

## **Лекция 1**

# **Общая характеристика систем передачи информации**

---

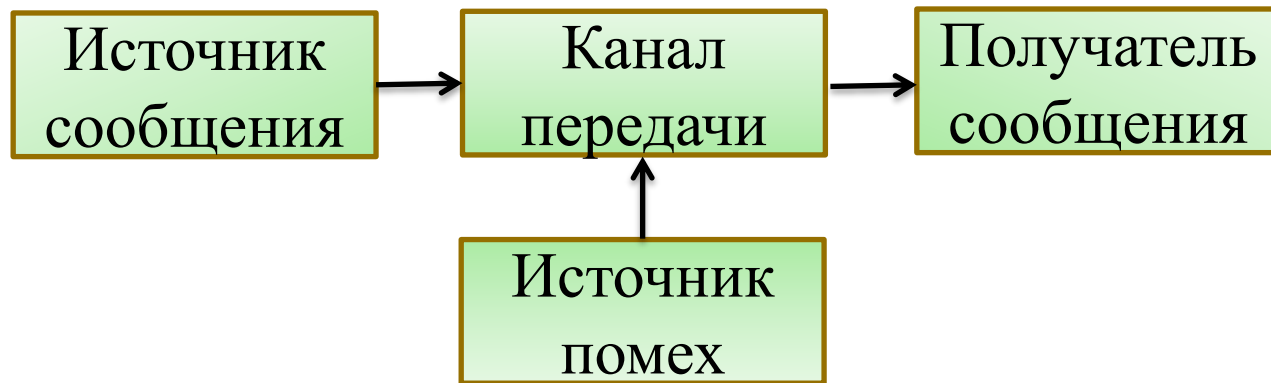
# Рассматриваемые вопросы

- 1 Основные понятия. Системы связи
- 2 Передача сигналов на расстояние. Используемые в радиотехнике частоты. Особенности распространения радиоволн
- 3 Радиопередающие устройства систем радиосвязи. Основные технические характеристики. Структурные схемы
- 4 Автогенераторы. Принцип действия, режимы работы, структурные схемы

# 1 Основные понятия. Системы связи

**Информация** — совокупность сведений о событиях, явлениях или предметах, предназначенная для передачи, приема, обработки, преобразования, хранения или непосредственного использования.

**Сообщение** — информация, подлежащая передаче (хранению), выраженная в форме текста, речи, цветного или чёрно-белого изображения (с речевым сопровождением или без него) или цифрового потока данных. В общем случае, процесс передачи сообщений можно представить в виде схемы



## Основные понятия

Для передачи **сообщения** на расстояние необходимо наличие какого-то **материального носителя**, в качестве которых используются **статические** (бумага, фотопленка и др.), или **динамические** средства – физические процессы (акустические или электромагнитные волны).

Физический процесс, используемый в качестве переносчика **сообщения** и отображающий передаваемое **сообщение**, называется **сигналом**.

**Сигналы**, используемые для передачи сообщений, по своим свойствам должны соответствовать характеристикам той физической среды, в которой они распространяются и доходят до получателя. Физическую среду, которая разделяет источник и получателя сообщений и обеспечивает передачу сигналов, называют **каналом передачи** сообщений (каналом связи, линией связи).

## Основные понятия

Основными параметрами электрических (электромагнитных) сигналов являются:

- **длительность сигнала**  $T_c$  — определяет интервал времени, в течение которого сигнал существует (отличен от нуля);
- **ширина спектра сигнала**  $F_c$  — полоса частот, в пределах которой сосредоточена основная энергия сигнала;
- **динамический диапазон сигнала**  $D_c$  — отношение наибольшей мгновенной мощности сигнала к той наименьшей мощности, которая необходима для обеспечения заданного качества передачи. Этот параметр выражается в логарифмических величинах децибелах (дБ):

$$D_c = 10 \lg P_{c \max} / P_{c \min}.$$

## Основные понятия

Для общей характеристики сигнала иногда используются параметры:

$B_c$  – база сигнала, равная произведению:

$$B_c = T_c \cdot F_c;$$

$V_c$  – объём сигнала, равный произведению:

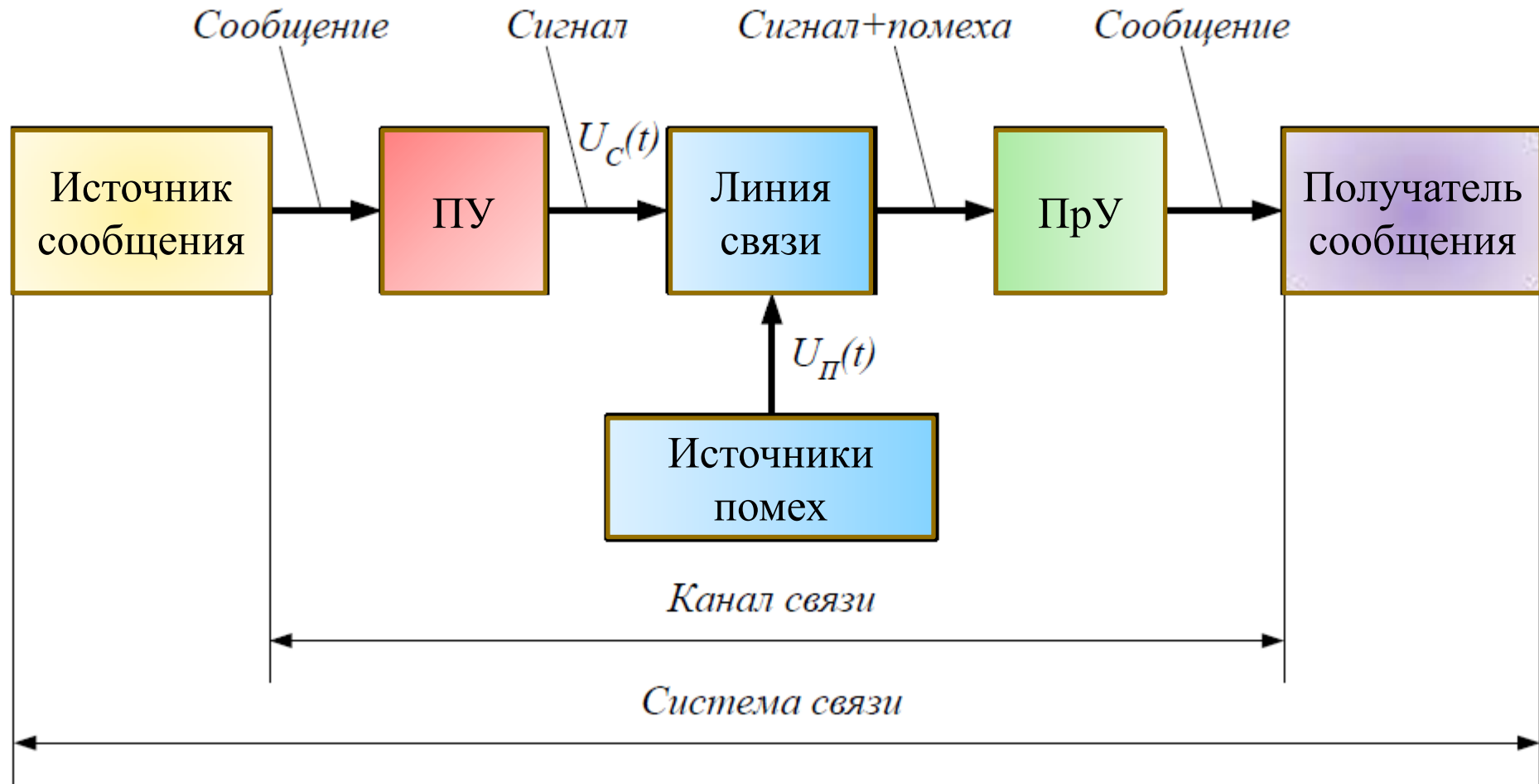
$$V_c = T_c \cdot F_c \cdot D_c.$$

Чем больше объём сигнала, тем больше информации можно заложить в этот объём, и тем сложнее передать такой сигнал по тракту связи с требуемым качеством.

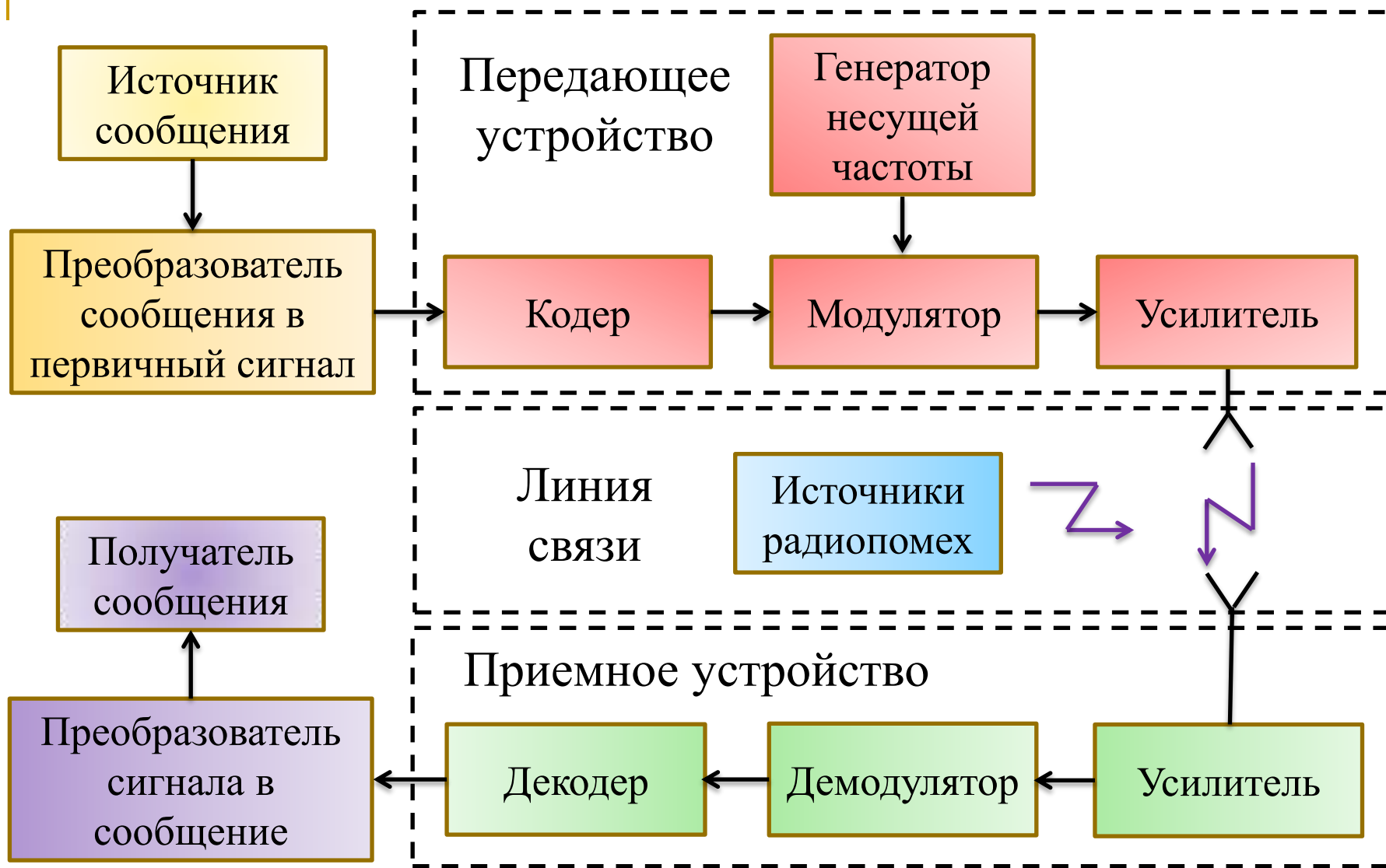
Минимальный уровень сигнала определяется уровнем собственных шумов тракта связи, а максимальный – допустимыми нелинейными искажениями сигнала при передаче его по тракту связи.

# Системы связи

**Система связи** – совокупность технических средств, для передачи сообщений от источника к потребителю.



# Системы связи





# Системы связи

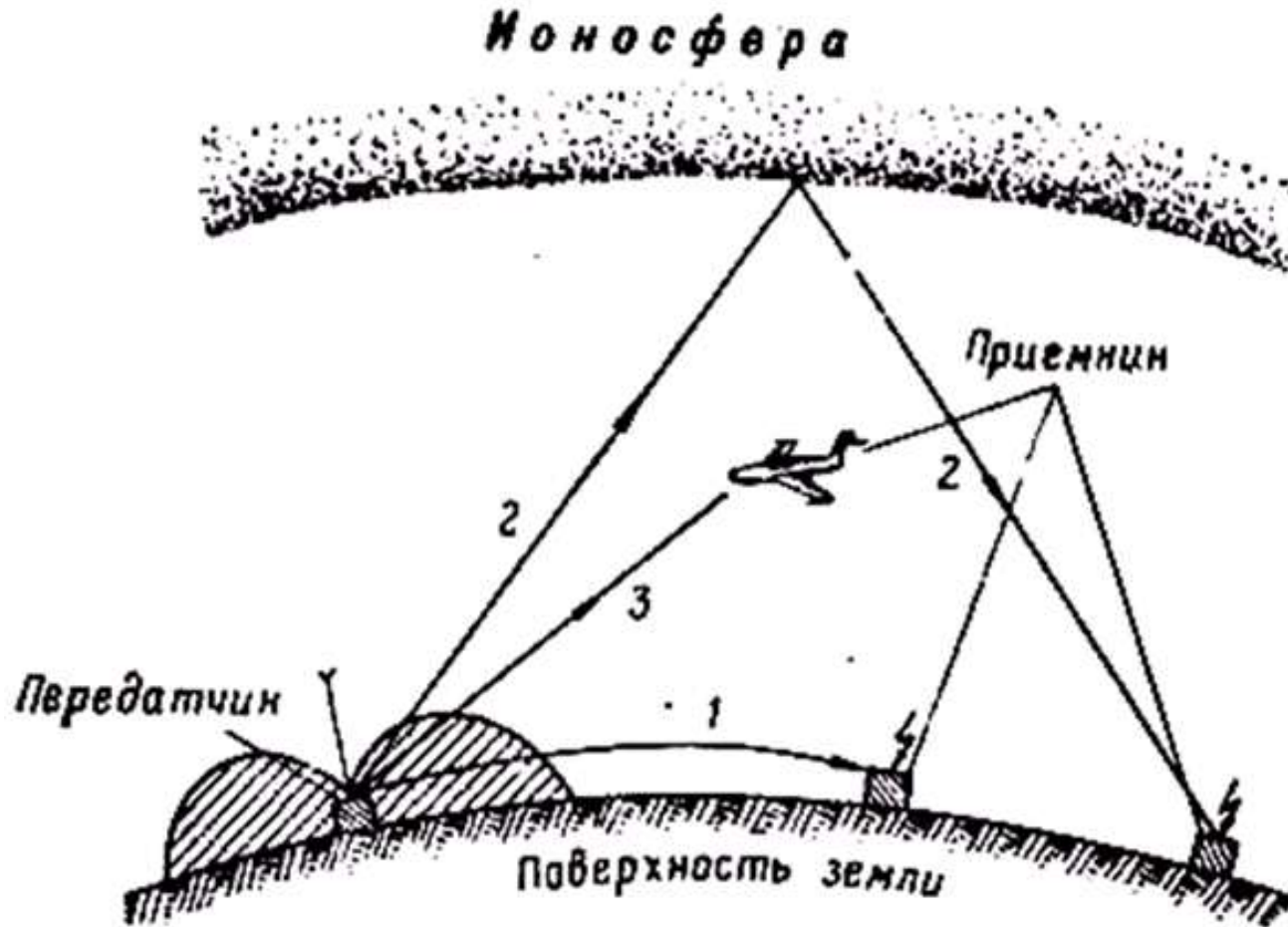
По виду передаваемых сообщений **системы радиосвязи** могут быть:

- передачи речи (телефония);
- передачи текста (телеграфия);
- передачи неподвижных изображений (фототелеграфия);
- передачи подвижных изображений (телевидение);
- передачи данных.

По назначению все системы радиосвязи делят на **вещательные**, отличающиеся высокой степенью художественности воспроизведения сообщений, и **профессиональные**.

В свою очередь профессиональные связные радиосистемы разделяют на **симплексные** (связь ведётся на одной частоте) и **дуплексные** (связь ведётся на двух частотах).

## 2 Передача сигналов на расстояние. Используемые в радиотехнике частоты. Особенности распространения радиоволн



1 – земной луч; 2 – ионосферный луч; 3 – пространственный луч.

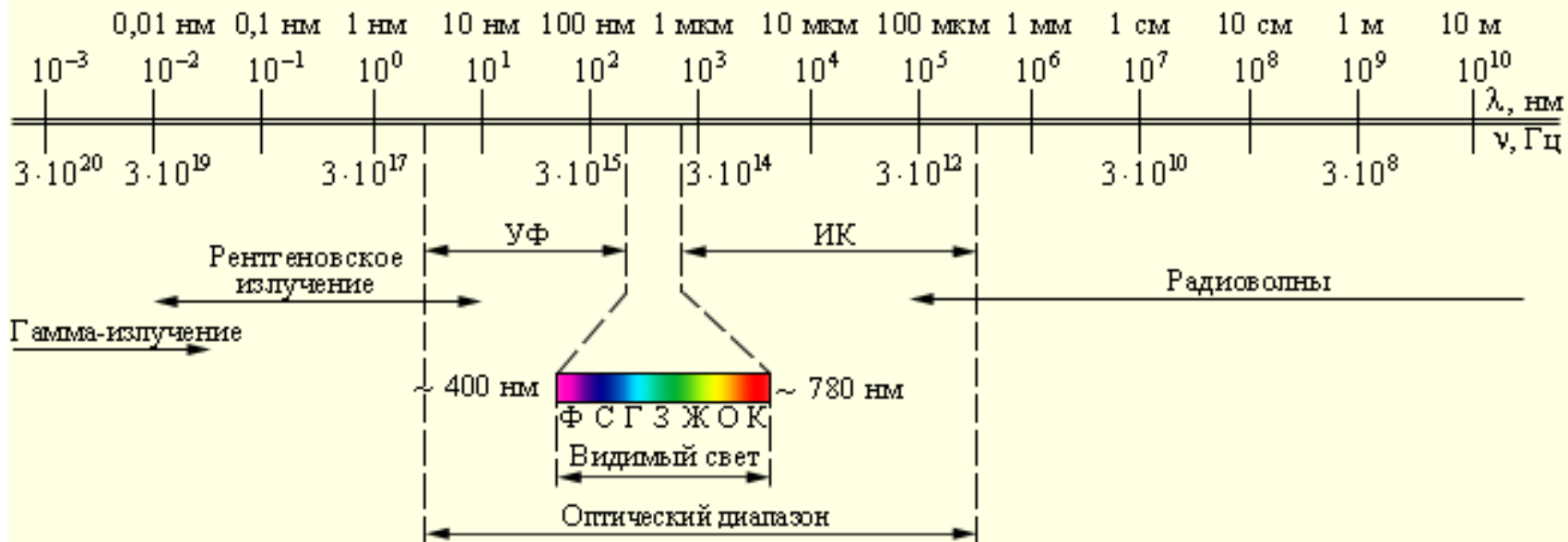
## Передача сигналов на расстояние.

Во всех случаях на распространение радиоволн атмосфера земли оказывает большое влияние, заключающееся в том, что радиоволны могут поглощаться в ней, переходя в тепло, преломляться ею, или отражаться от нее, изменяя направление своего движения.

Для **земного луча** условия распространения почти целиком определяются кривизной земной поверхности, свойствами верхних слоев почвы, вдоль которой происходит распространение, и неровностями (рельефом) местности. Верхние ионизированные слои атмосферы на распространение радиоволн земным лучом влияния не оказывают.

При распространении **ионосферным лучом** энергия, излучаемая передающей антенной, отражается от ионизированных слоев атмосферы и лишь после отражения доходит до приемника. В этом случае поверхность земли на распространение радиоволн влияния не оказывает. Условия распространения здесь целиком определяются свойствами ионизированных слоев атмосферы.

# Используемые в радиотехнике частоты.



Диапазон частот	Диапазон волн	Название
$3 \cdot 10^{19} - 3 \cdot 10^{18} \text{ Гц}$	$0,1 - 1 \text{ \AA}$	Гамма лучи
$3 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$	$1 - 100 \text{ \AA}$	Рентгеновские лучи
$3 \cdot 10^{16} - 10^{15} \text{ Гц}$	$100 \text{ \AA} - 0,3 \text{ мкм}$	Ультрафиолетовое излучение
$10^{15} - 4 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$	$0,3 - 0,75 \text{ мкм}$	Видимое излучение
$4 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$	$0,75 - 750 \text{ мкм}$	Инфракрасное излучение
$4 \cdot 10^{11} - 30 \text{ Гц}$	$750 \text{ мкм} - 10000 \text{ км}$	Радиодиапазон

# Используемые в радиотехнике частоты.

## Классификация диапазонов радиоволн

Наименование волн	Диапазон волн	Диапазон частот	Устаревшие термины
Декамегаметровые	$10^5 - 10^4$ км	3 – 30 Гц	
Мегаметровые	$10^4 - 10^3$ км	30 – 300 Гц	
Гектокилометровые	$10^3 - 10^2$ км	300 – 3000 Гц	
Мириаметровые	$10^2 - 10^1$ км	3 – 30 кГц	Сверхдлинные
Километровые	10 – 1 км	30 – 300 кГц	Длинные (ДВ)
Гектометровые	1000 – 100 м	300 – 3000 кГц	Средние (СВ)
Декаметровые	100 – 10 м	3 – 30 МГц	Короткие (КВ)
Метровые	10 – 1 м	30 – 300 МГц	Ультракороткие (УКВ)
Дециметровые	100 – 10 см	300 – 3000 МГц	
Сантиметровые	10 – 1 см	3 – 30 ГГц	
Миллиметровые	10 – 1 мм	30 – 300 ГГц	
Децимиллиметровые	1 – 0,1 мм	300 – 3000 ГГц	

# Особенности распространения радиоволн

**Длинные волны** (1000 – 10 000 м) относительно слабо затухают при распространении вдоль земной поверхности и хорошо огибают неровности местности и местные предметы.

Благодаря этим особенностям распространения длинных волн возможна радиосвязь земным лучом на расстояния до нескольких сотен и тысяч километров.

Так как распространение земных лучей не зависит от ионосферы, то радиосвязь на длинных волнах получается устойчивой круглосуточно в любое время года

Важным свойством длинных волн является также способность их проникать на большую глубину в почву или морскую воду. Это свойство длинных волн используется для связи с подводными лодками или между радиостанциями антенны, которых расположены под землей.

## Особенности распространения радиоволн

**Средние волны (100 – 1000 м)** по сравнению с длинными, обладают меньшей дифракционной способностью и быстрее затухают при распространении вдоль земной поверхности. Они широко применяются для связи как земным (на расстоянии до нескольких десятков и сотен километров), так и пространственным лучом.

Дальность действия радиостанций земным лучом при прочих равных условиях зависит от свойств почвы, над которой устанавливаются антенны и вдоль которой распространяются радиоволны.

При сухой песчаной или каменистой почве дальность действия уменьшается, при влажной почве она увеличивается. Особенности распространения средних волн ионосферным лучом аналогичны особенностям распространения коротких волн.

# Особенности распространения радиоволн

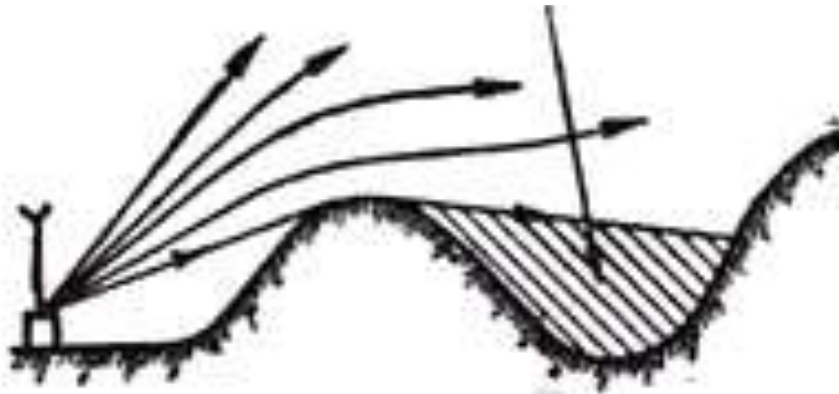
**Короткие волны (10 – 100 м)** по сравнению с более длинными волнами при распространении земным лучом быстрее поглощаются поверхностью почвы, вдоль которой они распространяются, и обладают меньшей дифракционной способностью.

Короткие волны, особенно примыкающие к поддиапазону УКВ, плохо огибают резкие складки местности и местные предметы, размеры которых намного превышают длину волны. На обратных (от передатчика) скатах крутых возвышенностей и за местными предметами образуются так называемые «теневые» области (области ослабления приема), где прием радиосигналов даже на расстояниях, близких от передатчика, затруднителен или практически невозможен.

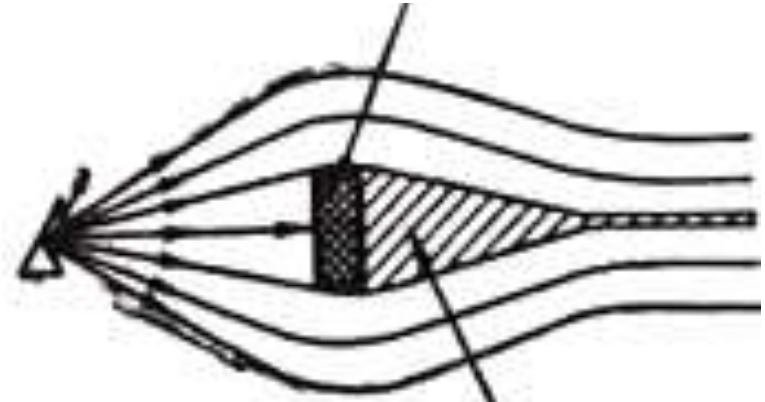


# Особенности распространения радиоволн

Область тени



Препятствие



Область тени

Образование теневых областей приема зависят от конфигурации препятствий. За теневыми областями благодаря дифракционным свойствам **коротких волн** прием снова становится возможным.

## Особенности распространения радиоволн

**Ультракороткие волны** (1 мм – 10 м). Общими особенностями распространения УКВ по сравнению с длинными волнами можно считать более быстрое затухание их при распространении земным лучом, меньшую дифракционную способность и нерегулярность отражения от ионосферы. особенности распространения УКВ земным лучом приводят к тому, что дальность их действия ограничивается примерно расстоянием прямой видимости между антеннами передатчика и приемника, которое определяется кривизной поверхности земли и рельефом местности. Наибольшее расстояние прямой видимости  $r_m$ , вдоль ровной поверхности земли с антеннами передатчика и приемника, поднятыми на высоту соответственно  $h_1$  и  $h_2$ , определяется формулой:

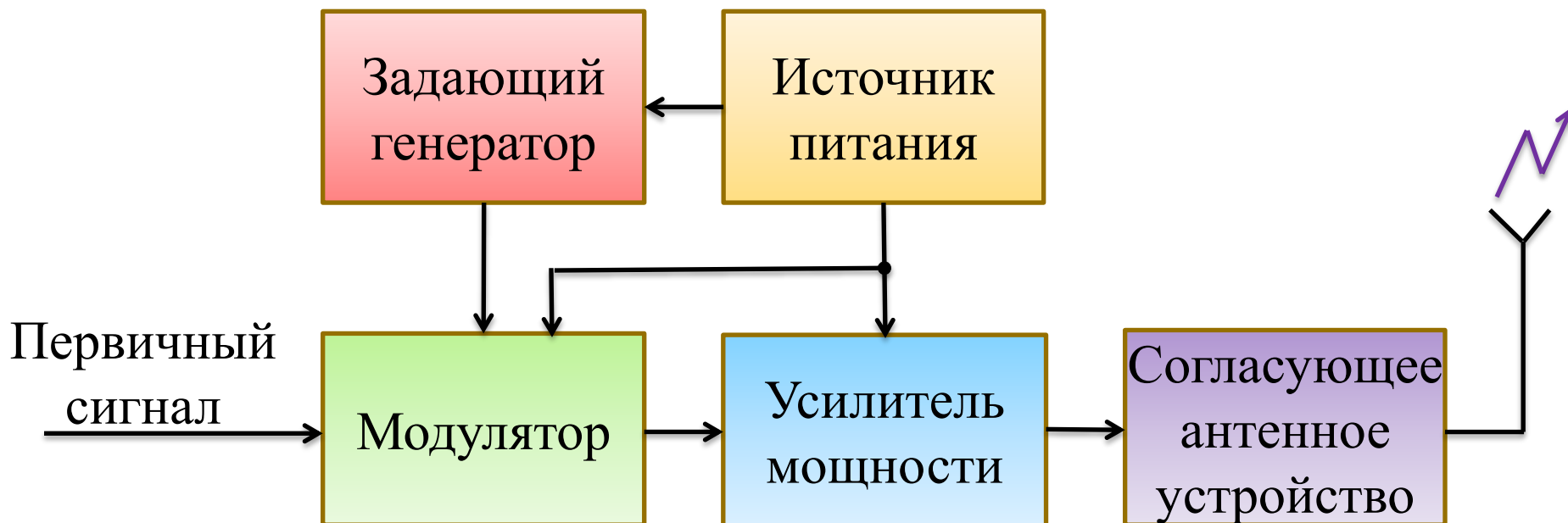
$$r_m = 3,6\sqrt{h_1 + h_2}$$

где  $h_1$  и  $h_2$  выражаются в, метрах, а  $r_m$  – в километрах.

Например, если  $h_1 = h_2 = 50$  м,  $r_m$  будет равно 36 км

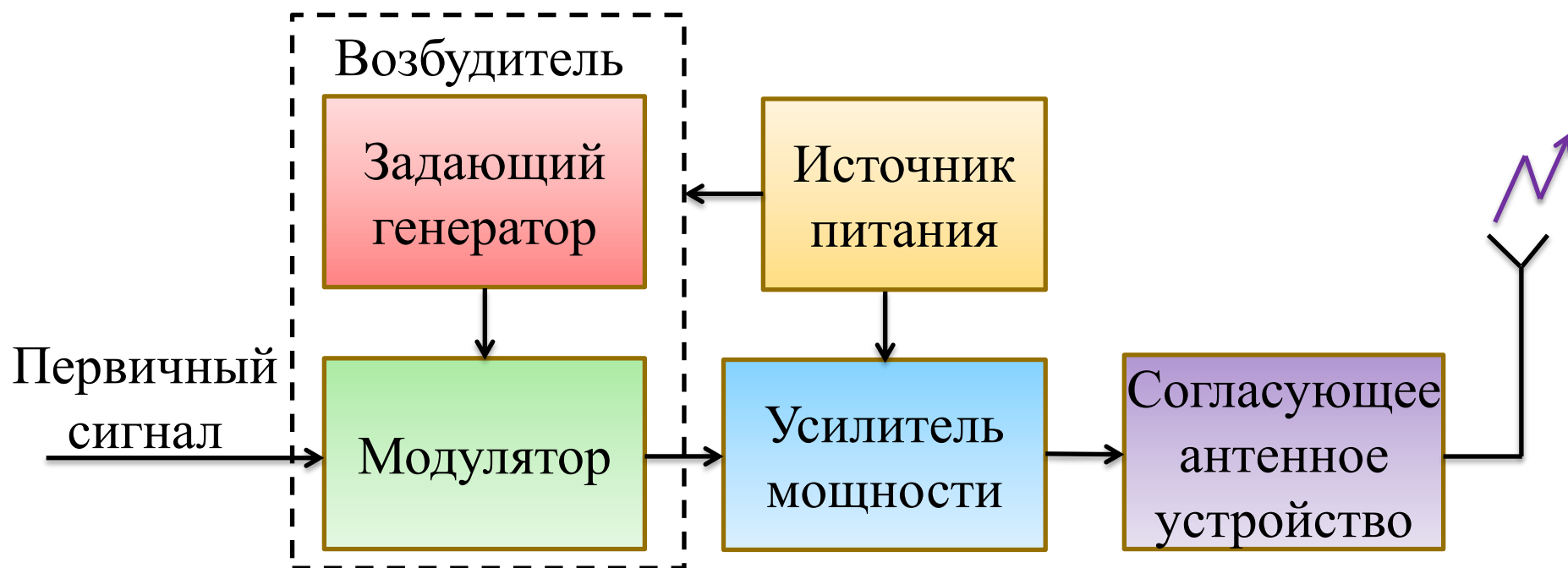
### 3 Радиопередающие устройства систем радиосвязи. Основные технические характеристики

**Радиопередатчик** – радиотехническое устройство, преобразующее первичные электрические сигналы в радиосигналы с мощностью, необходимой для радиосвязи на заданном расстоянии с требуемой надёжностью.



# Радиопередающие устройства систем радиосвязи

В соответствии с **ГОСТ 24375-80**, в радиопередатчиках допускается включение модулятора в состав возбuditеля.



# Радиопередающие устройства систем радиосвязи

**Возбудитель** предназначен для преобразования первичных электрических сигналов в радиосигналы, формирование сетки высокостабильных частот с заданным интервалом между соседними частотами, с помощью которых осуществляется перенос сформированных радиосигналов непосредственно на рабочую частоту в заданном диапазоне.

**Усилитель мощности** предназначен для усиления радиосигналов, сформированных в возбудителе, до величины, обеспечивающей требуемую дальность связи с заданной надёжностью.

**Согласующее антенное устройство** обеспечивает согласование усилителя мощности с передающей антенной с целью излучения антенной максимальной мощности, подводимой к ней от усилителя мощности.

## Основные технические характеристики

*Диапазон рабочих частот* определяется двумя параметрами:

- граничными частотами диапазона –  $f_{min}$  и  $f_{max}$ ;
- коэффициентом перекрытия диапазона по частоте –  $K_f$ :

$$K_f = \frac{f_{max}}{f_{min}}.$$

При заданном интервале между соседними частотами  $\Delta f_{pч}$  определяется количество рабочих частот  $N_{pч}$ , на которые может быть настроен радиопередатчик.

$$N_{pч} = \frac{f_{max} - f_{min}}{\Delta f_{pч}} + 1.$$

# Основные технические характеристики

*Виды радиосигналов* формируемых радиопередатчиками. используемыми в радиосвязи, можно разделить на три группы:

- **телефонные**, формируемые в процессе **модуляции**;
- **телеграфные**, формируемые в процессе **манипуляции**,
- **цифровые** сигналы.

В настоящее время при формировании телефонных радиосигналов наиболее широко используются методы однополосной модуляции (ОМ) и частотной модуляции (ЧМ).

При работе телеграфными сигналами применяются методы амплитудного АТ, частотного ЧТ и ДЧТ и фазового телеграфирования ФТ и ОФТ.

Цифровые потоки передачи данных формируются специальной аппаратурой.

# Основные технические характеристики

*Мощность радиопередатчика* определяет уровень сигнала в точке приёма, и, следовательно, дальность радиосвязи и её надёжность.

Для всех видов телефонных радиосигналов (кроме ОМ) средняя мощность измеряется при отсутствии первичного сигнала, т. е. в режиме молчания.

$$\overline{P}_{A\_ТЛФ} = \frac{I_{A\_МОЛЧ}^2 \cdot r_A}{2}.$$

где  $I_A$  — амплитуда тока радиосигнала на входе антенны;  
 $r_A$  — активная составляющая входного сопротивления антенны.



## Основные технические характеристики

Для телефонных радиосигналов с ОМ мощность радиопередатчика определяется пиковой мощностью радиосигнала при максимальном значении первичного модулирующего сигнала.

$$\bar{P}_{A\_OM} = \frac{I_{A\_MAX}^2 \cdot r_A}{2}.$$

При работе радиопередатчика телеграфными и цифровыми радиосигналами мощность оценивается средней мощностью, подводимой к антенне при передаче токовой (положительной) посылки или символа «единицы» первичного электрического сигнала.

$$P_{A\_ТЛГ} = \frac{I_A^2 \cdot r_A}{2}.$$

# Основные технические характеристики

*Стабильность частоты излучения радиосигналов* определяет устойчивость и надёжность радиосвязи, обеспечивает вхождение в связь без поиска корреспондентов и ведение радиосвязи без подстройки радиоприёмника по сигналу корреспондента.

*Абсолютная нестабильность частоты* – разность между текущими (измеренными) значениями частоты  $f$  и её номинальным значением  $f_0$ :

$$\Delta f = f - f_0 .$$

*Относительная нестабильность частоты* – отношение абсолютной нестабильности  $\Delta f$  к номинальному значению частоты  $f_0$ , на которой осуществляется измерение:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_0} .$$

# Основные технические характеристики

## *Подавление (фильтрация) побочных колебаний.*

Под **побочными колебаниями** радиопередатчика понимают колебания, излучаемые антенной на частотах, расположенных за пределами спектра основного радиосигнала.

### **Основные виды побочных излучений:**

- на **гармониках основной частоты**, появляющиеся в результате нелинейного режима усиления радиосигналов в усилителе мощности.

Нормы их подавления определяются требованиями **МККР**, согласно которым средняя мощность, излучаемая на гармониках основной частоты, должна быть меньше мощности основного сигнала на **40 дБ** (на **60 дБ**) и не превышать величины **50 мВт** (**1 мВт**) при работе в диапазоне частот до **30 МГц** (в диапазоне частот **30 – 235 МГц**);

**МККР** – международный консультативный комитет по радио

## Основные технические характеристики

- на комбинированных частотах, расположенных в непосредственной близости от спектра основного радиосигнала, появляющиеся в результате нелинейных преобразований при формировании радиосигналов на рабочей частоте в возбuditеле передатчика.

Требования по подавлению комбинационных частот:

- в полосе частот, отстоящих от полосы частот полезного сигнала на  $(\pm 3,5) - (\pm 25)$   $\kappa\Gamma\text{ц}$ , ослабление должно быть не менее 80 дБ;

- в полосе частот, отстоящих на  $\pm 25$   $\kappa\Gamma\text{ц}$  и до  $\pm 10$  % от установленной частоты, – 120 дБ;

- в полосе частот свыше  $\pm 10$  % от установленной частоты – 140 дБ.

## Основные технические характеристики

*Время перестройки передатчика* с одной частоты на другую, в значительной степени определяющее надёжность радиосвязи, особенно в условиях сложной помеховой обстановки: чем оно меньше, тем больше надёжность радиосвязи. Современные радиопередатчики, имеющие системы заранее подготовленных частот ЗПЧ, обеспечивают перестройку с одной ЗПЧ на другую в течение единиц секунд. В настоящее время предъявляются более жёсткие требования ко времени перестройки, которое ограничивается единицами — десятками миллисекунд и меньше.

*Промышленный КПД* — отношение мощности передатчика, подводимой к антенне  $P_A$ , к мощности, потребляемой радиопередатчиком от источника питания  $P_0$

$$\eta = \frac{P_A}{P_0}.$$

## Основные технические характеристики

По диапазону частот передатчики различают на: сверхдлинноволновые, длинноволновые, средневолновые, коротковолновые, ультра-коротковолновые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые.

Передатчики пяти первых диапазонов объединяются общим названием — высокочастотные, трех последних — сверхвысокочастотные. Границей между РПДУ ВЧ и СВЧ диапазонов является частота 300 МГц.

При частоте менее 300 МГц передатчик относится к ВЧ диапазону, выше — к СВЧ диапазону.

По мощности ВЧ сигнала, подводимого к антенне, РПДУ различают: малой — до 10 Вт, средней — 10... 500 Вт, большой — 500 Вт... 10 кВт, сверхбольшой — выше 10 кВт.

По виду излучения передатчики разделяют на работающие в непрерывном и импульсном режимах.

## 4 Автогенераторы. Принцип действия, режимы работы, структурные схемы

В соответствии с **ГОСТ 24375-80**, под **возбудителем радиопередатчика** следует понимать *устройство радиопередатчика для формирования гармонических колебаний с заданными частотами с помощью одного или нескольких автогенераторов.*

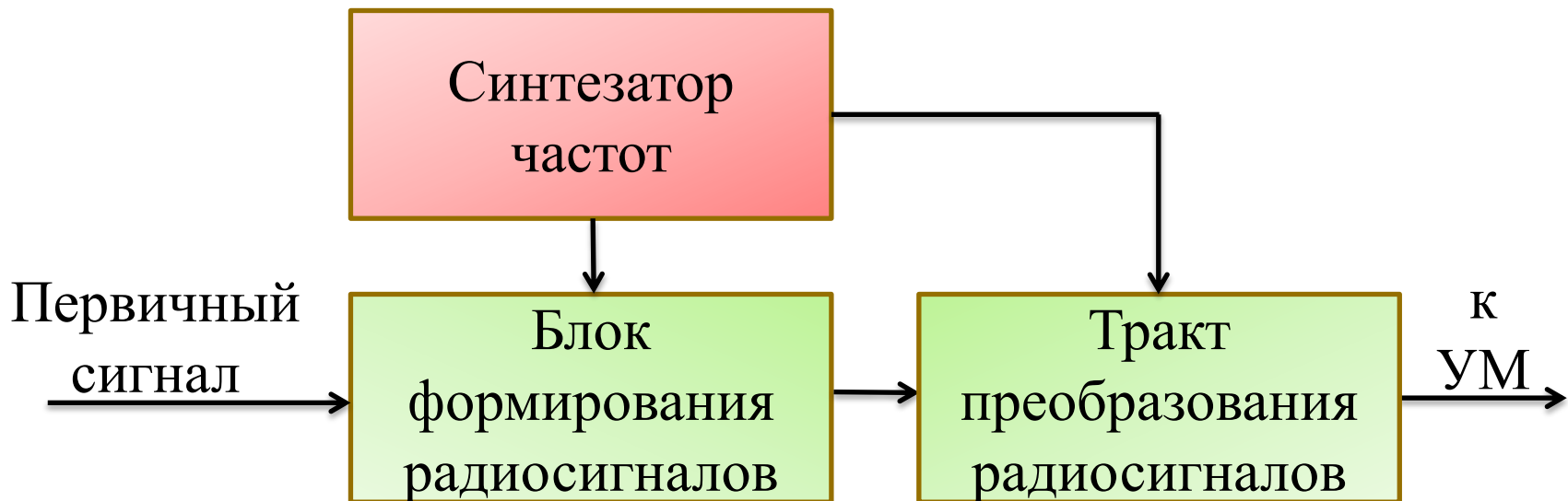
Часто в блоке возбудителя конструктивно размещены (**ГОСТ 24375-80**):

- задающий генератор частоты (фиксированной или перестраиваемой) несущей волны;
- модулирующее устройство, изменяющее параметры излучаемой волны (амплитуду, частоту, фазу или несколько параметров одновременно) в соответствии с сигналом, который требуется передать.

# Автогенераторы

В соответствии с выполняемыми функциями, любой возбудитель содержит функциональные элементы:

- синтезатор частот;
- блок формирования радиосигналов;
- тракт преобразования радиосигналов.



В состав синтезатора частот входят диапазонные и кварцевые автогенераторы.

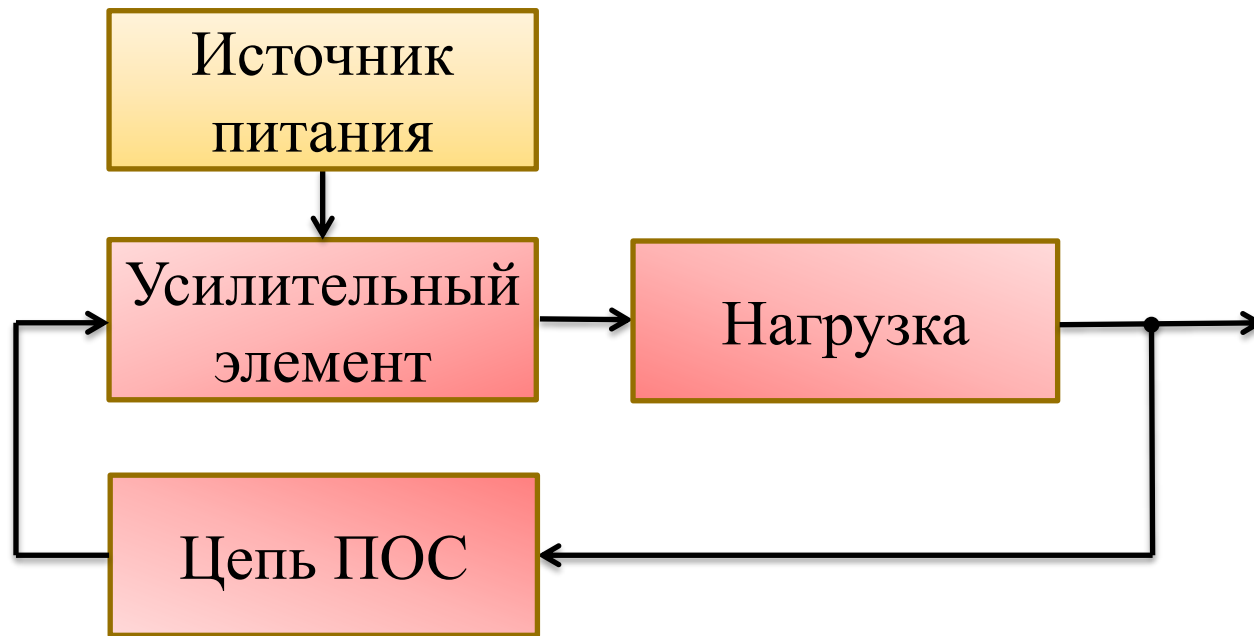


# Автогенераторы

**Автогенератор** — радиотехническое устройство, предназначенное для преобразования энергии источника постоянного тока в энергию незатухающих электрических колебаний. В автогенераторе, колебания возникают без постороннего воздействия при включении источника питания. Автогенератор можно представить как усилитель с положительной обратной связью и состоящий из:

- усилительного элемента (электронная лампа, транзистор, и др.);
- нагрузки усилительного элемента (как правило,  $LC$  колебательный контур);
- цепи положительной обратной связи (пассивного четырёхполюсника с коэффициентом передачи  $\beta < 1$ );
- стабилизированного источника питания.

# Автогенераторы



Автогенератор является принципиально нелинейным устройством, поскольку на его вход переменный процесс вообще не подается, а спектр выходного колебания обогащается новыми составляющими (в случае автогенератора гармонического колебания это одна составляющая).

# Принцип действия автогенератора

Принцип действия автогенераторов основан на применении в усилителе положительной обратной связи.

Из теории линейных усилителей следует, что комплексный коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью,  $K(j\omega)$  определяется соотношением:

$$K(j\omega) = \frac{K_y(j\omega)}{1 - K_y(j\omega)K_{oc}(j\omega)},$$

где  $K_y(j\omega)$  – комплексный коэффициент передачи усилителя без обратной связи;

$K_{oc}(j\omega)$  – комплексный коэффициент передачи цепи обратной связи.

## Принцип действия автогенератора

При 100 % положительной обратной связи, фазовый сдвиг, вносимый усилителем и цепью обратной связи равен нулю (кратен  $2\pi$ ), а произведение  $K_y(j\omega)K_{oc}(j\omega)$  является действительной и положительной величиной, следовательно знаменатель будет меньше 1, что приводит к увеличению коэффициента усиления  $K(j\omega)$ .

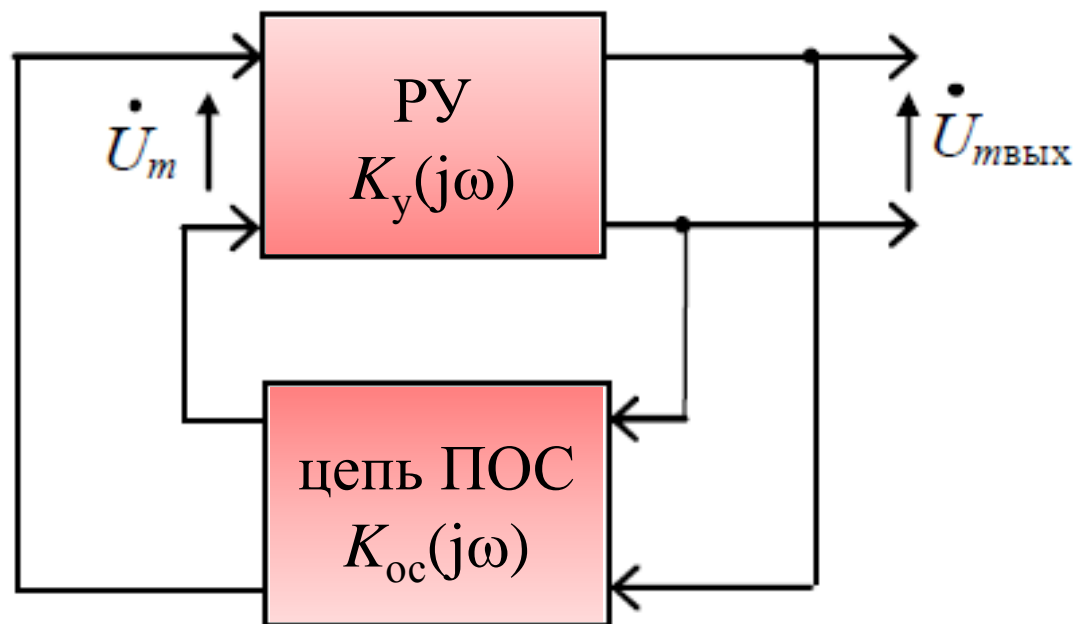
При выполнении равенства  $K_y(j\omega)K_{oc}(j\omega) = 1$ , знаменатель обращается в 0 и коэффициент усиления  $K(j\omega)$  становится бесконечно большой величиной, что свидетельствует о потере устойчивости и возникновении автоколебаний.

Для формирования гармонического процесса система должна быть узкополосной, что необходимо для выделения из спектра тока, протекающего через нелинейный элемент усилителя, только одной составляющей нужной частоты.

# Принцип действия автогенератора

Автогенератор гармонического колебания в своей структурной схеме должен содержать резонансный усилитель (РУ) и цепь ПОС.

Резонансный усилитель обеспечивает наряду с усилением узкополосную фильтрацию, а цепь ПОС обеспечивает синфазную подачу сигнала с выхода усилителя на его вход.



При этом образуется так называемая **кольцевая схема**

# Режимы работы автогенератора

Из-за инерционности резонансного усилителя процесс на выходе автогенератора гармонических колебаний устанавливается не мгновенно, а через некоторое время после включения.

Выделяют два режима работы автогенератора: **нестационарный** и **стационарный**.

**Нестационарный** — такой режим, при котором параметры колебания (амплитуда, частота и начальная фаза) непрерывно изменяются во времени.

Как правило, возникает при включении, выключении генератора, а также при изменении собственных параметров генератора, например при перестройке частоты.

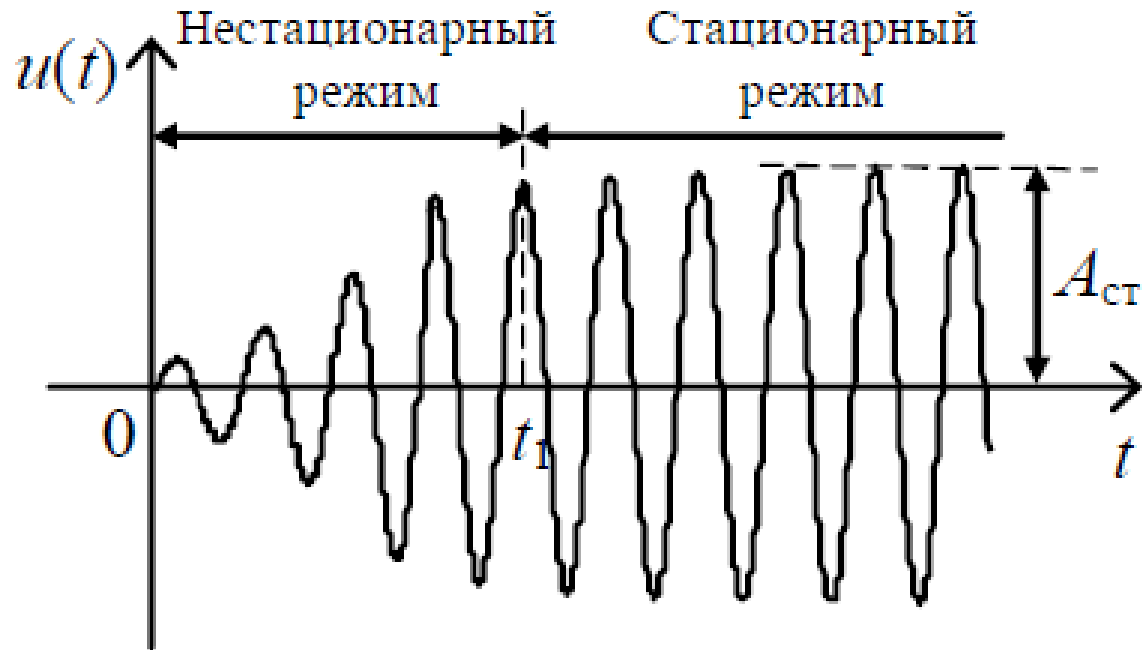
## Режимы работы автогенератора

**Стационарный** – такой режим, при котором параметры колебания (амплитуда, частота и начальная фаза) неизменны во времени. Этот режим также называют установившимся режимом, характеризующимся постоянством параметров колебаний.

Переход из нестационарного режима в стационарный происходит автоматически.

При включении питания в момент времени  $t = 0$  в автогенераторе возникает нестационарный режим, при котором амплитуда колебания нарастает. Однако процесс нарастания амплитуды со временем будет замедляться. Это связано с тем, что по мере увеличения амплитуды автоколебания начинают проявляться нелинейные свойства усилителя.

# Режимы работы автогенератора



При больших амплитудах усилительный элемент переходит в режим работы с отсечкой и ограничением тока, что приводит к эффективному уменьшению коэффициента усиления и дальнейший рост амплитуды колебания прекращается, автогенератор переходит в стационарный режим, в котором амплитуда  $A_{ст}$  не зависит от времени.



# Механизмы самовозбуждения автогенератора

При рассмотрении принципа действия автогенератора возникает вопрос: почему при отсутствии внешнего переменного воздействия на входе усилителя на его выходе формируется гармоническое колебание. На самом деле первичные колебания в системе присутствуют. Физически это объясняется следующими причинами:

**1) Переходной процесс, возникающий при включении питания.** Резонансный усилитель представляет собой узкополосной фильтр (из-за наличия колебательного контура). Поэтому под воздействием скачка постоянного напряжения, возникающего при включении питания, на выходе усилителя возникает переходной процесс в виде свободного колебания, частота осцилляций которого практически равна резонансной частоте контура. Это и есть первичное колебание.

# Механизмы самовозбуждения автогенератора

При отсутствии ПОС это первичное колебание носит, затухающий характер, при наличии ПОС эти колебания подаются на вход усилителя и при определенной глубине ПОС переходной процесс в системе становится нарастающим по амплитуде, что и приводит к самовозбуждению.

**2) Собственные шумы.** В электронном устройстве всегда присутствуют собственные шумы, которые также являются первичными колебаниями.

На выходе резонансного усилителя формируется узкополосный шум. Далее по цепи обратной связи этот шум поступает на вход усилителя и при определенной глубине ПОС происходит потеря устойчивости и формирование колебания с частотой, близкой к резонансной.

## Условия стационарности (баланс амплитуд и баланс фаз)

В стационарном режиме автогенератор можно рассматривать как нелинейный резонансный усилитель, на вход которого подается гармоническое колебание частотой генерации  $\omega_r$  с его выхода.

Комплексные коэффициенты передачи усилителя в стационарном режиме на частоте генерации  $K_y^{ст}(j\omega_r)$  и цепи обратной связи  $K_{ос}(j\omega_r)$  можно записать в виде:

$$K_y^{ст}(j\omega_r) = \frac{\dot{U}_{mвых}}{\dot{U}_m} ; \quad K_{ос}(j\omega_r) = \frac{\dot{U}_m}{\dot{U}_{mвых}} ,$$

где  $\dot{U}_m$ ,  $\dot{U}_{mвых}$  – комплексные амплитуды напряжений на входе и выходе усилителя соответственно.

## Условия стационарности (баланс амплитуд и баланс фаз)

В стационарном режиме комплексный коэффициент передачи кольцевой схемы на частоте генерации равен единице:

$$K_y^{\text{сг}}(j\omega_{\Gamma})K_{\text{ос}}(j\omega_{\Gamma}) = 1$$

Из этого выражения, записанного в показательной форме

$$K_y^{\text{сг}}(\omega_{\Gamma})K_{\text{ос}}(\omega_{\Gamma})e^{j[\varphi_y(\omega_{\Gamma})+\varphi_{\text{ос}}(\omega_{\Gamma})]} = 1$$

следует **условие баланса амплитуд**:

$$K_y^{\text{сг}}(\omega_{\Gamma})K_{\text{ос}}(\omega_{\Gamma}) = 1$$

и **условие баланса фаз**:

$$\varphi_y^{\text{сг}}(\omega_{\Gamma}) + \varphi_{\text{ос}}(\omega_{\Gamma}) = 2\pi n$$

## Условия стационарности (баланс амплитуд и баланс фаз)

Таким образом, в стационарном режиме работы автогенератора выполняются условия баланса амплитуд и баланса фаз, а именно: кольцевое усиление на генерируемой частоте устанавливается равным единице, а фазовый сдвиг в кольце – кратным  $2\pi$

Физический смысл **баланса амплитуд** и **баланса фаз** состоит в том, что на частоте генерации в стационарном режиме обратная связь должна быть чисто положительной (**баланс фаз**), а глубина обратной связи должна обеспечить полную компенсацию потерь в контуре (**баланс амплитуд**).

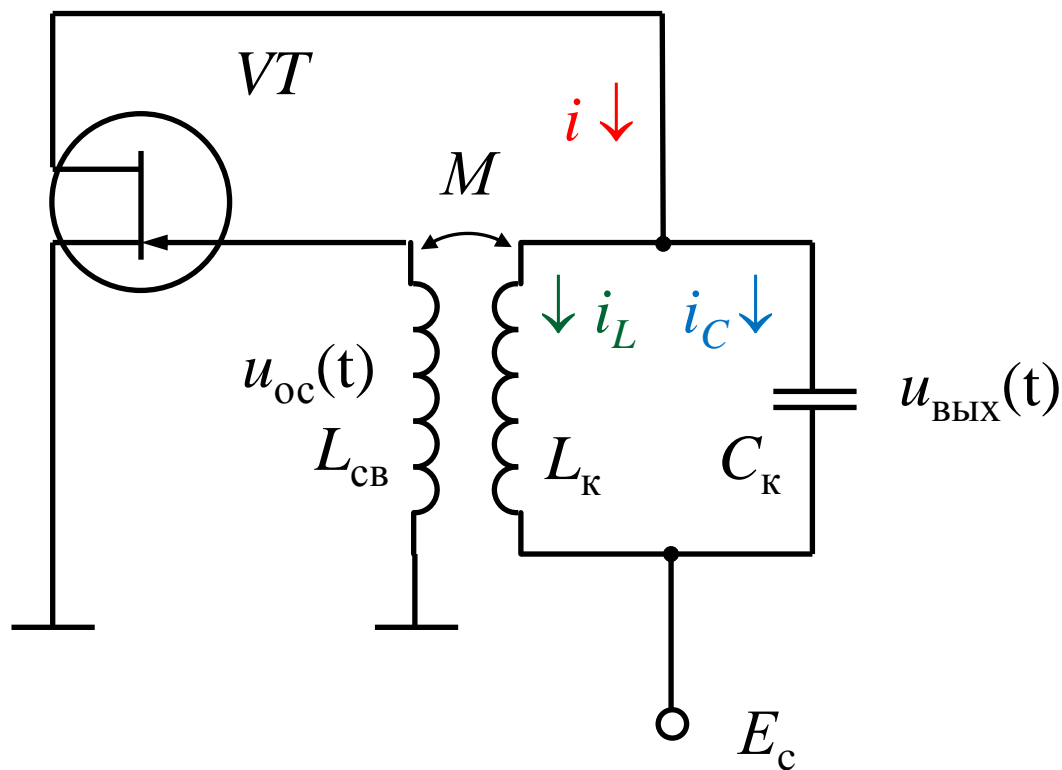
Условие баланса амплитуд позволяет определить амплитуду генерируемых колебаний в стационарном режиме, а условие баланса фаз – частоту этих колебаний.

## Условия самовозбуждения

Условия, при которых после включения питания начинается самовозбуждение автогенератора на примере простейшего  $LC$ -автогенератора с трансформаторной обратной связью.

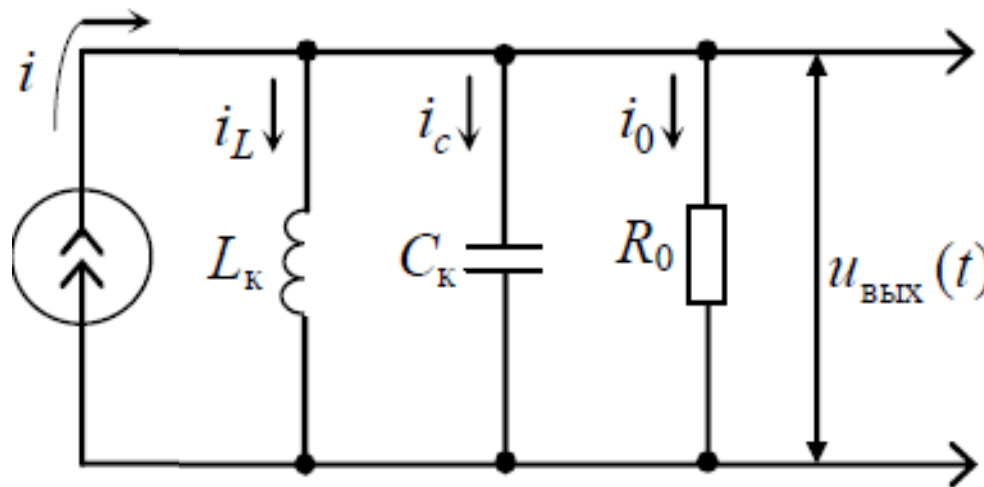
Напряжение обратной связи  $u_{oc}(t)$  снимается с  $L_{св}$  и подается на затвор транзистора  $VT$ .

Выходное напряжение  $u_{вых}(t)$  снимается с колебательного контура.



## Условия самовозбуждения

Эквивалентная схема выходной цепи автогенератора  
с трансформаторной обратной связью



$R_0$  – резонансное сопротивление контура;

$L_k$  – индуктивность контура;

$C_k$  – емкость контура.

По первому закону Кирхгофа:  $i(t) = i_0(t) + i_L(t) + i_C(t)$

## Условия самовозбуждения

Используя компонентное уравнение для индуктивности, выражение для выходного напряжения  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$  можно записать:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = L_{\text{К}} \frac{di_L}{dt}$$

Выражения для токов, через ток  $i_L$ :

$$i_0 = \frac{u_{\text{ВЫХ}}(t)}{R_0} = \frac{L_{\text{К}}}{R_0} \frac{di_L}{dt} \quad i_c = C_{\text{К}} \frac{du_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} = C_{\text{К}} L_{\text{К}} \frac{d^2 i_L}{dt^2}$$

Напряжение обратной связи  $u_{\text{ос}}(t)$  возникает из-за наличия взаимной индуктивности  $M$  и определяется как:

$$u_{\text{ос}}(t) = M \frac{di_L}{dt} ; \text{ для тока стока транзистора:}$$
$$i = Su_{\text{ос}}(t) = SM \frac{di_L}{dt}$$



## Условия самовозбуждения

$$i(t) = i_0(t) + i_L(t) + i_C(t) \rightarrow SM \frac{di_L}{dt} = \frac{L_K}{R_0} \frac{di_L}{dt} + i_L + L_K C_K \frac{d^2 i_L}{dt^2} \rightarrow$$
$$\rightarrow \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{C_K} \left( \frac{1}{R_0} - \frac{SM}{L_K} \right) \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{L_K C_K} i_L = 0$$
$$\frac{1}{L_K C_K} = \omega_p^2 \quad \frac{1}{2C_K} \left( \frac{1}{R_0} - \frac{SM}{L_K} \right) = \alpha_3$$

где  $\omega_p$  – резонансная частота колебательного контура;

$\alpha_3$  – эквивалентный коэффициент затухания.

Линейное дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее процесс после включения питания

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 2\alpha_3 \frac{di_L}{dt} + \omega_p^2 i_L = 0$$

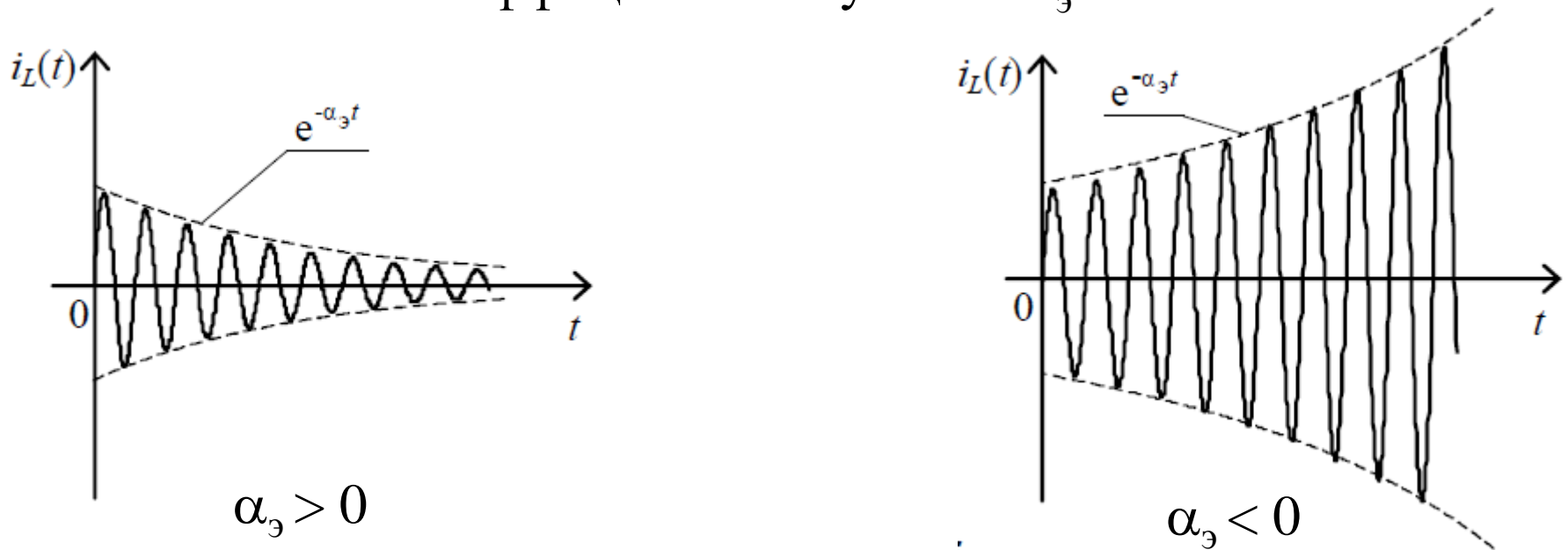
## Условия самовозбуждения

Решение уравнения записывается в виде:

$$i_L(t) = I_0 e^{-\alpha_3 t} \cos(\omega_{\text{св}} t + \theta_0)$$

где  $\omega_{\text{св}} = \sqrt{\omega_p^2 - \alpha_3^2}$  – частота свободных колебаний.

Оно определяет процесс изменения тока, от значений эквивалентного коэффициента затухания  $\alpha_3$ :



## Условия самовозбуждения

Следовательно **условием самовозбуждения** автогенератора является неравенство:

$$\alpha_{\Sigma} < 0 \quad \text{или} \quad K_y(\omega_{\Gamma})K_{oc}(\omega_{\Gamma}) > 1$$

Таким образом, для возникновения автоколебаний в системе с положительной обратной связью необходимо, чтобы в момент включения питания кольцевое усиление было больше единицы. Выполнение этого условия гарантирует запуск генератора.

**Условие самовозбуждения** переходит в равенство при переходе автогенератора от нестационарного режима работы в стационарный за счет уменьшения коэффициента усиления усилителя от величины  $K_y(\omega_{\Gamma})$  до  $K_y^{ст}(\omega_{\Gamma}) = 1 / K_{oc}(\omega_{\Gamma})$ .

---

# Литература

## а) основная литература

1. Першин, В. Т. Основы радиоэлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. Т. Першин. - Мн. : Выш. Шк. 2006. - 436 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view\\_red&book\\_id=234977](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=234977)
  2. Красковский Л. Е., Мельникова Л. Я., Меремсон Ю. Л. Приемо-передающие устройства железнодорожной радиосвязи [Электронный ресурс]: Учебное пособие / А. Е. Красковский и др.; под ред. А. Е. Красковского. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. — 360 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=227703&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=227703&sr=1)
  3. Акулиничев Ю. П. Теория и техника передачи информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / Ю. П. Акулиничев, Л. С. Бернгардт. — Томск: Эль Контент, 2012. — 210 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=208952&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=208952&sr=1)
-

## **б) дополнительная литература**

1. Мелихов С. В. Аналоговое и цифровое радиовещание [Электронный ресурс]: Учебное пособие./ С. В. Мелихов. - Электрон. текстовые дан. – 2-е изд., испр. – Томск: Томск, гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012.–233 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view&book\\_id=208686](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=208686) .
2. Томаси У. Электронные системы связи [Электронный ресурс] / У. Томаси. - Электрон. текстовые дан. – М.: Техносфера, 2007. – 1360 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view&book\\_id=135422](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=135422).
3. Логвинов, В. В. Схемотехника телекоммуникационных устройств, радиоприемные устройства систем мобильной и стационарной радиосвязи, теория электрических цепей : лабораторный практикум - II на персональном компьютере : учеб. пособие для вузов / В. В. Логвинов, В. В. Фриск .— М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2011 .— 655 с. : ил. — (Библиотека студента) (4 экземпляра в библиотеке).

4. Логвинов, В. В. Схемотехника телекоммуникационных устройств, радиоприемные устройства систем мобильной и стационарной радиосвязи, теория электрических цепей : лабораторный практикум -II на персональном компьютере: учебное пособие для студентов, обуч. по направлению бакалавров и магистров 210700 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" / В. В. Логвинов, В. В. Фриск .— М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2013 .— 656 с. : ил. — (Библиотека студента) (5 экземпляров в библиотеке).
5. Головин, О. В.. Устройства генерирования, формирования, приема и обработки сигналов : учеб. пособие по спец. "Средства связи с подвижными объектами" и "Радиосвязь, радиовещание и телевидение" / О.В. Головин .— М. : Горячая линия - Телеком, 2014 .— 782 с. : ил. (5 экземпляров в библиотеке).
6. Компоненты и технологии. [Электронный ресурс] - Электрон. текстовые дан. 2011-2015. - Режим доступа: URL <http://elibrary.ru/issues.asp?id=9938>