 1973 г. — М.А. Быховский, 1986 г. — Д. Миддлтон, 1988 г. — Е. Бедросян).
17. Разработка на основе методов анализа срыва слежения в системе ФАПЧ теоретических основ проектирования следящих демодуляторов ЧМ-сигналов с пониженным порогом (1970—1977 гг. — В.М. Дорофеев).

Литература к главе 1

1. *Schottky W.* Uber spontane Stromschwankungen in verschiedenen Elektizitatsleitern. Ann. Der Phys. 1918. V. 57. S. 541—567.
2. *Nyquist H.* Thermal agitation of electric charge in conductors // Phys. Rev. 1928. № 4.
3. *Быховский М.А.* Круги памяти // Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». — М.: Мобильные коммуникации. 2000. Вып. 1.
4. *Rice S.O.* Mathematical Analysis of Random Noise // BSTJ. July 1944. № 3; January 1945. № 1.
5. *Бунимович В.И.* Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. — М.: Сов. радио, 1951.
6. *Middleton D.* An introduction to statistical communication theory. N.Y.: McGraw-Hill. 1960. Pt.1; 1961. Pt.2.
7. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* Квазиомментные функции в теории случайных процессов / Докл. АН СССР. 1954. № 4.
8. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* Корреляционные функции в теории броуновского движения. Обобщение уравнения Фоккера—Планка // ЖЭТФ. 1954. Т. 26. Вып. 2.
9. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* Квазиомментные функции в теории случайных процессов // Теория вероятностей и ее применение. 1960. № 1.
10. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. — М.: Сов. радио, 1978.

11. *Бородич С.В.* Искажения и помехи в многоканальных системах радиосвязи с частотной модуляцией. — М.: Связь, 1976.
12. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* Прохождение случайных функций через нелинейные системы // Автоматика и телемеханика. 1953. № 2.
13. *Wiener N.* Response of nonlinear device to noise. MIT Radiation Lab. Rep. V-168. 4. 1942.
14. *Wiener N.* Nonlinear problems in random theory. N.Y.: MIT Press and Wiley. 1958.
15. *Deutsch R.* Nonlinear transformations of random processes. N.J.: Prentice-Hall. 1962.
16. *Mircea A.* Harmonic distortion and intermodulation noise in linear FM transmission systems. Rec. Electrotech. (Romania). 1967. V. 12. P. 2–13.
17. *Mircea A., Bedrosian E., Rice S.O.* Further comment on «Distortion and crosstalk of linearly filtered, angle — modulated signals» // Proc. IEEE (Lett.). 1969. № 5.
18. *Bedrosian E., Rice S.O.* Distortion and crosstalk of linearly filtered, angle — modulated signals // Proc. IEEE. 1968. № 1.
19. *Bedrosian E., Rice S.O.* The output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic and Gaussian inputs // Proc. IEEE. 1971. № 12.
20. *Быховский М.А.* Представление сигнала на выходе линейного фильтра при частотно-модулированном входном сигнале // Радиотехника и электроника. 1973. № 7.
21. *Быховский М.А.* Применение рядов Вольтерра для анализа нелинейных искажений в системах связи с частотной модуляцией // Труды НИИР. 1974. № 4.
22. *Быховский М.А.* Нелинейные искажения в следящих демодуляторах, обусловленные паразитной амплитудной модуляцией // Труды НИИР. 1976. № 1.
23. *Middleton D.* Effects of narrow-band filters on the output envelopes and phase of joint AM-FM inputs: An analysis extension of the Bedrosian-Rice formulation // IEEE Trans. COM-34. July 1986.
24. *Bedrosian E.* Amplitude demodulation of filtered AM/PM signals // IEEE Trans. on Inform. Theory. 1988. № 6.
25. *Narayanan S.* Transistors distortion analysis using Volterra series representation // BSTJ. May, June 1967.
26. *Rice S.O.* Volterra systems with more than one input port — distortion in a frequency converter // BSTJ. 1973. №8.
27. *Bussgang J.J., Erman L., Graham J.W.* Analysis of nonlinear systems with multiple inputs // Proc. IEEE. 1974. № 8.
28. *Богданович Б.М.* Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах. — М.: Связь, 1980.
29. *Ланнэ А.А.* Нелинейные динамические системы: синтез, оптимизация, идентификация. — Л.: ВАС, 1985.
30. *Данилов Л.В.* Ряды Вольтерра—Пикара в теории нелинейных электрических цепей. — М.: Радио и связь, 1987.
31. Методы нелинейных функционалов в теории электрической связи / Под ред. Б.М. Богдановича. — М.: Радио и связь, 1990.
32. *Van Trees H. L.* Synthesis of optimum nonlinear control systems. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1962.
33. *Schetzen M.* The Volterra and Wiener theories of nonlinear systems. N. Y.: Wiley. 1980.
34. *Бунимович В.И., Леонтович М.А.* О распределении числа больших отклонений при электрических флуктуациях / Докл. АН СССР. 1946. Т. 53. Вып. 1.
35. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* О длительности выбросов случайных процессов // ЖТФ. 1954. 24.
36. *Стратонович Р.Л.* Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1961.
37. *Тихонов В.И.* Выбросы случайных процессов. — М.: Наука, 1970.
38. *Тихонов В.И., Хименко В.И.* Выбросы траекторий случайных процессов. — М.: Наука, 1987.

39. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1974.
40. Понтрягин Л.С., Андронов А.А., Витт А.А. О статистическом рассмотрении динамических систем // ЖЭСФ. 1933. Т. 3. Вып. 3.
41. Колмогоров А.Н. Об аналитических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. — 1938. — Вып. 5.
42. Darling D.A., Siegert A.J. Systematic approach to a class of problems in the theory of noise and other random phenomena // IRE Trans. 1957. V. IT-6. № 2. Pt. I.
43. Тихонов В.И. Влияние шумов на работу системы ФАПЧ // Автоматика и телемеханика. 1959. № 9.
44. Васильев А.М. Применение теории броуновского движения к исследованию помехоустойчивости импульсных радиотехнических следящих устройств / НДВШ // Радиотехника и электроника. 1959. № 1.
45. Большаков И.А. Анализ срыва слежения в системах автоматического регулирования под воздействием флуктуационных помех // Автоматика и телемеханика. — 1959. — № 12.
46. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. — М.: Связь, 1966. 1-е изд.; 1972. 2-е изд.
47. Обрезков Г.В., Розевиг В.Д. Методы анализа срыва слежения. — М.: Сов. радио, 1972.
48. Viterbi A.J. Phase-lock loop dynamics in the presence of noise by Fokker — Planck techniques // Proc. IEEE. 1963. № 12.
49. Lindsey W.C. Synchronization systems in communication and control. — N. J.: Prentice-Hall. 1972.
50. Кантор Л.Я., Дорофеев В.М. Помехоустойчивость приема ЧМ-сигналов. — М.: Связь, 1977.
51. Lawson I.L., Uhlenbeck G.E. Threshold signals. — N.Y.: 1950.
52. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1957.
53. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение в задачах автоматического управления. — М.: Гостехиздат, 1957.
54. Bendat J.S. Principles and applications of random noise theory. — N.Y.: Wiley, 1958.
55. Davenport W.B., Root W.L. An introduction to the theory of random signals and noise. — N.Y.: McGraw-Hill. 1958.
56. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1966 1-е изд.; 1982. 2-е изд.
57. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. — М.: Сов. радио. 1977.
58. Тихонов В.И. Примеры и задачи по статистической радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1970.