

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

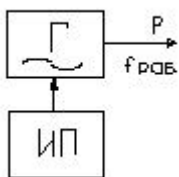
Радиопередающим устройством (РПУ) называется устройство, формирующее высокочастотные колебания для передачи сообщения на расстоянии. Высокочастотные колебания являются носителями, излучаются в виде электромагнитных волн. Заложить информацию в ВЧ колебания позволяет изменение параметров этого колебания в соответствии с сигналом сообщения (модуляция).

Области применения РПУ:

- 1) Радиовещательные и телевизионные станции.
- 2) Связные РПУ (станции).
- 3) Радиолокационные системы.
- 4) РПУ систем сигнализации: охранная, пожарная и т. д.
- 5) РПУ телеметрии: информация, поступающая с космических систем (многоканальные, многометрические).
- 6) РПУ информационно-волновых систем: устройства обнаружения металлической арматуры. Диагностика пациента с помощью тамографии и т.д.
- 7) РПУ медицинского назначения: "радиозонд", "радио пилюли" и т.д.
- 8) Генераторы медицинского назначения: диапазон от единиц герц до десятков Гигагерц. Непрерывная мощность десятки, сотни ватт. Импульсные мощности несколько киловатт.
- 9) Генераторы бытового назначения: СВЧ печи, устройства сушки, обработка пищевых продуктов, устройства отпугивания крыс, комаров.
- 10) Сотовая телефония

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ РПУ

Задающий генератор (автогенератор)



Автогенератор это каскад, преобразующий энергию источника питания в энергию ВЧ колебаний. Основным параметром является рабочая частота $f_{\text{раб}}$.

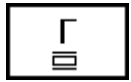
$\frac{\Delta f}{f_{\text{раб}}}$ - относительная нестабильность частоты.

$P_{\text{вых}}$ - выходная мощность.

В современных РПУ $f_{\text{раб}} = 10^3 \div 10^{10}$ ГГц.

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{раб}}} = 10^{-3} \div 10^{-6} \text{ Гц.}$$

$$P_{\text{вых}} = 10^{-2} \text{ Вт.}$$



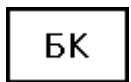
- автогенератор с кварцевой стабилизацией частоты.

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{раб}}} \sim 10^{-5} \text{ Гц.}$$

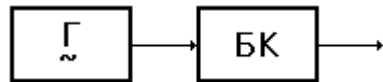
$$f_{\text{раб}} < 10^8 \text{ Гц.}$$

$$P_{\text{вых}} \sim 10^{-3} \div 10^{-4} \text{ Вт}$$

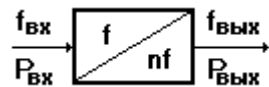
Буферный каскад



- используется для предотвращения влияния последующих каскадов.



Умножитель частоты



$$n = \frac{f_{\text{вых}}}{f_{\text{дл}}} - \text{коэффициент умножения частоты.}$$

$$\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \eta_{\text{пр}} < 1 - \text{коэффициент преобразования.}$$

Используется в тех случаях, когда АГ не обеспечивает требуемую рабочую частоту РПУ.

Усилитель мощности



- используется для повышения мощности в K_p раз.

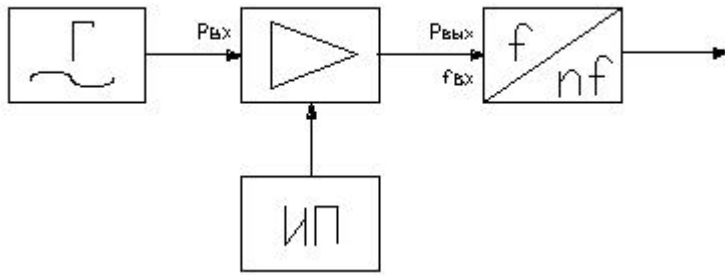
$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} - \text{коэффициент усиления по мощности.}$$

$$\eta_e = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0} - \text{электронный КПД.}$$

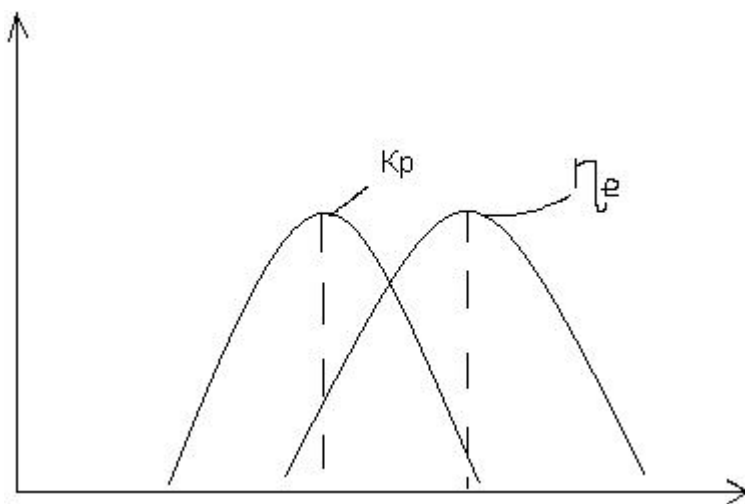
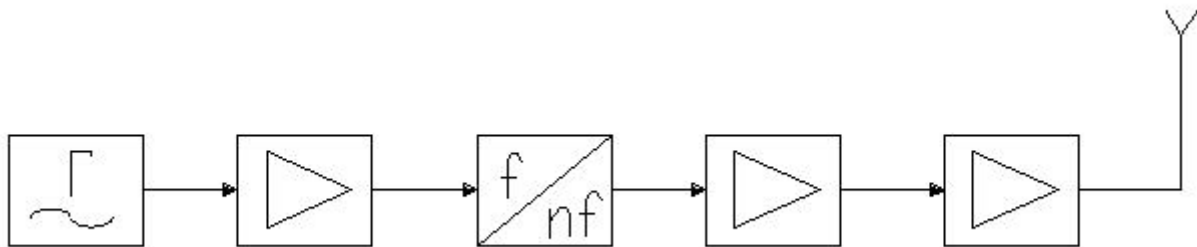
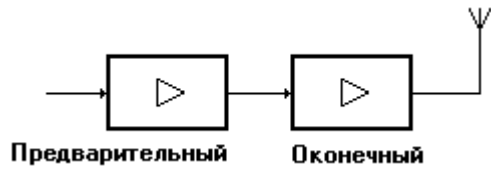
$P_{\text{вых}}$ - мощность ВЧ колебаний на выходе.

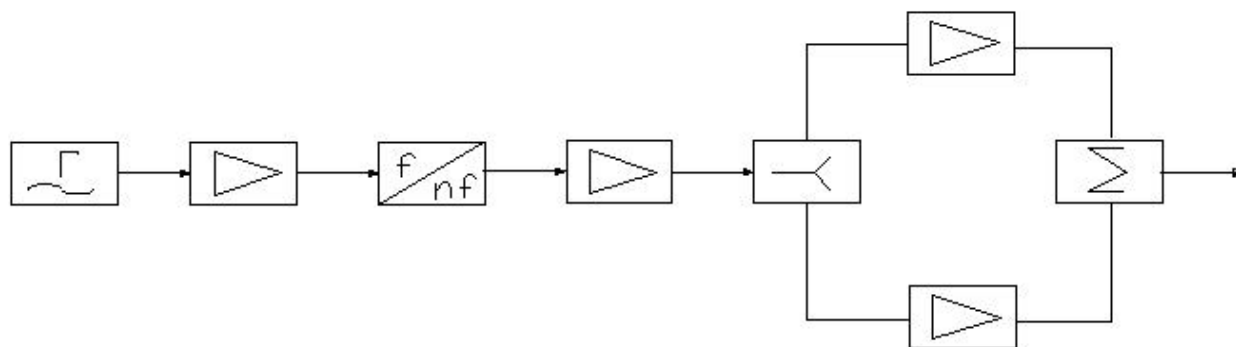
$P_{\text{вх}}$ - мощность ВЧ колебаний на входе.

P_0 - мощность потребляемая от источника питания постоянного напряжения.

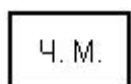


Диодные усилители частоты существенно больше.

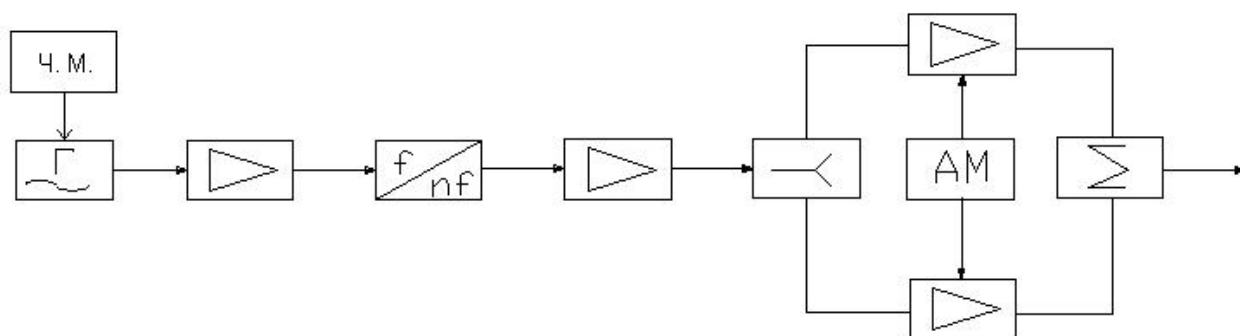




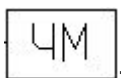
В тех случаях, когда активный прибор на заданной частоте не может обеспечивать $P_{\text{вых}}$, заданную техническим заданием, используют схему сложения мощностей параллельно складывая мощность нескольких активных приборов.



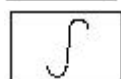
- изменённые внутренние параметры, прямая ЧМ



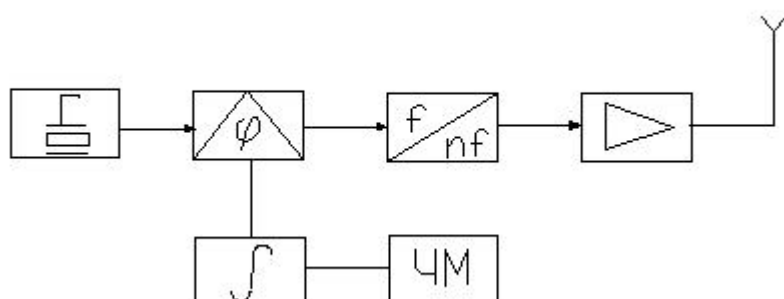
- фазовый модулятор



- косвенная ЧМ

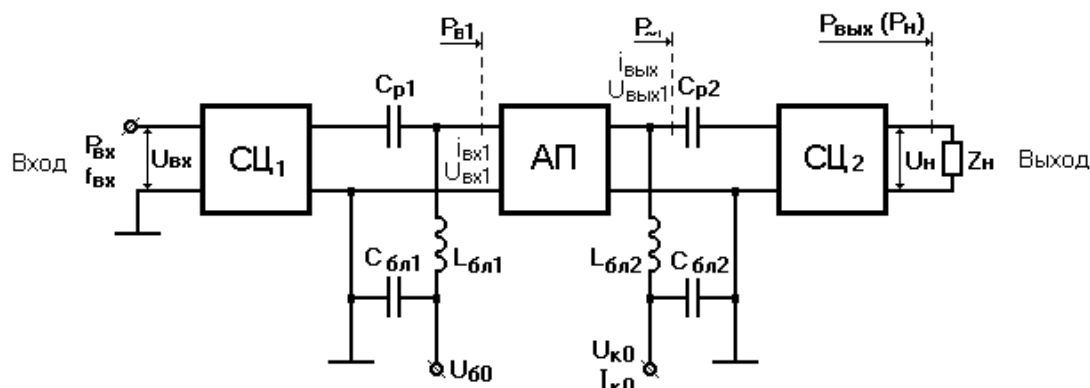


- интегратор



Генераторы с независимым возбуждением (Усилители мощности)

Обобщенная структурная схема:



СЦ₁ – согласование $R_{\text{вых}}$ предыдущего каскада с $R_{\text{вх}}$ активного прибора (АП);

фильтрация высших гармоник; обеспечение максимального КПД.

СЦ₂ – согласование $R_{\text{вых}}$ АП с нагрузкой; фильтрация высших гармоник; обеспечение максимального КПД при передаче энергии от АП к нагрузке.

C_{p1} – предотвращение попадания постоянного напряжения предыдущего каскада в цепь смещения транзистора.

C_{p2} – разделение по постоянному напряжению выходных клемм АП с нагрузкой.

$L_{бл1}$, $C_{бл1}$, $L_{бл2}$, $C_{бл2}$ – предотвращают паразитную обратную связь по ВЧ между входными и выходными электродами АП.

$U_{б0}$ – источник постоянного смещения на базу.

$U_{к0}$ – источник постоянного напряжения питания коллектора.

$P_{\text{вх}}$ – ВЧ мощность на входе каскада.

$U_{\text{вх}}$ – амплитуда напряжения ВЧ колебаний на входе каскада.

$P_{\text{вх}}$ – мощность ВЧ колебаний 1-й гармоники на входе АП.

$I_{\text{вх}}$, $U_{\text{вх}1}$ – амплитуда тока и напряжения на вх. клеммах АП.

$I_{\text{вых}}$, $U_{\text{вых}1}$ – амплитуда ВЧ колебаний на выходе АП.

$U_{\text{н}}$ – амплитуда напряжения на нагрузке.

P_{\sim} – мощность ВЧ колебаний на выходе АП (колебательная).

$P_{\text{вых}}$ – мощность на полезной нагрузке.

$I_{к0}$ – ток в цепи питания.

Инженерная методика расчётов режима работы активного прибора в усилителе мощности и умножителе частоты.

Усилитель мощности	Умножитель частоты
Напряжённость граничного режима:	
$\xi = \frac{U_{K1}}{U_{K0}}$	$\xi = \frac{U_{Kn}}{U_{Ku}}$
U _{K1} - амплитуда первой гармоники U _{K0} - постоянная напряжения питания коллектора	U _{Kn} - амплитуда n-ой гармоники коллекторного напряжения U _{K0} - постоянная напряжения питания коллектора
P _{вых1} - заданная выходная мощность колебаний первой гармоники	P _n - заданная выходная мощность для n-ой гармоники
-коэффициент Берга для первой гармоники	- коэффициент Берга для n-ой гармоники

Параметры обобщенной схемы:

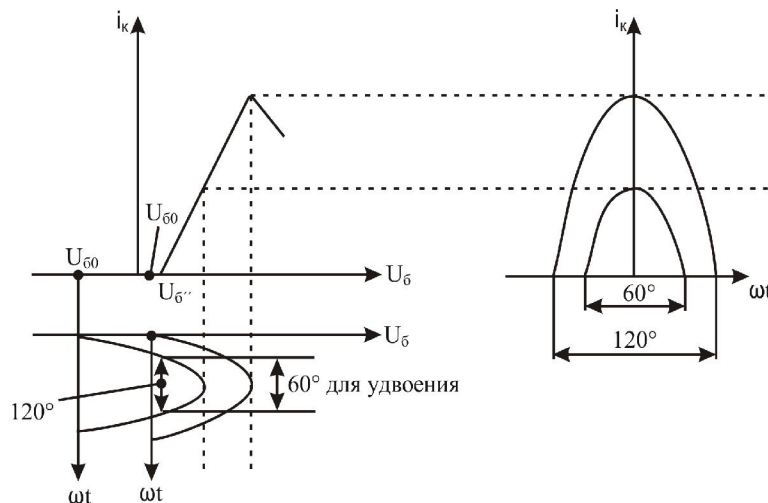
- 1) $P_{\text{вых}} = 0.5 \cdot I_{\text{вых}}^2 \cdot R_n$ – мощность на выходе в активной составляющей полезной нагрузки.
- 2) $P_{\sim} = 0.5 \cdot I_{\text{вых1}} \cdot U_{\text{вых1}}$ – колебательная мощность (на выходе АП).
- 3) $P_0 = I_{k0} \cdot U_{k0}$ – потребляемая от ИП мощность.
- 4) $\eta_e = \frac{P_{\sim}}{P_0}$ – электронный КПД.
- 5) $\eta_{k2} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\sim}}$ - контурный КПД выходной СЦ2.
- 6) $\eta_{k1} = \frac{P_{\text{в1}}}{P_{\text{вх}}}$ - КПД входной СЦ.
- 7) $K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \cdot \frac{P_{\text{в1}}}{P_{\text{в1}}} \cdot \frac{P_{\sim}}{P_{\sim}} = K_{\text{ракт}} \cdot \eta_{k1} \cdot \eta_{k2}$ - коэффициент усиления по мощности.

Элементная база АП (для бортовых и миниатюрных РПДУ)



Электронный режим работы АП

$i_k = S \cdot U_{\text{б}} + E_0^l$ - Статическая характеристика.



Динамический режим АП характерен наличием на входных и выходных клеммах АП ВЧ колебаний. При этом рабочая точка (РТ) скользит по ВАХ АП. Такой режим называется режимом с отсечкой коллекторного тока. $E_{\text{бб}}$ - напряжение смещения на базе.

Время нарастания I_k от 0 до максимума называется углом отсечки ($0 \leq \theta \leq 180^\circ$). При работе транзистора в режиме отсечки мы получаем максимально возможные значения работы транзистора по энергетике $> 50\%$. При работе в линейном режиме - КПД $< 50\%$.

Динамический режим при различных соотношениях напряжений на входе и выходе прибора

- 1) Увеличение напряжения на базе соответствует пропорциональному увеличению тока коллектора. Такой режим называется *недонапряженным*.
- 2) Когда напряжение на базе становится соизмеримым с напряжением на коллекторе, часть носителей ответвляется в цепь базы, и начинает расти ток базы. Этот режим называется *граничным*. Дальнейшее увеличение тока базы

приводит к уменьшению тока коллектора (общий ток через АП = const). Такой режим называется *перенапряженным*.

В граничном или слегка перенапряженном режимах мы получаем максимально возможные значения η_e и $P_{\text{вхл}}$.

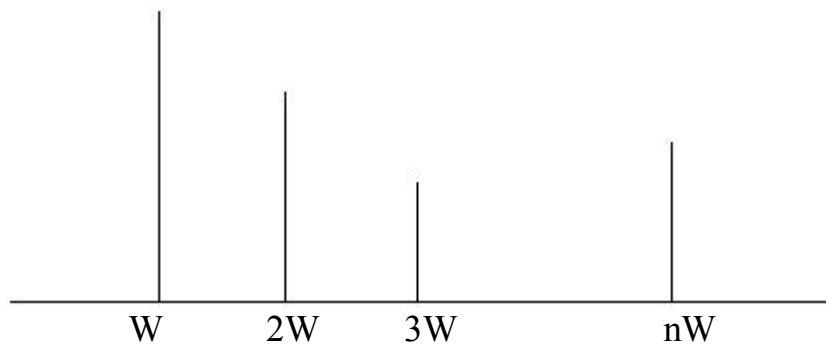
Форма импульса коллекторного тока

$$E_{\text{б0}} = \text{const}, U_{\text{б1}} - \text{изменяем. } U_{\text{б}} = E_{\text{б0}} + U_{\text{б1}} \cdot (\cos(\omega \cdot t))$$

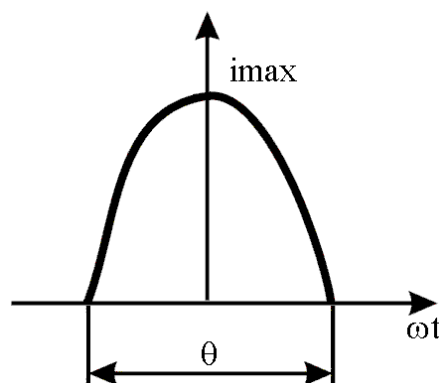
i_{max} - максимум импульса коллекторного тока.

Гармонический анализ I_k

$$i_k = I_{k0} + I_{k1} \cdot \cos \omega t + I_{k2} \cdot \cos 2\omega t + \dots + I_{kn} \cos n\omega t$$



Амплитуды $I_{k0}, I_{k1}, \dots, I_{kn}$ определяют форму импульса.



При проектировании усилителя мощности на выходе требуется обеспечить максимальную амплитуду I_{k1} . В соответствии с теоремой Фурье этого можно достичь, сформировав на выходе усилительного каскада импульс коллекторного тока I_{k1} определенной формы. Форма импульса коллекторного тока I_{k1} зависит от ω и угла отсечки θ . Задача проектирования усилителя мощности: на заданной частоте ω выбрать режим работы транзистора при

котором напряжения смещения на базе (предельный θ) реализуют макс. амплитуду I_{k1} .

$$i_k = i_{k_{\max}} \cdot \frac{\cos \omega t - \cos \theta}{1 - \cos \theta} - \text{форма импульса коллекторного тока } i_k$$

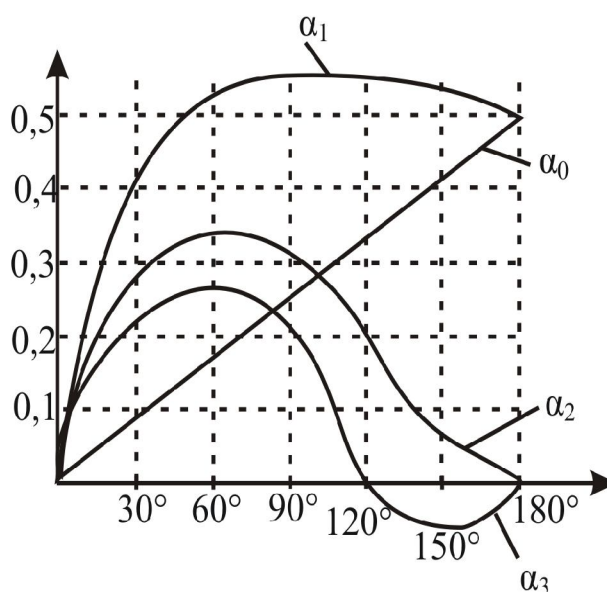
$$i_k = i_{k_{\max}} F(\theta); F(\theta) = \alpha_0 + \alpha_1 \cos \omega t + \alpha_2 \cos 2\omega t \dots$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\theta) d\omega t; \alpha_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(\theta) \cos n\omega t \cdot d\omega t$$

Коэффициенты Берга зависят от угла отсечки

$$I_{k0} = i_{k_{\max}} \cdot \alpha_0(\theta); I_{kn} = i_{k_{\max}} \cdot \alpha_n(\theta)$$

Коэффициенты Берга $\alpha_n(\theta)$ рассчитаны и сведены в графики и таблицы



$$\theta_{\text{opt}} = \frac{120^\circ}{n}$$

При θ_{opt} получаем максимум мощности на коллекторе $P_k = \frac{1}{2} I_k \cdot U_k$.

Максимум $\alpha_1 = 120^\circ$.

Однако максимум электронного КПД $\eta_e = \frac{P_k}{P_0}$ реализуется при $\theta_{\text{opt}} = 0^\circ$.

Поэтому, для УМ выбирают компромиссный режим:

$$60^\circ < \theta_{\text{opt}} < 120^\circ.$$

Такой режим позволяет получить на выходном усилителе каскада достаточно высокую мощность колебаний 1-ой гармоники и сохранить при этом приемлемый уровень электронного КПД.

Оконечный $\theta = 90^\circ$

Предварительный $\theta = 110^\circ$

Методика расчета электронного режима работы АП

Количественной характеристикой электронного режима является эффективность использования постоянного напряжения питания коллектора:

$$\xi = \frac{U_{K1}}{U_{K0}}, \quad 0 \leq \xi \leq 1$$

В гр. режиме: $\xi = \xi_{гр}$

НДР: $\xi < \xi_{гр}$

ПНР: $\xi > \xi_{гр}$

Основные соотношения для расчета режима АП

$$1) \xi_{гр} = 0,5 + 0,5 \sqrt{1 - \frac{8P_{\sim}}{S_{гр} \cdot \alpha_1(\theta) \cdot U_{k0}^2}} - \text{напряженность граничного режима.}$$

Параметры АП:

а) $S_{гр}$ - крутизна граничного режима

б) U_{K0} - типовое значение напряжения питания

в) $P_{\sim} = P_{K1}$ - выходная мощность 1-ой гармоники

г) $\alpha_1(\theta)$ - коэффициент Берга для 1-ой гармоники

2) $P_{K1} = 0,5 \cdot I_{K1} \cdot U_{K1}$ - мощность ВЧ

3) $P_0 = I_{K0} \cdot U_{K0}$ - потребляемая

4) $P_p = P_0 - P_{K1}$ - рассеянная на коллекторе

5) $\eta_e = \frac{P_{K1}}{P_0}$ - электронный КПД

6) $I_{K0} = i_{\max} \cdot \alpha_0(\theta)$ - пост. составл.

7) $I_{K1} = i_{\max} \cdot \alpha_1(\theta)$ - амплитуда 1-ой гармоники

8) $\xi_{гр} = \frac{U_{K1}}{U_{K0}}$ - коэффициент использования в гр. режиме

9) $U_{K1} = I_{K1} \cdot R_{K1}$, R_{K1} - активная составляющая вых. сопротивления транзистора

10) $U_{B1} = \frac{i_{\max}}{S \cdot (1 - \cos \theta)}$ - амплитуда 1-ой гармоники для напряжения на базе

11) $U_{B0} = \frac{i_{\max} \cdot \cos \theta}{S \cdot (1 - \cos \theta)} - U_{B0}^l$; S - крутизна в динамическом режиме,

U_{B0}^l - напряжение отпириания транзистора

Этапы:

1) Выбор типа АП

2) Расчет его электронного режима

а) Выбор АП по двум параметрам: $f_{\text{раб}}$ и P_{K1}

Для схемы с ОЭ: $f_{\text{раб}} < f_{\alpha}$

Схема с ОБ: $f_{\text{раб}} < (1,5 \div 2)f_{\alpha}$

Расчет режима работы транзистора приведенный выше (1-11) справедлив для безынерционного транзистора т.е.

$$f_{\text{раб}} < 0,05 \cdot f_{\alpha}$$

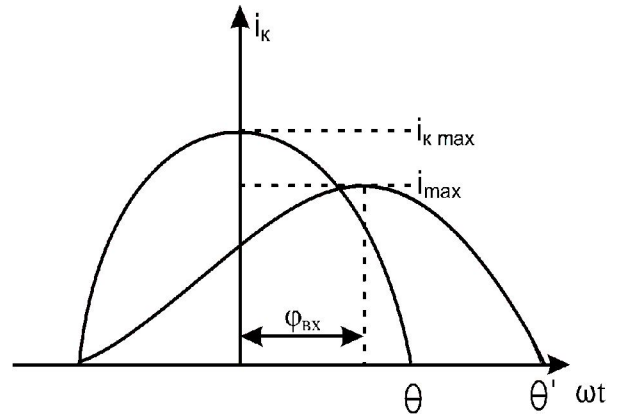
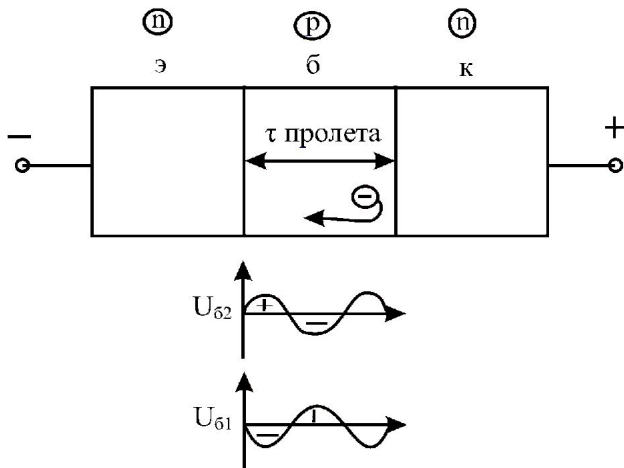
$$P_{\sim} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{\eta_{\text{К}} - (0,8 \div 0,9)}$$

По мощности:

$P_{\text{ВЫХ}}$ - заданная вых. мощность транзистора.

$P_{\text{ВЫХ}}$ должно быть меньше $P_{\text{НОМ}}$ - по справочнику.

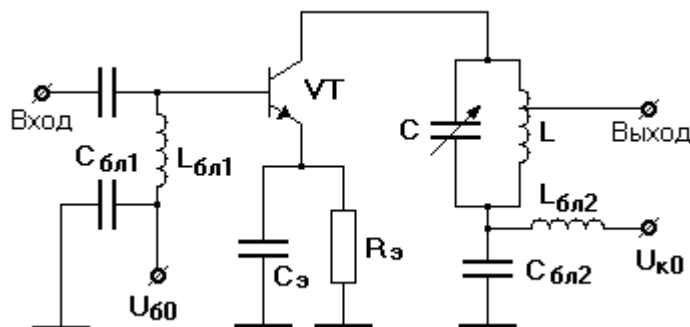
При отсутствии $P_{\text{НОМ}}$, транзистор выбирают по допустимой мощности рассеяния $P_{\text{доп}}$.



α зависят не только от θ но и от $\varphi_{\text{ВХ}}$, $\alpha_n(\theta, \varphi_{\text{ВХ}})$ ввели $\gamma_n(\theta, \varphi_{\text{ВХ}})$

$$I_{\text{Кн}} = i_{\text{Кmax}} \cdot \gamma_n(\theta, \varphi_{\text{ВХ}})$$

Схема №1



Умножители частоты на транзисторах

Умножитель частоты входных гармонических колебаний реализуется на принципе преобразования спектра на нелинейной характеристике ЛП с последующим выделением в выходном к.к. требуемой n-ой гармоники.

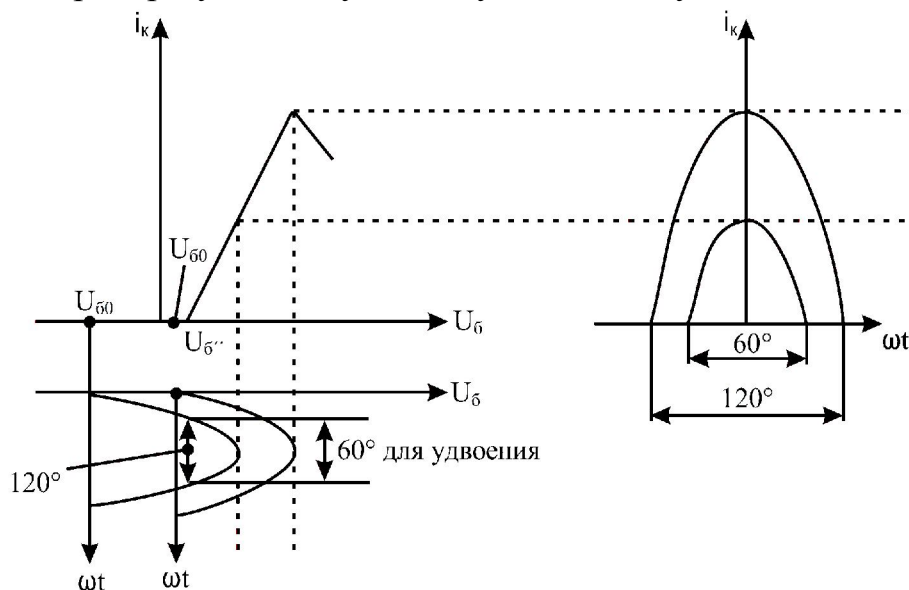
Транзисторный умножитель частоты реализует нелинейность либо режимом отсечки i_k , либо нелинейностью ёмкости “p-n” перехода

При выходе режима работы АП умножителя частоты

$$\theta_{opt} = \frac{120^\circ}{n}$$

Работа транзистора в умножителе частоте в режиме с отсечкой i_k энергетически мало эффективна из-за уменьшения i_{max} при $\theta_{opt} = \frac{120^\circ}{n}$.

Преобразуем схему №1 из усилителя в умножитель с $n = 2$.



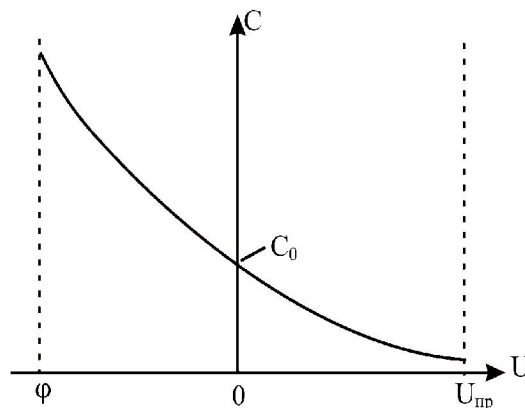
а) меняем резонансную $f_{к.к}$ на частоту $f_{вых} = 2f_{вх}$

- б) Изменяем величину $U_{\text{б0}}$ для реализации $\theta = 60^\circ$.
- в) Меняем $C_{\text{бл2}}$ чтобы обеспечить протекание тока 2-ой гармоники,
 $L_{\text{бл2}}$ чтобы не пропустить 2-ую гармонику в ИП.

Умножитель частоты на транзисторе с нелинейной ёмкостью “р-п” перехода

В качестве нелинейной ёмкости может использоваться ёмкость “р-п” перехода п/п прибора смещенного в область обратной проводимости.

На вход подается гармоническое напряжение и вследствие нелинейной ёмкости на выходе появляется спектр высших гармоник тока, выделяя одну из которых, осуществляет умножение частоты.



Ge-1A
 Si-2A
 AsG01-3A

$$C(U) = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{U}{\phi}\right)^\gamma}$$

ϕ - контактная разность потенциалов

Широкое применение в СВЧ умножителях частоты получили диоды с нелинейной ёмкостью, которые в зависимости от степени нелинейности характеристики разделяются на:

- варакторы ($\gamma > 1/3$)
- ДНЗ ($\gamma < 1/3$)

Для обоих типов диодов $\phi \approx 0,5$.

В паспорте на диод указывается $C(0)$ и $C(E)$

$$C(u) = C_3(u) = C_6(u) = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{u}{\phi}\right)}$$

$$C_{от}(u) = C_д(u) = B * e^{Bu}$$

$C_3(u)$ - емкость закрытого p-n перехода

$C_{от}(u)$ -емкость открытого перехода

Запертый переход соответствует барьерной емкости C_6 открытого перехода, определяется диффузионной емкостью $C_д$.

C_0 определяется паспортными данными

Ge- $\phi = 0.7$ В

Si- $\phi = 1,1$ В

AsGa- $\phi = 1,5$ В

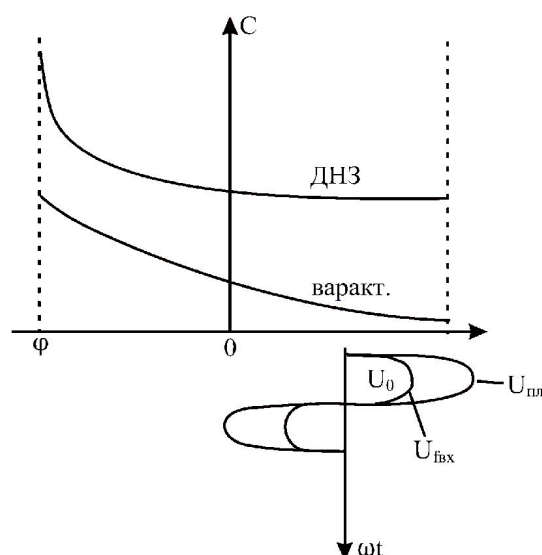
γ -степень нелинейности емкости p-n перехода

$\gamma = 1/2$ -резкий переход

$\gamma = 1/3$ -плавный переход

$\gamma \leq 1/4$ -сверхплавный переход

Режимы работы диодных умножителей



U_0 - напряжение смещения на диоде.

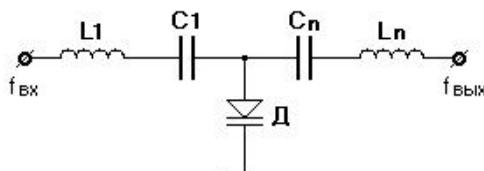
I. Режим запертого “p-n” перехода: $U_{\text{fвх}}$ не пересекает режим отпирания.

Варактор в этом режиме более эффективен (больше нелинейность).
Невысокая мощность-недостаток.

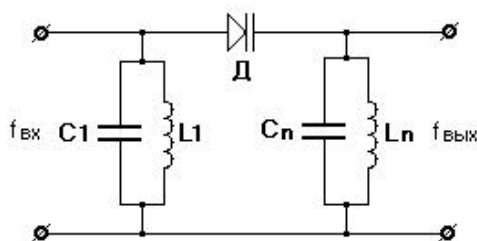
II. $U_{\text{fвх}}$ пересекает режим отпирания.

Схемы умножителей частоты на диоде

Параллельная:



Последовательная:



Параллельная:

Преимущество: использование в мощных каскадах ввиду хорошего теплоотвода от диода.

Недостаток: низкое входное сопротивление и сложность согласования

Последовательная:

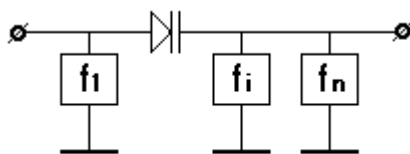
Преимущество: входное и выходное сопротивления растут, удобство монтажа в полосовых гибридных ИС.

Недостаток: трудности теплоотвода.

Для обеих схем общий недостаток это низкая эффективность

преобразования частоты равная $\eta_{\text{пр}} = \frac{P_n}{P_1}$.

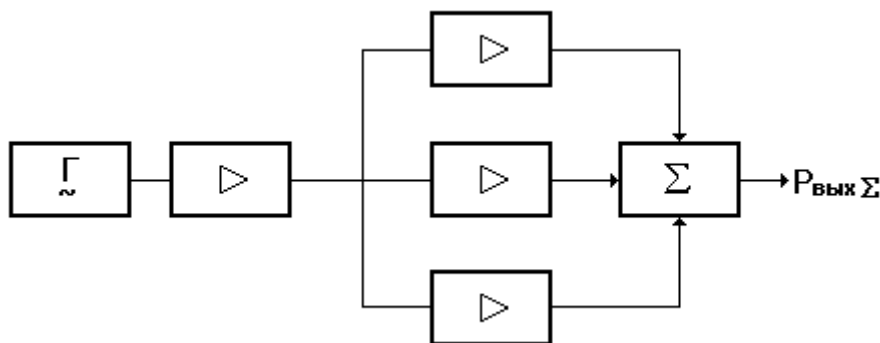
Для повышения $\eta_{\text{пр}}$ используются схемы с холостыми контурами.



Сложение мощностей в каскадах РПДУ

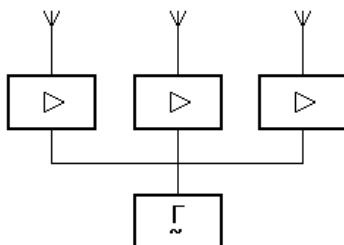
В технических случаях когда выходная мощность не может быть обеспечена мощностью одного АП, используются различные варианты сложения мощностей. Кроме того использование сложения мощностей

позволяет реализовать облегченный тепловой режим работы АП. В ряде случаев специальные мостовые схемы сложения используются в многочисленных усилителях для развязки между каскадами и устранения влияния изменяющейся нагрузки.



Уровни сложения мощностей

1. Сложение мощности п/п структур в одном кристалле.
2. Сложение мощности нескольких кристаллов в одном корпусе.
3. Сложение мощности нескольких п/п приборов на общую нагрузку.
4. Сложение мощности нескольких усилительных каскадов на общую нагрузку.
5. Сложение мощности нескольких усилителей в свободном пространстве.
(активная ФАР)



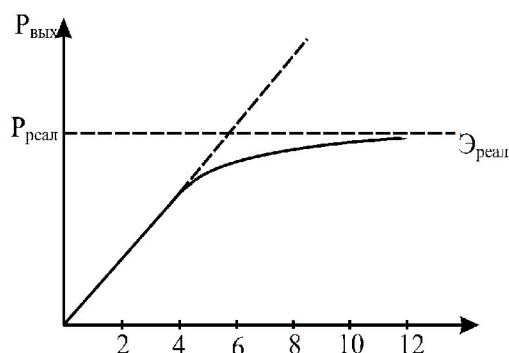
В принципе возможно использование всех уровней сложения мощностей одновременно.

Требования к схемам сложения мощностей

1) Эффективность сложения мощности

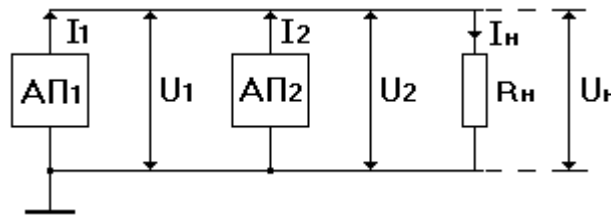
$$\mathcal{E} = \frac{P_{\text{выхE}}}{P_1 \cdot N}$$

Приемлемая эффективность при $N = 6 \div 8$.



Схемы сложения мощностей

1) Параллельная схема

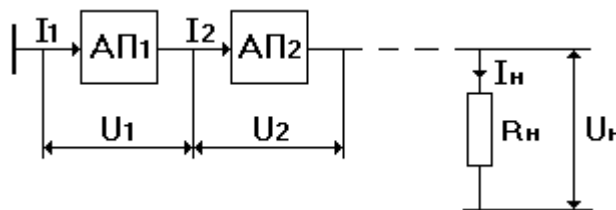


$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^N I_i} = \frac{U_i}{N \cdot I_i} = \frac{R_{\text{н}i}}{N};$$

Недостаток:

Уменьшение оптимального сопротивления нагрузки при увеличении числа АП. Это ограничивает количество параллельно включенных АП.

2) последовательная схема



$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{I_i} = \frac{N \cdot U_i}{I_i} = N \cdot R_{\text{н}i};$$

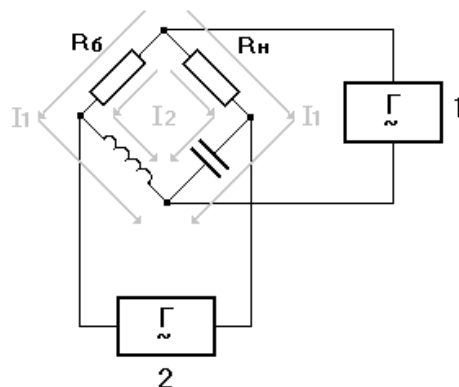
Для ВЧ – схем последовательная схема дает возможность реализовать приемлемые значения $R_{\text{н}}$

Надежность схем сложения

С точки зрения пробивных напряжений худшей надежностью обладает последовательная схема. Поэтому она используется в п/п каскадах редко.

Недостатком параллельной схемы является влияние режимов работы АП друг на друга. Исключить взаимное влияние позволяет мостовая схема.

Мостовые схемы сложения



При абсолютно идентичных генераторах ($I_1 = I_2$) на сопротивлении R_H выделяется удвоенная мощность или полностью суммируются мощности генераторов.

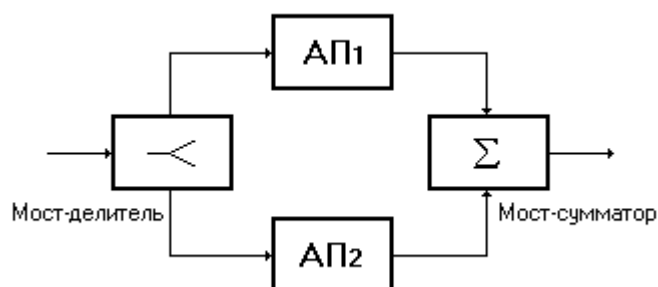
Мощность на R_B равна нулю.

Пусть $I_1 \neq I_2$

На $R_H \rightarrow P_H \downarrow$

На $R_B \rightarrow I_1 - I_2 \neq 0 \rightarrow P_B$, но никакого влияния на режим работы каждого генератора не происходит.

Усилительный каскад со сложением мощности



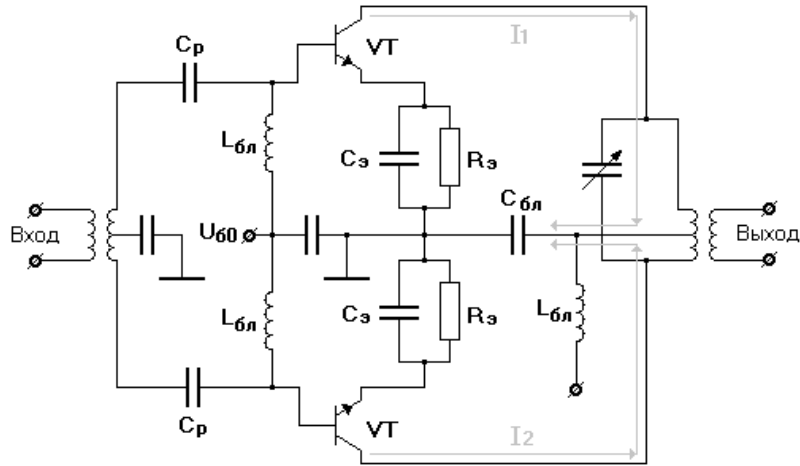
Мост – делитель и мост – сумматор являются идентичными устройствами с зеркальной схемой включения.

Мостовые схемы позволяют развязать АП.

Даже выход из строя одного АП не повлияет на оптимальную нагрузку предыдущего и последующего каскада.

Снизиться только мощность пропорциональная одному АП. Т.о. резко увеличится надежность таких каскадов.

Двухтактная схема сложения



$$\begin{aligned}
 i_1 &= I_0 + I_1 \cos \omega t + I_2 \cos 2\omega t + I_3 \cos 3\omega t + \dots \\
 i_2 &= I_0 + I_1 \cos(\omega t + \pi) + I_2 \cos 2(\omega t + \pi) + I_3 \cos 3(\omega t + \pi) + \dots \\
 &= I_0 - I_1 \cos \omega t + I_2 \cos 2\omega t - I_3 \cos 3\omega t + \dots \\
 i_H &= i_1 - i_2 = 2I_1 \cos \omega t + 2I_3 \cos 3\omega t
 \end{aligned}$$

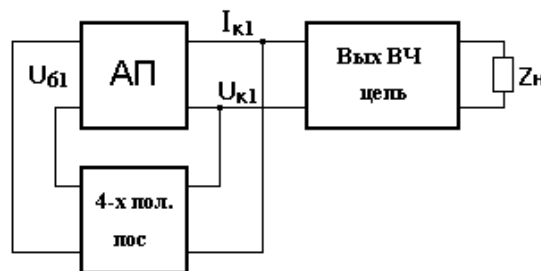
В нагрузке отсутствуют четные гармоники но есть удвоенные нечетные. Поэтому двухтактная схема сложения имеет свойство самофильтрации четных гармоник.

При $\theta = 120^\circ \Rightarrow \alpha_3(\theta) = 0 \Rightarrow$ удвоенная первая гармоника на выходе.

Недостаток: нужны абсолютно идентичные трансформаторы.

Возбудители в РПДУ (АГ)

АГ – устройства преобразующие энергию ИП в энергию ВЧ колебаний.



Условия стационарных колебаний в АГ

$U_{БЛ}$ - амплитуда 1-ой гармоники на базе.

$U_{к1}$ - амплитуда 1-ой гармоники на коллекторе.

$I_{к1}$ - амплитуда тока на коллекторе.

\dot{S}_{CP} - средняя крутизна динамической характеристики АП.

$$\dot{S}_{CP} = \frac{\dot{I}_{K1}}{\dot{U}_{B1}};$$

$$\dot{U}_{K1} = \dot{I}_{K1} \cdot \dot{Z}_{ВЫХ};$$

$$\dot{K}_{OC} = \frac{\dot{U}_{B1}}{\dot{U}_{K1}} < 1;$$

$$S_{CP} = \frac{\dot{U}_{B1} \cdot 1}{\dot{U}_{B1} \cdot \dot{K}_{OC} \cdot \dot{Z}_{ВЫХ}} = \frac{1}{\dot{K}_{OC} \cdot \dot{Z}_{ВЫХ}};$$

$\dot{S}_{CP} \cdot \dot{K}_{OC} \cdot \dot{Z}_{ВЫХ} = 1$ - условие стационарных колебаний в АГ.

$$\dot{S}_{CP} = |\dot{S}_{CP}| \cdot e^{j\varphi_s};$$

$$\dot{K}_{OC} = |\dot{K}_{OC}| \cdot e^{j\varphi_{OC}}; \quad \dot{Z}_{ВЫХ} = |\dot{Z}_{ВЫХ}| \cdot e^{j\varphi_z};$$

$$|S_{CP}| \cdot |K_{OC}| \cdot |Z_{ВЫХ}| \cdot e^{j(\varphi_s + \varphi_{OC} + \varphi_z)} = |1| \cdot e^{j2\pi n};$$

$S_{CP} \cdot K_{OC} \cdot Z_{ВЫХ} = 1$ - баланс амплитуд.

$\varphi_s + \varphi_{OC} + \varphi_z = 2\pi n$ - баланс фаз.

Баланс амплитуд в АГ

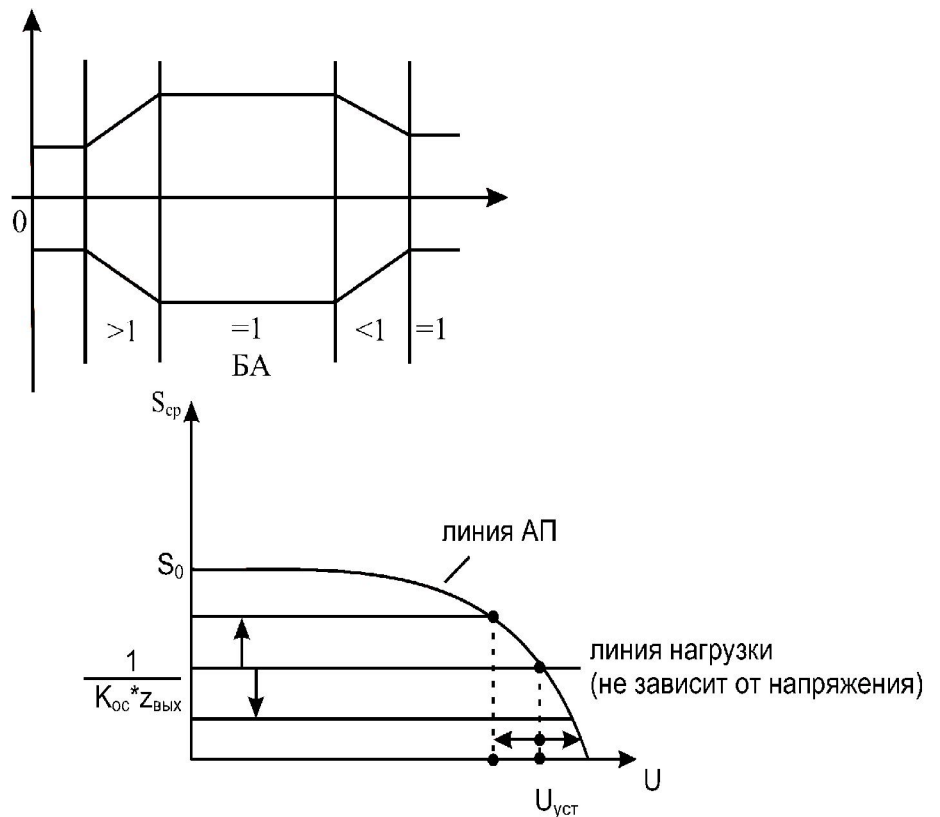
K_{OC} - не энергоемкая величина.

Источник энергии – АП.

Потребитель энергии - $Z_{ВЫХ}$

$S_{CP} \cdot K_{OC} \cdot Z_{ВЫХ} > 1$ - увеличивается.

$S_{CP} \cdot K_{OC} \cdot Z_{ВЫХ} < 1$ - уменьшается до нового равновесия.



$$S_{CP} = \frac{1}{K_{OC} \cdot Z_{ВЫХ}};$$

Чем больше проводимость нагрузки тем больше энергии забирается из системы значит амплитуда установившегося режима уменьшается.

Роль модуля коэффициента ОС

- служит средством регулировки амплитуды выходных установившихся колебаний:

$$K_{OC} \uparrow \Rightarrow U_{уст} \uparrow; K_{OC} \downarrow \Rightarrow U_{уст} \downarrow$$

Баланс фаз

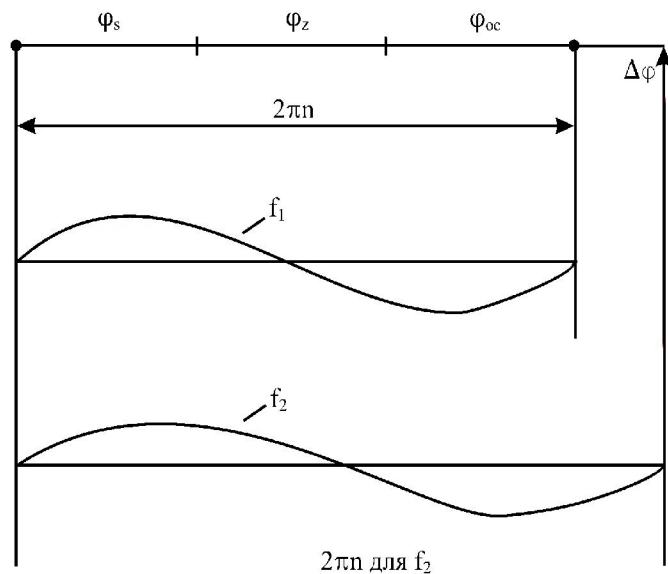
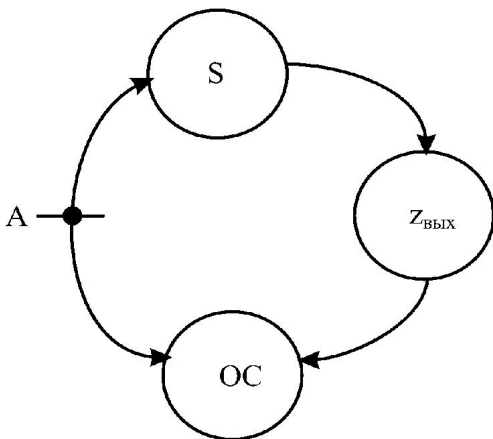
$$\varphi_s + \varphi_{OC} + \varphi_z = 2\pi n$$

φ_s - набег фазы в АП

φ_{OC} - набег фазы в четырехполоснике ОС

φ_z - набег фазы в выходном к.к.

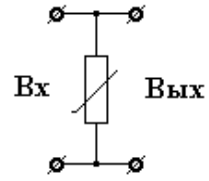
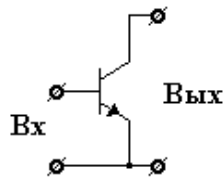
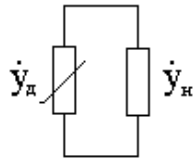
$2\pi n$ - положительная обратная связь



Баланс фаз определяет частоту колебаний АГ. Изменение фазовых соотношений в кольце ОС приводит к нарушению баланса фаз на заданной частоте. На новой частоте баланс фаз будет выполняться.

Изменяя амплитуду U_k , изменяется фаза S_{CP} из этого следует то, что мы можем менять частоту АГ.

Диодные АГ (ДАГ)



$$\dot{Y}_g = G_g + jB_g; Y_H = G_H + jB_H;$$

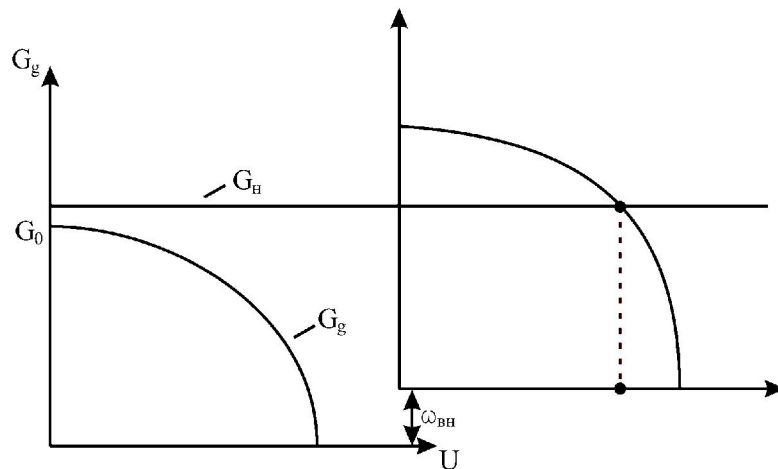
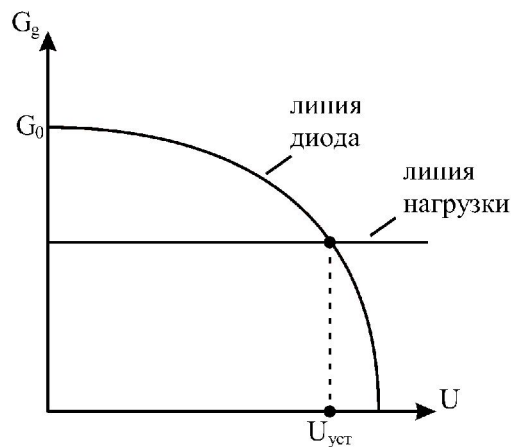
В ДАГ ПОС называется внутренней. В трансформаторных – внешней.
Баланс фаз в ДАГ:

$$B_g = B_H$$

Если B_g носит емкостной характер то B_H должно быть индуктивного характера и наоборот.

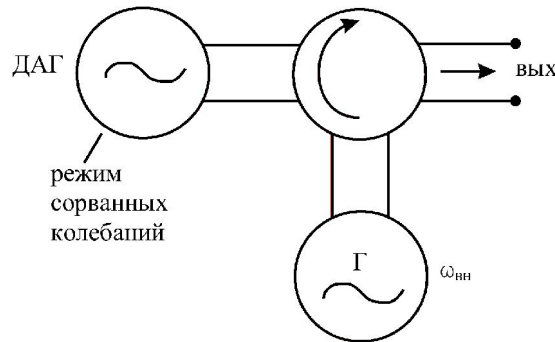
Баланс амплитуд в ДАГ:

$$G_g = G_H$$



Можно внешним источником добиться БА.

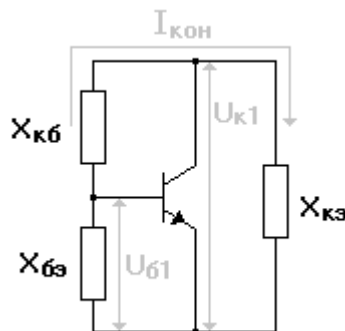
На этом принципе основан эффект регенеративного усиления в диодных генераторах.



Энергия ДАГ увеличивается на $W_{\text{вн}}$ и скачком на выходе появились колебания.

Обобщенная схема АГ

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{бэ}}}{U_{\text{кэ}}} = \frac{\dot{U}_{\text{б1}}}{\dot{U}_{\text{к1}}} = \frac{X_{\text{бэ}}}{X_{\text{кэ}}};$$



В стационарном колебании в АГ протекает общий контурный ток $I_{\text{кон}}$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{б1}} &= jX_{\text{бэ}} \cdot \dot{I}_{\text{кон}}; \\ \dot{U}_{\text{к1}} &= jX_{\text{кэ}} \cdot \dot{I}_{\text{кон}}; \end{aligned}$$

Коэффициент ОС по модулю:

$$\begin{aligned} |K_{\text{ос}}| &< 1; \\ \text{Знак } K_{\text{ос}} &> 0; \\ |X_{\text{бэ}}| &< |X_{\text{кэ}}|; \end{aligned}$$

- 1) $X_{\text{бэ}} > 0$, $X_{\text{кэ}} > 0$ - индуктивная трех точка.
- 2) $X_{\text{бэ}} < 0$, $X_{\text{кэ}} < 0$ - емкостная трех точка.

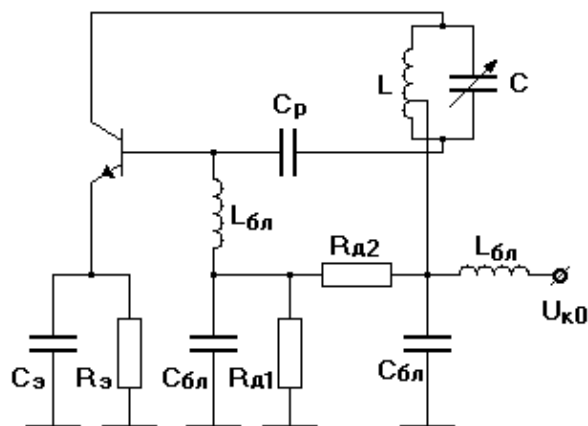
Чтобы в контуре АГ был резонанс одна из недостающих реактивностей должно быть противоположного знака:

$$X_{\text{кб}} + X_{\text{кэ}} + X_{\text{бэ}} = 0 \text{ - условие резонанса.}$$

- 1) Для индуктивной $X_{кб} < 0$
- 2) Для емкостной $X_{кб} > 0$

Практическая схема АГ

Индуктивная трех точка:

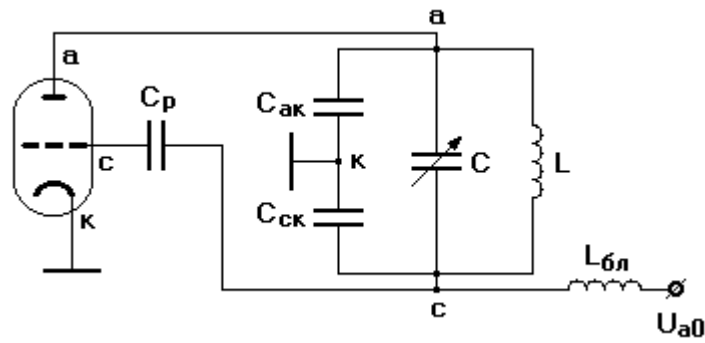


Меняем точку подключения к индуктивности из этого следует что меняется $K_{ос}$ и амплитуда колебаний.

Если меняем $f_{рез}$ к.к. путем изменения емкости контура произойдет изменение амплитуды колебаний т.к. измениться $|X_{кб}|$.

$$|K_{ос}| = \frac{L_{БЭ}}{L_{КЭ}} = \frac{n_{БЭ}}{n_{КЭ}}$$

Емкостная трех точка



$$K_{OC} = \frac{X_{CK}}{X_{AK}} = \frac{\frac{1}{\omega C_{CK}}}{\frac{1}{\omega C_{AK}}} = \frac{C_{AK}}{C_{CK}}; C_{AK} < C_{CK}$$

При изменении резонансной частоты амплитуда колебаний не меняется т.к. $K_{OC} = const$.

Достоинства: при проектировании АГ учитываются паразитные межэлектродные емкости.

Стабилизация частоты в АГ

Факторы, влияющие на нестабильность частоты:

1) Неточность установки частоты генерации

- Существует неточность градуировки шкал.

Использование конусных шкал, увеличительных стекол, оптических зайчиков - механические люфты привода.

Используются вейгенверные устройства.

2) Механические деформации, например емкости с воздушным заполнением, температурная деформация пластин, смещение витков индуктивности.

Использование упругих материалов, системы гасящей вибрации

3) Изменение рабочей температуры.

Изменяются размеры элементов, влияющих на частоту. В ряде ответственной аппаратуры используется термостатированные переменные емкости заключаются в колбу, внутри специальный элемент поддерживает постоянную температуру.

4) Изменение давления и влажности.

Влажность изменяет диэлектрическую проницаемость, давление механические свойства.

5) Смена АП.

Разброс параметров.

Предусмотреть в схеме подстроечные элементы.

6) Нестабильность нагрузки.

Использование развязывающих элементов буферного каскада

7) Нестабильность ИП

Воздействует на частоту колебаний несколькими путями

А) изменение скорости пролета носителей в АП

Б) изменение режима работы АП а значит изменение тока базы

В) изменение режима, изменяется температура, изменяется частота

Г) изменение межэлектродной емкости

Методы:

- использование высокодобротной фильтрующей системы

- осуществление термостабилизации

- стабилизация питающих напряжений

Основные пути стабилизации в АГ

$$\sum \varphi(\omega, P_i) = 2\pi n$$

$$\frac{\partial \sum \varphi(\omega, P_i)}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial \sum \varphi(\omega, P_i)}{\partial P_i} \Delta P_i + \dots = 0$$

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{-\sum \frac{\partial \sum \varphi}{\partial P_i} \Delta P_i}{\omega \frac{\partial \sum \varphi}{\partial \omega}}$$

Пути уменьшения:

1) уменьшение ΔP_i - уменьшение ухода параметров.

2) уменьшение $\frac{\partial \sum \varphi}{\partial P_i}$ - уменьшение влияния параметра на частоту.

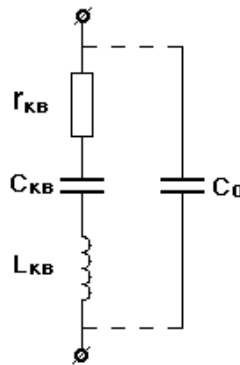
3) $\frac{\partial \sum \varphi}{\partial \omega} \omega \rightarrow \infty$

$$\sigma = \omega \left[\frac{\partial \varphi_s}{\partial \omega} + \frac{\partial \varphi_{\text{ВЫХ}}}{\partial \omega} + \frac{\partial \varphi_{\text{ОС}}}{\partial \omega} \right]$$

Чтобы $\sigma \uparrow$ выходной к.к. должен обладать высокой добротностью Q и слабо зависеть от изменения ΔL и ΔC

Кварцевая стабилизация частоты

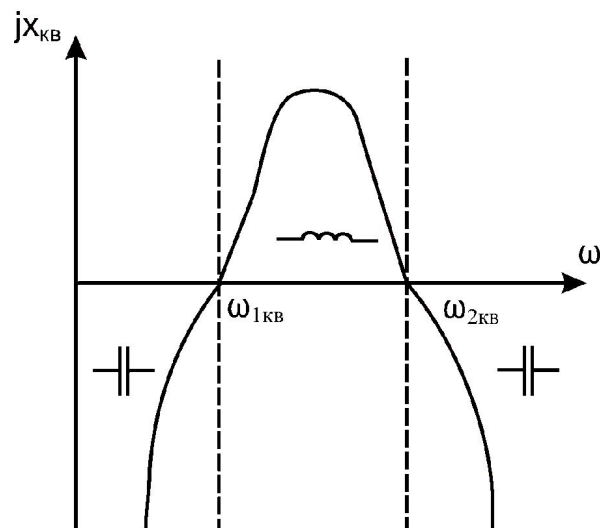
Описанными выше свойствами последовательного к.к. с высокой σ обладает кристалл природного кварца имеющий эквивалентную схему последовательного к.к.



Физически кварц обладает свойством прямого и обратного электромеханического эффекта (пьезоэффект).

Резонансы кристалла кварца

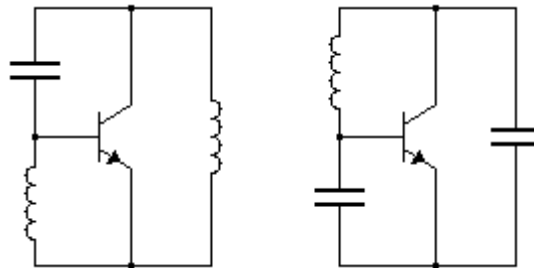
$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = 10^{-5} \div 10^{-7}$$



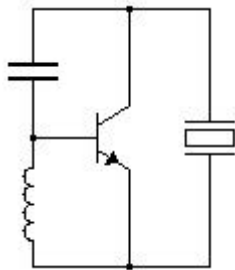
$$\omega_{1кв} = \frac{1}{\sqrt{L_{кв} \cdot C_{кв}}} \text{ - собственная частота кварцевой пластины.}$$

$$\omega_{2KB} = \frac{1}{\sqrt{L_{KB} \left(\frac{C_0 \cdot C_{KB}}{C_0 + C_{KB}} \right)}} - \text{резонансная частота кварцевого резистора.}$$

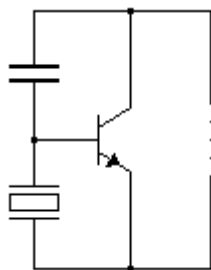
Включение кварца в схему АГ



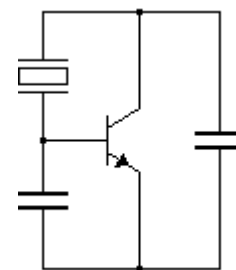
Кварц может включаться в качестве индуктивности:



1)



2)



3)

Практические схемы АГ с кварцем

