

**ЛЕКЦИИ 1-2**  
**ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ**

Составитель:  
к.т.н., доцент,  
доцент кафедры РЛ1  
Родин М.В.

Москва – 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1.1 Введение в теорию передачи радиосигналов .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Место и функции РПДУ в радиоэлектронных системах.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Основные этапы развития техники и теории РПДУ .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4 Классификация РПДУ .....</b>	<b>35</b>
<b>1.5 Основные параметры и требования, предъявляемые к РПДУ .....</b>	<b>37</b>
<b>1.6 Структура, принцип функционирования и основы расчета РПДУ .....</b>	<b>50</b>
<b>1.7 Электромагнитная совместимость РПДУ .....</b>	<b>63</b>

## 1.1 Введение в теорию передачи радиосигналов

Тот, кто владеет информацией – тот владеет миром. Эта максима неразрывно связана с современным обществом, которое все чаще называют информационным.

По одной из легенд Натан Ротшильд, основатель банковской династии Ротшильдов, как-то сказал эту фразу, которая сразу стала крылатой. В 1815 г., на следующий день после битвы при Ватерлоо, Натан Ротшильд явился на Лондонскую биржу. Он был единственным в Лондоне, кто знал о поражении Наполеона. Однако он немедленно приступил к массовой продаже своих акций. Все остальные биржевики сразу же последовали его примеру, так как решили, что сражение проиграли англичане. Поднялась паника, акции обесценивались, а их тайно и спешно скупали подставные агенты Ротшильда. За один день он заработал 40 миллионов фунтов стерлингов и овладел большой долей британской экономики. Вот уж, поистине: кто владеет информацией – тот владеет миром.

Человек живет в информационном мире, который постоянно изменяется и пополняется. В широком смысле информацию можно определить как совокупность знаний об окружающем нас мире. В таком понимании информация является важнейшим ресурсом научно-технического прогресса и социально-экономического развития общества и наряду с материей и энергией принадлежит к фундаментальным философским категориям естествознания.

*Информация* (от лат. *informatio* – разъяснение, изложение) – это совокупность сведений или данных о каких-либо событиях, явлениях или предметах, то есть это совокупность знаний об окружающем нас мире.

Передачу информации осуществляют с помощью различных знаков (символов), которые позволяют представить её в некоторой форме.

*Сообщение* – это совокупность знаков, отображающих ту или иную информацию. Перенос сообщений (а, следовательно, и информации) на расстоя-

ние осуществляют с помощью какого-либо материального носителя (например, бумаги или магнитной ленты) или физического процесса (например, звуковых или электромагнитных волн, электрического тока и т. д.).

*Сигнал* – это физический процесс, несущий передаваемое сообщение. В качестве сигналов в настоящее время в основном используют электрические и оптические сигналы. Сигнал передаёт (развёртывает) сообщение во времени, то есть всегда является функцией времени. Сигналы формируют путём изменения тех или иных параметров физического процесса в соответствии с передаваемым сообщением.

Сообщения могут быть функциями времени, например, речь при передаче ее по телефону, температура или давление при передаче телеметрических данных, спектакль при передаче по телевидению и т. д. В других случаях сообщение не является функцией времени (например, текст телеграммы, неподвижное изображение и т. д.).

Технические средства, обеспечивающие передачу, прием, хранение и обработку информации, широко используют во многих сферах деятельности человека. Бытовая техника, транспорт, промышленность, здравоохранение, авиационная и космическая техника – вот далеко не полный перечень направлений возможного использования таких технических средств. Современное общество давно не представляет своей жизни без компьютера, интернета, мобильной связи. И всё это невозможно было бы без радиоэлектроники.

*Радиоэлектроника* – это значительный по масштабам комплекс наук, который охватывает обширные области человеческого знания. Но главное, чем занимается радиоэлектроника как наука – это изучение способов передачи, приема и преобразования информации с помощью радиосигналов. Достижения радиоэлектроники в настоящее время широко используют в бытовой и военной технике, медицине, астрономии, химии и даже в экономике, лингвистике и психологии.

Особую роль играет военное применение радиоэлектроники. В интересах обороноспособности страны были созданы сложнейшие радиоэлектронные системы и комплексы, которые нашли широкое применение в радиолокации, радионавигации, радиоуправлении, связи и многих других областях техники. Радиоэлектронные средства составляют техническую основу всех современных систем управления войсками и оружием.

Обнаружение воздушных, водных и наземных целей на больших расстояниях, наведение с высокой точностью управляемых ракет на цели, разведка и наблюдение за полем боя, дистанционное зондирование земли с авиационно-комических носителей, спутниковая связь и навигация, обеспечивающие непрерывное управление войсками – всё это и многое другое составляет успехи радиоэлектронной техники сегодняшнего дня на передовых рубежах военнотехнического развития страны.

Термин «*радиоэлектроника*» появился в нашей стране в середине прошлого века. К этому времени достигшая наивысшего подъёма *радиотехника* стала постепенно исчезать с газетных страниц и из названий научных книг. Взамен неё появился другой термин – «радиоэлектроника». В том, что произошла именно замена слов, сомневаться не приходилось: те достижения, которые раньше приписывались радиотехнике, теперь относились на счёт радиоэлектроники. Ответственность за это в полной мере взял на себя академик А.И. Берг, роль которого в становлении и популяризации новой технической дисциплины огромна: «По существу, современная радиоэлектроника является комплексом наук. Она связана с радиофизикой, радиолокацией и многими другими областями применения радиотехнических методов. У этих отраслей есть родственная связь: все они имеют дело с электромагнитными волнами и электронными процессами в их практическом применении». Таким образом, объединение двух разделов науки – радиотехники и электроники – дало жизнь но-

вой дисциплине, на долгие годы определившей облик научно-технической мысли современного общества.

Радиотехника как определяющая часть радиоэлектроники связана с изучением электромагнитных колебаний радиодиапазона и методов генерации, усиления, преобразования, излучения и приёма радиосигналов. Кроме того, она включает в себя проектирование и изготовление радиоаппаратуры для приёма, передачи и обработки информации.

Второй составной частью термина «радиоэлектроника» является собственно электроника, обеспечивающая по современной терминологии элементную базу радиоэлектроники. Вместе с тем электроника сама по себе в XX в. стала значительной по масштабам отраслью науки и техники.

Другим термином, часто применяющимся совместно с радиоэлектроникой, является *радиофизика*. Это раздел физики, в котором изучаются электромагнитные волны радиодиапазона. Радиофизика обеспечивает радиотехнику методами, необходимыми для разработки антенн, приемников, передатчиков и т. д. Радиофизика сформировалась в 1930-1940-е гг. благодаря бурному развитию радиотехники (основоположники в нашей стране Л.И. Мандельштам и Н.Д. Папалекси). Появление радиолокации и радионавигации потребовало освоения новых диапазонов волн и разработки общих физических принципов генерирования, излучения, приема и обработки радиосигналов.

В настоящее время элементная база, технические устройства, главным образом крупномасштабные и сложные радиоэлектронные системы, пользуются достижениями радиофизики и информатики. Для симбиоза этих наук в последние годы придумана концептуальная база – *радиоинформатика* – в результате радиоэлектронная аппаратура и программное обеспечение развиваются и совершенствуются совместно.

Чтобы окончательно обозначить место радиоэлектроники в перечне технических наук, стоит обратиться к мнению академика А.Л. Минца. В 1974 г. в

журнале «Известия вузов. Радиотехника» он опубликовал статью «Радиотехника, радиофизика, радиоэлектроника». В этой статье А.Л. Минц указал на то, что радиоэлектроника перекрывает многие разделы радиотехники и радиофизики. В заключение академик отметил: «Границ, разделяющих радиотехнику, радиофизику и радиоэлектронику, не существует или они крайне условны и расплывчаты. В зависимости от научных интересов и личных склонностей учёных они могут причислять себя к специалистам по технике, физике и электронике. Это определяется не сутью различий этих наук, а либо вкусом учёных, либо характером основного рода их деятельности».

Таким образом, радиоэлектронике следует отвести промежуточное положение между науками фундаментального профиля (радиофизика, физика твёрдого тела, механика) и техническими науками (электротехника, радиотехника). Разумеется, такое деление различных отраслей науки является в достаточной степени условным из-за того, что они во многом пересекаются, взаимно проникают друг в друга, обогащая соседние области и идеями, и их техническими реализациями.

В общем случае информационная радиоэлектронная система (рисунок 1.1) содержит источник информации *ИИ* (в частных случаях может отсутствовать), канал передачи сигналов *ПРД*, линию связи *ЛС*, источник помех  $n(t)$ , приёмный канал *ПРМ*, получатель информации *ПИ*. Назначение канала передачи информации состоит в преобразовании сообщений источника *ИИ* в ту физическую форму, которая необходима для передачи в канале. Именно этот канал обеспечивает передачу информации на расстояние. Как правило, для радиоэлектронных систем сигналы в канале имеют вид электрических колебаний.

Каждый функциональный блок в системе характеризуется своим оператором преобразования  $L_i(x_i) = x_i + 1$ , где  $x_i$  – сигнал на входе блока,  $x_i + 1$  – на выходе блока,  $L_i$  – оператор преобразования блока. Надо понимать, что сигналы  $x_i$  – это колебания во времени.

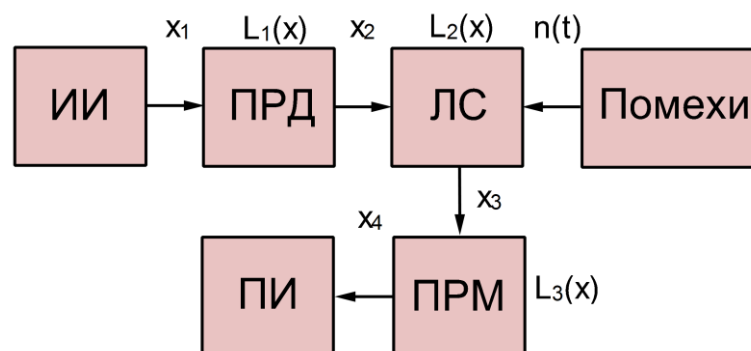


Рисунок 1.1 – Структура системы передачи информации

*ИИ* – источник информации; *ПРД* – канал передачи сигналов;

*ЛС* – линия связи; *ПРМ* – приемный канал; *ПИ* – получатель информации

Сигналы, применяемые в передающих каналах, классифицируют по различным признакам.

1. По признаку времени действия: *непрерывные* сигналы и *импульсные*. Для непрерывных сигналов время их действия  $t_u \geq T_n$  – времени наблюдения. При импульсных сигналах обычно  $t_u \ll T_n$ .

2. По признаку расположения спектра на оси частот различают: низкочастотные сигналы (*видеосигналы*), спектр частот которых примыкает к частотам, близким к нулю (речевые сигналы, сигнал изображения в аналоговом телевидении), и высокочастотные сигналы, в которых ширина спектра частот  $\Delta\omega$  много меньше средней (несущей) частоты  $\omega_0$ : такие сигналы именуют *радиосигналами*. Обычно низкочастотные сигналы являются в радиоэлектронных системах исходными, модулирующими высокочастотное несущее колебание. Под *модуляцией* понимают процесс наложения исходного сообщения (например, речи или телевизионного изображения) на радиосигнал.

Спектр частот радиосигнала характеризуют:

- частота несущей  $f_0$ ;
- допустимая абсолютная нестабильность частоты несущей  $\Delta f_0$ ;
- допустимая относительная нестабильность частоты несущей  $\delta f = \Delta f_0 / f_0$ ;



- занимаемая полоса частот;
- ширина зоны внеполосных излучений.

Точность, с которой фиксируется положение спектра радиосигнала на оси частот, определяется нестабильностью несущей частоты  $\Delta f_0$ . Обычно задают требования на допустимую относительную нестабильность частоты.

Под занимаемой полосой частот обычно понимают интервал между нижней  $f_n$  и верхней  $f_v$  частотами, в котором сосредоточено 99% мощности сигнала.

3. По признаку представления параметра сигнала различают: *непрерывные* и *дискретные* сигналы. В непрерывных сигналах параметр сигнала (мгновенное значение, амплитуда, частота, фаза и т.д.) может принимать любое значение в пределах динамического диапазона изменений параметра. В дискретных сигналах параметр принимает только ряд установленных значений в пределах динамического диапазона, число которых, следовательно, счётно.

4. По признаку характера кодирования сигналов различают: *аналоговые* сигналы и *цифровые*. Аналоговые сигналы повторяют форму сигнала источника *ИИ* (например, в микрофоне). Цифровые сигналы представляют мгновенные значения сигнала в форме числа в некоей системе счисления (обычно это двоичная система). Тогда форма цифрового сигнала имеет вид импульсов (0 или 1), расположенных в пределах тактовых интервалов (разрядов числа). Далее разрядные импульсы модулируют несущую.

5. По степени достоверности различают: *детерминированные* сигналы, форма и параметры которых полностью известны, и *случайные* сигналы, параметры и форма которых известна только с некоторой степенью достоверности (вероятности).

Общими параметрами сигналов являются: длительность  $t_u$ , ширина спектра  $\Delta F$ , динамический диапазон  $D = 10 \lg(P_{\max}/P_{\min})$  и пик-фактор  $K_{\Pi} = 10 \lg(P_{\max}/P_{cp})$ , где  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  — его максимальная и минимальная мгновенная

венные мощности соответственно, а  $P_{cp}$  – средняя мощность. На основе их вводят обобщенный параметр сигнала – базу:  $B = t_u \Delta F$ . Если база  $B \approx 1$ , то сигнал именуют *простым*, если  $B \gg 1$  – *сложным*.

Способами описания сигналов являются: временной (колебания во времени), спектральный (в форме рядов Фурье, интегралов Фурье и подобных), вероятностный (статистический) для описания моделей случайных сигналов в форме усреднённых параметров и характеристик (среднестатистических значений уровней и мощностей сигналов, энергетических спектров, корреляционных функций), а также в форме законов распределения вероятностей мгновенных значений сигналов.

Радиосигнал может быть представлен рядом аналитических моделей. Первая модель имеет вид:

$$s(t) = A(t) \cos \psi(t) = A(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t) + \varphi_0], \quad (1.1)$$

где  $\psi(t)$  – полная фаза сигнала;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – круговая частота;  $f_0$  – несущая частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза;  $A(t)$  и  $\varphi(t)$  – законы амплитудной и фазовой модуляции соответственно, при этом мгновенная частота сигнала определяется как производная от полной фазы:

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt}. \quad (1.2)$$

Функции  $A(t)$  и  $\varphi(t)$  – относительно медленно меняющиеся функции, которые несут информацию о передаваемом в радиосистеме сигнале. Таким образом, при модуляции можно управлять всего двумя параметрами несущего колебания: амплитудой и полной фазой. При управлении только амплитудой получают амплитудную модуляцию, при управлении полной фазой – угловую модуляцию (фазовую и частотную). При управлении и амплитудой, и полной фазой можно получить все известные виды модуляции.

Вторая модель может быть получена, если преобразовать (1.1) к виду:

$$s(t) = A(t)\cos(\omega_0 t)\cos\varphi(t) - A(t)\sin(\omega_0 t)\sin\varphi(t). \quad (1.3)$$

Таким образом сигнал представляется в виде разности двух модулированных колебаний с несущими  $\cos(\omega_0 t)$  и  $\sin(\omega_0 t)$ , сдвинутыми друг относительно друга на  $90^\circ$ . Амплитудные функции равны  $A(t)\cos\varphi(t)$  и  $A(t)\sin\varphi(t)$ . Обозначив эти функции как  $a(t)$  и  $b(t)$ , можно перейти к уравнению:

$$s(t) = a(t)\cos(\omega_0 t) - b(t)\sin(\omega_0 t). \quad (1.4)$$

Такое представление сигнала называют квадратурным, а способ модуляции квадратурной амплитудной модуляцией (QAM – Quadrature Amplitude Modulation). В частности, такая модуляция получила широкое распространение при передаче цифровой информации. Используется она, например, и в системах 5G.

*Третья модель* имеет вид:

$$\dot{s}(t) = A(t)e^{j(2\pi f_0 t + \varphi(t) + \varphi_0)} = \dot{S}(t)e^{j2\pi f_0 t}, \quad (1.5)$$

где  $\dot{S}(t) = A(t)e^{j(\varphi(t) + \varphi_0)}$  – комплексная амплитуда (огибающая) сигнала.

Несущая частота  $f_0$  в (1.5) не влияет на форму сигнала, она только смещает его спектр по оси частот. Форма сигнала зависит только от функций  $A(t)$  и  $\varphi(t)$ . Начальную фазу  $\varphi_0$  обычно опускают.

Сигнал  $\dot{S}(t)$  является комплексным, с изменяющимися во времени амплитудой и фазой, причем изменение амплитуды сигнала  $\dot{S}(t)$  полностью совпадает с изменением амплитуды радиосигнала  $s(t)$ , а изменение фазы полностью совпадает с изменением фазы радиосигнала  $s(t)$ . Однако отсутствие множителя  $e^{j2\pi f_0 t}$  говорит о том, что сигнал  $\dot{S}(t)$  представляет собой перенесенный на нулевую частоту комплексный сигнал  $\dot{s}(t)$ . Комплексная огибающая сигнала существенно упрощает анализ сигнала.

Для ряда математических преобразований при обработке сигналов во многих приложениях радиоэлектроники удобно представлять сигнал  $s(t)$  в виде

$$s(t) = \operatorname{Re}\{\dot{s}(t)\}, \quad (1.6)$$

то есть физически существующий сигнал (1.1) является реальной частью комплексного сигнала (1.5). Так, например, в радиолокации высокочастотное заполнение, используемое как переносчик информации о цели по радиолокационному каналу, исключается после приема операцией детектирования сигнала. Описание процессов в радиолокации с помощью комплексных огибающих, а не самих радиосигналов, удобнее, поскольку оно не связано с тригонометрическими преобразованиями.

Как известно, любое комплексное число можно представить в виде точки на комплексной плоскости или вектора, выходящего из 0 до этой точки (рисунок 1.2а), а комплексный сигнал можно трактовать как комплексную функцию времени, то есть вектор, который описывает на комплексной плоскости некоторую траекторию в течение времени.

Таким образом, геометрической интерпретацией сигнала в форме (1.5) является вектор длиной  $A(t)$ , вращающийся против часовой стрелки с угловой скоростью (рисунок 1.2б)

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega(t), \quad (1.7)$$

где  $\Delta\omega(t)$  – закон частотной модуляции, определяемый выражением

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (1.8)$$

Проекции этого вектора на оси координат являются действительной и мнимой частями сигнала в форме (1.5), то есть

$$\dot{s}(t) = \operatorname{Re}\{\dot{s}(t)\} + j \operatorname{Im}\{\dot{s}(t)\}. \quad (1.9)$$

Данные составляющие обычно называют квадратурными.

Комплексная амплитуда  $\dot{S}(t)$  может быть выражена вектором с соответствующими квадратурными составляющими:

$$\dot{S}(t) = \operatorname{Re}\{\dot{S}(t)\} + j \operatorname{Im}\{\dot{S}(t)\}. \quad (1.10)$$

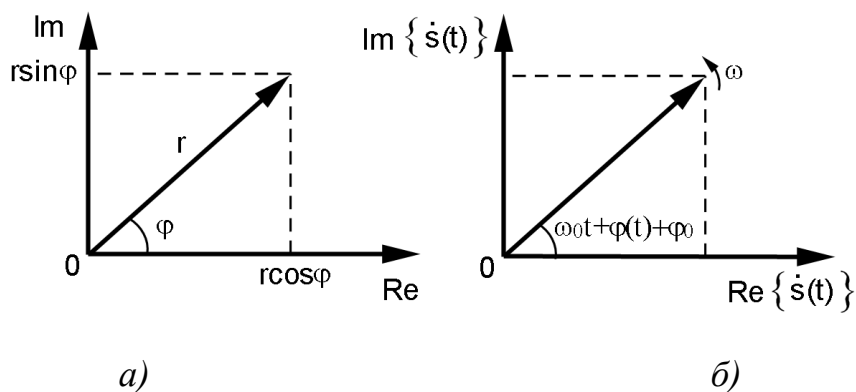


Рисунок 1.2 – Вектор на комплексной плоскости (а) и геометрическая интерпретация радиосигнала в комплексной форме (б)

Когда комплексная огибающая  $\dot{S}(t)$  является действительной функцией времени, сигнал  $s(t)$ , согласно (1.5), записывается в виде

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_0 t) \cos \varphi(t). \quad (1.11)$$

В общем же случае комплексная огибающая может быть представлена как

$$\dot{S}(t) = I(t) + jQ(t) = A(t) \cos \varphi(t) + jA(t) \sin \varphi(t), \quad (1.12)$$

где  $I(t)$  и  $Q(t)$  – *синфазная (in-phase)* и *квадратурная (quadrature)* составляющие. При этом

$$A(t) = |\dot{S}(t)|. \quad (1.13)$$

Из выражений (1.12) и (1.13) следует, что

$$\begin{aligned} A(t) &= \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}, \\ \varphi(t) &= \operatorname{arctg} \frac{Q(t)}{I(t)}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Если комплексная огибающая  $\dot{s}(t)$  содержит и действительную  $I(t)$ , и мнимую  $Q(t)$  составляющие, то  $\varphi(t)$  является произвольной функцией времени и, следовательно, сигнал  $s(t)$  будет обладать угловой модуляцией.

Вообще синфазная и квадратурная составляющие меняются в соответствии с законом модуляции. При амплитудной модуляции варьируется длина вектора  $r$ , а его фазовый угол  $\varphi$  остается постоянным. При фазовой модуляции происходит обратное: длина вектора  $r$  постоянна, фазовый угол  $\varphi$  меняется (то есть вектор вращается).

Окончательно радиосигнал  $s(t)$  через квадратурные составляющие может быть представлен как

$$s(t) = \operatorname{Re}\{\dot{s}(t)\} = I(t)\cos(\omega_0 t) + Q(t)\sin(\omega_0 t). \quad (1.15)$$

Поскольку исходный модулирующий сигнал является низкочастотным, то формирование комплексной огибающей обычно производят в цифровом виде.

В радиолокации широко используют импульсные радиосигналы в качестве зондирующих. Их делят на радиоимпульсы без внутриимпульсной модуляции и радиоимпульсы с внутриимпульсной модуляцией (частотной или фазовой). Первые из указанных зондирующих сигналов относят к простым сигналам, а вторые – к сложным.

Радиоимпульсы без внутриимпульсной модуляции обычно представляют собой колебания, промодулированные только по амплитуде. Наиболее широко в радиолокации используют прямоугольные радиоимпульсы. Математически они записываются таким образом:

$$s(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.16)$$

где

$$A(t) = \begin{cases} A_0, & |t| \leq t_u, \\ 0, & |t| > t_u, \end{cases} \quad (1.17)$$

где  $t_u$  – длительность радиоимпульса, а  $A_0$  – постоянная амплитуда. Последнее выражение может быть записано также как  $A(t) = \text{rect}(t/t_u)$ .

Широкое применение в радиолокации нашли и так называемые пачки радиоимпульсов:

$$s(t) = \sum_{k=1}^M A_k [t - (k-1)T] \cos \{2\pi f_0 t + \varphi_k(t) + \varphi_{0k}\}, \quad (1.18)$$

где  $A[\cdot]$ ,  $\varphi_k(t)$  – функции, определяющие соответственно законы амплитудной и фазовой модуляции отдельного радиоимпульса пачки;  $T$  – период повторения радиоимпульсов;  $M$  – число радиоимпульсов в пачке;  $\varphi_{0k}$  – начальная фаза  $k$ -го радиоимпульса.

Если начальная фаза радиоимпульсов  $\varphi_k$  в пачке постоянная или изменяется по известному закону, то такую пачку называют *когерентной*.

В большинстве современных радиолокационных систем применяют линейно частотно модулированные (ЛЧМ) зондирующие радиоимпульсы с прямоугольной огибающей. Комплексная огибающая таких сигналов может быть описана как

$$\dot{S}(t) = A(t) \exp \left( j \frac{\pi \Delta f_o t^2}{t_u} \right), \quad |t| \leq \frac{t_u}{2}, \quad (1.19)$$

где  $\Delta f_o$  – девиация частоты, численно равная ширине спектра  $\Delta F$  радиоимпульса, а  $A(t) = \text{rect}(t/t_u)$ .

Выше было отмечено, что сигналы могут иметь случайный характер. Случайными параметрами подчас выступают и амплитуда, и фаза, и частота, и время поступления сигнала. Поэтому в таких случаях различают сигналы: со случайной амплитудой, случайной начальной фазой, случайным временем и т.д.

В радиоканалах всегда присутствуют помехи, шумы, которые искажают сигналы и борьба с которыми является вечной задачей радиотехники. Помехи и

шумы имеют случайный характер и описываются вероятностными, статистическими моделями. По характеру воздействия на полезный сигнал помехи  $n(t)$  делят на аддитивные и мультипликативные.

Аддитивная помеха  $n(t)$  суммируется с полезным сигналом:  $S(t) = s(t) + n(t)$ , мультипликативная  $N(t)$  множится на сигнал:  $S(t) = N(t)s(t)$ . В общем случае может быть одновременно и то и другое:  $S(t) = N(t)s(t) + n(t)$ .

Итак, источник модулированных тем или иным образом сигналов для радиоэлектронных систем того или иного назначения (связных, телевизионных, радиолокационных, радионавигационных и т. д.), пригодных для передачи по радиоканалу, называют *радиопередающим* устройством (РПДУ), или радиопередатчиком (в англоязычной научно-технической литературе – *transmitter*).

## 1.2 Место и функции РПДУ в радиоэлектронных системах

Итак, РПДУ служат для генерирования, модуляции и усиления по мощности высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний, подводимых к антенне и излучаемых в пространство. Следует отметить, что эти колебания могут быть использованы либо в информационных (чаще всего на практике), либо в энергетических целях (например, в электромагнитном оружии).

Устройства формирования колебаний, используемые в РПДУ, делят на два больших класса: генераторы с внешним возбуждением (ГВВ) и генераторы с самовозбуждением, или автогенераторы (АГ). ГВВ – источник электрических колебаний, создающий их под воздействием колебаний другого, обычно менее мощного ГВВ или АГ. В обоих случаях выходное электрическое колебание с той или иной мощностью формируется за счет преобразования энергии источника электропитания (рисунок 1.3).



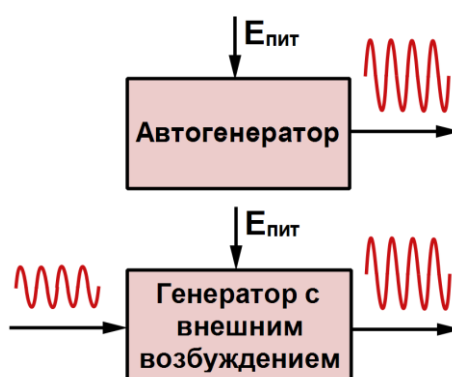


Рисунок 1.3 – К иллюстрации различия между автогенератором и ГВВ

Как правило, РПДУ служат для передачи информации в рамках определенной радиоэлектронной системы. К их числу относят системы звукового и телевизионного радиовещания, радиосвязи, радионавигации, радиолокации, радиоуправления, радиоэлектронной борьбы и некоторые другие. В зависимости от назначения радиоэлектронной системы применяют тот или иной тип РПДУ.

В некоторых случаях РПДУ служат не для передачи информации как таковой. Например, они находят применение:

- при обеспечении различных технологических процессов в промышленности: плавки металлов, нагреве металлических деталей, нагреве диэлектрических и полупроводниковых материалов и деталей из них с целью сушки, химических и физических превращений и т. д.;

- при проведении агротехнических мероприятий в сельском хозяйстве: сушки зерна, облучения семян для улучшения их всхожести и уничтожения вредителей, облучение посевов для повышения их биологической активности;

- для осуществления лечебных мероприятий в медицине (прогрев внутренних органов и высокочастотная терапия), выполнение сложных хирургических операций;

- для проведения экспериментов и осуществления технологических процессов в ядерной физике и технике электропитания электродов ускорителей заряженных частиц, нагрева плазмы и т. д.

### 1.3 Основные этапы развития техники и теории РПДУ

Исторически появление РПДУ как составной части радиоэлектронной системы связано с открытием радио.

У истоков радио стоят два человека: русский ученый Александр Степанович Попов (1859-1906) и итальянский изобретатель Г. Маркони (1874-1937). Но кто из них все же первым передал на расстояние информацию с помощью электромагнитных волн, распространяющихся в свободном пространстве, или, как было принято говорить, с помощью беспроволочного телеграфа?

Прежде всего, необходимо подчеркнуть, что радио возникло на основе экспериментально-теоретических исследований и технических разработок в области электричества и магнетизма, сделанных в XIX в. Одновременно с этим широко развивалась теория и практика проводной электросвязи, в которую русские учёные (П.М. Голубицкий, П.Л. Шиллинг, Б.С. Якоби и многие другие) внесли заметный вклад.

Начало проводной электросвязи можно отсчитывать с 1832 г., когда русским ученым П.Л. Шиллингом был создан первый в мире электромагнитный телеграфный аппарат. В 1837 г. электромагнитный аппарат в США запатентовал С. Морзе. Система Морзе быстро завоевала популярность во всем мире. Большой заслугой Морзе является изобретение весьма эффективного неравномерного телеграфного кода (код Морзе).

Важным для начального периода развития проводной электросвязи явилась установленная немецким ученым К. Штейнгейлем в 1838 г. возможность осуществлять телеграфную связь по линии, имеющей только один провод, в качестве второго использовалась земля. Примечательно, что К. Штейнгель пытался создать беспроволочный телеграф с использованием одной только земли. Однако его опыты успеха не имели.

Более успешными были опыты С. Морзе. В 1842 г. он расположил телеграфные аппараты на разных берегах Вашингтонского канала и, соединив их

проложенными по дну канала двумя изолированными и разнесенными далеко друг от друга проводами, разрубил оба провода, оставив их оголенные концы в воде. Несмотря на разрыв металлической цепи, возможность телеграфирования сохранилась. Дальность связи составила до 1,6 км.

В 1880 г. в США Дж. Трубридж повторил подобный же опыт, используя для телеграфирования в передатчике электрическую батарею с прерывателем и изобретенный к тому времени телефон в приемнике. Благодаря высокой чувствительности телефона надежное телеграфирование оказалось возможным на довольно значительное расстояние. В этой системе телефон был впервые применен для приема телеграфных сигналов. Позже прием телеграфных сигналов на слух использовался многими другими изобретателями беспроводных систем связи.

В этом же году в США А. Долбей разработал систему телеграфа, основанного на электрической индукции. В качестве приемника также применялся телефон, а на приемной и передающей линии связи использовались высокоподнятые пластины, соединенные через электрические батареи с землей. По сути это были антенны. В 1883 г. Долбей получил на свою систему патент. В начале своих экспериментов Долбей добился передачи сигналов на расстояние около 350 м, а много позже ему удалось увеличить это расстояние до 18 км. Однако к этому времени уже были созданы радиосистемы, с которыми его система конкурировать не могла.

В 1885 г. Т. Эдисон со своими помощниками разработал, а в 1891 г. запатентовал беспроволочный телеграф, действовавший на принципе электрической индукции для связи между берегом и кораблем, а также – на принципе магнитной индукции для связи движущегося поезда со станциями. Передатчик Эдисона состоял из индукционной катушки, первичная обмотка которой была соединена с телеграфным ключом, а вторичная – с поднятыми высоко над зем-

лей или водной поверхностью большими металлическими пластинами (антеннами).

В России в 1899 г. подполковник инженерных войск Е. Пилсудский также создал систему связи без проводов через водные препятствия, используя для передачи сигналов токи от высоковольтной катушки Румкорфа. Его система получила некоторое применение для ближней связи в Первую мировую войну.

Все описанные выше опыты проводились в зоне индукции, в которой напряженность поля убывает с увеличением расстояния по квадратичному закону. Поэтому протяженность таких индукционных линий беспроводной связи была небольшой.

Вместе с тем было понятно, что увеличение ёмкости линий телефона и телеграфа не поспевает за стремительно возрастающими потребностями абонентов. Жизнь настоятельно требовала создания нового средства связи.

Первым на долгой дороге, которая привела к изобретению радио, был датчанин Г. Эрстед. В 1820 г. он показал, что вокруг проводника с электрическим током возникает электрическое поле. Спустя одиннадцать лет англичанин М. Фарадей доказал, что магнитное поле порождает электрический ток. Теоретическую базу создал к 1873 г. англичанин Д. Максвелл, опубликовав свою электродинамическую теорию («Трактат по электричеству и магнетизму»), в которой говорилось, что изменяющиеся электрические и магнитные поля, взаимно порождая друг друга, образуют единое переменное электромагнитное поле – электромагнитную волну. Как следствие, из составленных Д. Максвеллом уравнений следовал вывод о возможности распространения электромагнитных волн в свободном пространстве со скоростью света.

Вместе с тем уже в 1872 г. в одной из своих лекций американец М. Лумис утверждал, что в будущем, на основании научных знаний, станет возможным, используя неиссякаемый источник атмосферного электричества, не только посылать сообщения с одного континента на другой без использования кабеля, но

и изменять климат на Земле. В том же году ему был выдан первый в мире патент на систему беспроводного телеграфа (№129971 USA), а в 1873 г. М. Лумис создал первую в мире компанию беспроводной связи «Loomis Aerial Telegraph Co». Исторической справедливости ради следует подчеркнуть, что идея Лумиса не нашла тогда своего практического применения. Необходимо было время для осмысления его идеи не только в философском, но и технологическом плане, то есть готовности изобретателя представить обществу оборудование, реально воплощающее в жизнь декларируемые возможности.

Примечательно, что М. Лумис по профессии был дантистом. В своих опытах он опирался на результаты многочисленных исследований физических явлений, связанных с атмосферным электричеством, выполненных предыдущими поколениями ученых. Любопытно, что свои эксперименты М. Лумис начал тогда, когда еще не было ясного представления о природе электромагнитного поля. М. Лумис, конечно же, не имел представления и о теории Максвелла.

Радиоволны, пригодные для связи, впервые сумел получить немецкий физик Г. Герц только в 1888 г. Исследования его были фундаментальны, но широкого практического применения своего открытия он так же не разглядел.

Сущность опытов Герца состояла в следующем. К двум латунным стержням с малым зазором подключалась индукционная катушка, создающая высокое напряжение (рисунок 1.4). Когда это напряжение превышало напряжение пробоя, в зазоре проскакивала искра – и происходило возбуждение электромагнитных колебаний с длиной волны  $\lambda$ , равной примерно  $2L$ . Излученные колебания регистрировались на расстоянии в несколько десятков метров, что неопровержимо доказывало распространение электромагнитных волн. Герцем была получена минимальная длина волны  $\lambda = 60$  см (частота  $f = 500$  МГц) при  $L = 26$  см.

В дальнейшем устройство, приведенное на рисунке 1.4, получило название осциллятор Герца. В современном представлении этот осциллятор есть от-

крытый колебательный контур, в котором при возбуждении его искровым способом возникают затухающие колебания, излучаемые в пространство. Осциллятор Герца является прототипом современного полуволнового вибратора, используемого в качестве простейшей антенны.

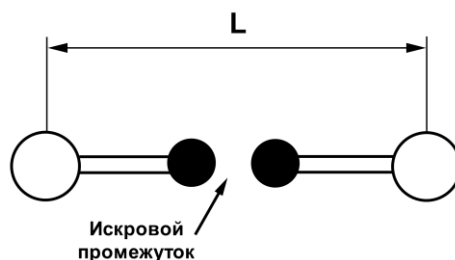


Рисунок 1.4 – Осциллятор Герца

В 1891 г. американец сербского происхождения Н. Тесла разработал и сконструировал устройство, названное им «резонанс-трансформатором». Оно предназначалось для передачи на расстояние электрической энергии без помощи проводов. Спектр сигнала в нем ограничивался за счет применения резонансных цепей. Сам Н. Тесла не предполагал использовать «резонанс-трансформаторы» для беспроводной связи. Несколько позже он даже признавался, что его больше интересует беспроводная передача энергии на большие расстояния и меньше – решение вопросов связи, хотя идею «телеграфа без проводов» он не отвергал и понимал, что её можно реализовать путём переноса электромагнитных колебаний.

Н. Тесле принадлежат многие пионерские изобретения, нашедшие применение в радиотехнике в первый период ее развития. Он был, видимо, первым, кто с самого начала отчетливо понимал значение применения резонансных электрических цепей в беспроводной связи и широко использовал их при разработке устройств передачи радиосигналов. Им были предложены такие важные элементы первых радиосистем, как резонанс-трансформатор, дуговые генераторы и электрические машины, вырабатывающие высокочастотные колебания.

В лекции «О световых и других высокочастотных явлениях», прочитанной в 1893 г., Н. Тесла совершенно точно указал на возможность осуществления беспроводной связи: «Я хотел бы сказать несколько слов о предмете, который все время у меня на уме и который затрагивает благосостояние всех нас. Я имею в виду передачу осмысленных сигналов и, быть может, даже энергии на любое расстояние без помощи проводов. С каждым днем я все более убеждаюсь в практической осуществимости этой схемы... Мое убеждение установилось так прочно, что я рассматриваю этот проект передачи энергии или сигналов без проводов уже не просто как теоретическую возможность, а как весьма серьезную проблему электротехники, которая должна быть решена со дня на день».

Другое важное изобретение, позволившее заметно повысить излучаемую в пространство энергию сигнала и увеличить дальность линии беспроводной связи, было сделано в 1899 г. немецким физиком Брауном. В устройстве Брауна разрядник был помещен в замкнутый колебательный контур, с которым антенна связывалась индуктивно при помощи высокочастотного трансформатора.

Одной из важнейших задач, которую было необходимо решить для того, чтобы беспроводная передача сигналов стала реальностью, было повышение чувствительности устройства, регистрирующего радиоволны. Чувствительность человеческого глаза визуально обнаруживать прием радиосигнала, как это делал Г. Герц, наблюдая в темной комнате за появлением искр в резонаторе своего приемника, была совершенно недостаточной. Такой метод обнаружения радиосигнала позволял обнаруживать его лишь на расстоянии не более 10 м от излучателя.

В 1891 г. французский ученый Э. Бранли опубликовал статью, сыгравшую исключительно важную роль в изобретении радио. В ней он описал открытый им эффект существенного снижения сопротивления железных опилок, заполнявших стеклянную трубку, при воздействии на нее импульса электро-

магнитного излучения. Трубка Э. Бранли оказалась весьма чувствительным индикатором действия электромагнитных волн. Ее особенностью было то, что после окончания действия электромагнитного импульса она теряла свою чувствительность – и для ее восстановления ее необходимо было встряхнуть.

Исключительно важные для развития беспроводной связи эксперименты в 1894 г. выполнил британский физик О. Лодж. Он усовершенствовал экспериментальную установку Г. Герца, применив в ней для регистрации радиоволн прибор, созданный Э. Бранли и усовершенствованный им сами, дав ему название «когерер». Работы О. Лоджа явились для многих физиков стимулом для развертывания исследований по созданию систем беспроводной связи. В их числе были А.С. Попов и Г. Маркони.

В 1889 г. на Кроштадском морском собрании преподаватель минного офицерского класса А.С. Попов заявил: «Человеческий организм не имеет ещё такого органа чувств, который замечал бы электромагнитные волны в эфире; если бы изобрести такой прибор, который заменил бы нам электромагнитные чувства, то его можно было бы применять к передаче сигналов на расстояние». Спустя несколько лет прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний – первый в мире радиоприёмник – был им придуман и собран.

Демонстрация прибора в действии состоялась 7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге, где А.С. Попов выступил с докладом «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». В качестве источника электромагнитных колебаний А.С. Попов использовал вибратор Герца, а для увеличения дальности приёма электромагнитных волн в приёмнике использовалась антенна в виде куска металлического провода. Патент на конструкцию приёмника (грозоотметчика) А.С. Попов оформлять не стал.

Специальным декретом Совнаркома, который был подписан И.В. Сталиным 2 мая 1945 г., день 7 мая был установлен в СССР ежегодным Днем Радио.



Отчет о знаменательном заседании с описанием доклада и эксперимента А.С. Попова был опубликован в журнале общества в августе 1895 г. и январе 1896 г. Свой отчет А.С. Попов кончает следующими словами: «В заключение я могу выразить надежду, что мой прибор, при дальнейшем усовершенствовании его, может быть применен к передаче сигналов на расстоянии при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающих достаточной энергией».

Уже 24 марта 1896 г. А.С. Попов помимо радиоприемника продемонстрировал и созданный им искровой радиопередатчик, передав из одного здания в другое азбукой Морзе первую в мире радиотелеграмму. Текст ее был краток: «Генрих Герц».

В 1897 г. при испытаниях на кораблях дальность связи с помощью аппаратов Попова достигла 5 км, а к 1900 г., во время спасательных работ севшего на камни корабля в Балтийском море, она возросла до 47 км.

Как выдающийся ученый и изобретатель, А.С. Попов получил широкое признание не только в России, но и в Европе. Летом 1900 г. на Всемирном электротехническом конгрессе в Париже профессором М.А. Шателеном был зачитан доклад А.С. Попова «Непосредственное применение телефонного приемника в телеграфии». Таким образом был отмечен вклад Попова в изобретение беспроводного телеграфа, а ему были вручены Золотая медаль и почетный диплом. В этом же году он был избран членом Французского физического общества.

После возвращения в Петербург Попов был представлен к награждению орденом Станислава 2-й степени, как получивший «...общее уважение и вполне заслуженную славу прекрасного профессора и серьезного ученого».

В 1895 г. сообщение о работах А.С. Попова поступило в Италию в университет города Болонья, и с ними познакомился профессор А. Риги. В то же время лекции А. Риги по физике и приёму электромагнитных возмущений по-

сещал Г. Маркони, который в 1896 г. подал в Англии заявку на патент «Усовершенствования в передаче электрических импульсов и сигналов и в аппаратуре для этого». В 1897 г. заявку утвердили и выдали патент, несмотря на то, что в нём были описаны методы, использованные ранее другими экспериментаторами (в первую очередь, Н. Теслой), и инструменты, похожие на те, которые ранее демонстрировали другие (в частности, А.С. Попов).

Еще в юношеские годы Г. Маркони решил стать не только великим изобретателем, но и богатым человеком. Вот что он говорил о себе в зрелом возрасте: «Я никогда не изучал физики и электротехники систематически, хотя еще мальчиком я очень интересовался этими вопросами. Однако я прослушал полный курс лекций по физике... и я был достаточно хорошо знаком с публикациями того времени, относящимися к научным вопросам, включая также работы Герца, Бранли и Риги».

В 1907 г. Маркони создал крупное акционерное общество «Маркони и К». Маркони в Великобритании зарекомендовал себя не только изобретателем, но и крупным предпринимателем, сумевшим быстро и эффективно внедрить в промышленное производство изобретенные им радиотелеграфные аппараты, приносящие созданной им компании большую прибыль. В 1901 г. с помощью аппаратов Маркони была установлена радиосвязь через Атлантический океан с Америкой, а в 1918 г. – с Австралией. В 1909 г. за изобретение радио Маркони была присуждена Нобелевская премия по физике. За три года до этого события скончался А.С. Попов.

Поскольку Нобелевская премия присуждается только при жизни, то кандидатура А.С. Попова не рассматривалась. Внимательно изучая различные источники, в том числе и такой авторитетный, как «Британская энциклопедия», можно сделать вывод о том, что первым публично продемонстрировал и сделал сообщение о своем изобретении радио А.С. Попов. А вот в деле патентования и

продвижения в промышленное производство созданных им радиотелеграфных аппаратов преуспел Маркони.

Рассмотрим, как был устроен первый в мире радиопередатчик, изобретенный А.С. Поповым. Схема радиопередатчика, приведенная на рисунке 1.5а, включает следующие основные элементы: антенный контур, состоящий из антенны  $A$  и вторичной обмотки индукционной катушки  $L$ , искровой разрядник  $P$ , прерыватель  $\Pi$ , ключ  $K$  и источник постоянного тока  $B$ .

В радиопередатчике А.С. Попова прерыватель  $\Pi$  создавал при нажатом ключе  $K$  импульсы в первичной обмотке индукционной катушки  $L$  (катушки Румкорфа). Высокое напряжение, возникавшее при этом во вторичной обмотке, периодически приводило к электрическому пробое разрядника  $P$  – и в антенном контуре  $A$  возникали затухающие колебания. Таким образом, при нажатом ключе происходило излучение «пачки» радиоимпульсов, каждый из которых имел вид, показанный на рисунке 1.5б.

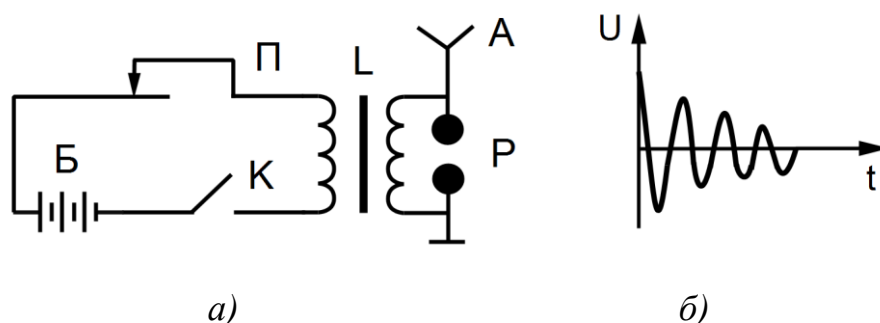


Рисунок 1.5 – Схема (а) радиопередатчика А.С. Попова и форма напряжения на его выходе (б)

Каждый импульс в «пачке» представлял собой затухающий колебательный процесс, описываемый выражением

$$u(t) = Ue^{-\alpha t} \cos \omega t, \quad (1.20)$$

где  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  – частота колебаний;  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $U$  – начальная амплитуда колебания.

Длительность излучаемой «пачки» радиоимпульсов определялась временем нажатия ключа. Более длинная «пачка» соответствовала тире, короткая – точке. Выражаясь современным языком, радиопередатчик Попова работал в режиме амплитудной радиотелеграфии, излучая высокочастотные импульсы согласно азбуке Морзе.

Таким образом, в радиопередатчике А.С. Попова присутствовали все необходимые элементы, обеспечивающие выполнение функций, свойственных РПДУ. Генерация в схеме осуществлялась преобразованием энергии источника постоянного тока в энергию ВЧ колебаний с помощью прерывателя, антенного контура и искрового разрядника, модуляция – с помощью ключа, излучение – посредством штыревой антенны.

Первые искровые радиопередатчики были очень просты по конструкции – излучателем радиоволн служил искровой разряд, а модулятором являлся телеграфный ключ. С помощью такого радиопередатчика информация передавалась в кодированной дискретной форме – например, азбукой Морзе или иным сводом условных сигналов. Недостатками такого радиопередатчика была относительно высокая мощность, требуемая для эффективного излучения радиоволн искровым разрядом, а также очень широкий диапазон (спектр) излучаемых им волн. В результате из-за взаимного влияния одновременная работа нескольких близко расположенных таких радиопередатчиков была практически невозможной.

От режима работы разрядника, помещенного в колебательный контур, существенно зависела мощность искровых РПДУ. Многие изобретатели работали над его усовершенствованием. Одно из первых и наиболее удачных решений этой задачи было предложено Н. Теслой в 1896 г. Он создал вращающийся разрядник, в котором искровой промежуток быстро увеличивался за счет того, что между неподвижными электродами вращался диск с радиальными зубцами, по очереди проходившими вблизи электродов. Разряд происходил всякий раз,

когда зубцы проходили рядом с электродами. Такие радиопередатчики создавали многие фирмы, в том числе фирма Маркони.

Немецким инженером М. Вином в 1906 г. был создан другой «многократный» разрядник, в котором разрядный промежуток был разделен на несколько автономных последовательных включенных зазоров. Он также применялся во многих искровых РПДУ.

В настоящее время условно выделяют четыре этапа развития РПДУ. Этим этапам соответствует применение в РПДУ новых электронных приборов и освоение все более высоких по частоте диапазонов.

*Первый этап* (1896-1920 гг.) включает в себя создание искровых, дуговых и электромашинных радиопередатчиков. Их мощность достигала нескольких киловатт, а частота – 20 кГц. Помимо А.С. Попова среди русских ученых, внесших наиболее весомый вклад в развитие этого направления, следует назвать В.П. Вологодина и М.В. Шулейкина.

Вместе с тем от строительства искровых радиопередатчиков инженеры отказались около 1916 г. С 1912 г. начали применять радиопередатчики с электрической дугой, включенной в колебательный контур. Дуговой радиопередатчик, в отличие от искрового, генерирует незатухающие колебания, то есть позволяет передавать даже голосовой сигнал с амплитудной модуляцией.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) и схема дугового генератора показаны на рисунке 1.6. Дуга представляет собой нелинейное сопротивление, управляемое током. В пределах падающего участка ВАХ сопротивление дуги для переменного тока имеет отрицательный знак. Рабочую точку на этом участке ВАХ можно установить, задав исходный ток, для чего последовательно с дугой включали достаточно большое сопротивление.

Для возбуждения колебаний необходимо включить дугу в колебательный контур (рисунок 1.6б). Если сопротивление, эквивалентное потерям в этом контуре, будет меньше сопротивления дуги для переменного тока малой амплиту-

ды на падающем участке ВАХ, то возникшие в контуре сколь угодно малые колебания, например, за счет тепловой флуктуации электронов, будут нарастать до тех пор, пока за счет верхнего и нижнего изгибов ВАХ дуги ее среднее сопротивление для переменного тока не станет равным сопротивлению контура. Дроссель в схеме служит препятствием для прохождения тока высокой частоты через источник электропитания.

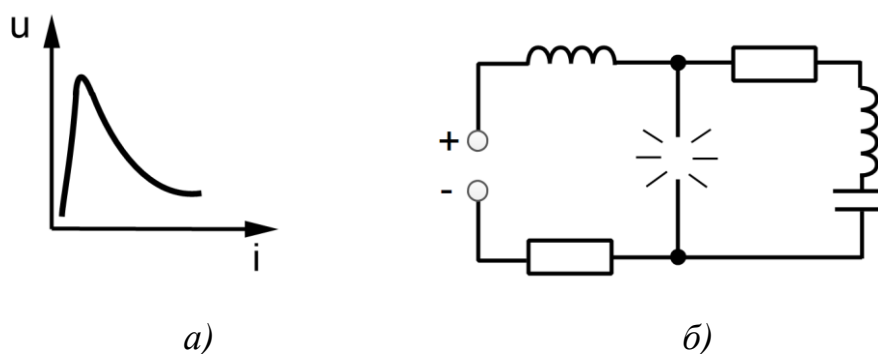


Рисунок 1.6 – ВАХ дуги (а) и схема дугового генератора (б)

Идея создания дугового генератора электрических колебаний была доложена Н. Теслой в лекции, которую он прочел в 1893 г. в институте Франклина в Филадельфии. В 1900 г. англичанин Дуддель построил первый пригодный для связи дуговой высокочастотный генератор. Датским инженером В. Паульсеном в 1902 г. были разработаны дуговые радиопередатчики, получившие широкое применение при создании мощных радиостанций длинных волн. Их мощность доходила до 1000 и более кВт. В России оригинальные мощные дуговые генераторы разрабатывал С.М. Айзенштейн. В 1910 г. по его проекту был построен дуговой радиопередатчик в Севастополе.

Дуговым радиопередатчиком был, например, 100-киловаттный радиопередатчик радиостанции на Шаболовке в Москве, запущенный в действие в феврале 1920 г.

Из-за свойств дугового разряда дуговые генераторы работали только на длинных волнах, получить с их помощью частоту больше 400 кГц было невоз-

можно. Обычно КПД их не превышал 20%, а амплитуда и частота сигнала сильно зависели от параметров радиопередатчика и были нестабильны. Также эти генераторы были капризны в настройке и эксплуатации.

Ещё одним направлением в развитии радиопередатчиков было использование электромашинного генератора переменного тока. Такой генератор позволял получить достаточно стабильные колебания определенной частоты, которую можно изменять, регулируя частоту вращения ротора генератора. Мощность могла достигать десятков и сотен киловатт. Сигнал такого генератора можно модулировать по амплитуде, что позволяет передавать по радио звуковой сигнал. Однако электромашинный генератор практически пригоден для генерации частот не выше десятков килогерц, то есть радиопередатчик может работать только в самом длинноволновом диапазоне.

Патент на электромашинный генератор в 1891 г. получил Н. Тесла. Его мощность составляла около 1 кВт, а частота – 5 кГц. В 1906 г. Р. Фессенденом был создан машинный генератор мощностью 60 кВт, который был использован при создании радиостанции Бронд-Рок, работающей на частоте 50 кГц.

Значительный вклад в развитие радиопередающей техники на основе машинных генераторов внес американский инженер Эрнст Александерсон, разработавший конструкции машинных генераторов с мощностью до 200 кВт. Генераторы Александерсона широко применялись на радиостанциях в США, Англии, Швеции, Польше и в других странах.

В Европе фирмой «Телефункен» выпускались машинные генераторы конструкции Георга фон Арко, имевшие мощность до 400 кВт. Фирма «Маркони» также выпускала машинные генераторы, разработанные ее сотрудником – английским инженером К. Франклиным.

До 1950-х гг. электромашинные радиопередатчики использовали в радиовещании и радиосвязи. Так, в 1925 г. на Октябрьской радиостанции в Ленин-

граде были установлены два генератора мощностью 50 и 150 кВт конструкции В.П. Вологодина.

Изобретение в 1913 г. Мейснером (Германия) электронного генератора и дальнейшее развитие электронных вакуумных ламп позволило усовершенствовать устройство радиопередатчика и устранить недостатки искровых, дуговых и электромашинных систем.

*Второй этап* связан с изобретением электровакуумных приборов – триода, тетрода и пентода. В России первые электровакуумные приборы были созданы в 1914 г. Н.Д. Папалекси для радиопередатчика в Царском Селе. Пригодные для генерации и усиления ВЧ колебаний электровакуумные лампы были разработаны и в Нижегородской радиолaborатории под руководством М.А. Бонч-Бруевича.

В письме М.А. Бонч-Бруевичу в 1920 г. В.И. Ленин писал: «Газета без бумаги и «без расстояний», которую Вы создаёте, будет великим делом. Всяческое и всемерное содействие обещаю Вам оказывать этой и подобным работам».

В период с 1918 по 1926 гг. под руководством М.А. Бонч-Бруевича в Нижегородской радиолaborатории были созданы мощные радиотелефонные радиопередатчики. Первая в стране радиовещательная станция мощностью 12 кВт (длина волны 3200 м), спроектированная М. А. Бонч-Бруевичем, была сооружена в 1922 г. в Москве в районе Вознесенской улицы (ныне ул. Радио) и получила название «Большой Коминтерн». В то время это была самая мощная станция в Европе. А в 1926 г. коллектив радиолaborатории разработал и построил новую радиовещательную станцию мощностью 40 кВт. Станция была перевезена в Москву на Шаболовку и получила название «Новый Коминтерн».

Заслуги Нижегородской радиолaborатории были неоднократно отмечены советским правительством. В 1924 г. ей было присвоено имя В.И. Ленина, а имена теперь всемирно известных учёных М.А. Бонч-Бруевича, А.М. Кутушева,



В.В. Татаринова, О.В. Лосева и А.А. Пистолькорса навсегда были вписаны в славную историю отечественной радиотехники.

Ламповые радиопередатчики, мощность которых непрерывно наращивалась, достигнув нескольких сотен киловатт, полностью вытеснили искровые. В них стало возможно осуществить любой вид модуляции, работу на любой частоте во всем радиодиапазоне, получить выходную мощность в диапазоне от тысячных долей ватта до тысяч киловатт. Так, в Москве под руководством А.Л. Минца в 1929 г. была построена радиовещательная станция в диапазоне длинных волн мощностью 100 кВт, в 1933 г. – 500 кВт, в 1943 г. – 1200 кВт (г. Куйбышев). Отличительной особенностью этих станций была блочная структура, когда несколько блоков (генераторов) работали на общую нагрузку.

Первый армейский ламповый радиопередатчик разработал в 1921 г. А.Л. Минц. Радиопередатчик представлял собой генератор с самовозбуждением, работающий непосредственно на антенну. Электропитание осуществлялось от генератора переменного тока, вращаемого ножным приводом.

Разработка и строительство РПДУ в СССР сопровождалась интенсивными теоретическими и экспериментальными исследованиями. Многие работы советских ученых, посвященные расчету радиопередатчиков, являются ведущими, они были опубликованы раньше, чем аналогичные работы в иностранной печати.

В этот же период выдающимся советским радиоспециалистом М.В. Шулейкиным в лекциях были заложены основы многих радиотехнических курсов, в частности, и курса радиопередатчиков. Ему принадлежит приоритет в разработке метода расчета ламповых генераторов по идеализированным статическим характеристикам. Этот метод позже был развит в работах А.И. Берга, И.Г. Кляцкина и А.Л. Минца.

Тогда же советскими учеными созданы учебники, в которых содержится систематическое изложение теории и расчетов РПДУ. Так, важный вклад в раз-

витие теории РПДУ внес советский ученый А.И. Берг, издавший книгу «Теория и расчет ламповых генераторов» (1932 г.).

В настоящее время электровакуумные приборы применяют в основном только в СВЧ РПДУ больших мощностей (свыше десятков киловатт).

*Третий этап* связан с настоятельной необходимостью в разработке принципиально новых приборов, работающих в СВЧ диапазоне, для нужд радиолокации и радиотелевещания. Такие приборы – магнетроны, клистроны, лампы бегущей волны, в которых электронный поток взаимодействует с электромагнитной системой распределенного типа, – были разработаны, что и позволило создавать СВЧ радиопередатчики. Мощность этих приборов непрерывно возрастала, достигнув нескольких киловатт в непрерывном режиме и мегаватт – в импульсном. Среди отечественных ученых у истоков этого направления стояли Н.Ф. Алексеев, Д.Е. Маляров, В.Ф. Коваленко и др.

В настоящее время СВЧ электровакуумные приборы применяют в основном только в СВЧ РПДУ повышенной мощности, преимущественно в радиолокации.

*Четвертый этап* (с 1960 г. по настоящее время) связан с созданием мощных ВЧ и СВЧ транзисторов, а также интегральных микросхем (ИМС).

Первый транзистор, за который американским ученым У. Шокли, Д. Бардину и У. Браттейну в 1956 г. присудили Нобелевскую премию по физике, был сделан в 1950 г. Однако первые транзисторы имели ограничения как по частоте, так и по мощности. Только с созданием многоэмиттерных полупроводниковых структур оба ограничения были преодолены и появилась возможность изготавливать мощные ВЧ и СВЧ транзисторы, а на их основе и полупроводниковые РПДУ мощностью в несколько десятков и даже сотен ватт, в том числе и в СВЧ диапазоне.

7 мая 1952 г. британский радиотехник Д. Даммер впервые выдвинул идею объединения множества стандартных электронных компонентов в монолитном

кристалле полупроводника. Осуществление этих предложений в те годы не могло состояться из-за недостаточного развития технологий. В конце 1958 г. и в первой половине 1959 г. в полупроводниковой промышленности состоялся прорыв. Так, Д. Килби запатентовал принцип объединения, создал первые, несовершенные, прототипы ИМС и довёл их до серийного производства.

В настоящее время транзисторные РПДУ, а также РПДУ на основе ИМС занимают доминирующее положение. Они имеют преимущества по сравнению с ламповыми по таким параметрам, как долговечность, надёжность, пониженное напряжение электропитания, масса, габаритные размеры, технологичность изготовления.

#### **1.4 Классификация РПДУ**

РПДУ можно классифицировать по ряду признаков.

1. По мощности различают РПДУ:

- очень малой ( $P_n < 10$  Вт, где  $P_n$  – мощность в нагрузке);
- малой (10-100 Вт);
- средней (0,1-3 кВт);
- мощные (3-100 кВт);
- сверхмощные (более 100 кВт).

2. По виду модуляции:

- РПДУ, работающие в непрерывном режиме;
- РПДУ, работающие в импульсном режиме.

Также выделяют РПДУ с амплитудной, частотной, фазовой и комбинированной модуляцией (манипуляцией).

3. По типу генераторных приборов (ГП) в выходных каскадах:

- ламповые;
- транзисторные;
- клистронные и т. д.

## 4. По условиям работы:

- стационарные;
- подвижные (мобильные).

## 5. По назначению:

- телевизионные;
- связные;
- телеметрические;
- медицинские;
- радионавигационные;
- радиолокационные и т. д.

## 6. Диапазону частот:

- сверхдлинноволновые;
- длинноволновые (ДВ);
- средневолновые (СВ);
- коротковолновые (КВ);
- ультракоротковолновые (УКВ);

Также выделяют мириаметровые, километровые, гектометровые, метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые РПДУ.

РПДУ пяти первых диапазонов объединяют общим названием – высокочастотные, трех последних – сверхвысокочастотные. Границей между РПДУ ВЧ и СВЧ диапазонов является частота 300 МГц. При частоте менее 300 МГц РПДУ относится к ВЧ диапазону, выше – к СВЧ диапазону.

Следует отметить, что в радиолокации принято другое обозначение диапазонов частот. Так, радиолокационные РПДУ могут работать в UHF (300...1000 МГц), L (1...2 ГГц), S (2...4 ГГц), C (4...8 ГГц), X (8...12 ГГц), Ku (12...18 ГГц), K (18...27 ГГц), Ka (27...40 ГГц), V (40...75 ГГц), W-диапазонах (75-110 ГГц).

В таблице 1.1 приведены некоторые типы радиосистем и РПДУ различного назначения с привязкой к диапазонам длин волн.

Таблица 1.1 – Классификация РПДУ по частотным диапазонам

Наименование диапазона	Длина волны	Частота	Назначение системы и РПДУ
Мириаметровые (сверхдлинные волны)	100...10 км	3...30 кГц	Дальняя радионавигация
Километровые (длинные волны)	100...1 км	30...300 кГц	Радиовещание
Гектометровые (средние волны)	1000...100 м	0,3...3 МГц	Радиовещание
Декаметровые (короткие волны)	100...10 м	3...30 МГц	Радиовещание. Мобильная радиосвязь. Любительская радиосвязь (диапазон 27 МГц)
Метровые (ультракороткие волны)	10...1 м	30...30 МГц	УКВ ЧМ вещание Телевизионное вещание Мобильная радиосвязь. Самолетная радиосвязь
Дециметровые (UHF-, L-, S-диапазоны)	1...0,1 м	0,3...3 ГГц	Телевизионное вещание. Космическая радиосвязь и радионавигация. Сотовая радиосвязь. Радиолокация
Сантиметровые (C-, X-, Ku-, Ka-диапазоны)	10...1 см	3...30 ГГц	Космическая радиосвязь. Радиолокация. Радионавигация. Радиоастрономия
Миллиметровые	10...1 мм	30...300 ГГц	Космическая радиосвязь. Радиолокация. Радиоастрономия

### 1.5 Основные параметры и требования, предъявляемые к РПДУ

Любое РПДУ характеризуется набором показателей, которые должны удовлетворять определенным требованиям. Эти требования установлены в соответствующих государственных или отраслевых стандартах либо других до-

кументах, имеющих статус нормативных (в частности, в технических условиях).

К основным параметрам РПДУ, характеризующим его технические показатели, относят:

1. Диапазон частот несущих колебаний  $f_1...f_N$  и число частот  $N$  внутри этого диапазона.

В самом простом случае РПДУ может быть одночастотным – и тогда  $N=1$ .

2. Шаг сетки рабочих частот  $\Delta f_{\text{ш}}$  в заданном диапазоне, определяемый согласно выражению

$$\Delta f_{\text{ш}} = (f_N - f_1) / (N - 1), \quad (1.21)$$

где  $N \geq 2$ .

РПДУ может работать на любой из фиксированных частот внутри диапазона  $f_1...f_N$  (рисунок 1.7). Например, РПДУ системы УКВ самолетной радиосвязи работает в диапазоне частот 118...126 МГц при шаге 25 кГц, общее число частот  $N = 721$ .

Недопустимо излучение РПДУ не только вне закрепленного за ним диапазона частот  $f_1...f_N$ , но и на частоте, отличной от фиксированной сетки частот, например между частотами  $f_2$  и  $f_3$ .

3. Нестабильность частоты несущих колебаний.

Различают абсолютную и относительную нестабильность частоты, долгосрочную и кратковременную.

Абсолютной нестабильностью частоты называют отклонение частоты  $f$  излучаемого РПДУ сигнала от номинального значения частоты  $f_{\text{ном}}$ . Например,  $f_{\text{ном}} = 120$  МГц, а фактически РПДУ излучает сигнал с частотой  $f = 119,9994$  МГц. Следовательно, абсолютная нестабильность частоты составит  $\Delta f_{\text{нест}} = f_{\text{ном}} - f = 120 - 119,9994$  МГц = 0,0006 МГц = 0,6 кГц. Относитель-

ной нестабильностью частоты называется отношение абсолютной нестабильности частоты к ее номинальному значению:

$$\Delta f = \frac{\Delta f_{\text{нест.}}}{f_{\text{ном}}} . \quad (1.22)$$

Согласно (1.22) в рассмотренном примере относительная нестабильность составит  $\Delta f = 5 \cdot 10^{-6}$ .

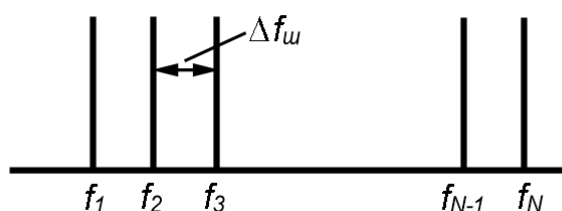


Рисунок 1.7 – Сетка частот РПДУ  $f_1 \dots f_N$

В современных РПДУ относительная нестабильность частоты обычно не превышает  $(2 \dots 3) \cdot 10^{-6}$ . Но в некоторых случаях, например, в системах радионавигации, к этому параметру предъявляются еще более жесткие требования: в них следует иметь  $\Delta f \leq 10^{-9}$ .

#### 4. Полоса частот

В режиме несущих колебаний РПДУ излучает сигнал (1.1). Спектр такого колебания имеет одну составляющую (рисунок 1.8а). При любом виде модуляции – амплитудной, частотной, фазовой и импульсной – спектр сигнала становится или линейчатым (рисунок 1.8б), или сплошным (рисунок 1.8в), занимая определенную полосу частот  $\Delta f_{\text{сн}}$ .

Для этого спектра выделяется определенная полоса частот  $\Delta f_{\text{выд}}$ . При этом следует соблюдать неравенство  $\Delta f_{\text{сн}} \leq \Delta f_{\text{выд}}$ , то есть спектр сигнала должен укладываться в выделенную для него полосу. В противном случае излучения одного радиопередатчика могут мешать другим радиопередатчикам, проникая в выделенные для них полосы излучения.

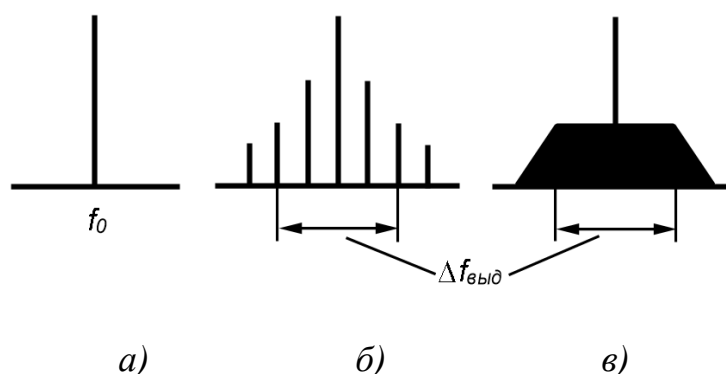


Рисунок 1.8 – Спектры немодулированного (а) и модулированного (б, в) колебаний

5. Выходная мощность несущих колебаний  $P_A$  – активная мощность, поступающая из радиопередатчика в антенну. Антенна имеет входное комплексное сопротивление  $Z_A = R_A + jX_A$ . Поэтому при измерении выходной мощности радиопередатчика антенна может быть заменена эквивалентным сопротивлением  $Z_{\text{экв}} = Z_A$ . Мощность, рассеиваемая в активной составляющей сопротивления  $R_A$ , и есть выходная мощность радиопередатчика  $P_A$ , излучаемая антенной.

Выходная мощность РПДУ в значительной мере определяет дальность действия соответствующей радиоэлектронной системы. Мощность современных РПДУ составляет от долей ватта до десятков мегаватт.

На практике, особенно в спутниковых и наземных радиовещательных радиопередатчиках, вместо выходной мощности используют *эквивалентную изотропно излучаемую мощность* (ЭИИМ, от англ. *EIRP – Equivalent Isotropically Radiated Power*) – произведение мощности радиочастотного сигнала, подводимого к антенне, на абсолютный коэффициент усиления антенны.

ЭИИМ – интегральная энергетическая характеристика радиопередатчика, соединенного фидерным трактом с антенной, равная мощности, которую должен излучать изотропный излучатель, чтобы на одинаковом удалении плотность потока мощности создаваемого им радиоизлучения равнялась плотности потока мощности радиоизлучения, создаваемого данным радиопередатчиком в



направлении максимума диаграммы направленности её антенны. ЭИИМ измеряют в единицах мощности (Вт, дБВт, дБм). Из определения ЭИИМ следует, что маломощный радиопередатчик с направленной антенной может создать в некотором направлении такой же уровень радиоизлучения, что и мощный радиопередатчик со слабонаправленной антенной.

6. Суммарная мощность  $P_0$ , потребляемая радиопередатчиком от источника электропитания по всем цепям.

7. Коэффициент полезного действия (КПД), или промышленный КПД, определяемый как отношение выходной мощности радиопередатчика к потребляемой:

$$\eta = \frac{P_A}{P_0}. \quad (1.23)$$

8. Вид модуляции и определяющие его параметры.

При амплитудной модуляции таким параметром является глубина (коэффициент) модуляции  $m \leq 1$ , при частотной – девиация частоты  $\Delta f_{dev}$ , при фазовой – девиация фазы  $\Delta \varphi_{dev}$ , при импульсной – длительность импульсов  $t_u$  и период их повторения  $T$  (скважность  $Q$ ).

9. Параметры, характеризующие допустимые искажения передаваемого сообщения.

В результате процесса модуляции, то есть наложения на несущие колебания исходного сообщения, последнее претерпевает некоторые изменения или, иначе говоря, искажается. В каждом конкретном случае устанавливается вид и норма на эти искажения.

Искажения в общем случае могут быть линейными и нелинейными. Линейные искажения не обогащают спектр сигнала новыми гармониками, тогда как нелинейные обуславливают появление в спектре новых гармоник. Например, при передаче сообщения в виде синусоидального сигнала параметром, характеризующим допустимые искажения передаваемого сообщения, является

коэффициент нелинейных искажений, определяющий появление в исходном сигнале 2, 3-й и последующих гармоник.

При передаче импульсных сигналов искажения можно характеризовать по изменению формы сигнала.

#### 10. Побочные излучения.

В идеальном случае радиопередатчик должен излучать только сигнал на частоте несущей, и его спектр должен укладываться в выделенную полосу частот (рисунок 1.9а). Однако по нескольким причинам, основной из которых является нелинейный характер процессов, протекающих в каскадах РПДУ, в спектре излучаемого им сигнала появляются побочные составляющие (рисунок 1.9б). Побочные излучения, лежащие за пределами, но вблизи выделенной полосы частот, называются внеполосными. Кроме них радиопередатчик может излучать гармоники – сигналы с частотой  $2f_0$ ,  $3f_0$  и т. д., а также субгармоники – сигналы с более низкой частотой. Кроме того, возможно излучение так называемых «паразитных» колебаний, причиной возникновения которых является самовозбуждение в усилительных каскадах радиопередатчика. Возникновение «паразитных» колебаний должно быть практически исключено.

Поскольку полностью исключить побочные излучения нельзя, особенно в мощных РПДУ, то устанавливается норма на их значение или в абсолютных единицах (то есть указывается, что мощность такого-то побочного излучения не должна превышать определенного числа Вт), или в относительных единицах к мощности основного (полезного) излучения. Обычно эта норма составляет не менее -60 дБ, т.е. по мощности побочное колебание должно быть меньше мощности основного не менее чем в  $10^6$  раз. На некоторых частотах эта норма может достигать -100 дБ, - 110 дБ и т. д.

11. Нормы на надежность и долговечность, массу и габаритные размеры РПДУ устанавливают в соответствии с общими нормами для радиоэлектронной аппаратуры.

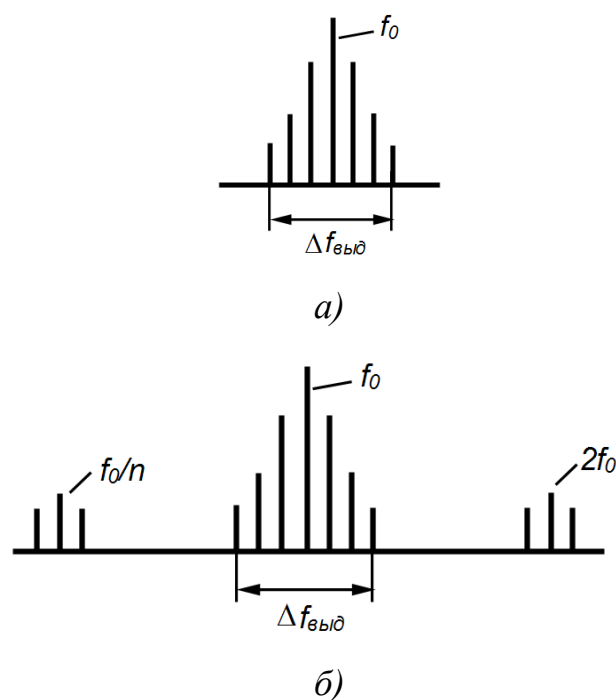


Рисунок 1.9 – Спектры сигнала без (а) и с побочными (б) излучениями

Требования к РПДУ, содержащиеся в техническом задании, могут иметь как количественный, так и качественный характер. Наиболее важная часть требований обычно выражена количественно, объединяя показатели и характеристики РПДУ, отражающие свойства радиосигналов, реакции РПДУ на внешние воздействия, побочные эффекты от работы РПДУ и т. д. При этом показатели представляют собой числа или массивы чисел, а характеристики – функции от одного или нескольких аргументов.

Все многообразие технических требований, предъявляемых к РПДУ, целесообразно сгруппировать следующим образом.

*А. Первая группа* – системные требования, уточняющие выданное задание и вытекающие из назначения РПДУ и особенностей радиосистемы, в которой оно используется.

#### 1. Назначение РПДУ.

В проекте может быть поставлена задача проектирования устройства (или его части), предназначенного, например, для следующего:

- фиксированная радиосвязь: радиорелейная (на сегодняшний день только цифровая), космическая (наземная или бортовая станция), декаметровая магистральная, тропосферная и т.п.;

- мобильная радиосвязь общего применения (базовая или абонентская станция сотовой или транкинговой системы связи);

- локальная (низовая) народнохозяйственная связь в декаметровом, метровом или дециметровом диапазонах, включая цифровые и аналоговые транкинговые (корпоративные) системы связи;

- для служебной связи подвижных объектов: судов, самолетов, железнодорожного или автомобильного транспорта (бортовые или стационарные станции);

радиовещание в километровом (ДВ), гектометровом (СВ) и декаметровом (КВ) диапазонах волн с амплитудной модуляцией; в метровом (УКВ) диапазоне с частотной модуляцией; цифровое радиовещание в этих же диапазонах волн;

- телевизионное вещание в диапазонах метровых и дециметровых волн, включая РПДУ цифрового телевидения;

- РПДУ радиолокационных систем;

- РПДУ телеметрии и телеуправления;

- радиооборудование систем беспроводного доступа различного назначения, городских и локальных сетей, персональных сетей, сверхширокополосных сетей, сетей радиоиентификации.

## 2. Условия эксплуатации.

Устанавливаются в соответствии с назначением РПДУ.

## 3. Полезная мощность, отдаваемая РПДУ в нагрузку (антенну, фидер).

Как правило, мощность выходного сигнала РПДУ является функцией времени, причем для реальных сигналов случайной. Мощность РПДУ обычно задают как максимальное (пиковое) значение, которое он способен обеспечить.

На практике, если РПДУ работает без амплитудной модуляции, среднюю мощность считают постоянной и не зависящей от времени.

В импульсной радиолокации при разработке РПДУ оперируют обычно средней и импульсной мощностью. При этом средняя мощность определяет энергетический потенциал радиолокатора, а импульсная мощность характеризует мощность излучаемого импульса. Как правило, РПДУ в этом случае рассчитывают для обеспечения требуемого значения импульсной мощности.

4. Допустимые отклонения мощности от номинала (по диапазону частот, при изменении питающих напряжений и т. д.) Здесь же указываются требуемые градации изменения (дискретного регулирования) мощности и точность их установки.

5. Диапазон рабочих частот, характер перекрытия диапазона (плавный или дискретный, шаг сетки частот); фиксированные частоты; время перестройки с одной частоты на другую, если это обусловлено условиями эксплуатации. Отдельно может оговариваться частота смены рабочих волн, допустимые затраты времени на перестройку и переключение.

6. Способ передачи сигнала (аналоговый, цифровой, одноканальный либо многоканальный), вид модуляции или манипуляции, скорость манипуляции; число независимых телефонных, телеграфных или цифровых каналов.

Во многих случаях РПДУ должно работать с несколькими видами модуляции (манипуляции).

Б. *Вторая группа* – требования по электромагнитной совместимости (ЭМС).

7. Допустимая нестабильность (отклонение от номинала) несущей частоты РПДУ, обусловленная требованиями стандартов.

Этот важнейший показатель РПДУ во многом определяет показатели радиосистемы в целом.

Причины изменения частоты многообразны и обусловлены как внутренними процессами, так и внешними воздействиями на РПДУ. Это изменение температуры, влажности, давления, старение элементов РПДУ, удары, вибрации и т. д. Важно, что отклонение частоты несущего колебания содержит как детерминированную (которую можно точно прогнозировать), так и случайную составляющие. Поэтому в общем случае нестабильность частоты и ее оценки носят статистический характер.

Если рассматривать частоту как функцию времени, то в ней можно выделить медленно и быстро изменяющиеся компоненты.

Медленные обусловлены изменениями климатических условий, старением. Быстрые – шумами, помехами, пульсациями напряжения электропитания, вибрациями и т. д. При этом медленная составляющая обычно носит монотонный (убывающий или возрастающий) характер.

В связи с этим различают кратковременную и долговременную нестабильности частоты. Кратковременная нестабильность обусловлена быстрыми изменениями частоты и соответствует малым интервалам усреднения. Долговременная нестабильность связана с медленными изменениями частоты и измеряется на больших временных интервалах.

В радиолокационных системах с селекцией движущихся целей нестабильность несущей частоты обычно характеризуют спектром несущего колебания. При отсутствии нестабильности частоты, то есть для идеального гармонического колебания спектр представляет собой одну дискретную линию. При наличии нестабильности частоты спектр размывается. За оценку нестабильности в этом случае обычно принимают ширину такой размытой дискретной линии на заданном удалении от центральной частоты.

8. Допустимый уровень побочных излучений (высшие гармоники, субгармоники, комбинационные составляющие, значительно отстоящие от рабочего канала, и т. д.) в соответствии со стандартами.

9. Допустимая ширина полосы частот (полосы канала), занимаемая полезным излучением передатчика, и уровень внеполосных (внеканальных) излучений, определяемые требованиями стандартов, в том числе требования, определяемые спектральной маской (Emission Mask) и допустимым уровнем излучения в соседнем канале (ACPR).

В. *Третья группа* требований, определяющая показатели качества передачи сообщения.

10. Допустимые уровни искажений передаваемого сигнала при заданных параметрах модуляции.

Указываются допустимые нормы искажений сигнала, которые могут нормироваться как: коэффициент ошибок модуляции (MER) или амплитуда вектора ошибки (EVM) при номинальной полезной мощности передатчика; коэффициент нелинейных искажений (или коэффициент гармоник) при заданной глубине амплитудной модуляции или при заданной девиации частоты или фазы угловой модуляции; допустимые уровни комбинационных (интермодуляционных) составляющих спектра выходного сигнала радиопередатчика при его номинальной полезной мощности; допустимые искажения амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной характеристик (ФЧХ) и т. д.

Уровень искажений оценивают различными количественными показателями, основанными на сравнении передаваемого и искаженного сигналов во временной или спектральной области, причем для различных видов модуляции используют разные показатели.

Следует отметить, что уровень нелинейных искажений зависит от мощности радиосигнала. Задавая требуемую мощность РПДУ, обычно оговаривают уровень допустимых при этом искажений.

11. Полоса модулирующих частот  $f_{min} \dots f_{max}$  при передаче сигналов и допустимая неравномерность АЧХ (глубины модуляции, девиации частоты или фа-

зы) по этому диапазону; наличие и характер предварительной коррекции АЧХ, если таковая имеется.

12. Для импульсных РПДУ показатели качества передачи сообщения – это частота следования импульсов, их длительность и форма, значение паразитного излучения в паузах и другие показатели в соответствии с видом модуляции и с требованиями стандартов.

13. Допустимый уровень паразитной амплитудной, частотной или фазовой модуляции, допустимый уровень шумов и фона.

Г. *Четвертая группа* – энергетические и эксплуатационные требования.

14. Параметры антенно-фидерного устройства: тип антенны (возможно использование нескольких антенн для разных корреспондентов или разных частот); необходимость фидера (волновода) между антенной и РПДУ; симметричное или несимметричное построение антенн и фидеров; электрические параметры антенн и фидеров.

В случае непосредственного подключения антенны к РПДУ необходимо указать зависимость активного и реактивного сопротивления антенны от несущей частоты. При использовании фидера (волновода) указывается его тип, конструкция, волновое сопротивление и минимально допустимый коэффициент бегущей (или стоячей) волны.

15. Особенности электропитания.

16. Промышленный (полный) КПД.

Промышленный КПД является важнейшим энергетическим показателем и характеризует потери мощности, которые имеют место при преобразовании энергии источника электропитания в энергию выходных электромагнитных колебаний.

Как и выходная мощность колебаний, КПД зависит в общем случае от времени и режима работы усилительных каскадов РПДУ. Соответствующий пиковой мощности радиосигнала КПД не определяет средние потери мощности



при длительной работе РПДУ. Для оценки КПД обычно используют среднее значение выходной мощности за достаточно большой интервал времени.

Повышение КПД важно не только для более эффективного использования энергии источника электропитания, но и для уменьшения тепловых потерь в конструкции РПДУ, так как для решения проблем теплоотвода приходится применять порой сложные и дорогостоящие технические средства. Это усложняет проектирование и существенно сказывается на различных технико-экономических показателях РПДУ.

17. Параметры информационного входа: резистивное входное сопротивление и номинальный уровень подводимого сигнала, тип входного интерфейса / порта и т. д.

18. Условия эксплуатации: температура окружающей среды, давление, влажность.

Кроме этого, в техническое задание могут быть включены требования по надежности, резервированию, ремонтпригодности, массе, габаритам, материальным затратам и другие в соответствии со спецификой проектируемого устройства.

### **1.6 Структура, принцип функционирования и основы расчета РПДУ**

К числу основных функциональных блоков, составляющих РПДУ, относятся:

- блок усиления ВЧ или СВЧ сигнала по мощности, выполняемый из последовательно включенных ГВВ;
- блок умножителей частоты, применяемый в случае большого коэффициента умножения;
- синтезатор частот, предназначенный для образования дискретного множества частот;

- возбудитель, включающий в свой состав синтезатор частот и частотный или фазовый модулятор;
- амплитудный модулятор, служащий для осуществления амплитудной модуляции;
- импульсный модулятор, предназначенный для осуществления импульсной модуляции;
- антенно-фидерное устройство (АФУ), соединяющее выход радиопередатчика с антенной и включающее фильтр, направленный ответвитель, ферритовое однонаправленное и согласующее устройства;
- блоки регулирования, служащие для стабилизации или управления параметрами радиопередатчика (современные устройства автоматического регулирования строятся на основе микропроцессора);
- источник электропитания (ИЭП).

Разнообразные типы РПДУ выполняют как комбинации соответствующих блоков. Как правило, в реальных РПДУ используют либо все, либо некоторые из перечисленных блоков. При выборе той или иной архитектуры для тракта передачи учитывают целый ряд факторов, например, требования соответствующих стандартов связи, в частности, тип используемой модуляции (для связных РПДУ), тип излучения (для радиолокационных РПДУ) и т. д.

Обобщенная структурная схема РПДУ представлена на рисунке 1.10.

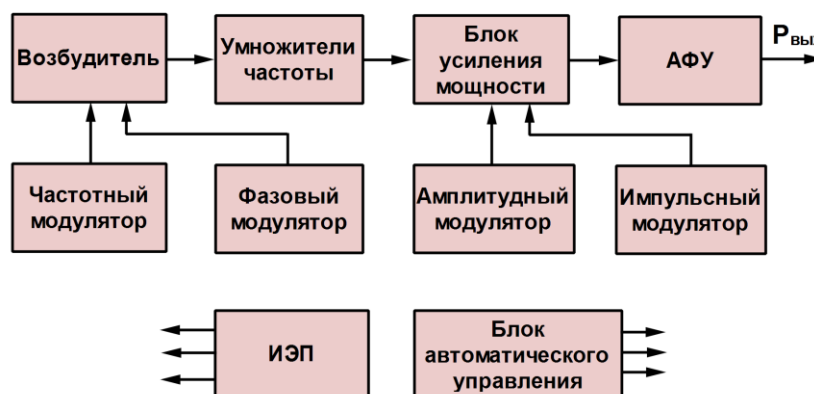


Рисунок 1.10 – Обобщенная структурная схема РПДУ

Возбудитель служит для формирования сетки рабочих частот с требуемой стабильностью. При небольшом числе рабочих частот возбудитель строится по принципу «кварц-волна», что означает: каждой из частот соответствует свой кварцевый АГ. Переход с одной частоты на другую осуществляется с помощью электронного коммутатора.

При большом числе частот возбудитель представляет собой цифровой синтезатор частот, в состав которого входит кварцевый АГ, называемый опорным, делитель с переменным коэффициентом деления и устройство автоматической подстройки частоты. Такой синтезатор может быть построен на основе интегральной микросхемы. Частота кварцевых АГ обычно не превышает 100 МГц. Поэтому при частоте РПДУ больше данного значения в устройство включают умножители частоты, повышающие частоту сигнала в необходимое число раз.

Получение требуемой выходной мощности РПДУ осуществляют с помощью блока усиления мощности, каскадно-включенных ВЧ или СВЧ ГВВ. При выходной мощности РПДУ, превышающей мощность одного ГП, в выходном каскаде происходит суммирование мощностей отдельных ГП.

В современных РПДУ используют три способа сложения мощностей:

- с помощью сумматоров и предварительных делителей мощности;
- с помощью активных фазированных антенных решеток, при этом суммирование мощности происходит в пространстве;
- комбинированный.

Между выходным каскадом РПДУ и антенной включают АФУ. В состав АФУ входят: фильтр для подавления побочных излучений радиопередатчика, датчики падающей и отраженной волны и согласующее устройство. При работе в СВЧ диапазоне вместо последнего обычно применяют ферритовое однонаправленное устройство – вентиль или циркулятор.

Частотная модуляция осуществляется в возбудителе РПДУ, фазовая – в возбудителе или ВЧ умножителях и усилителях, амплитудная и импульсная – в ВЧ усилителях.

С помощью блока автоматического управления выполняются автоматическая стабилизация параметров РПДУ (в первую очередь, мощности и температурного режима), защита при нарушении нормальных условий эксплуатации (например, при обрыве антенны) и управление (включение-выключение, перестройка по частоте).

Все приведенные блоки обычно выполняют в виде единой конструкции.

Расчет структурной схемы РПДУ включает в себя следующие основные этапы.

1. Оценку целесообразности применения одного из известных вариантов структурных схем. Выбор вариантов схемы.

2. Распределение частот колебаний во всех каскадах РПДУ.

3. Определение уровней колебательной мощности по каскадам.

4. Выбор типов ГП и номинальных питающих напряжений.

5. Оптимизация структурной схемы РПДУ на основе реализуемых в предлагаемой схеме значений частоты и мощности колебаний.

Далее рассмотрим представленные этапы более подробно.

Одним из первых и наиболее важных этапов разработки РПДУ является определение общих принципов его функционирования. На сегодняшнем этапе развития радиопередающей техники в подавляющем большинстве случаев применяют многокаскадное построение, позволяющее обеспечивать современные жесткие требования к стабильности частоты и качеству формируемого сигнала.

Однако существует ряд практических приложений, где используют и классическое однокаскадное построение РПДУ. Прежде всего, это энергетические приложения.

При выборе архитектуры многокаскадного РПДУ, прежде всего, необходимо тщательно взвесить все достоинства и недостатки возможных вариантов. Наиболее простыми являются РПДУ, построенные на основе прямой архитектуры, когда модуляция радиосигнала осуществляется непосредственно на рабочей частоте. Такая архитектура содержит минимум вспомогательных узлов, а ее использование не приводит к образованию дополнительных комбинационных гармоник в спектре формируемого радиосигнала.

Среди недостатков такого построения наиболее опасным является эффект затягивания частоты, что требует усложнения радиопередающего тракта, либо применения более сложной архитектуры с преобразованием частоты. Особенно остро проблема затягивания частоты возникает в компактных мобильных устройствах, когда близкое взаимное расположение тракта усиления мощности и синтезатора частот вызывает значительные электромагнитные связи между этими узлами. С этой точки зрения гораздо менее подвержены данной проблеме, например, стационарные радиовещательные и телевизионные РПДУ, в которых чаще всего возбудитель и усилитель мощности конструктивно выполняют в виде отдельных шкафов. Что же касается мобильных устройств, где существенно снизить взаимное влияние усилителя мощности на синтезатор частот не представляется возможным, требуется усложнение прямой архитектуры радиопередающего тракта, при котором синтезатор частот вырабатывает удвоенную рабочую частоту с последующим делением ее на два. В таком случае явление затягивания частоты существенно снижается.

Свободна от затягивания частоты и архитектура радиопередающего тракта с преобразованием частоты (аналогичная супергетеродинному построению радиоприемника). Здесь синтезатор частот является гетеродином, частота которого отличается от рабочей частоты РПДУ на значение промежуточной частоты. Однако применять такую архитектуру в миниатюрных мобильных устройствах чаще всего невозможно в силу больших массогабаритных показателей

полосовых фильтров, включаемых на выходе преобразователя частоты (смесителя). В то же время, архитектура радиопередающего тракта с преобразованием частоты находит широкое применение там, где нереализуема прямая архитектура. Прежде всего, это радиооборудование диапазона СВЧ (в первую очередь, речь идет о частотах более 10 ГГц), когда формирование модулированного сигнала непосредственно на рабочей частоте затруднительно, либо вообще невозможно.

Архитектура с преобразованием частоты также незаменима в тех случаях, когда сигнал должен формироваться на фиксированной частоте, например, при формировании сигнала изображения в РПДУ аналогового телевидения, где требуется частичное подавление одной из боковых полос специальным формирующим фильтром, а также в связных однополосных радиостанциях.

После того, как принято и обосновано решение об архитектуре проектируемого РПДУ, необходимо сразу же определиться с тем, каким способом и в каком узле РПДУ будет осуществляться требуемая модуляция. Большинство сложных сигналов современных систем связи и телерадиовещания формируются программными способами – и через цифро-аналоговые преобразователи поступают в радиопередающий тракт в виде квадратурных ( $I$  и  $Q$ ) либо полярных ( $A$  и  $\varphi$ ) компонент. В соответствии с этим в РПДУ применяют универсальные квадратурные модуляторы (при квадратурном способе формирования сигнала) либо осуществляют раздельную фазовую и амплитудную модуляцию (при полярном способе формирования сигнала). В последнем случае амплитудную модуляцию целесообразно формировать на высоком уровне мощности в окончательном каскаде РПДУ, используя метод Л. Кана, что позволяет существенно повысить его КПД.

В отдельных случаях формирование сигналов с фазовыми (BPSK, QPSK, 8PSK) и частотными (GMSK, BFSK, 4FSK, 8FSK) видами модуляции целесообразно осуществлять непосредственно в синтезаторе частот.

Сигналы с аналоговыми видами модуляции (частотной и фазовой) могут быть получены как непосредственно в синтезаторе частот, так и в отдельном фазовом либо частотном модуляторе.

Получение амплитудной и однополосной модуляции в связных и телевизионных РПДУ обычно осуществляют на низкой промежуточной частоте и малом уровне мощности фильтровым способом, поскольку эти меры обеспечивают требуемую чистоту формируемого спектра сигнала. Что же касается мощных радиовещательных РПДУ, формирование амплитудной модуляции обычно осуществляют в оконечном усилительном каскаде путем управления напряжением электропитания. Такой способ модуляции позволяет достигать высокого промышленного КПД РПДУ.

Следующим этапом построения РПДУ является решение вопроса, в каких каскадах тракта усиления мощности РПДУ целесообразно применение полупроводниковых приборов, а в каких – электровакуумных ламп или специальных электровакуумных приборов СВЧ.

Тракты усиления мощности РПДУ малой и средней мощности (менее единиц кВт) за редким исключением строят полностью полупроводниковыми. При построении мощных РПДУ возможно как полностью полупроводниковое построение (если это оправдано и целесообразно), так и использование в самых мощных каскадах усиления электровакуумных ламп либо специальных электровакуумных приборов СВЧ.

Поскольку мощности транзисторов относительно невелики, при построении оконечных и предоконечных каскадов РПДУ средней и большой мощности используют многомодульные структуры каскадов со сложением мощностей, отдаваемых большим количеством транзисторов. Из-за необходимости использования в мощных полупроводниковых каскадах усиления больших радиаторов охлаждения (а часто и дополнительных электровентиляторов и даже систем водяного охлаждения радиаторов), громоздких согласующих цепей и мостов сло-

жения, габариты таких каскадов не получаются меньше ламповых при условии равноценной полезной мощности.

В процессе предварительной разработки каскадов усиления мощности обязательно производится выбор питающих напряжений (из ряда стандартных значений по ГОСТ).

В структуре РПДУ можно выделить ВЧ/СВЧ часть, состоящую из возбуждителя, и ВЧ/СВЧ часть, состоящую из ГВВ (цепочки ГВВ). Вторую часть называют часто усилительным трактом.

В общем случае (особенно в связи с применением ГВВ на полупроводниковых приборах) усилительный тракт выполняют многокаскадным. Рассмотрим далее основные параметры усилительного тракта.

Структура усилительного тракта может быть представлена в виде рисунка 1.11.

На рисунке 1.11  $K$ ,  $P$ ,  $\eta$  – коэффициент усиления, мощность и КПД соответствующих каскадов;  $D$  – затухание усилительного каскада в выключенном состоянии;  $\Delta f$  – ширина полосы усиления;  $d$  – затухание межкаскадных трактов. Каскады усиления, предшествующие выходному (оконечному), обычно называют *промежуточными* или *предварительными*.

В общем случае в состав межкаскадных трактов входят линии связи, вентили, аттенюаторы, фазовращатели, направленные ответвители, мосты и т. д. Их полоса пропускания обычно существенно шире полосы усилительных каскадов. Согласующие цепи входят в состав усилительных каскадов.

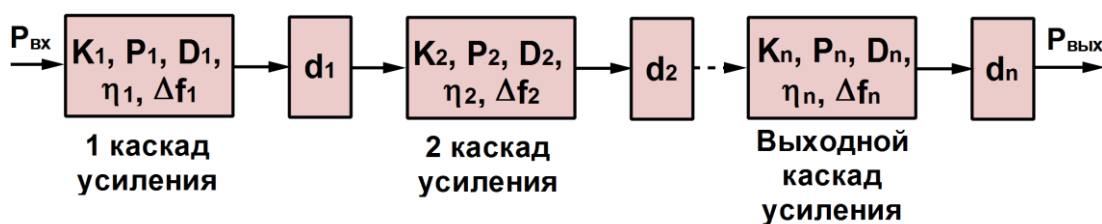


Рисунок 1.11 – Структура усилительного тракта



К основным параметрам усилительного тракта наряду с КПД, коэффициентом усиления и выходной мощностью относят также АЧХ, ФЧХ и шумовые характеристики.

Очевидно, что во всех случаях желательно иметь наименьшее число усилительных каскадов тракта при заданных значениях входной и выходной мощностей, то есть желательно иметь каскады с большим коэффициентом усиления. Однако на практике этот показатель всегда ограничен свойствами применяемых ГП.

Так как мощность возбудителей лежит в пределах 0,01...0,1 Вт, а выходные мощности РПДУ могут составлять  $10^5$ - $10^7$  Вт, то коэффициент усиления достигает 70-90 дБ. Поэтому на практике между входом и выходом такого тракта, а также между его промежуточными усилительными каскадами должна быть достаточная развязка для исключения регенеративных эффектов, повышения шумов и самовозбуждения.

КПД усилительного тракта  $\eta$  – это отношение выходной мощности  $P_{вых}$  к сумме мощностей  $P_{0i}$ , потребляемых от ИЭП всеми каскадами, то есть

$$\eta = \frac{P_{вых}}{\sum_{i=1}^n P_{0i}}. \quad (1.24)$$

Значения  $P_{0i}$  должны определяться с учетом потребления мощности от всех ИЭП, обслуживающих данный каскад, включая и мощность, потребляемую вспомогательными цепями.

Обычно на практике КПД усилительного тракта определяется преимущественно КПД окончного усилительного каскада.

АЧХ усилительного тракта, состоящего из каскадов, параметры которых не изменяются при включении в тракт, определяется как произведение АЧХ  $K_i(\omega)$  отдельных каскадов:

$$K(\omega) = \prod_{i=1}^n K_i(\omega). \quad (1.25)$$

АЧХ зависит только от частоты при условии линейности амплитудных характеристик каскадов, что не всегда выполняется на практике, так как усиленные каскады работают, как правило, в режиме насыщения. В этом случае АЧХ будет не только функцией частоты, но и амплитуды.

ФЧХ усилительного тракта представляет собой сумму ФЧХ каждого из его каскадов:

$$\Phi(\omega) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(\omega). \quad (1.26)$$

При составлении и расчете структурной схемы транзисторного РПДУ исходят из его назначения, условий работы и следующих основных параметров:  $P_A$  – выходной мощности, подводимой к антенне;  $f_1 \dots f_2$  – диапазона рабочих частот; стабильности частоты; вида модуляции и характеристик модулирующего сигнала.

Общий коэффициент усиления сигнала по мощности РПДУ составляет

$$K_P = \frac{P_A}{K_{AFY} P_{\text{возб}}}, \quad (1.27)$$

где  $P_A$  – мощность сигнала, поступающего в антенну;  $K_{AFY} < 1$  – коэффициент передачи АФУ;  $P_{\text{возб}}$  – мощность сигнала возбуждения.

Тот же параметр, выраженный в децибелах относительно мощности в 1 Вт:

$$K_{P(\text{дБ})} = 10 \lg P_A - 10 \lg P_{\text{возб}} - 10 \lg K_{AFY}. \quad (1.28)$$

Общий коэффициент умножения по частоте

$$K_f = f_1 / f_{1\text{возб}} = f_2 / f_{2\text{возб}}, \quad (1.29)$$

где  $f_1 \dots f_2$  – диапазон частот радиопередатчика;  $f_{1\text{возб}} \dots f_{2\text{возб}}$  – диапазон частот возбуждения.

Исходя из значения  $K_f$ , равного произведению коэффициентов умножения отдельных каскадов, определяется число умножителей.

Общий коэффициент усиления сигнала по мощности РПДУ есть произведение коэффициентов усиления отдельных каскадов (или сумма, если коэффициент усиления выражен в дБ). Выбрав тип ГП в каждом из каскадов и определив по справочнику или рассчитав значения коэффициентов усиления данных приборов, можно составить структурную схему проектируемого РПДУ.

**Пример.** Рассмотрим пример при следующих исходных данных: мощность сигнала, передаваемого в антенну,  $P_A = 20$  Вт; коэффициент передачи АФУ  $K_{АФУ}$  составляет 0,8 или 1 дБ; мощность возбуждителя  $P_{возб} = 5$  мВт.

Согласно (1.28) общий коэффициент усиления сигнала по мощности РПДУ составит

$$K_{P(дБ)} = 10 \lg 20 - 10 \lg 0,8 - 10 \lg 0,005 = 37 \text{ дБ}.$$

Например, при коэффициенте усиления одного ГП, равном 10 дБ, т.е. в 10 раз по мощности, для получения общего коэффициента усиления в 37 дБ потребуется четыре последовательно включенных ГВВ.

Итак, задачей составления структурной схемы РПДУ является определение рационального числа ВЧ/СВЧ каскадов между возбуждителем и выходом РПДУ, обеспечивающего выполнение заданных технических требований к РПДУ при минимальных затратах средств на изготовление и при достаточно высоком КПД.

На первом этапе схема является ориентировочной, потому что составляется на основе обобщения опыта проектирования РПДУ, накопленного в прошлом, использования усреднённого коэффициента  $N_P$ , представляющего собой отношение номинальных (паспортных) мощностей ГП двух соседних каскадов. Такой обобщённый подход позволяет достаточно просто получить представление о том, каким в первом приближении будет проектируемое РПДУ, и при дальнейшем проектировании согласовывать отдельные частные решения с обобщённой структурной схемой РПДУ в целом.

Итак, зная номинальную мощность ГП выходного каскада  $P_{вых(n)}$ , ориентировочное значение мощности ГП предыдущего каскада можно найти по формуле:

$$P_{вых(n-1)} \approx \frac{P_{вых(n)}}{N_{P(n)}}. \quad (1.30)$$

Аналогично определяют значение номинальной мощности ГП следующего  $(n-2)$  каскада. Так продолжают до тех пор, пока необходимая мощность очередного каскада окажется равной (или несколько меньшей) мощности типового возбудителя.

Исходя из этого выясняют возможность применения последовательной структурной схемы или необходимость использования системы сложения мощностей нескольких модулей.

При выборе последовательной схемы транзисторы используются на пределе своих возможностей по мощности и частоте. При работе в области ВЧ/СВЧ коэффициент усиления по мощности мал и приближённо зависит от частоты.

Значения параметров для некоторых биполярных транзисторов представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры транзисторов

Тип транзистора	$f_T$ , МГц	$K'_P$	$P_{1дон}$ , Вт
2Т926А	50	20	50
2Т967А	180	10...13	90
2Т950А	150	7...11	70
2Т920А	400	7...12	2
2Т930Б	450	4	40

Построение модульной структурной схемы осуществляют путём выбора типов транзисторов, их числа в модуле (два или четыре), учитывая КПД согласующей цепи  $\eta_{сц} \approx 0,8...0,9$ . Мощность модуля определяют как  $P_m \approx mP_1\eta_{сц}$ , где

$m$  – число транзисторов в модуле,  $P_I$  – выходная мощность транзистора. С учётом КПД устройств сложения мощностей  $\eta_{cl} \approx 0,8...0,9$  определяют число модулей в выходном каскаде:

$$M_{(n)} \geq \frac{P_{вых}}{\eta_{cl} P_m}. \quad (1.31)$$

Число модулей должно быть целым.

Следует отметить, что тип транзистора усилительного каскада выбирают с учетом  $P_I \leq 0,8 P_{дон}$ , где  $P_{дон}$  – допустимая мощность транзистора.

На практике обычно задают мощность в антенне РПДУ, которая превышает мощность выходного усилительного каскада из-за наличия потерь в выходной фильтрующей системе ( $\eta_{ВФС} \approx 0,75...0,9$ ).

Коэффициент усиления по мощности  $K_P$  ориентировочно определяют как

$$K_P \approx \left( \frac{f_{max}}{f} \right)^2. \quad (1.32)$$

Целесообразно выбирать такой транзистор, для которого  $25...30 \geq K_P \geq 2$ .

Тогда мощность возбуждения усилительного каскада можно найти как

$$P_{вых(n-1)} = \frac{P_{выхn}}{K_P}. \quad (1.33)$$

**Пример.** Пусть требуется разработать последовательную и модульную структурные схемы транзисторного усилительного тракта РПДУ с выходной мощностью  $P_{вых} = 90$  Вт на частоте  $f = 20$  МГц.

В качестве ГП выберем биполярный транзистор 2Т926А, для которого зададим  $P_I = 20$  Вт. Выберем число транзисторов в модуле равное двум и определим выходную мощность модуля с учетом потерь в схеме согласующей цепи:

$$P_m \approx 2 \cdot 20 \cdot 0,85 = 34 \text{ Вт.}$$

Определим число модулей в выходном усилительном каскаде с учетом потерь в схеме сложения мощностей:

$$M_{(n)} \approx \frac{90}{0,85 \cdot 34} \approx 3,1.$$

Выбираем целое число, то есть  $M_{(n)} = 4$ .

Поскольку  $f = 20$  МГц, то получим ориентировочно  $K_{P_{вых}} = 5$ ; т.е. на вход выходного каскада должен поступать сигнал мощностью

$$P_{вых(n-1)} \approx \frac{90}{5} \approx 18 \text{ Вт.}$$

Количество модулей в предвыходном каскаде:

$$M_{(n-1)} \geq \frac{18}{0,85 \cdot 34} = 0,6.$$

Таким образом, в предвыходном каскаде достаточно одного модуля из двух транзисторов. Каждый из транзисторов должен отдавать на вход следующего каскада мощность:

$$P_{1(n-1)} = \frac{P_{вых(n-1)}}{m\eta_{сц}},$$

откуда

$$P_{1(n-1)} = \frac{18}{2 \cdot 0,85} \approx 10,6 \text{ Вт.}$$

В итоге получим  $K_{P(n-1)} \approx 9$ .

На вход предвыходного модуля должен поступать сигнал мощностью

$$P_{вых(n-2)} = \frac{18}{9} = 2 \text{ Вт.}$$

Для мощности 2 Вт уже можно не применять модульный принцип и реализовать  $(n-2)$  каскад на одном транзисторе. Тогда получим  $K_{P(n-2)} \approx 80$ . Данное значение чрезмерно велико, что будет вызывать самовозбуждение в данном каскаде. Выберем другой транзистор КТ602А с параметрами  $f_T = 40$  МГц,  $P_{I_{дон}} = 2$  Вт. Тогда  $K_{P(n-2)} = 5,5$ .

В итоге

$$P_{вых(n-3)} = \frac{2}{5,5} \approx 0,36 \text{ Вт.}$$

Для следующего каскада будем использовать этот же транзистор. Тогда  $K_{P(n-3)} = 30$ . В итоге

$$P_{вых(n-4)} = \frac{0,36}{30} = 0,012 \text{ Вт.}$$

Таким образом, на вход  $(n-3)$  каскада должна поступать мощность 12 мВт, которая близка к выходной мощности возбудителя.

Структурная схема рассчитанного РПДУ будет иметь вид, изображённый на рисунке 1.12.

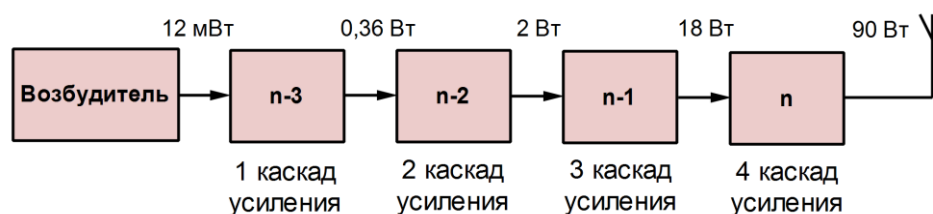


Рисунок 1.12 – К расчету структурной схемы РПДУ

### 1.7 Электромагнитная совместимость РПДУ

В мире работают миллионы РПДУ, создающих вокруг Земли электромагнитное поле. Радиосигналы приходят на Землю и из космоса: на околоземных орбитах находятся сотни спутников, на каждом из них установлено по несколько РПДУ. Только систем дальней космической радиосвязи в мире насчитывается около 50.

Каждой радиоэлектронной системе отводится строго определенная полоса частот, в которой допускается радиоизлучение. Однако фактически РПДУ, помимо полезного сигнала, излучает и побочные колебания, которые по отношению к другой радиоэлектронной системе являются помехами. Обратимся в этой связи к рисунку 1.9б. Пусть номинальная частота РПДУ равна  $f_0$ . Но помимо нее РПДУ излучает и сигнал, пусть и весьма малой мощности, на частоте  $2f_0$ . Именно на эту частоту настроены радиоприемники другой радиоэлектронной системы. По отношению к ним сигнал частотой  $2f_0$  является помехой, причем весьма сильной, если РПДУ первой системы расположено близко от радиоприемника второй системы. В целом данная проблема, связанная с одновременной работой нескольких радиоэлектронных систем без взаимного влияния друг на друга, называется электромагнитной совместимостью (ЭМС). При этом следует рассматривать ЭМС радиоэлектронной аппаратуры, работающей в пре-

делах одного объекта, на обширной территории. На многих современных объектах – кораблях, самолетах, спутниках – располагается много разнообразной радиоэлектронной аппаратуры, относящейся к разным системам и работающей в разных частотных диапазонах.

Вот примерный перечень радиоаппаратуры, устанавливаемой на современном самолете гражданской авиации:

- связная радиостанция УКВ диапазона, с помощью которой летчик поддерживает радиотелефонную связь с наземными службами;
- связная радиостанция дециметрового диапазона спутнико-космической системы для радиосвязи самолета с дальними наземными объектами;
- радиокompас, позволяющий определять направление полета;
- аппаратура дециметрового диапазона спутнико-космической радионавигационной системы для точного определения местоположения самолета;
- радионавигационная аппаратура длинноволнового диапазона, работающая по сигналам наземных РПДУ;
- радиовысотомер сантиметрового диапазона для определения высоты полета;
- радиолокатор сантиметрового диапазона, с помощью которого просматривается окружающее пространство и обеспечивается безопасность полета, исключающая возможность столкновения самолета с другими летательными аппаратами;
- комплекс радиоаппаратуры, обеспечивающий «слепую» посадку самолета.

Во все перечисленные радиоэлектронные устройства входят РПДУ и радиоприемники, и они не должны мешать друг другу при совместной, одновременной работе. Для обеспечения данного обязательного требования РПДУ должны излучать побочные колебания ниже определенной допустимой нормы.



Только при этом условии может быть решена проблема ЭМС радиоаппаратуры, работающей на одном объекте.

Другая сторона ЭМС связана с работой радиоэлектронных систем на обширных территориях. Обратимся в этой связи к космической системе радиосвязи, антенна которой «освещает» большую территорию на Земле, например, всю Россию. Чтобы радиоизлучения со спутника не влияли на наземные средства радиосвязи, мощность спутникового РПДУ должна быть ограничена. В этой связи вводится норма на плотность потока мощности, создаваемого излучением спутника у поверхности Земли, которая не должна превышать  $-152 \text{ дБ} \cdot \text{Вт}/\text{м}^2$  в полосе 4 кГц. Такие же жесткие требования вводятся на побочные излучения радиовещательных и телевизионных наземных РПДУ с целью исключения их взаимного влияния друг на друга.

Измерение внеполосных излучений является одной из наиболее сложных задач при разработке и вводе в эксплуатацию РПДУ. Для контроля спектра выходного сигнала РПДУ используют несколько способов, среди которых наиболее часто применяют на практике *наложение спектральной маски* и *измерение коэффициента мощности в соседнем канале*.

Спектральная маска – условная кривая, ограничивающая уровень внеполосных излучений. Спектральная маска задается таблично (согласно соответствующим нормам) и сопровождается графическим изображением (рисунок 1.13).

При оценке уровня внеполосных излучений в радиолокации интерес представляет не сам амплитудный (или энергетический) спектр зондирующего сигнала, а огибающая этого спектра. Обычно для уменьшения интенсивности внеполосных излучений необходимо получить максимально большую скорость спада огибающей спектра при увеличении расстройки по частоте за пределами необходимой полосы.

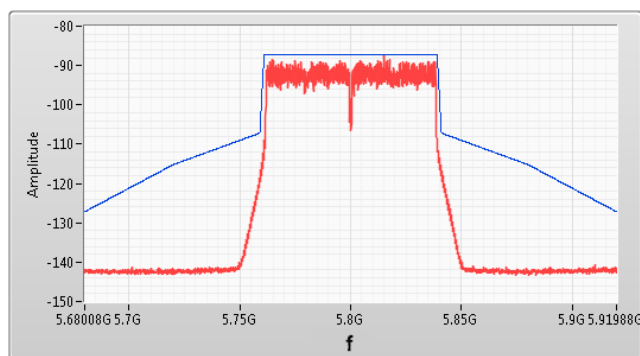


Рисунок 1.13 – К иллюстрации наложения спектральной маски

На практике для определения скорости убывания интенсивности внеполосного излучения обычно используют полосу частот  $\Delta F_{-60}$  на уровне минус 60 дБ. При этом скорость спада огибающей спектра принято оценивать в дБ/декаду. Получаемые линии ограничения должны укладываться в границы спектральной маски, регламентированной в соответствующих рекомендациях и стандартах.

В качестве примера на рисунке 1.14 приведены формы огибающих  $A_{огиб}$  энергетических спектров для двух ЛЧМ радиоимпульсов равной энергии и длительности с базой  $B = 14000$  (на интервале декады): прямоугольного и промодулированного по амплитуде в соответствии с весовой функцией Тейлора. Как видно из рисунка, наименьший уровень внеполосных излучений обеспечивается при излучении радиоимпульса с непрямоугольной огибающей.

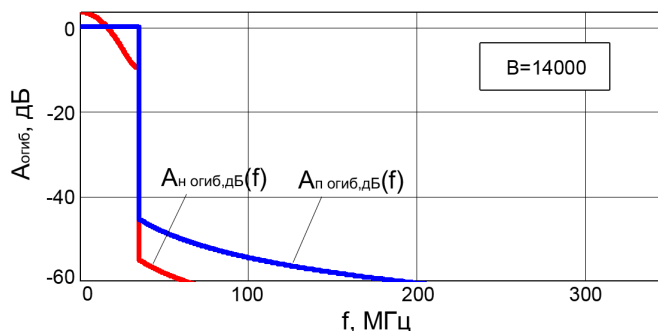


Рисунок 1.14 – Огибающие спектров ЛЧМ радиоимпульсов с прямоугольной и непрямоугольной огибающими ( $B = 14000$ )

Уровень внеполосных излучений и скорость спада спектра зависят (при

условии, что модулирующая функция одинаковая) от базы  $B$  ЛЧМ радиоимпульса. На рисунке 1.15 приведены формы огибающих  $A_{огиб}$  энергетических спектров для двух ЛЧМ радиоимпульсов (прямоугольного и непрямоугольного) равной энергии и длительности с базой  $B = 100$  (на интервале декады): очевидно, уровни внеполосных излучений оказались выше по сравнению со случаем, когда  $B = 14000$ . Однако, как и прежде, наименьший уровень внеполосных излучений обеспечивается при излучении радиоимпульса с непрямоугольной огибающей. Наложение спектральной маски на спектры рассматриваемых зондирующих сигналов проиллюстрировано на рисунке 1.16.

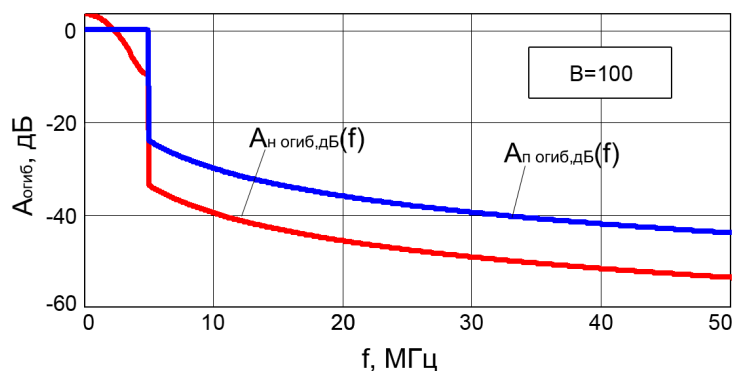


Рисунок 1.15 – Огибающие спектров ЛЧМ радиоимпульсов с прямоугольной и непрямоугольной огибающими ( $B = 100$ )

*Коэффициент мощности в соседнем канале* (ACPR – от англ. *Adjacent Channel Power Ratio*) – мера паразитного проникновения сигнала в соседние каналы, вызванные нелинейностью устройства. Как правило, этот параметр используют, чтобы оценить степень искажений, вызванных нелинейностью УМ и в целом всего тракта радиопередачи.

В общем виде коэффициент ACPR определяется как выраженное в децибелах отношение значения мощности  $P1$  в определенной полосе частот  $BW1$  на центральной частоте рабочего канала к значению мощности  $P2$ , сосредоточенной в определенной полосе  $BW2$  при заданной расстройке  $F$  от несущей частоты рабочего канала  $f_{ch}$  (рисунок 1.17).

Конкретные значения используемых при измерениях значений полос частот, расстроек, мощностей для различных стандартов и технологий можно найти в соответствующих нормативных документах.

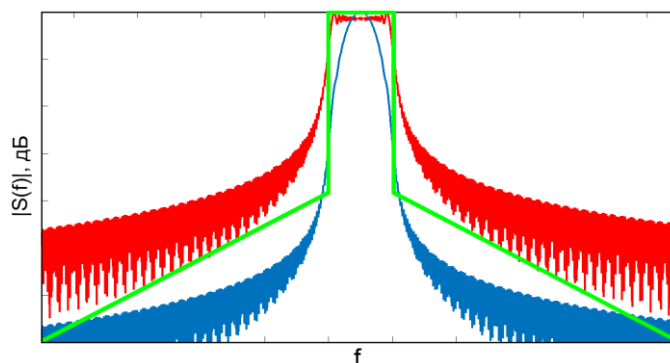


Рисунок 1.16 – Наложение спектральной маски на спектры зондирующих сигналов

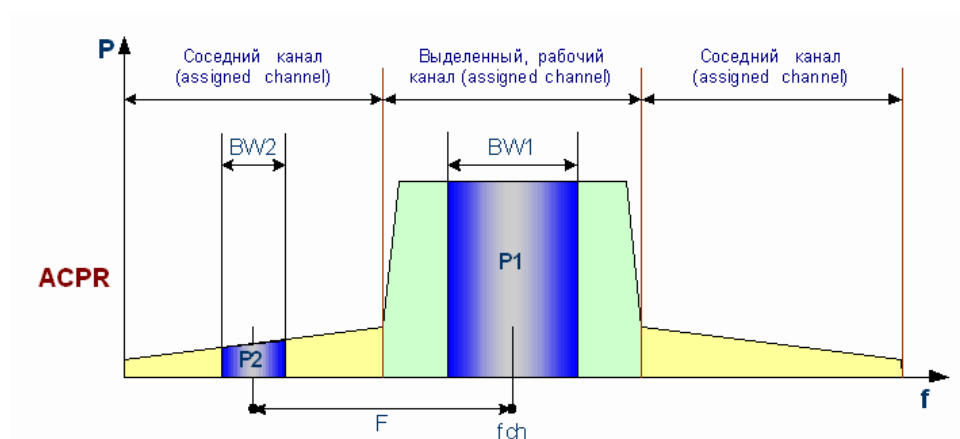


Рисунок 1.17 – К иллюстрации измерения ACPR

### Контрольные вопросы и задания

1. В чем состоит назначение РПДУ?
2. Назовите радиоэлектронные системы, в которых применяют РПДУ.
3. На какие диапазоны делят волны в радиотехнике?
4. Где проходит граница между высокими и сверхвысокими частотами?
5. В чем заключались опыты Г. Герца по передаче радиосигнала?
6. Как был устроен первый радиопередатчик А.С. Попова?
7. Перечислите основные параметры РПДУ.

8. Назовите каскады, из которых состоит типовое РПДУ.
9. Зачем необходимо антенно-фидерное устройство?
10. В чем проявляется воздействие РПДУ на экологию? Обоснуйте свое мнение.
11. Приведите известные способы измерения уровня внеполосных излучений РПДУ.
12. В программах «Mathcad» или «Matlab» промоделируйте физически излучаемые радиолокационной системой следующие зондирующие сигналы:  
а) одиночный радиоимпульс с прямоугольной огибающей без внутриимпульсной модуляции; б) пачка радиоимпульсов с прямоугольной огибающей без внутриимпульсной модуляции; в) одиночный ЛЧМ радиоимпульс с гауссовой огибающей.
13. Рассчитайте коэффициент усиления РПДУ по мощности в размах и децибелах при мощности сигнала, передаваемого в антенну  $P_A = 1$  кВт, коэффициенте  $K_{АФУ} = 0,7$  и мощности возбуждителя  $P_{возб} = 10$  мВт.
14. Рассчитайте коэффициент усиления РПДУ по мощности в размах и децибелах при коэффициенте усиления 1-го каскада 8 дБ, 2-го каскада - 9 дБ, 3-го каскада - 6 дБ.
15. Разработайте последовательную и модульную структурные схемы транзисторного РПДУ с выходной мощностью  $P_{вых} = 300$  Вт на частоте  $f = 450$  МГц. Транзистор следует выбрать самостоятельно.

### Список литературы

1. Рыбкина П.Н. Изобретение радиотелеграфа в России // Радиотехник. – 1919. – № 8. – С. 256-283.
2. Шамшур В. Первые годы советской радиотехники и радиолюбительства. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 248 с.
3. Пестриков В. «Радио»? Откуда? // Радиолюбби. – 1998. – № 1. – С. 2-3.

4. Конторов Д.С., Конторов М.Д., Слока В.К. Радиоинформатика. – М.: Радио и связь, 1993. – 260 с.

5. Ворона В.А. Радиопередающие устройства. Основы теории и расчета: учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 384 с.

6. Быховский М.А. Развитие телекоммуникаций: на пути к информационному обществу. История телеграфа, телефона и радио до начала XX века. – М.: Либроком, 2012. – 344 с.

7. Радиопередающие устройства: учебник для вузов / С.И. Дингес, В.В. Шахгильдян, М.С. Шумилин и др.; под ред. Р.Ю. Иванюшкина. – М.: Горячая линия-Телеком, 2019. – 1200 с.