

Лекция 1

**Общая характеристика систем
передачи информации.**

**Элементы радиопередающих
устройств систем связи.**

Автогенераторы

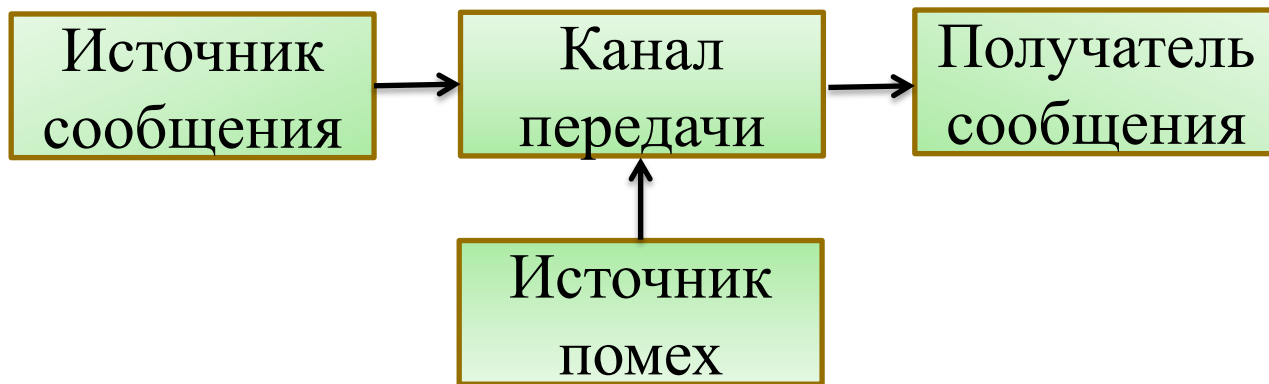
Рассматриваемые вопросы

- 1 Основные понятия систем передачи информации
- 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 систем передачи информации

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 систем передачи информации

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 систем передачи информации

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 систем передачи информации

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:

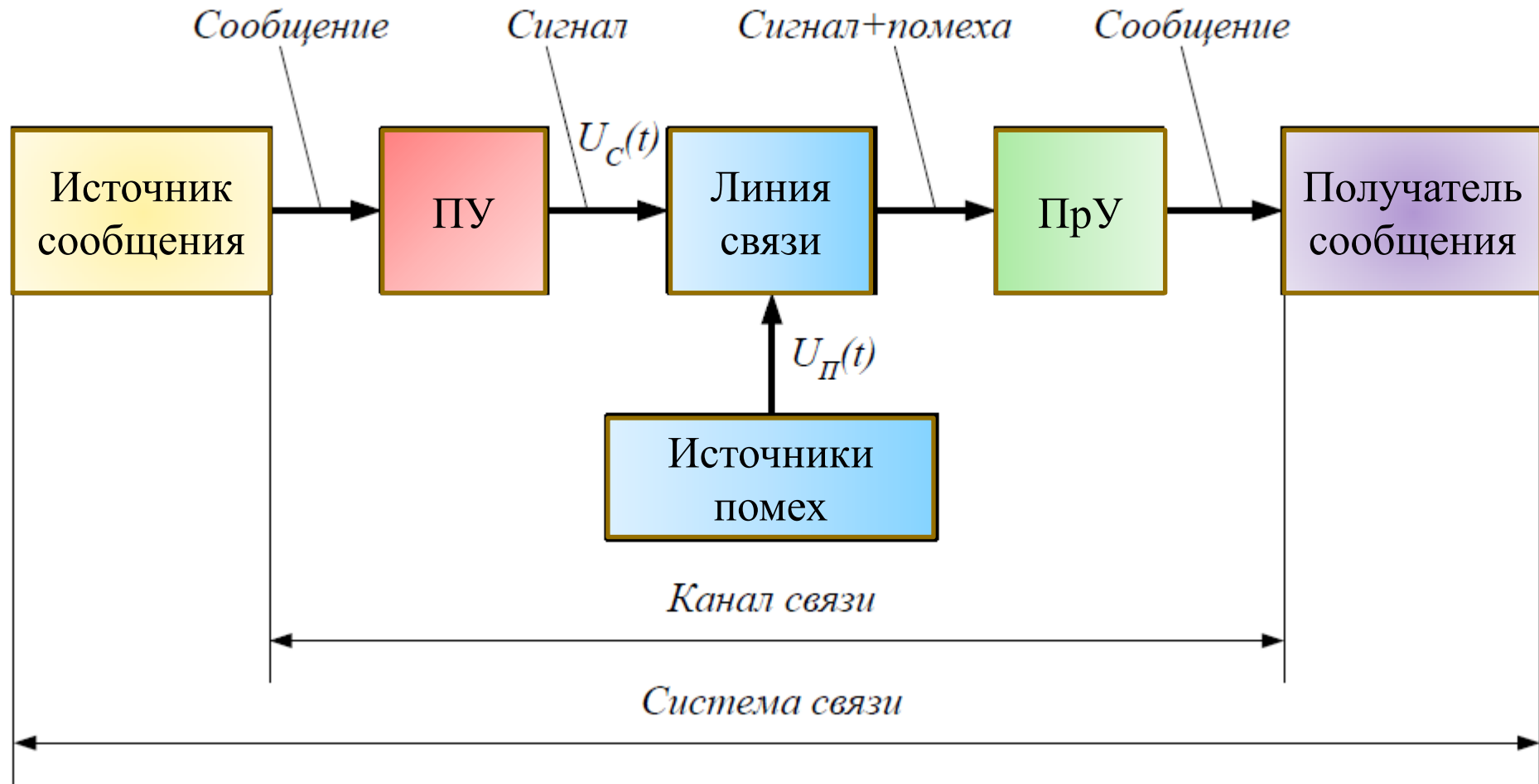
$$V_c = T_c \cdot F_c \cdot D_c.$$

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

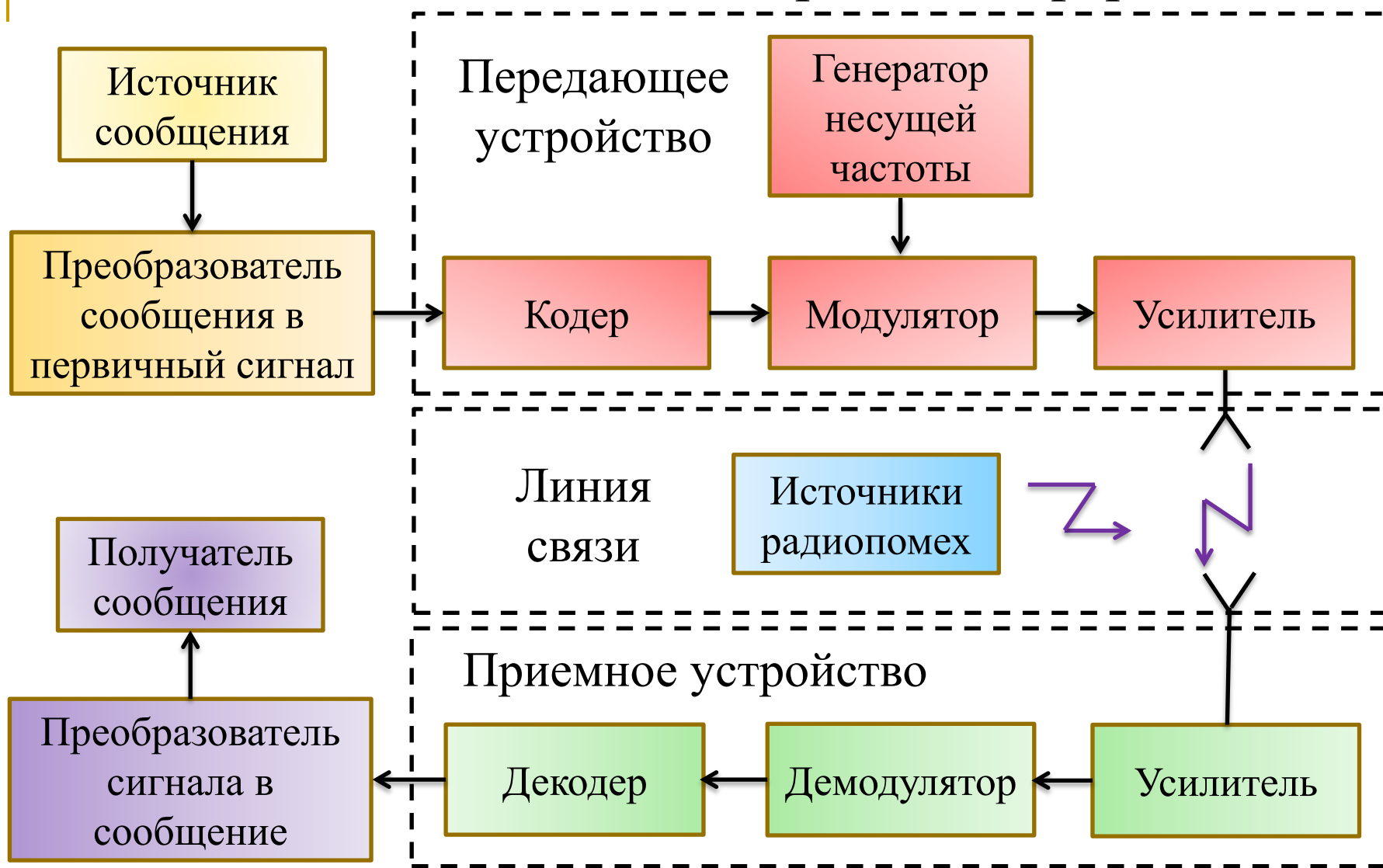
Минимальный уровень сигнала определяется уровнем собственных шумов тракта связи, а максимальный – допустимыми нелинейными искажениями сигнала при передаче его по тракту связи.

Основные понятия систем передачи информации

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



Основные понятия систем передачи информации



Основные понятия систем передачи информации

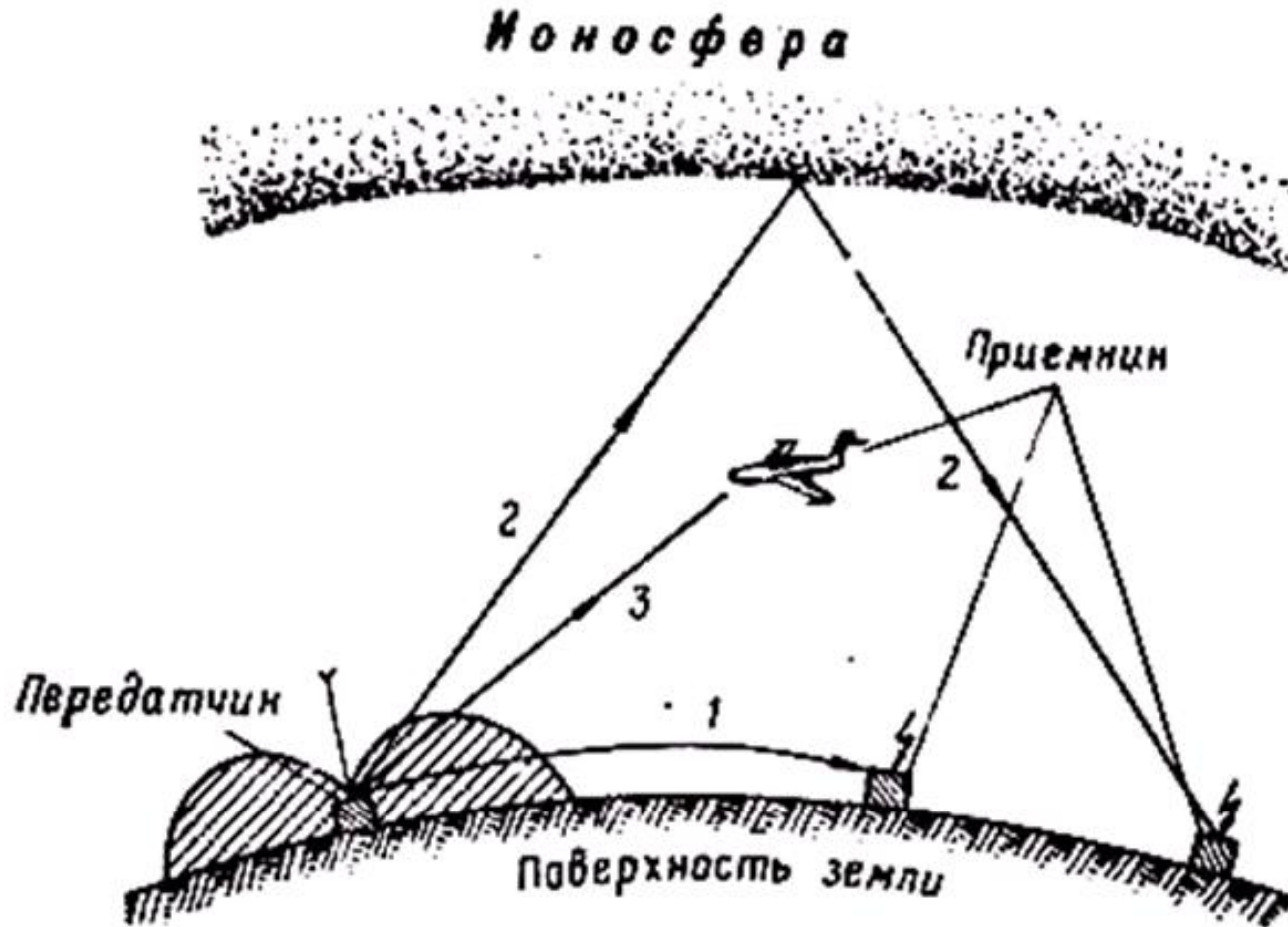
По виду передаваемых сообщений **системы радиосвязи** могут быть:

- 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.

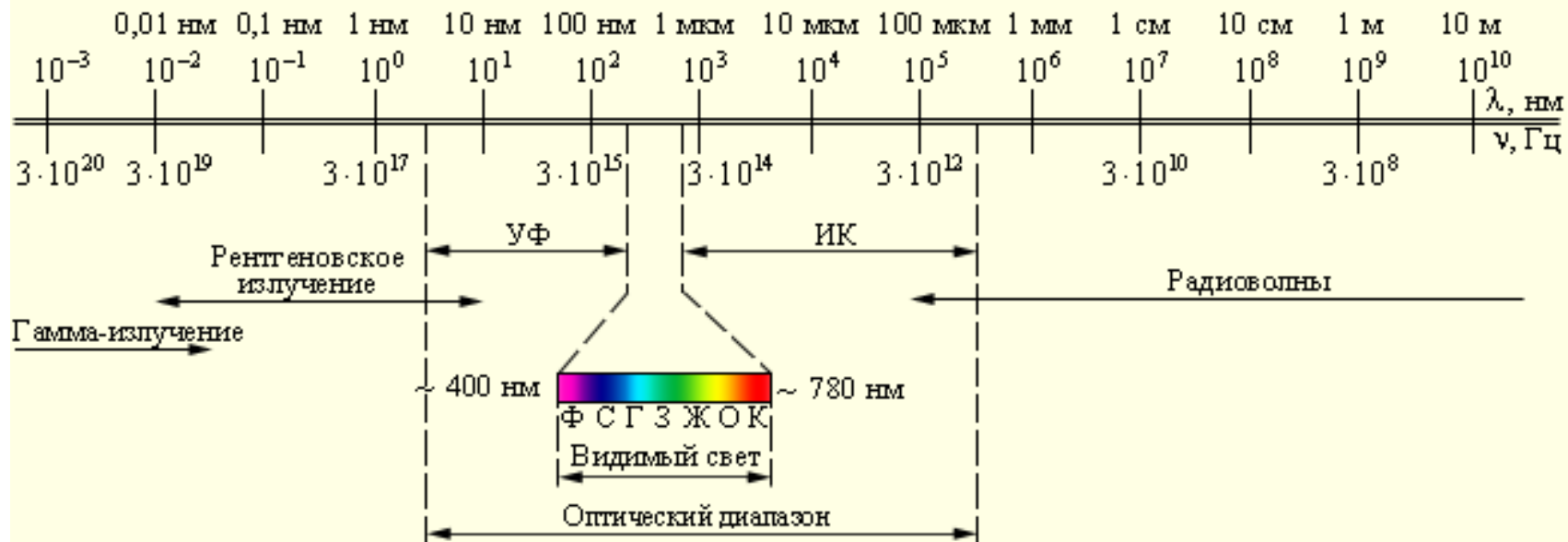
Передача сигналов на расстояние.

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.

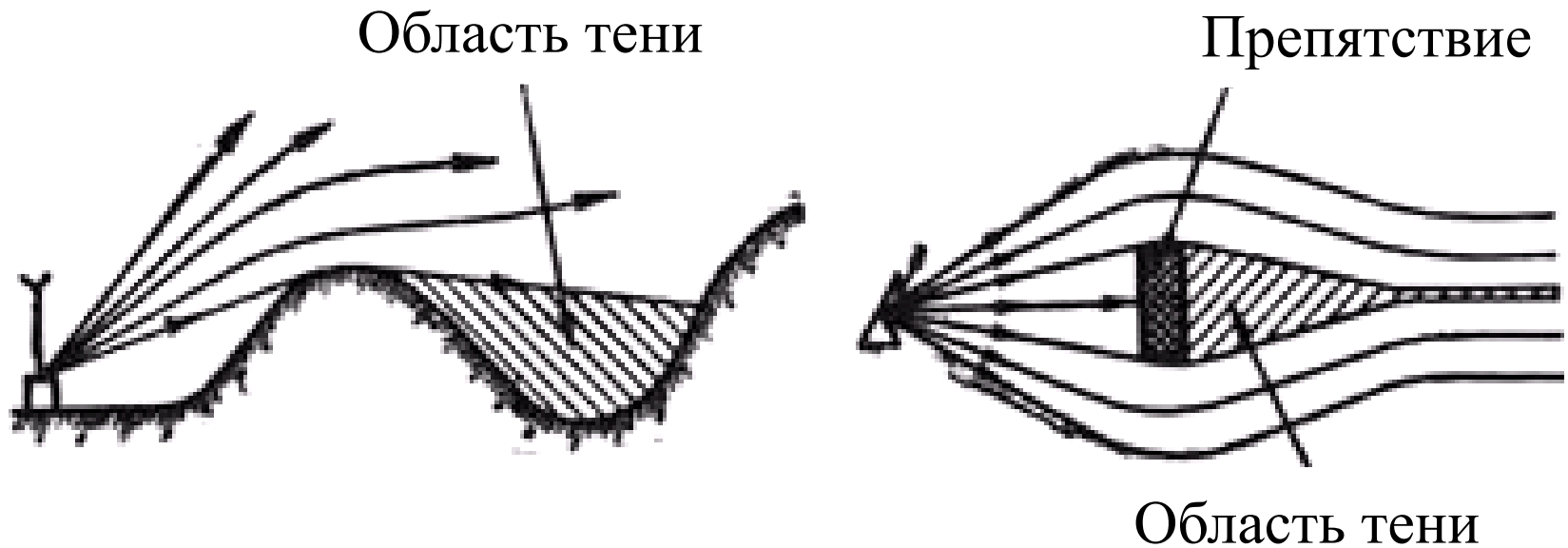
При сухой песчаной или каменистой почве дальность действия уменьшается, при влажной почве она увеличивается. Особенности распространения средних волн ионосферным лучом аналогичны особенностям распространения коротких волн.

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



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:

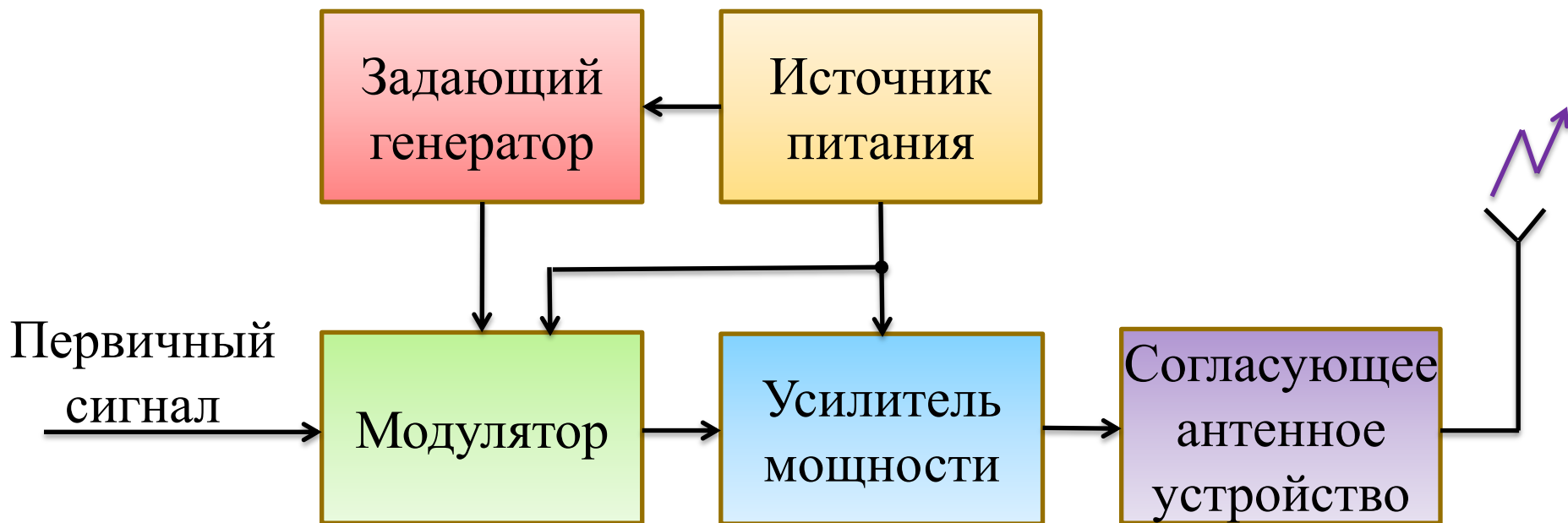
$$r_m = 3,6\sqrt{h_1 + h_2}$$

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

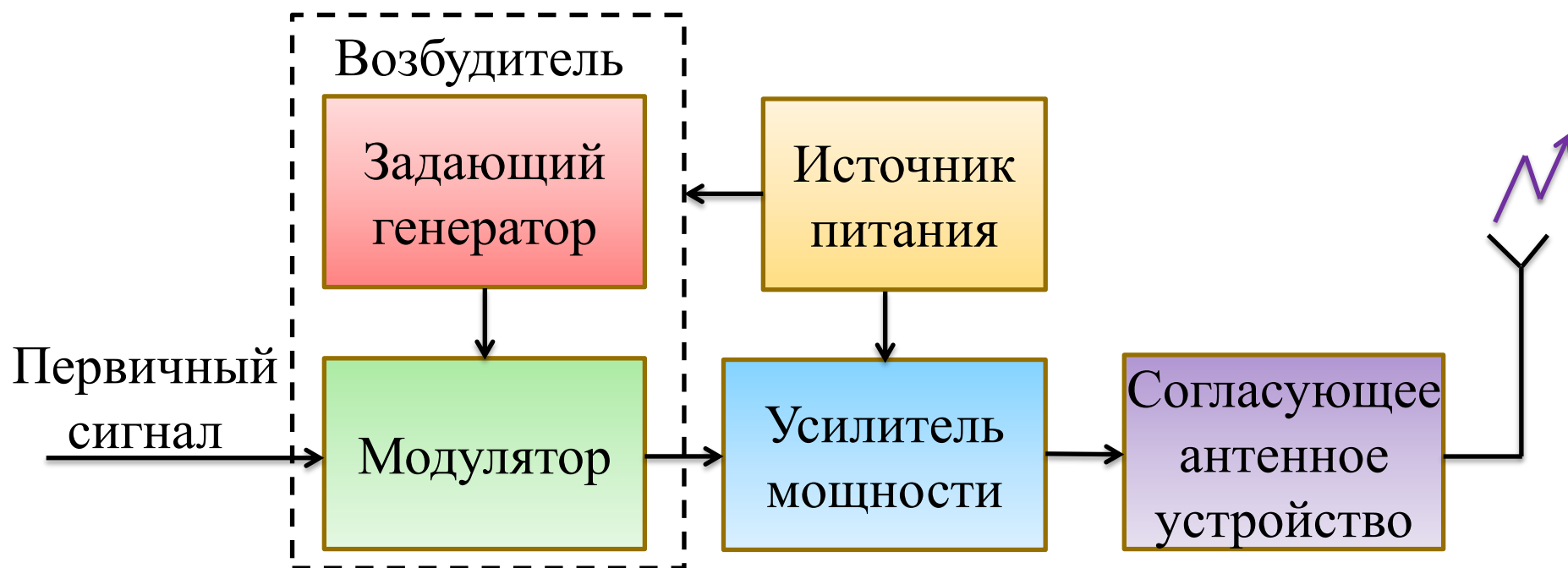
3 Радиопередающие устройства систем радиосвязи. Основные технические характеристики

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.

$$\bar{P}_{A_ТЛФ} = \frac{I_{A_МОЛЧ}^2 \cdot r_A}{2}.$$

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 Δf 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 $\partial\text{Б}$;

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

- в полосе частот свыше ± 10 % от установленной частоты – 140 $\partial\text{Б}$.

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.*

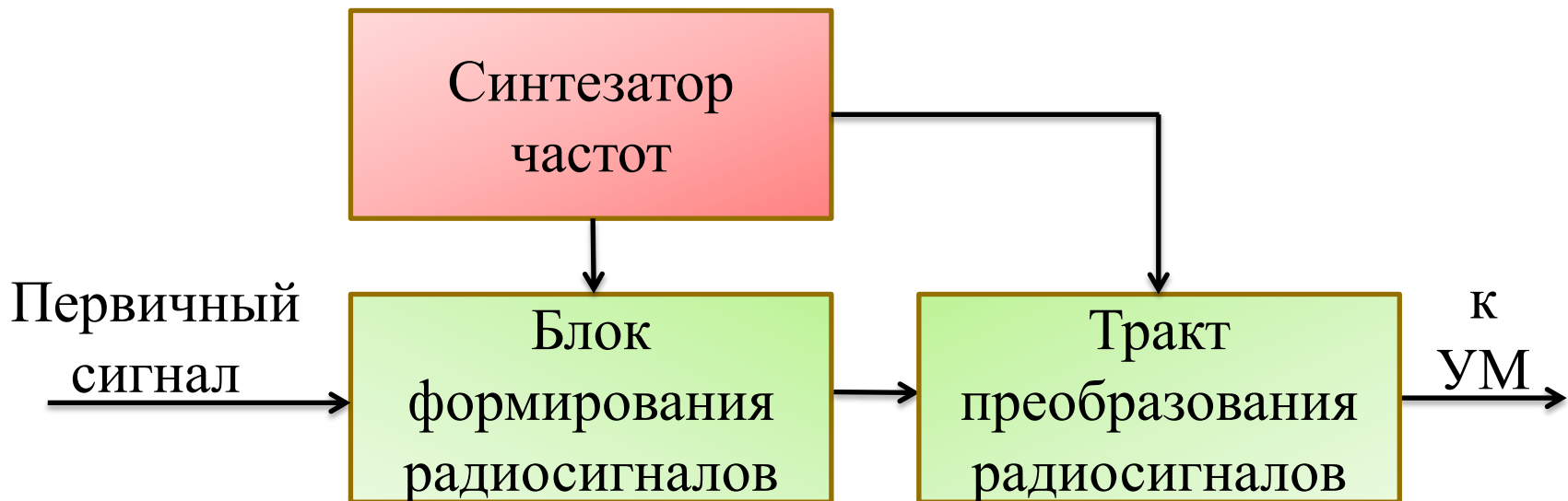
Часто в блоке возбудителя конструктивно размещены (**ГОСТ 24375-80**):

- 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.



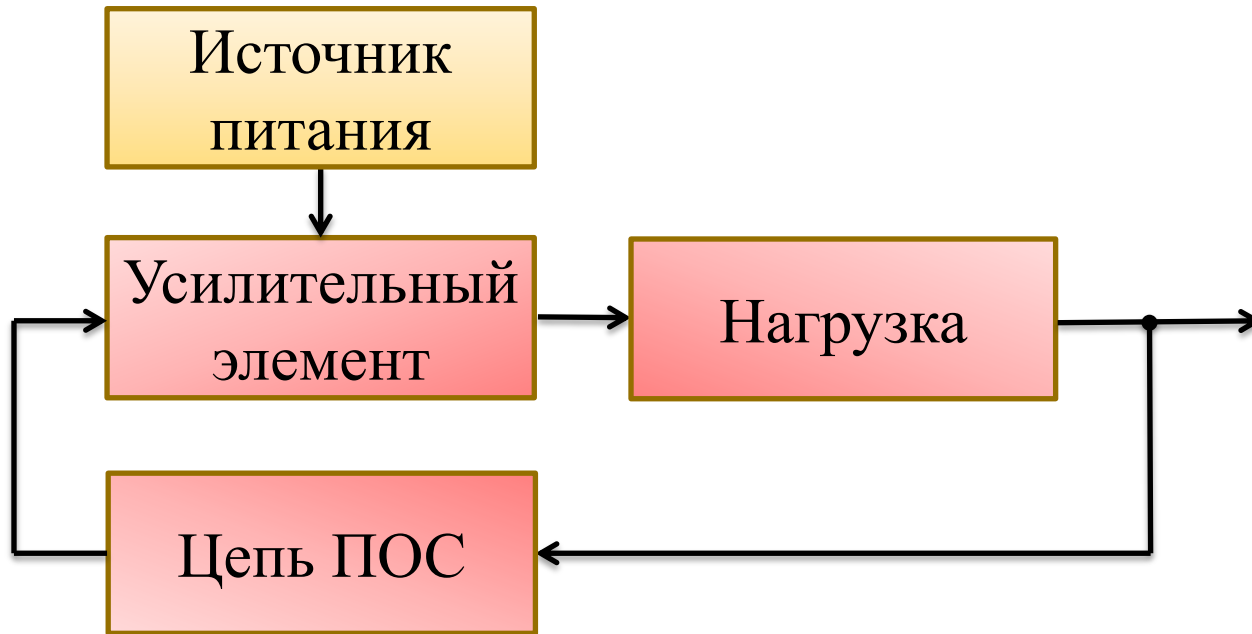
В состав синтезатора частот входят диапазонные и кварцевые автогенераторы.

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 2π), 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 $K(j\omega)$.

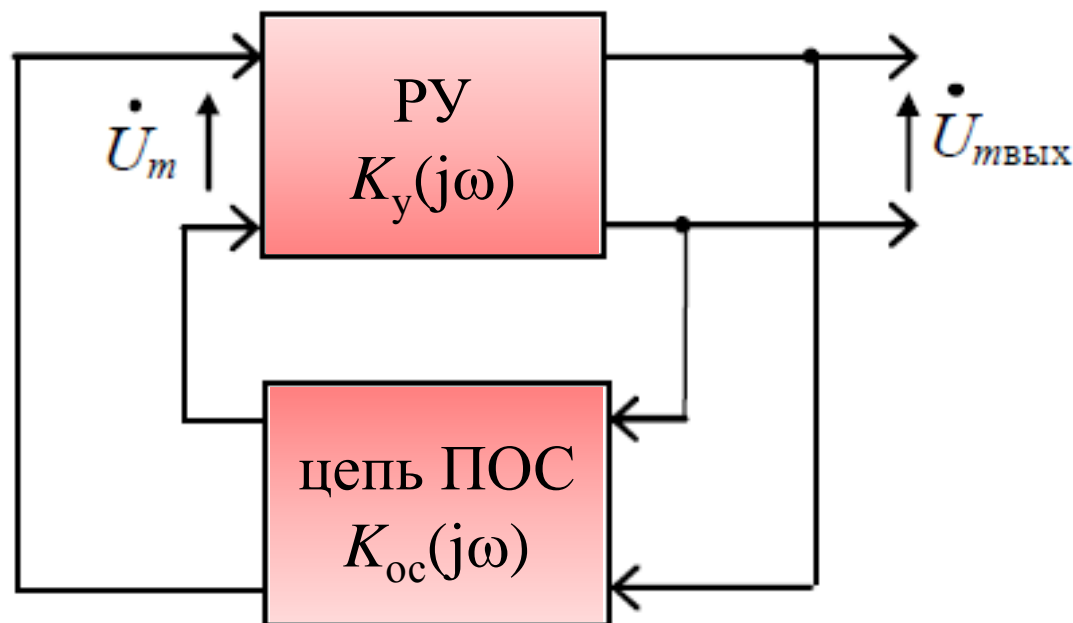
При выполнении равенства $K_y(j\omega)K_{oc}(j\omega) = 1$, знаменатель обращается в 0 и коэффициент усиления $K(j\omega)$ становится бесконечно большой величиной, что свидетельствует о потере устойчивости и возникновении автоколебаний.

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.

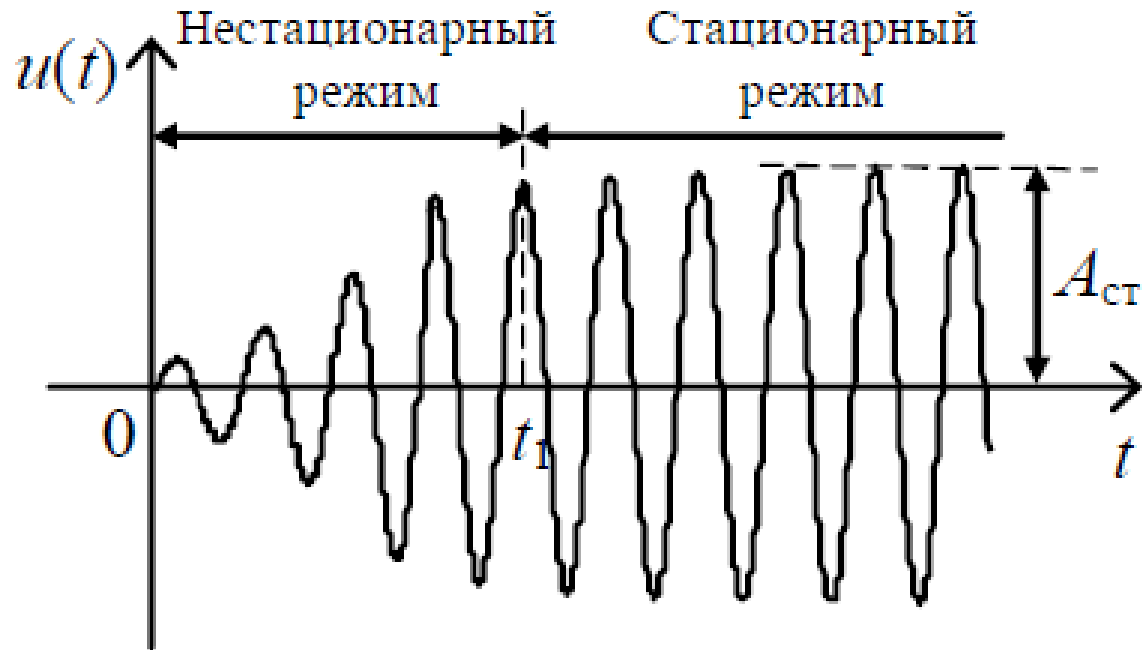
Режимы работы автогенератора

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 ω_{Γ} с его выхода.

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

$$K_y^{\text{ст}}(j\omega_{\Gamma}) = \frac{\dot{U}_{m\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_m} ; \quad K_{\text{ос}}(j\omega_{\Gamma}) = \frac{\dot{U}_m}{\dot{U}_{m\text{ВЫХ}}} ,$$

где \dot{U}_m , $\dot{U}_{m\text{ВЫХ}}$ – 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:

$$K_y^{\text{CT}}(j\omega_{\Gamma})K_{\text{OC}}(j\omega_{\Gamma}) = 1$$

Из этого выражения, записанного в показательной форме

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

следует **условие баланса амплитуд**:

$$K_y^{\text{CT}}(\omega_{\Gamma})K_{\text{OC}}(\omega_{\Gamma}) = 1$$

и **условие баланса фаз**:

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

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 2π

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**).

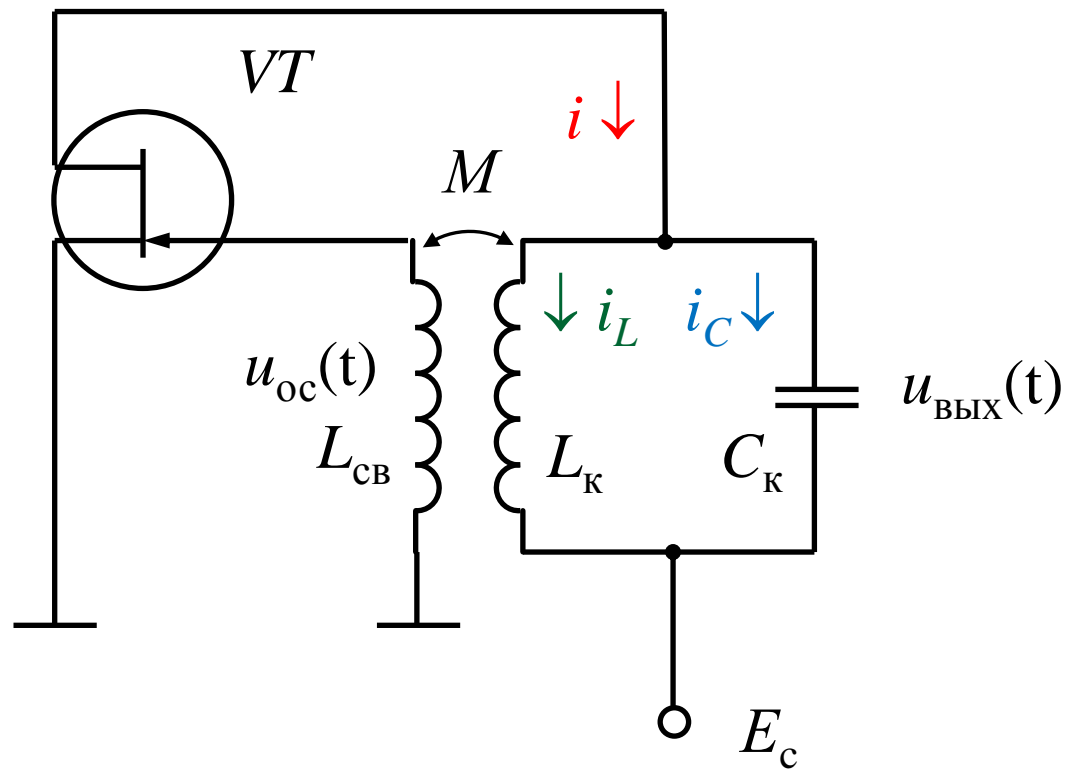
Условие баланса амплитуд позволяет определить амплитуду генерируемых колебаний в стационарном режиме, а условие баланса фаз – частоту этих колебаний.

Условия самовозбуждения

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

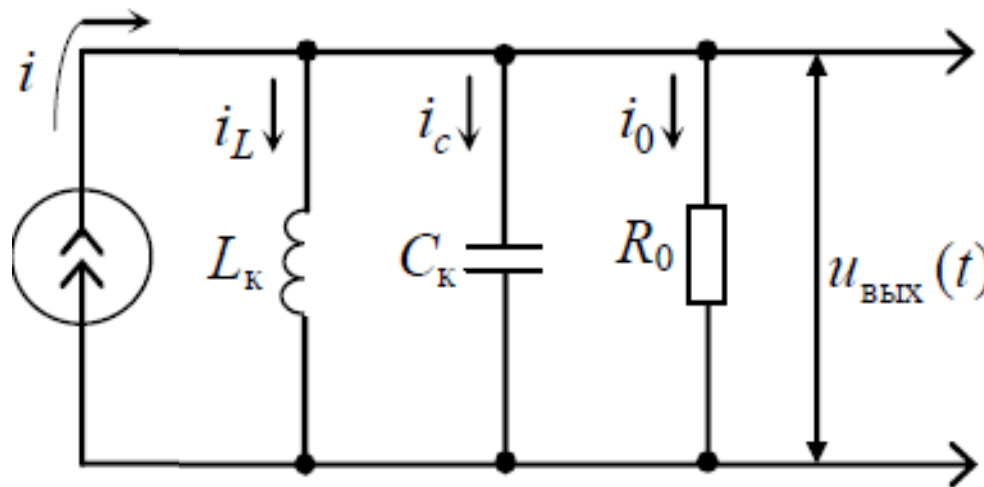
Напряжение обратной связи $u_{oc}(t)$ снимается с L_{cb} и подается на затвор транзистора VT .

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

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

где ω_p – резонансная частота колебательного контура;

$\alpha_э$ – эквивалентный коэффициент затухания.

Линейное дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее процесс после включения питания

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

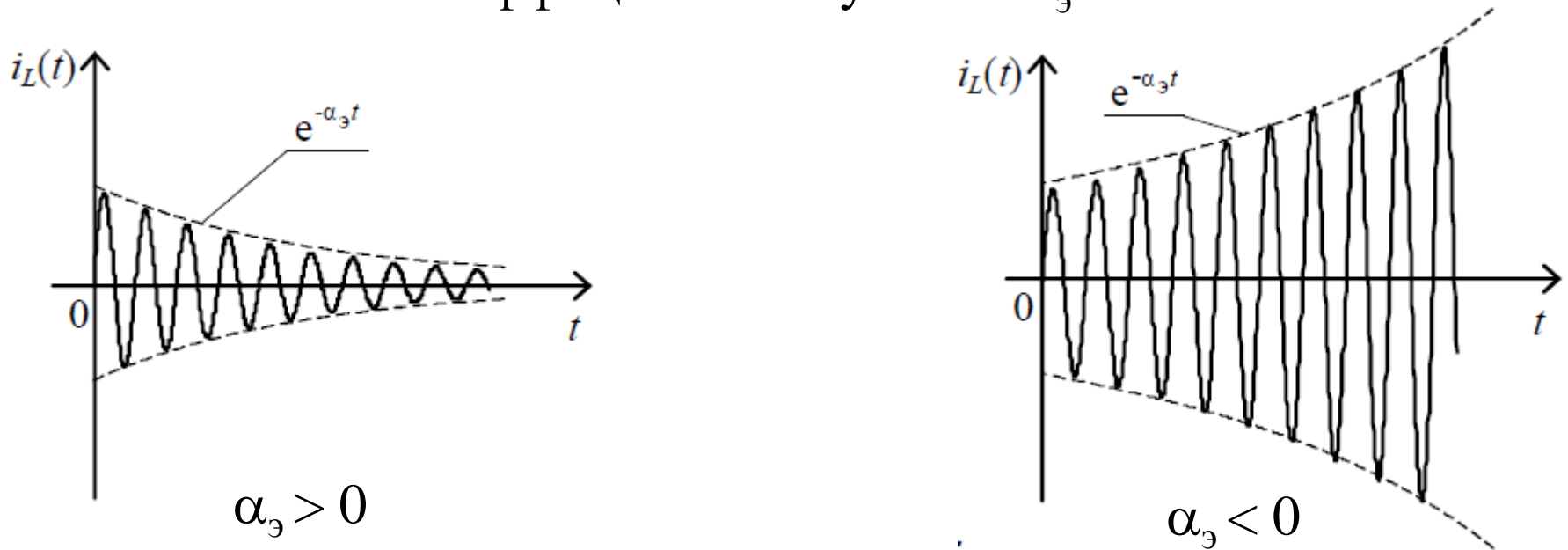
Условия самовозбуждения

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 α_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 $K_y^{ст}(\omega_{\Gamma}) = 1 / K_{oc}(\omega_{\Gamma})$.

Колебательная характеристика автогенераторов

Из уравнения баланса амплитуд $K_{yc} \cdot \beta_{oc} = 1$ можно получить выражение:

$$S_{CP} U_{mБЭ} = \frac{1}{\beta_{OC} Z_{KP}} U_{mБЭ}$$

где S_{cp} – средняя крутизна передаточной характеристики НЭ;

$U_{mБЭ}$ – напряжение база – эмиттер;

β_{OC} – коэффициент обратной связи;

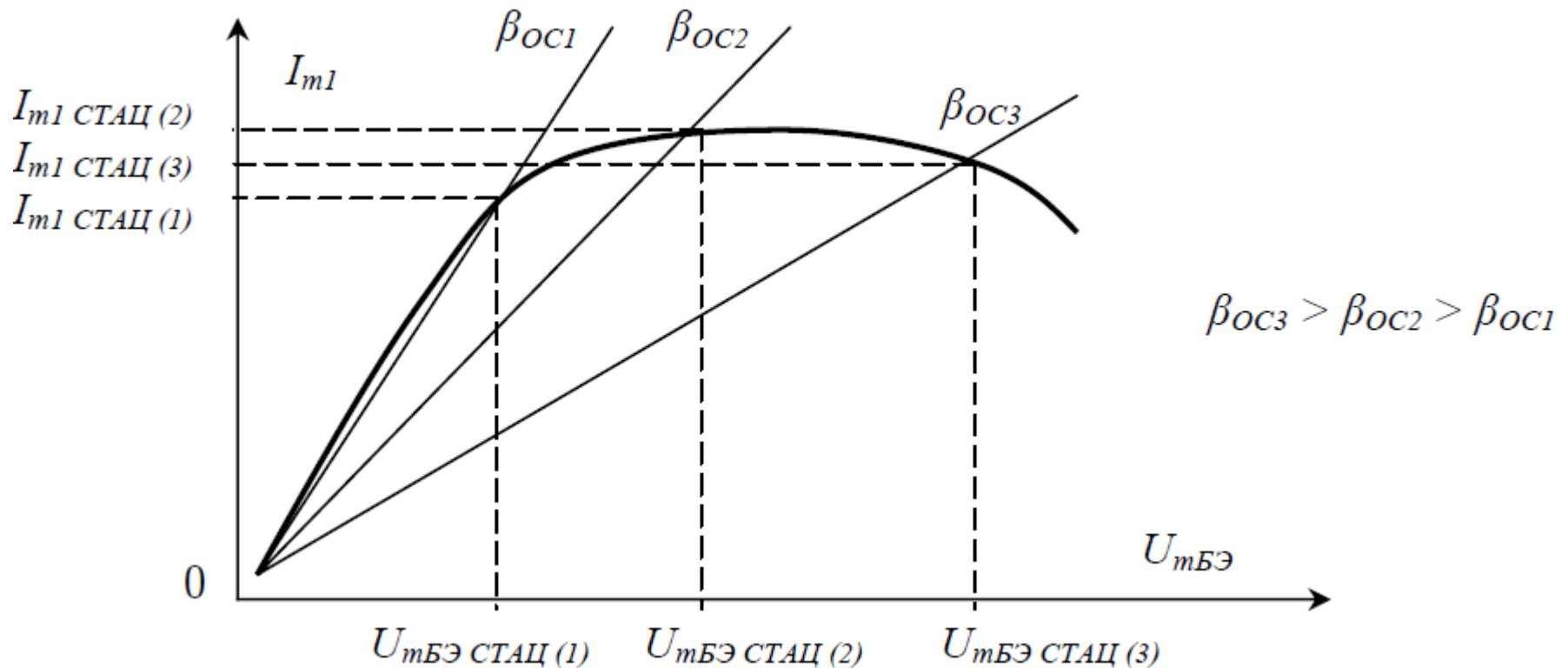
Z_{KP} – резонансное сопротивление контура.

Левая часть выражения характеризует активный нелинейный элемент (транзистор), т. е. энергию, вносимую в колебательный контур:

$$I_{m1} = S_{CP} U_{mБЭ}$$

Колебательная характеристика автогенераторов

Зависимость амплитуды первой гармоники тока I_{m1} усилительного элемента от амплитуды воздействия при постоянном смещении и разомкнутой цепи ОС называется **колебательной характеристикой**



Колебательная характеристика автогенераторов

Правая часть выражения характеризует пассивную часть схемы автогенератора – колебательный контур и цепь ПОС:

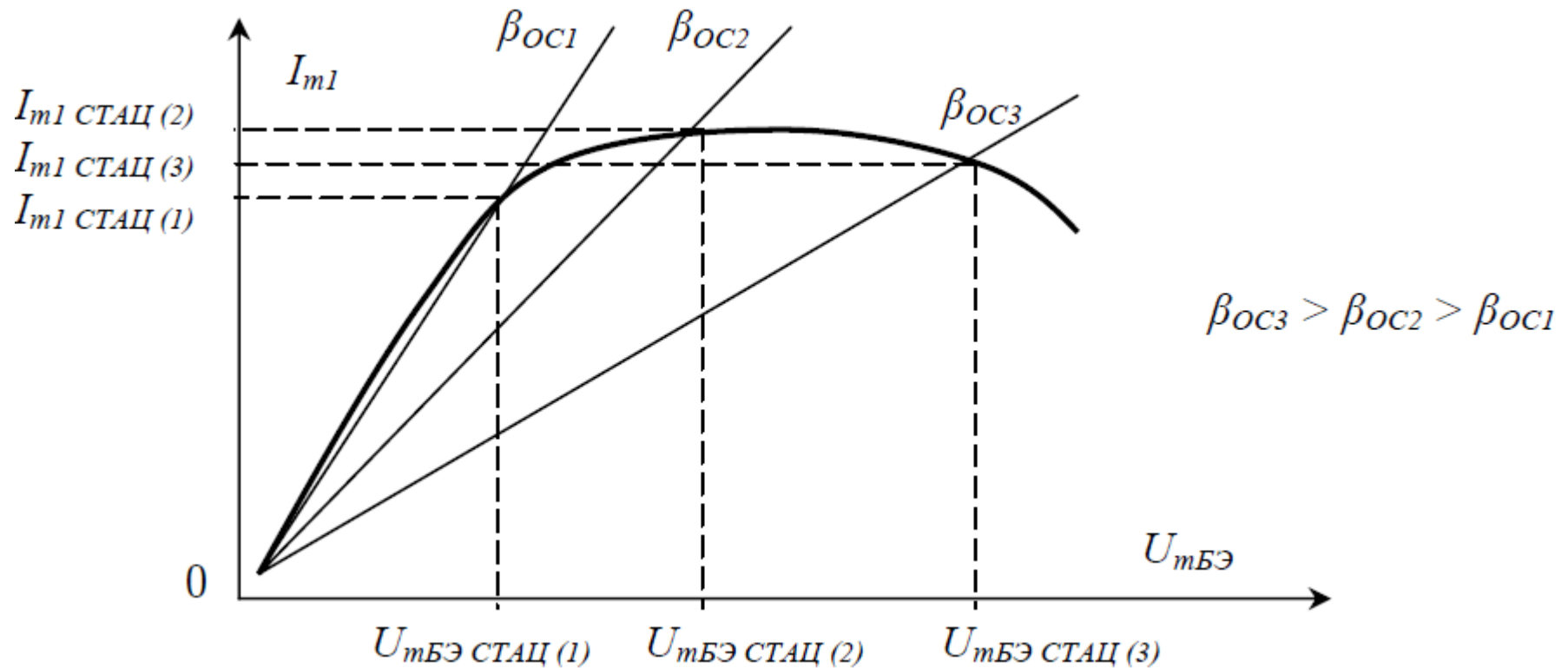
$$I_{m1} = \frac{1}{\beta_{OC} Z_{KP}} U_{mБЭ}$$

Это выражение является уравнением прямой линии, угол наклона которой зависит от β_{OC} и сопротивления контура при резонансе Z_{KP} , которое зависит от параметров контура L , C и R . Эту прямую называют **прямой ОС** (*прямой нагрузки*). Точка пересечения **колебательной характеристики** и **прямой ОС** даёт решение уравнения:

$$S_{CP} U_{mБЭ} = \frac{1}{\beta_{OC} Z_{KP}} U_{mБЭ}$$

Колебательная характеристика автогенераторов

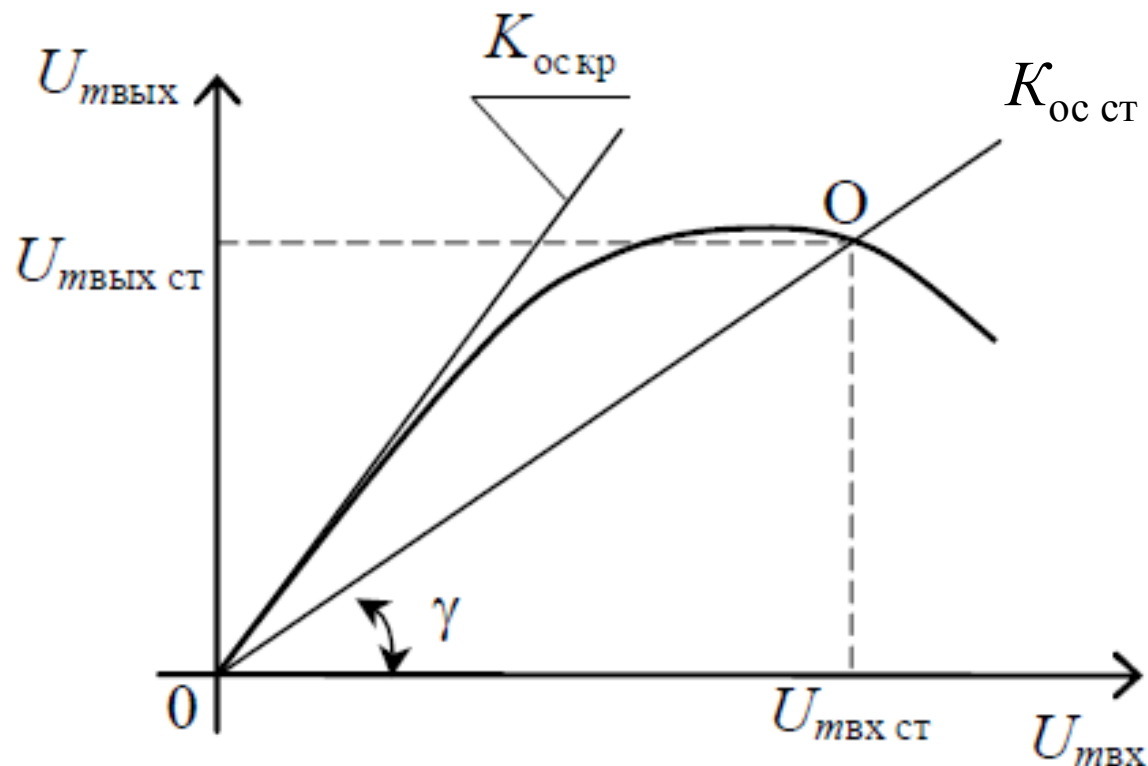
т. к. определяет стационарное значение амплитуды напряжения $U_{mБЭстaц}$ и амплитуды первой гармоники тока контура $I_{m1стaц}$



Режимы самовозбуждения автогенераторов

Различают два режима самовозбуждения: **мягкий** и **жёсткий**.

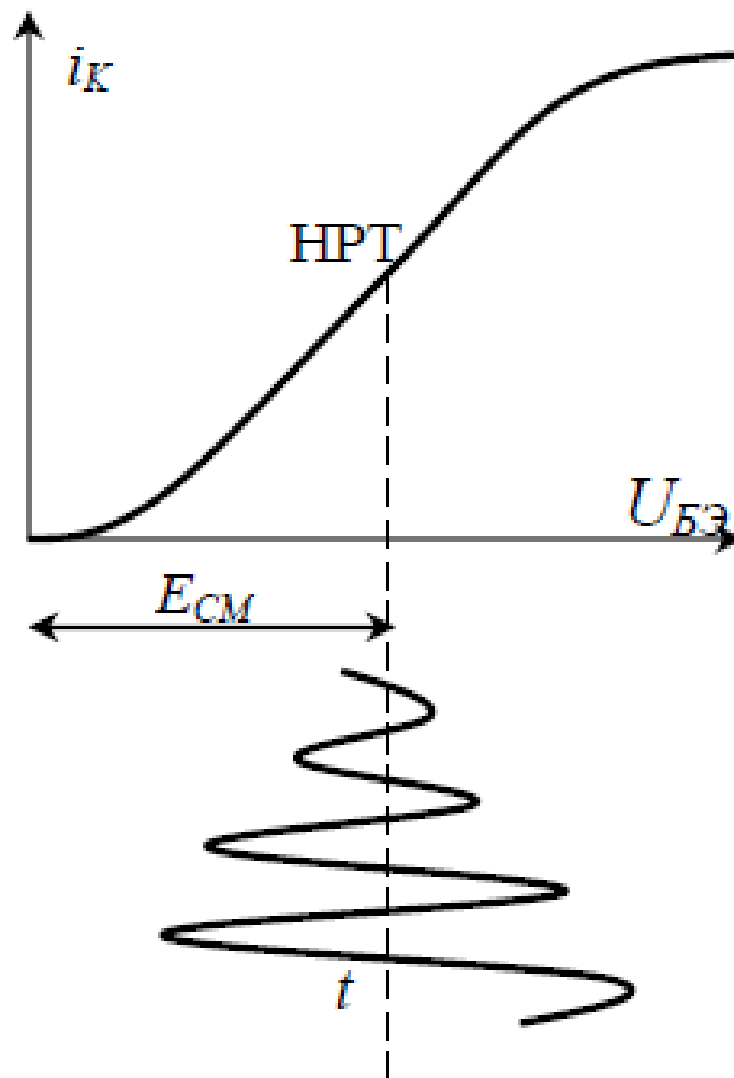
Мягкий режим возникает когда колебательная характеристика резонансного усилителя выходит из начала координат и имеет выпуклость в области малых амплитуд входного сигнала.



Колебательная характеристика

Режимы самовозбуждения автогенераторов

Условия возникновения **мягкого** режима самовозбуждения достигается путем подачи напряжения смещения, обеспечивающего положение начальной рабочей точки (НРТ) на середину наиболее линейного участка ВАХ транзистора (участка с большой крутизной передаточной характеристики).

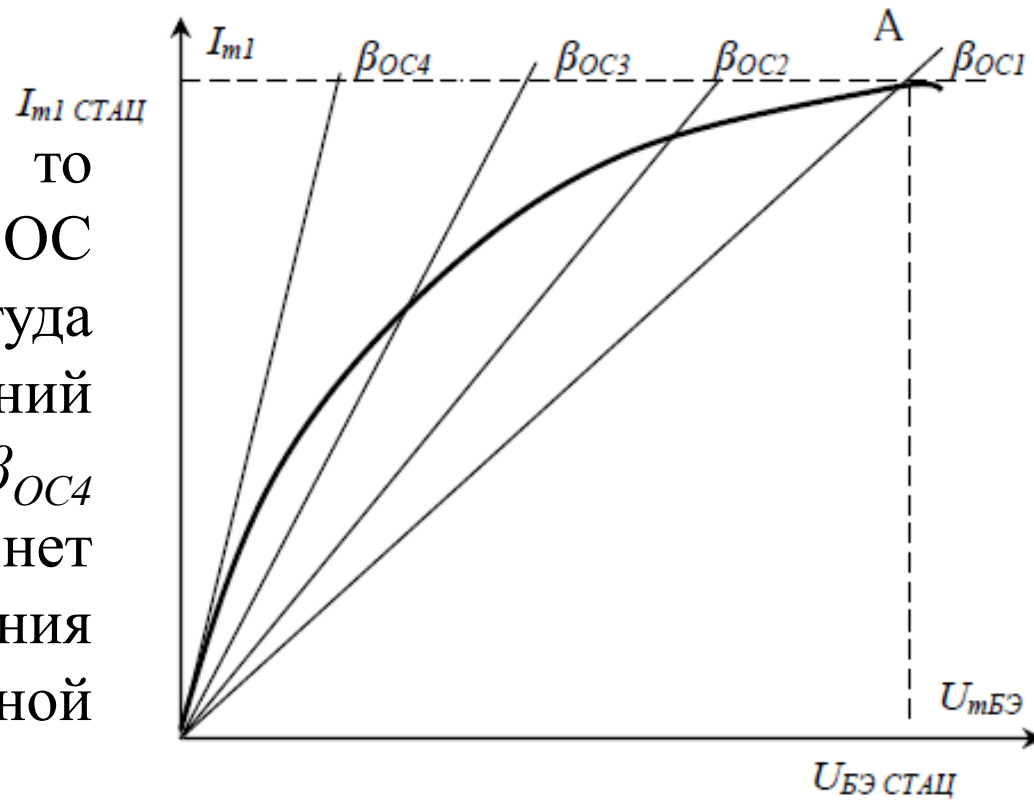


Режимы самовозбуждения автогенераторов

Правее точки А при β_{OC1} колебания возникать не будут, т. к. потери больше, чем вносимая энергия. Энергия потерь равна вносимой энергии по цепи ОС.

Точка А соответствует стационарному режиму АГ при β_{OC1} .

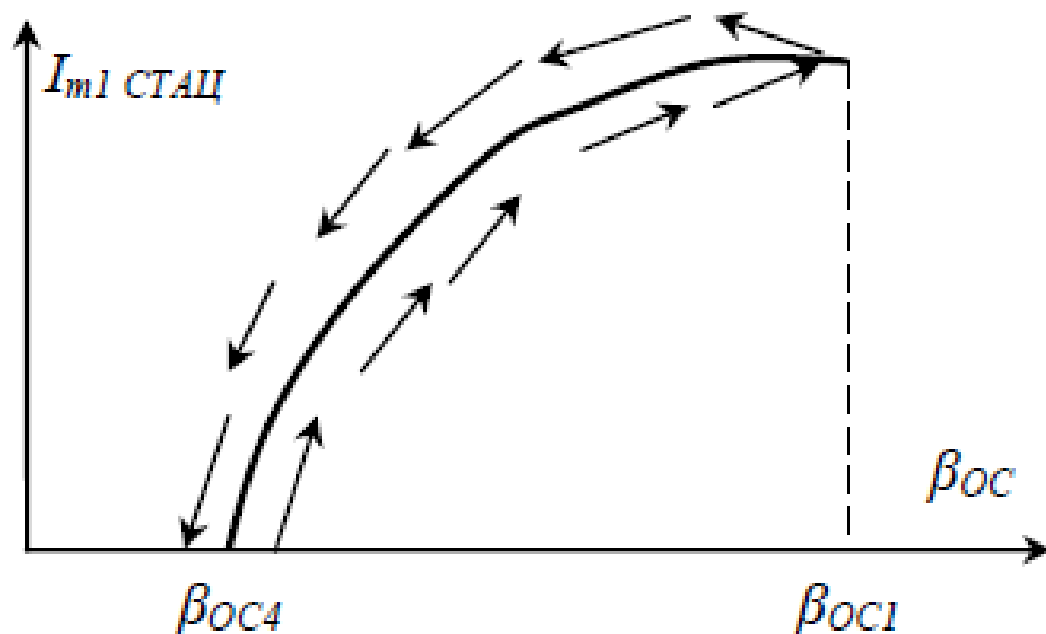
Если уменьшать β_{OC1} , то угол наклона прямой ОС увеличится, амплитуда стационарных колебаний уменьшится, и при β_{OC4} колебания исчезнут, т. к. нет общей точки пересечения прямой ОС с колебательной характеристикой.



Режимы самовозбуждения автогенераторов

Зависимость стационарной амплитуды первой гармоники тока I_{m1} от коэффициента обратной связи β_{OC} называется **регулирующей характеристикой**.

В мягком режиме колебания возникают и срываются при одном и том же значении β_{OC} .



Режимы самовозбуждения автогенераторов

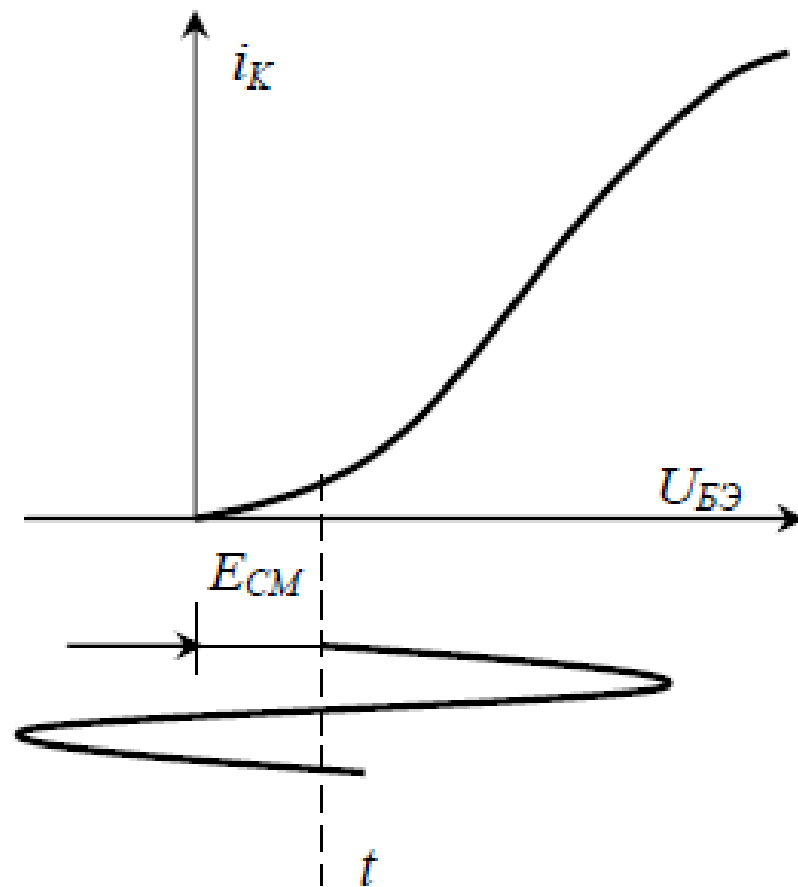
Достоинства мягкого режима заключаются в том, что колебания возбуждаются легко (мягко) при малом β_{OC} и имеется возможность плавно регулировать амплитуду колебаний изменением β_{OC} .

Недостаток мягкого режима заключается в том, что генератор работает без отсечки тока, в режиме энергетически невыгодном. На НЭ рассеивается большая мощность, он находится в тяжёлом тепловом режиме. КПД автогенератора низкий.

Режимы самовозбуждения автогенераторов

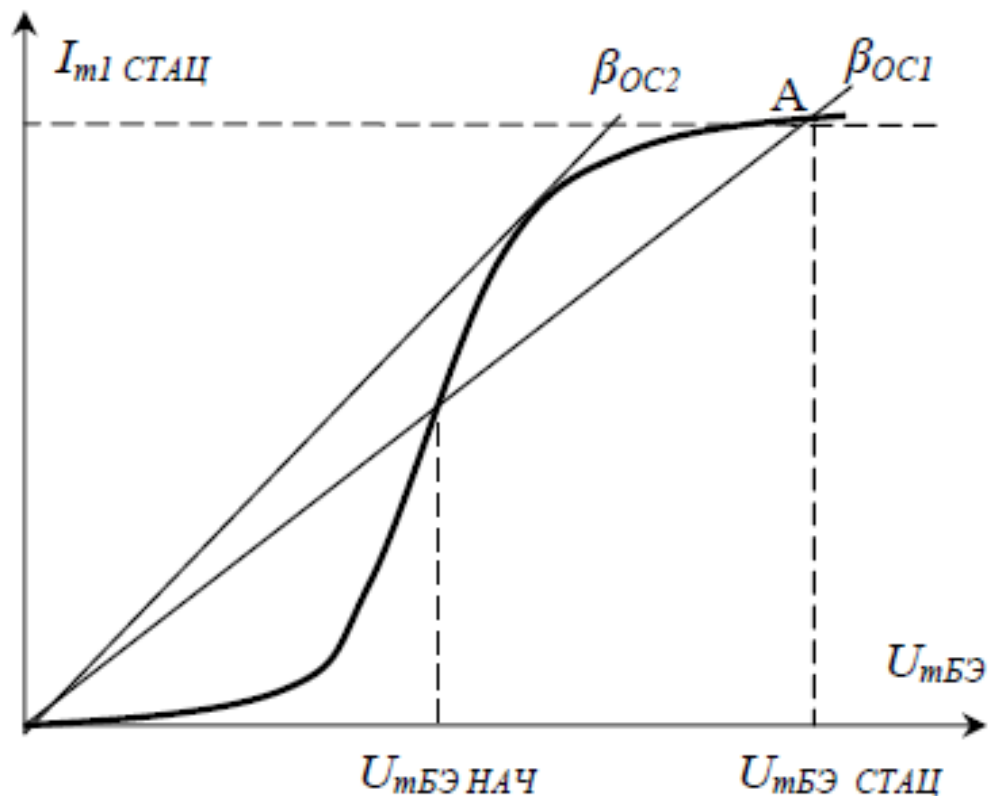
Жёсткий режим самовозбуждения АГ осуществляется при выборе начальной рабочей точки (НРТ) усиительного элемента на участке с малой крутизной.

В жёстком режиме колебательная характеристика имеет начальный участок с малой крутизной.



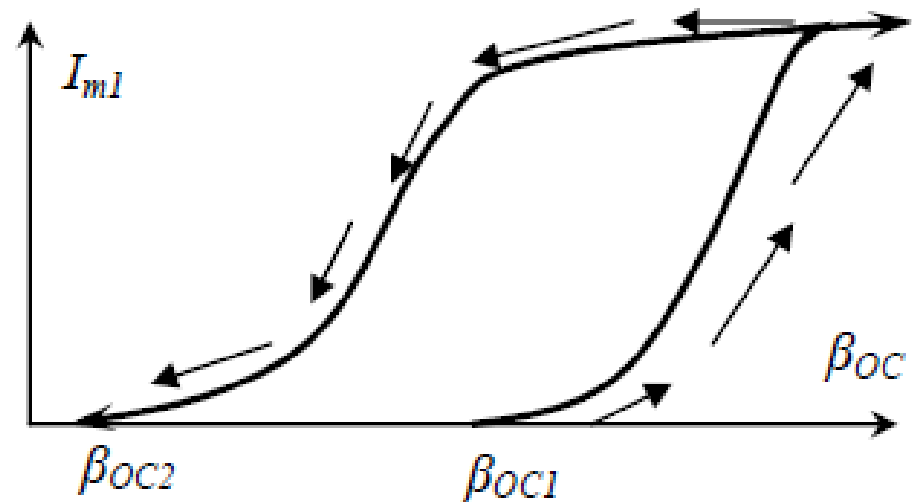
Режимы самовозбуждения автогенераторов

Поэтому при β_{OC1} колебания могут возникнуть только при внешнем возбуждении (толчке) с амплитудой большей, чем $U_{mБЭНАЧ}$, и будут нарастать до точки «А» $I_{m1СТАЦ}$.



Режимы самовозбуждения автогенераторов

Регулировочная характеристика при жёстком режиме отличается от мягкого режима. Возбуждение колебаний происходит при большем β_{OC} , по сравнению с β_{OC} срыва колебаний.



При «толчке» $U_{mБЭ.НАЧ}$ возбуждение колебаний осуществляется при β_{OC1} , а срыв – при β_{OC2} . Первоначальный толчок осуществляется за счёт возникновения колебаний в момент включения источника питания.

Если толчок в момент включения источника питания меньше $U_{mБЭ}$, колебания в АГ не возникнут.

Режимы самовозбуждения автогенераторов

Достоинством жёсткого режима является то, что автогенератор работает с отсечкой тока, т. е. в энергетически выгодном режиме с высоким КПД. Усилительный элемент работает в лёгком тепловом режиме.

Недостаток жёсткого режима заключается в том, что колебание возникает тяжело (жёстко) при определённом толчке и большом β_{OC} , амплитуда нарастает резко и трудно поддается регулировке.

Автоматическое смещение в автогенераторах

Для надежного запуска автогенератора точка покоя должна находиться на середине линейного участка ВАХ транзистора, что соответствует нулевому напряжению смещения между затвором и истоком полевого транзистора или положительному напряжению смещения база – эмиттер для биполярного транзистора. Однако этот режим характеризуется малым значением КПД. При переходе в стационарный режим целесообразно уменьшить напряжение смещения, так как это увеличит КПД автогенератора. Для того чтобы АГ возбуждался в мягком режиме, а в стационарном состоянии работал в энергетически выгодном жестком режиме (режиме с отсечкой тока), применяют автоматическое смещение на управляющий электрод усилительного элемента.

Автоматическое смещение в автогенераторах

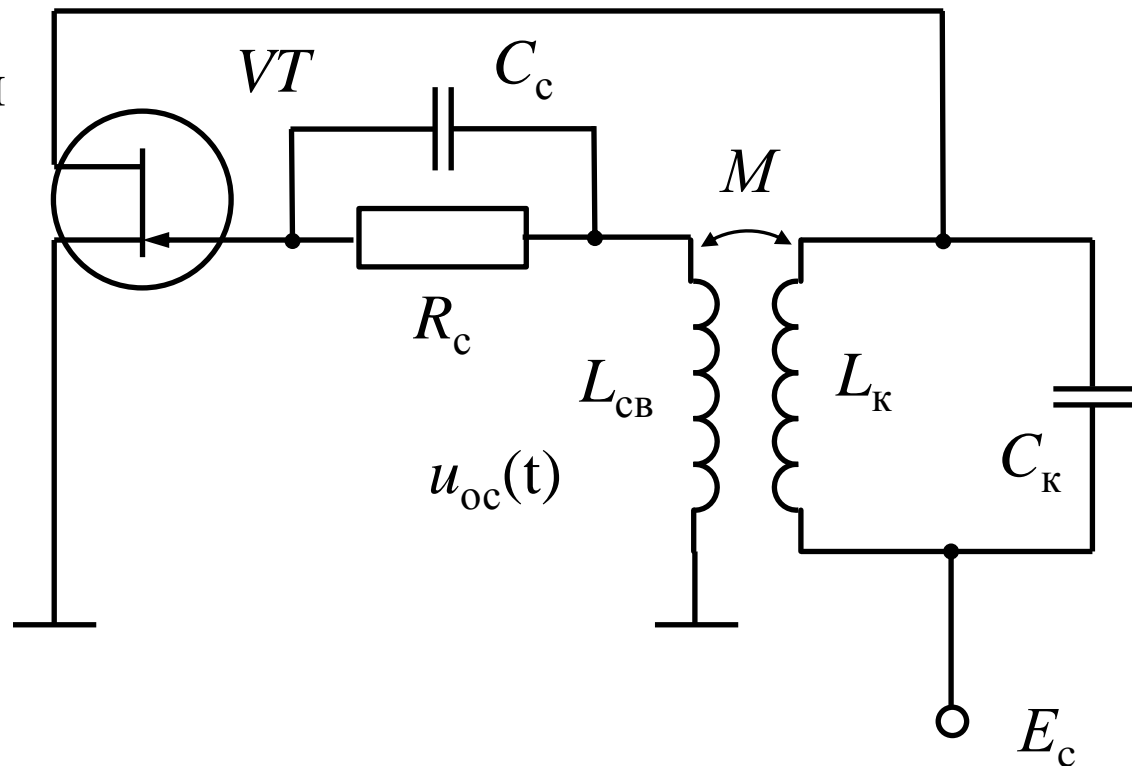
Цепь автоматического смещения можно реализовать с помощью резистора R_c и конденсатора C_c , которые включают параллельно в цепь затвора полевого или в цепь базы биполярного транзистора.

- коэффициент обратной связи:

$$K_{oc} = \frac{M}{L_K}$$

- резонансная частота контура

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}}$$



LC - автогенератор с трансформаторной обратной связью

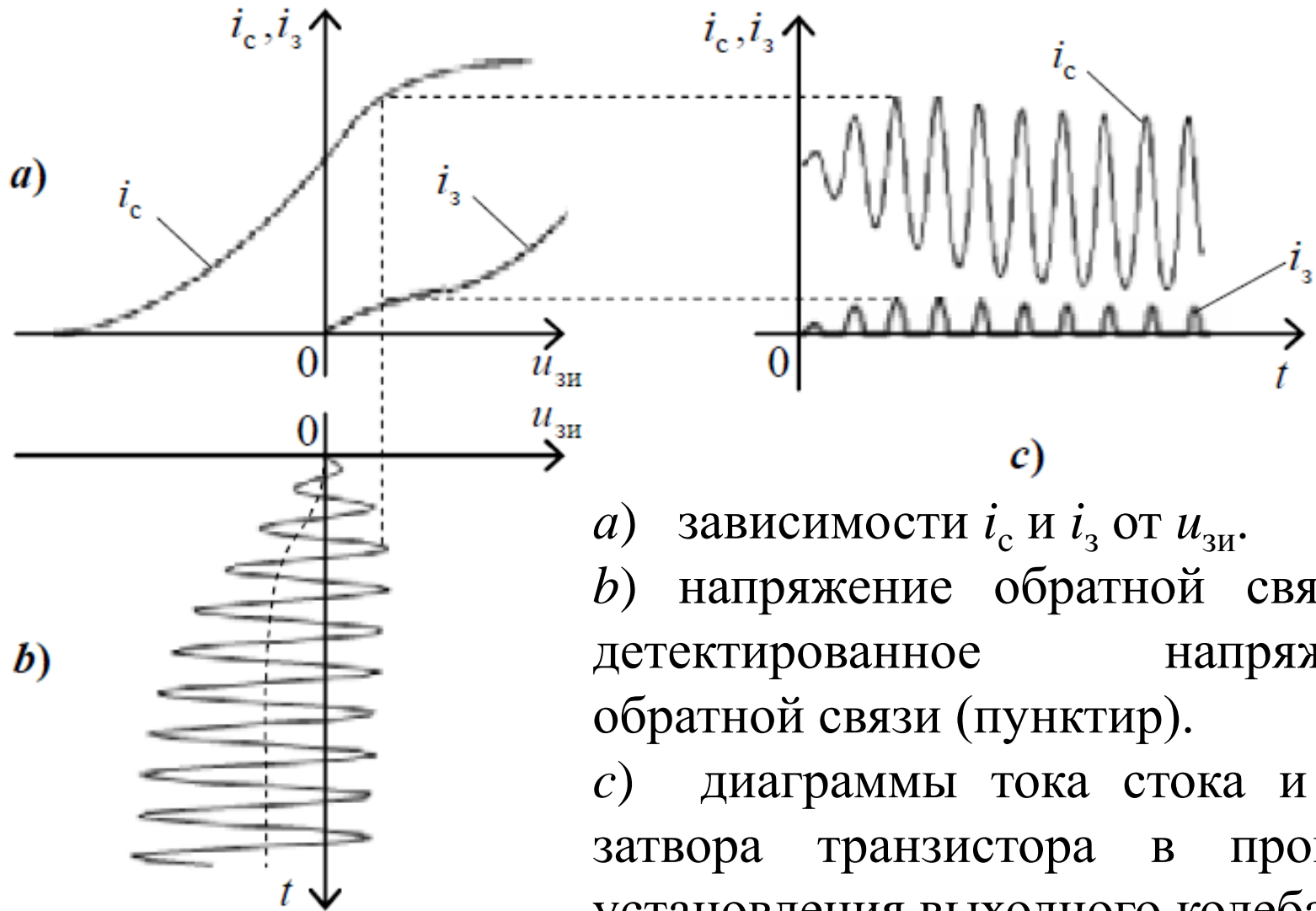
Автоматическое смещение в автогенераторах

Переход затвор-исток полевого транзистора представляет собой диод для тока затвора. Этот диод совместно с сопротивлением R_c и конденсатором C_c образует амплитудный детектор. При запуске автогенератора на индуктивности связи $L_{св}$ возникает высокочастотное напряжение обратной связи.

Это напряжение преобразуется указанным амплитудным детектором в медленно изменяющееся напряжение.

При этом рабочая точка транзистора смещается в сторону его запираения.

Автоматическое смещение в автогенераторах



a) зависимости i_c и i_3 от $u_{зи}$.

b) напряжение обратной связи и детектированное напряжение обратной связи (пунктир).

c) диаграммы тока стока и тока затвора транзистора в процессе установления выходного колебания.

Трёхточечные схемы автогенераторов

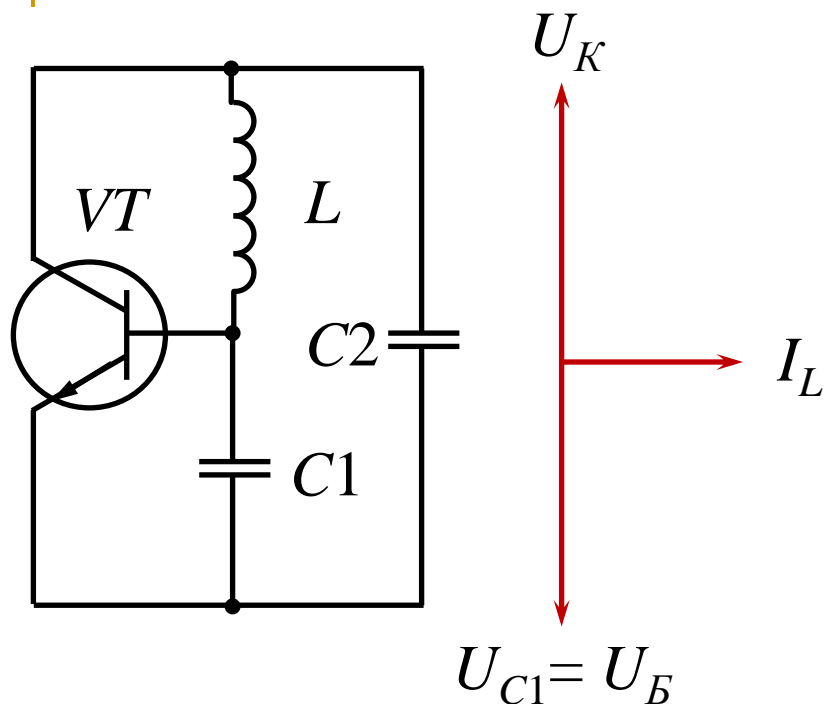
Если колебательный контур автогенератора подключён к активному нелинейному элементу тремя точками, то такая схема АГ называется **трёхточечной**.

Фазовые условия в транзисторной трёхточечной схеме АГ с общим эмиттером в идеальном случае выполняются тогда, когда фазы напряжений на элементах контура, подключённых коллектору и базе, противоположны.

Учитывая сдвиг фаз в идеальном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ равен 180° , суммарный сдвиг фаз в кольце ОС будет равен 360° .

Это возможно в двух вариантах схемы автогенератора :
первая называется **ёмкостной трёхточкой**,
вторая называется **индуктивной трёхточкой**.

Трёхточечные схемы автогенераторов



Ёмкостная трёхочка и
ее фазовый портрет

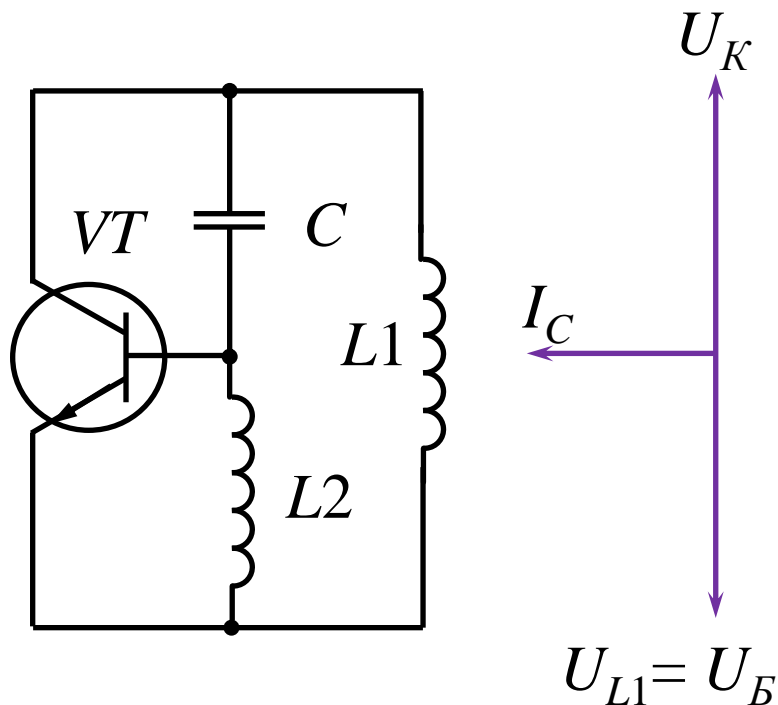
В ёмкостной трёхточечной схеме положительная ОС осуществляется за счёт ёмкостного делителя $C1, C2$.

Амплитудные условия самовозбуждения определяются соотношением ёмкостей $C2/C1$, чем оно меньше, тем глубже ПОС, обычно $C2 \ll C1$. Поэтому ёмкостью $C2$ определяется ёмкость контура $C_K \approx C2$.

$$f_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_K}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L C_2}}$$

Частота генерируемых колебаний

Трёхточечные схемы автогенераторов



Индуктивная трёхочка
и ее фазовый портрет

Частота генерируемых колебаний

В индуктивной трёхточечной схеме обратная связь автотрансформаторная.

Амплитудные условия самовозбуждения для этой схемы выполняются отношением $L1/L2$.

Чем больше это отношение, тем глубже ПОС.

Обычно $L1 \gg L2$.

$$f_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}$$

Трёхточечные схемы автогенераторов

Правило построения трёхточечных схем заключается в следующем:

- если между коллектором и базой индуктивный характер сопротивления, то между коллектором и эмиттером, базой и эмиттером ёмкостный характер сопротивления;
- если между коллектором и базой ёмкостный характер сопротивления, то между коллектором и эмиттером, базой и эмиттером индуктивный характер сопротивления.

В этих случаях в трёхточечных схемах АГ выполняются фазовые условия возбуждения электрических колебаний.

Кварцевые автогенераторы

Кварцевая пластина представляет собой в эквиваленте колебательную систему высокой добротности.

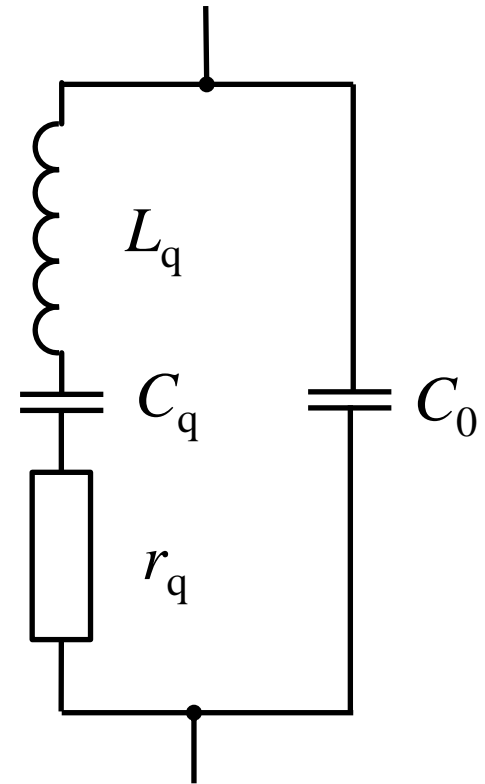
В такой колебательной системе резонанс наблюдается на двух частотах:

- последовательный резонанс на частоте

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}}$$

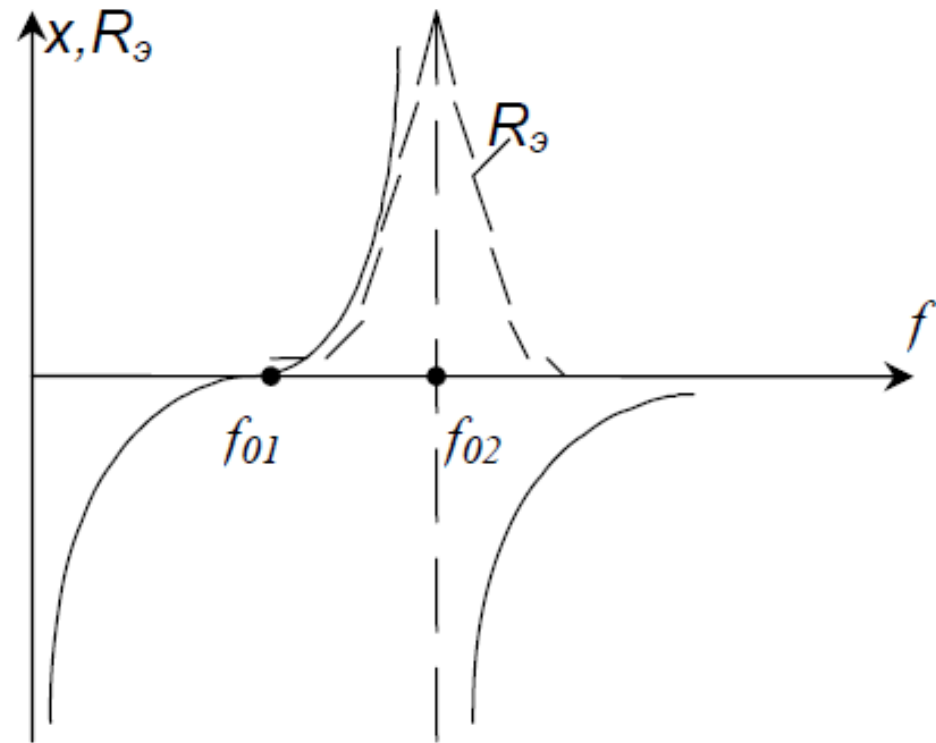
- параллельный резонанс на частоте

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q \frac{C_q C_0}{C_q + C_0}}}$$



Кварцевые автогенераторы

Частоты f_{01} и f_{02} близки между собой и отличаются на 0,25 % от резонансной частоты при $C_0 / C_q \approx 2000$. На частоте f_{01} сопротивление кварцевого резонатора носит активный характер и имеет малую величину, на частоте f_{02} сопротивление кварцевого резонатора носит активный характер и имеет большую величину. В интервале частот $f_{01} - f_{02}$ сопротивление кварцевого резонатора носит индуктивный характер.



Кварцевые автогенераторы

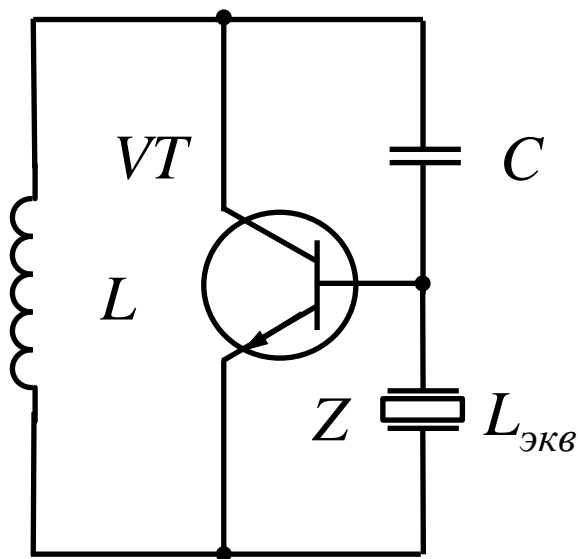
Вследствие того, что частоты f_{01} и f_{02} стабильны, то используя кварцевый резонатор в АГ в качестве последовательного колебательного контура или индуктивности, можно получить высокую стабильность частоты АГ. Относительная нестабильность частоты кварцевых АГ лежит в пределах $10^{-6} - 10^{-10}$.

Кварцевые генераторы широко применяются в технике связи для стабилизации частоты АГ. Для повышения стабильности частоты кварцевого генератора кварцевый резонатор или весь генератор помещают в термостат и питают генератор от стабилизированного источника питания.

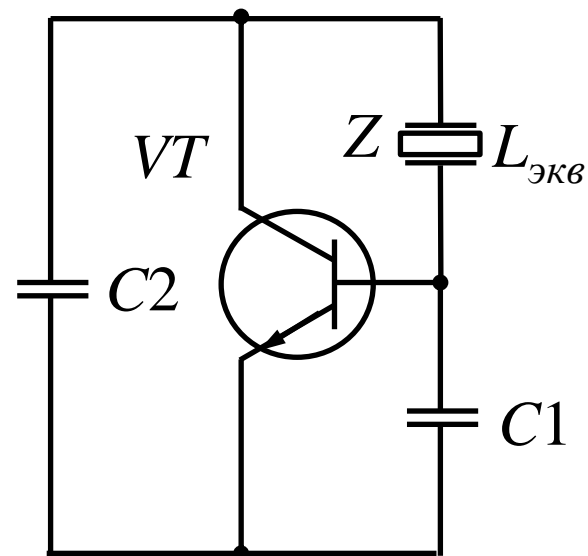
В кварцевых АГ, построенных по трёхточечной схеме, на генерируемой частоте кварцевая пластина имеет индуктивный характер сопротивления, т. е. $f_{\text{ГЕН}}$ лежит в пределах $f_{01} - f_{02}$.

Кварцевые автогенераторы

Осцилляторная схема кварцевого генератора, работающего на частоте параллельного резонанса (схема емкостной трёхточки).



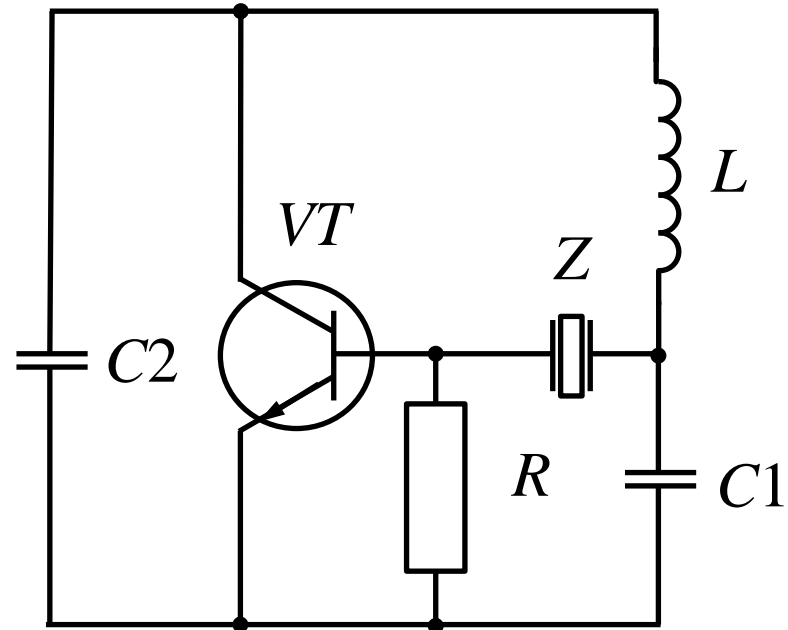
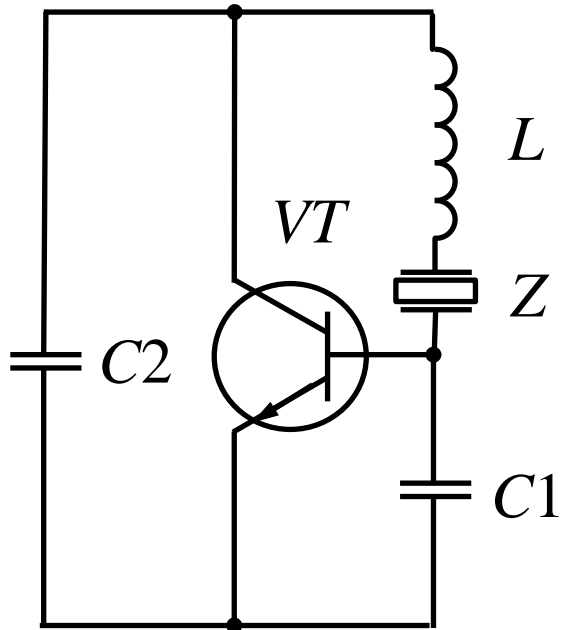
При включении кварцевого резонатора между базой и эмиттером, получается АГ по схеме индуктивной трёхточки



Кварцевые автогенераторы

Кварцевый резонатор на частоте f_{01} имеет малое активное сопротивление. Это свойство используется в схеме АГ, где кварцевый резонатор стоит в цепи ОС.

Схемы работающие на частоте последовательного резонанса:



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
 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
 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
-

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 .
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.
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>
-