

*«...Я просила мудрости — и Бог  
сказал — нет. Он прислал мне про-  
блемы, над которыми нужно ломать  
голову...»\**

## Предисловие

Современный этап развития человеческой цивилизации и информационно-телекоммуникационных процессов [1] характеризуется ускорением темпов роста объёма знаний, умений и новых технологий, необходимых для смены поколений в социальной, культурной, экономической и научно-технической сферах деятельности. Наступила эра информатизации и расширения возможностей доступа к информационным ресурсам множества людей разных стран мира. Как образно отметил нобелевский лауреат по физике Дж. Л. Холл, «человечество продолжает раскрывать русскую матрёшку Природы», снижая погрешности радиотехнических измерений, осваивая новые технические решения для достижения прецизионной точности, наноразмерные и радиодиффракционные технологии, многократно увеличивая скорость передачи информационных потоков.

Вместе с тем возникают тормозящие эффекты и процессы, обусловленные ограниченными возможностями освоения новых знаний молодыми специалистами, консервативностью обновления фундаментальных физических положений, неравномерностью процессов развития технологий и подготовки научно-технических кадров из-за организационных, финансовых и иных ограничений.

При проектировании мощных радиопередающих устройств сверхвысокочастотного и оптического диапазонов в учебной литературе господствуют методы аналитического расчёта только энергетических характеристик усилителей мощности сверхвысоких частот

---

\* *«Я просила ...»* — из молитвы Матери Терезы Калькуттской — лауреата Нобелевской премии мира 1979 года, монахини, основательницы конгрегации миссионерок, занимающейся служением бедным и больным. Она причислена в 2016 году католической церковью к лику Святых за чудесное исцеление больного от опухоли головного мозга [см. Волков С. М. Диалоги с Владимиром Спиваковым / Под ред. Елены Шубиной. — М.: Изд-во АСТ, 2019. — 319 с. ISBN 978-1-17-097069-1. С. 18].

на базе немодулированных сигналов гармонической формы, дополняемые эмпирическим применением лицензируемых программных средств. Тенденция расширения занимаемой частотной полосы передаваемого радиосигнала входит в противоречие с возможностями достижения паспортных значений энергетической эффективности усилителя мощности, определяемых без учёта свойств модулированных колебаний. Дефицит радиочастотного ресурса заставляет разработчиков при выборе компромиссных решений учитывать необходимость выполнения жёстких требований по электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Вопросы анализа и расчёта именно интермодуляционных искажений сигналов, передаваемых по беспроводным линиям связи, практически не затрагиваются в учебной литературе. При этом доступ профессионалов и специалистов к современной элементной базе, к технологии изготовления и использования компонентов устройств миллиметрового, субмиллиметрового и нанометрового диапазонов, к пониманию методов создания новых средств радиофотоники ограничен политико-экономическими процессами и уходом из активной деятельности высококвалифицированных преподавательских кадров широкого профиля. Данное учебное пособие представляет собой обобщённый анализ современных знаний и умений в области устройств формирования и обработки модулированных радиосигналов диапазона сверхвысоких и крайне высоких частот с непостоянной огибающей и пытается частично восполнить указанные выше пробелы.

Материал книги предназначен для студентов и аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 9.03.02 «Информационные системы и технологии»; 11.03.01, 11.04.01 «Радиотехника»; 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»; 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»; 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи». Пособие будет полезно преподавателям высших учебных заведений и широкому кругу специалистов в области разработки, конструирования, технологии производства и эксплуатации электронных приборов СВЧ, устройств информатизации, телекоммуникации, средств мобильной и спутниковой связи.

Материал пособия разбит на три раздела. В первом представлены общие сведения об искажениях радиосигналов и методах их количественной оценки. Во втором анализируются технические решения

по минимизации интермодуляционных искажений в твёрдотельных и вакуумных усилителях мощности радиосигналов указанного диапазона с установленным уровнем линейности по огибающей, включая адаптивные и алгоритмические методы, одновременный учёт нелинейных и инерционных проявлений в активном элементе и в цепях формирования и обработки сигналов. Третий раздел впервые в учебной литературе содержит анализ механизмов и проявлений интермодуляционных искажений сигналов в компонентах антенно-фидерных трактов передачи и приёма сигналов, которые ранее считались пассивными и линейными. Приведены сведения об описании контактных, ферромагнитных, пьезоэлектрических, электротепловых, мультипакторных источников интермодуляционных искажений, приведен обзор рекомендаций о технологических решениях и о способах алгоритмического их снижения до допустимого уровня.

Для проверки качества усвоения материала и знакомства обучающихся с современной отечественной и зарубежной научно-технической литературой по исследуемым вопросам пособие содержит обширный список опубликованных источников информации, в котором иноязычные названия публикаций снабжены уточнённым переводом на русский язык; наиболее часто используемые термины и сокращения сопоставляются с русскоязычными эквивалентами в тексте и в приложенных списках; реквизиты публикаций авторов и первых соавторов по определённому направлению сгруппированы в позициях списка литературы. Основные разделы пособия заканчиваются перечнями контрольных вопросов для самостоятельной проверки обучающимися понимания изучаемого материала.

Окончание подготовки пособия к опубликованию совпало с тяжёлым для человечества периодом, вызванным инфекционными проблемами. Эти условия стимулировали появление в тексте ряда сведений энциклопедического характера, подчёркивающих общность интересов учёных и специалистов разных стран, конфессий и сфер деятельности, выходящих за пределы узко технических понятий, которые подчёркивают значение общечеловеческих ценностей и культурных традиций предшествующих поколений для освоения новых представлений, знаний и умений.

Пособие явилось результатом многолетней деятельности автора на кафедре радиопередающих устройств (сейчас — кафедра формирования и обработки радиосигналов) Института радиотехники и

электроники имени В. А. Котельникова Национального исследовательского университета Московского энергетического института (НИУ «МЭИ») и сотрудничества с «Особым конструкторским бюро МЭИ» (ОКБ «МЭИ», Роскосмос) и с «Российской корпорацией ракетно-космического приборостроения и информационных систем (АО «РКС»).

Считаю своим приятным долгом выразить искреннюю признательность своему Учителю профессору Михаилу Владимировичу Капранову, ушедшему из жизни профессору Олегу Антониновичу Челнокову за привлечение интереса к научно-технической деятельности, Владимиру Макаровичу Рожкову за постоянную поддержку и анализ множества смежных вопросов конструирования, технологии и производства космической аппаратуры, ушедшему от нас в период подготовки рукописи к опубликованию профессору Сергею Михайловичу Смольскому за пример интеллектуальной активности и его поддержку автора на разных этапах многолетней совместной деятельности, своим успешным ученикам и коллегам на разных этапах научно-технической активности Виктору Неофидовичу Кочемасову, Александру Сергеевичу Кондрашову, Кириллу Витальевичу Ромащенко, Сергею Владимировичу Петушкову. Высказываю глубокую благодарность рецензентам пособия профессорам Александру Валентиновичу Пестрякову и Николаю Петровичу Ямпурину за ценные замечания и рекомендации по улучшению качества пособия.

Работа посвящена Галине Петровне Беловой за постоянную всестороннюю помощь, понимание и поддержку на протяжении длиннейшего жизненного пути от самых его истоков до настоящего времени.

Москва, апрель 2020 г.

# 1 Общие сведения о радиосигналах

---

## 1.1. Характеристики радиочастотных сигналов и искажения при их формировании и обработке

В связи, акустике и информатике *сигналом* называют [2] физический процесс или материальный носитель информации, предназначенный для ее передачи, параметры которого изменяются в соответствии с передаваемым сообщением. В радиосигнале в качестве носителя используется непрерывное знакопеременное электромагнитное колебание, которое может распространяться в пространстве в форме волны. Радиочастотным спектром [3–6] называют упорядоченную совокупность радиочастот в установленных Международным союзом электросвязи\* пределах, которые могут быть использованы для функционирования радиоэлектронных средств или высокочастотных устройств.

К радиочастотам в широком смысле относят колебания с частотой колебаний  $f$  от 3 кГц (сверхдлинные или мириаметровые волны с длиной волны в вакууме  $\lambda$  менее 100 км) до 3 ТГц (терагерцовое радиоизлучение с длиной волны более 1 мм). В соответствии с Международной системой физических величин и единиц СИ\*\* и с действующим стандартом\*\*\* используется десятичное разбиение совокупности радиочастот на 12 диапазонов, среди которых наименование «сверхвысокие частоты — СВЧ» присвоено диапазону № 10

---

\* Международный союз электросвязи (МСЭ, International Telecommunication Union, ITU) — специализированное учреждение Организации объединенных наций, которая определяет рекомендации в области телекоммуникаций и радио, а также регулирует вопросы международного использования радиочастот. Рекомендации МСЭ не являются обязательными, но широко поддерживаются.

\*\* Международная система единиц (СИ) (фр. Le Système International d'Unités, SI).

\*\*\* ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.

с частотой колебаний от 3 до 30 ГГц (сантиметровые волны с длиной волны от 1 до 10 см). К нему примыкают ультравысокие частоты (УВЧ) с частотой колебаний от 0,3 до 3 ГГц (дециметровые волны с длиной волны от 100 до 10 см) и крайне высокие частоты (КВЧ) с частотой колебаний от 30 до 300 ГГц (миллиметровые волны с длиной волны от 10 до 1 мм). В космической связи используются гипервысокие частоты (ГВЧ) с частотой колебаний от 300 ГГц до 3 ТГц, относящиеся к оптической области электромагнитного спектра излучения.

Распределение полос частот между радиослужбами в Российской Федерации определяется Регламентом радиосвязи\* и нормативной правовой базой Российской Федерации в области регулирования и использования радиочастотного спектра.

В мировой практике для наименования диапазонов и полос радиочастот используются различные (иногда — противоречивые) цифровые и буквенные обозначения, опирающиеся на конкретные приложения (подводная связь, гражданская авиация, телевидение, радиолокация, волноводная техника, спутниковая навигация и др.). В качестве общего наименования частоты электромагнитных колебаний для беспроводной передачи цифровых сообщений будем в данном пособии использовать наименование «сверхвысокие частоты» (СВЧ) в широком смысле, частично соответствующее в англоязычной литературе [6] термину «микроволны» (*Microwaves*).

Оставляя за рамками данного пособия перспективные для связи, локации и измерений сверхширокополосные сигналы [7, 8], ограничимся далее колебаниями с малым значением ширины занимаемой полосы радиочастот  $B_c$  по отношению к ее центральной частоте  $f_0 \gg B_c$ . Радиосигналом будем далее называть детерминированное электромагнитное колебание  $x(t)$  почти синусоидальной (квазигармонической) формы, не содержащее постоянной составляющей [7, 8] и изменяющееся во времени  $t \in (0, T_c)$  на длительности наблюдения  $T_c$ .

---

\* Регламент радиосвязи принят Международным союзом электросвязи по итогам всемирных конференций радиосвязи в г. Женеве в 2012 и 2015 годах и утвержден Российской стороной распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 апреля 2018 г. № 685-р и нормативной правовой базой Российской Федерации в области регулирования и использования радиочастотного спектра.

Модулированному действительному радиосигналу  $x(t)$  ставится в однозначное соответствие его отображение область частот  $f$  в виде комплексного спектра прямого преобразования Фурье\* [2]. Основные спектральные свойства сигнала описывает распределение спектральной плотности его амплитудной и фазовой компонент. Их совокупность позволяет при помощи обратного преобразования Фурье однозначно восстановить описание сигнала во временной области  $x(t)$ . Ограниченному по времени сигналу  $x(t)$ ,  $t \in (0, T_c)$  соответствует спектр преобразования Фурье на бесконечном интервале частот  $f \in (-\infty, +\infty)$ . Если спектр определен на ограниченном частотном интервале, то интегральное обратное преобразование Фурье [2] определяет для него отображение в бесконечной временной области, включая полубесконечный действительный интервал  $t \in (0, +\infty)$ .

Для всех служб радиосвязи, включая спутниковые, в неограниченном частотном диапазоне для сигналов, заданных на ограниченном отрезке времени, определена *занимаемая* (эфффективная) полоса частот  $B_c$ , «за нижним и верхним пределами которой излучаемые средние мощности (каждая) равняются определенному проценту от общей средней мощности данного излучения»\*\*. По умолчанию, если нет иных указаний относительно соответствующего класса излучения, в каждой полосе за этими границами сосредоточено по 0,5 % от общей мощности. При этих условиях эфффективная длительность радиосигнала  $T_c$ , эфффективная ширина занимаемой спектром сигнала радиочастотной полосы  $B_c$  и его средняя колебательная излучаемая мощность обеспечивают получение энергии, необходимой для распознавания в месте приёма и распознавания информационного сообщения с заданной достоверностью на фоне естественного шума.

Ограничения физической и технической реализуемости процессов формирования, усиления и обработки сигналов приводят к возникновению непредумышленных *искажений* — отклонений сигнала от идеализированных расчетных характеристик во временном или

---

\* Фурье, Жан-Батист Жозеф (J.-B. J. Fourier, 1768–1830) — французский математик и физик, заложивший основу исследований свойств колебаний и волн. Пожизненный секретарь французской академии; создатель теории тригонометрических рядов, теории множеств, теории распространения тепла и др.

\*\* Рекомендация МСЭ-Р СМ.443-4 (02/2007) Измерение ширины полосы частот на станциях радиоконтроля (<http://www.itu.int/publ/R-REC/en>).

спектральном представлении [10, 11, 16]. Искажения радиосигналов вызываются неизбежными инерционными и нелинейными свойствами цепей и узлов обработки сигналов. Появление искажений может нарушать требования электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств и представлять собой помехи для приёма, демодуляции, декодирования и надёжного распознавания передаваемых сообщений [9].

К понятию «искажения» можно прийти с разных сторон. Со стороны прецизионной точности формирования сигналов малая заметность искажений характеризуется синонимами «красота», «совершенство», «гармония», «идеал» в искусстве, музыке, живописи, поэзии, архитектуре, в Природе. Со стороны технической реализации представление о малости искажений сигналов позволяет установить диалектическую близость понятий о предельно малых и весьма больших количественных значениях в категориях пространства, времени и высокой точности.

Термин «искажения» часто используется в недостаточно определённом смысле. В научно-технической литературе рассматриваются и анализируются разные виды и характеристики искажений сигналов, звуков, изображений: нелинейные, частотные, амплитудные, фазовые, амплитудно-фазовые, переходные, параметрические, перекрёстные, динамические, речевые, акустические, модуляционные, межсимвольные, межканальные, дисперсионные, инерционные, автокорреляционные, Hi-Fi (*High-Fidelity* — «высокая верность») и т. д.

Фундаментальный подход к определению понятия «Искажения радиосигнала» предложен в [10]. В соответствии с ним вводится определение неискажающей, идеальной системы, на выходе которой весь выходной радиосигнал является полезным, а продукты искажений отсутствуют. При этом выходной радиосигнал неискажающей системы  $\tilde{y}(t)$  может отличаться от входного  $x(t)$  лишь линейным масштабом по ординатам и сдвигом во времени  $\tau$ :

$$\tilde{y}(t) = kx(t - \tau). \quad (1.1)$$

Различие реакции исследуемой  $y(t)$  и идеализированной неискажающей системы  $\tilde{y}(t)$  на входной сигнал позволяет выделить продукты искажений — функцию потерь

$$\xi(t) = y(t) - \tilde{y}(t). \quad (1.2)$$



Множество значений функции потерь  $\{\xi(t)\}$  во временном, спектральном или статистическом представлении позволяет определить меру линейности системы — количественный критерий качества по этому параметру. Чаще всего применяются среднеквадратичный (по мощности на интервале определения во времени) критерий  $|\{\xi(t)\}|^2$ . Находят применение [10, 11, 16] характеристики: доли времени нахождения модуля ошибки  $|\xi(t)|$  вне определенного интервала; интегральные формы равномерного приближения к среднему квадратическому значению; максимальное (пиковое) или автокорреляционное значение функции потерь.

В конкретном приложении необходимо определять признаки, критерии оценки уровня и границы допустимости искажения того или иного вида. Например, в системе передачи акустических звуковых сигналов [12], создаваемых музыкальными инструментами и человеческим голосом (речь, пение, высококачественное звуковое вещание), достаточен частотный диапазон основного тона от 70...240 Гц для мужчин и 240...450 Гц для женщин; частотный интервал ощущаемого человеком звучания фортепиано составляет от 27 Гц основного тона до 10 кГц и выше с учетом обертонов; для распознавания содержания речи достаточен интервал частот от 125 Гц до 3 кГц; оценка качества звучания акустической аппаратуры производится с учетом субъективных показателей; высококачественная запись звучания музыкального произведения выполняется с частотой дискретизации до 198 кГц при стандартной частоте 44,1 кГц. В данной работе ограничимся непредумышленными искажениями радиочастотных сигналов при передаче цифровой информации.

Иногда разделяют виды искажений на два крупных класса: нелинейные и частотные. Однако в современном понимании характеристик узкополосных радиосигналов отделение нелинейных преобразований от инерционных и анализ огибающих передаваемых сигналов без рассмотрения их мгновенных значений может привести к значительному отличию от результатов прямых измерений.

Выделение отдельного класса «линейных» цепей, устройств и функциональных преобразований является только привычной гипотезой, которая не подтверждается на практике при проведении измерений с высокой точностью. Например, в технике радиопередающих устройств условно выделяют «линейные усилители мощности» (ЛУМ, *Liner*), подразумевая при этом [14] создание устрой-

ства, которое характеризуется одновременно выполнением требований конкретного применения по выходной мощности, по допустимому уровню искажений передаваемого сообщения и по достаточной энергетической эффективности в смысле значения коэффициента преобразования мощности  $P_0$  источника электропитания по постоянному току (*Input direct current Power*) в мощность  $P_{\text{ВЫХ}}$  первой гармоники (*RF Output Power*) в импульсах выходного тока

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0} \times 100 \%. \quad (1.3)$$

По существу, наименование ЛУМ не вполне корректно, так как для усиления по мощности, в отличие от малопумящего усиления по напряжению, например, необходимо использовать *нелинейное* преобразование входного напряжения гармонической формы в импульсы тока сложной формы. Точнее следует говорить о линейной связи между передаваемым сообщением и амплитудными параметрами первой гармоники выходного радиосигнала.

Соотношение (1.3) в [13–15] называют электронным коэффициентом полезного действия (КПД) усилительного каскада по выходной цепи. В англоязычных источниках параметр  $\eta_{\text{э}}$  называют коллекторной эффективностью (*Drain/collector Efficiency*). Для усилительных каскадов с ограниченными значениями коэффициента усиления по мощности  $K_P = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$  наряду с (1.3) используют [22, 73–83] оценку КПД с вычитанием дополнительной входной высокочастотной мощности (*Power Added Efficiency, PAE*):

$$\eta_{\text{PAE}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}}{P_0} \times 100 \%, \quad (1.4)$$

а также *полный КПД* усилительного каскада с учётом высокочастотной мощности  $P_{\text{ВХ}}$ , поступающей от предыдущего каскада:

$$\eta_{\text{полн}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0 + P_{\text{ВХ}}} \times 100 \%. \quad (1.5)$$

Варианты оценки энергетической эффективности связаны между собой соотношением

$$\eta_{\text{PAE}} = \eta_{\text{э}} \left[ 1 - \frac{1}{K_P} \right], \quad (1.6)$$

где  $K_P = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$  — коэффициент передачи по высокочастотной мощности.