

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

**А.Р. Сафин  
Н.Н. Удалов**

**ТРАНЗИСТОРНЫЕ АВТОГЕНЕРАТОРЫ.  
СБОРНИК ЗАДАЧ.**

Учебное пособие  
по курсу

«Устройства генерирования и формирования сигналов»  
для студентов, обучающихся по направлениям «Радиотехника»,  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»

Москва  
Издательство МЭИ  
2018

УДК  
ББК  
М

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»*

Подготовлено на кафедре Формирования и обработки радиосигналов

**Сафин, А.Р., Удалов, Н.Н.**

М Транзисторные усилители мощности. Сборник задач: учебное пособие. А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов. / Под ред. проф. Н.Н. Удалова. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 63 с.

Данное учебное пособие содержит задачи по расчету параметров схем и режимов одноконтурных автогенераторов, методов управления их частотой, а также неустойчивости частоты. По каждому разделу даны краткие теоретические сведения, примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Радиотехника», «Радиоэлектронные системы и комплексы».

УДК  
ББК

© Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>1. СХЕМЫ И РЕЖИМЫ ОДНОКОНТУРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ.....</b>	<b>5</b>
1.1. Схемы автогенераторов .....	8
1.2. Режимы автогенераторов.....	14
1.3. Диаграммы срыва и смещения.....	20
1.4. Нагрузочные характеристики .....	26
1.5. Влияние питающих напряжений на режим автогенератора.....	31
<b>2. УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ В ОДНОКОНТУРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРАХ.....</b>	<b>34</b>
2.1. Схемы управляемых автогенераторов .....	39
2.2. Расчет параметров контура и девиации частоты.....	41
2.3. Статические модуляционные характеристики .....	45
2.4. Паразитная амплитудная модуляция .....	48
<b>3. НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ ОДНОКОНТУРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ.....</b>	<b>50</b>
3.1. Влияние температуры .....	53
3.2. Влияние питающих напряжений .....	58
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>61</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>62</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие составлено в помощь студентам, изучающим курс «Устройства генерирования и формирования сигналов» специальности «Радиотехника». В своей основе оно является существенно переработанной и обновленной версией издания 1989 года [1], ставшего библиографической редкостью. Также при составлении данного пособия использовались материалы из других задачников [2,3]

Основная цель задачника – углубление и закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях и в ходе самостоятельной подготовки, а также выработка навыков в решении практических задач. Полное изложение теоретического материала, охватываемого задачами, содержится в учебнике [4].

В современных устройствах генерирования и формирования сигналов для усиления колебаний применяются различные типы активных приборов. На частотах до 300 МГц это в основном биполярные и полевые транзисторы. В диапазоне СВЧ к ним добавляются различные электронные приборы такие, как клистроны, магнетроны, лампы бегущей и обратной волн и др. В данном учебном пособии студентам предлагаются задачи по следующим разделам: одноконтурные автогенераторы (схемы, режимы, влияние нагрузки и питающих напряжений), управляемые по частоте автогенераторы (схемы, режимы, статические модуляционные характеристики), нестабильность частоты. В качестве активного элемента выбран биполярный транзистор, работающий на частотах, где в первом приближении можно не учитывать его инерционные свойства.

В каждом разделе приведены теоретические сведения, примеры решения задач и задачи для самостоятельного изучения. Приведенных в задачнике теоретических сведений, формул и справочных данных вполне достаточно для решения всех задач. В пособии включены задачи различной сложности – от простейших до весьма сложных и трудоемких. В каждом подразделе задачи сгруппированы по конкретным темам и расположены в порядке нарастания сложности.

Автор благодарен рецензентам к.т.н., проф. Белову Л.А. и д.ф.-м.н., проф. Устинову А.Б. за полезные советы и замечания, способствовавшие существенному улучшению данного пособия.

# 1. СХЕМЫ И РЕЖИМЫ ОДНОКОНТУРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

Задачи составлены для автогенераторов (АГ) гармонических колебаний, построенных по схеме обобщенной трехточки (рис.1.1а).

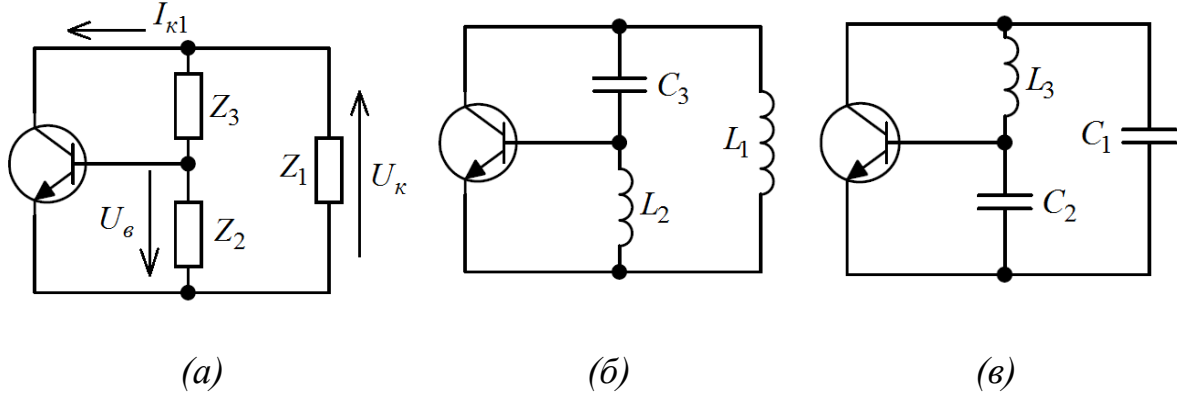


Рис.5.1. Обобщенная трехточечная схема АГ (а) и ее варианты – индуктивная (б) и емкостная (в) трехточки

Потери в колебательном контуре малы, и каждое из сопротивлений  $Z_1, Z_2, Z_3$  можно считать реактивным

$$Z_1 \approx jX_1; Z_2 \approx jX_2; Z_3 \approx jX_3, \quad (1.1)$$

а при круговом обходе контура учесть потери

$$Z_1 + Z_2 + Z_3 = r + jX = r(1 + j\alpha), \quad (1.2)$$

где обобщенная расстройка контура

$$\alpha = X/r = Q(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega); Q = \rho/r; \omega_0 = 1/\sqrt{L_{\text{сум}}C_{\text{сум}}}. \quad (1.3)$$

Здесь  $\rho, Q, \omega_0$  - характеристическое сопротивление, добротность и собственная частота контура,  $L_{\text{сум}}, C_{\text{сум}}$  - суммарные индуктивность и емкость контура при круговом обходе:

$$L_{\text{сум}} = L_1 + L_2 + L_3; 1/C_{\text{сум}} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3. \quad (1.4)$$

В стационарном режиме напряжения и токи, протекающие через электроды БТ, связаны такими же соотношениями, что и в усилителе мощности, только напряжение возбуждения создается за счет обратной связи. Коэффициент обратной связи  $k$  с учетом направлений напряжений, принятых за положительные (рис.1.1), равен

$$k = U_g/U_k; k = -Z_2/(Z_2 + Z_3). \quad (1.5)$$

$$\text{Напряжение на контуре } U_k = I_{k1}Z_k. \quad (1.6)$$

Сопротивление контура

$$Z_k = Z_1(Z_2 + Z_3)/(Z_1 + Z_2 + Z_3). \quad (1.7)$$

Первая гармоника коллекторного тока

$$I_{k1} = SU_g \cdot \gamma_1(\theta, \theta_1) = S_1 U_g; S_1 = S\gamma_1(\theta, \theta_1), \quad (1.8)$$

где  $\gamma_1(\theta, \theta_1)$  - коэффициент разложения первой гармоники (в общем случае импульса с провалом), характерного для перенапряженного режима (ПР),  $\theta$  - нижний угол отсечки косинусоиды,  $\theta_1$  - верхний угол отсечки (ширина провала).

Если в (1.6) подставить (1.8), (1.5), то получим запись уравнения стационарного режима в виде

$$S_1 k Z_k = 1, \quad S_1 Z_y = 1, \quad (1.9)$$

где  $Z_y$  - управляющее сопротивление АГ. Из (1.9) с учетом (1.5), (1.7) получаем

$$Z_y = k Z_k = -Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2 + Z_3). \quad (1.10)$$

Приближенно, согласно (1.1) и подставив (1.2) в (1.10), получим

$$Z_y = X_1 X_2 / (r + jX). \quad (1.11)$$

В случае безинерционного транзистора крутизна  $S_1$  вещественная, и поэтому из (1.9) следует, что  $Z_y$  - активное сопротивление:

$$Z_y = R_y, \quad S_1 R_y = 1, \quad R_y = k R_k, \quad (1.12)$$

а реактивное

$$X = X_1 + X_2 + X_3 = 0. \quad (1.13)$$

$$\text{Из (1.11) с учетом (1.13)} \quad R_y = X_1 X_2 / r. \quad (1.14)$$

Условие  $R_y > 0$  реализуется, если  $X_{1,2}$  - реактивные сопротивления одного знака, а (1.13) выполняется, если  $X_3$  - другого. Возможны два варианта схем:

- 1) Индуктивная трехточка (ИТ) (рис.1.1б) -  $X_{1,2} > 0, X_3 < 0$ ;
- 2) Емкостная трехточка (ЕТ) (рис.1.2в) -  $X_{1,2} < 0, X_3 > 0$ .

Уравнение (1.13) выполняется, если частота колебаний  $\omega$  равна собственной частоте контура

$$\omega = \omega_0. \quad (1.15)$$

Коэффициент обратной связи (1.5) с учетом (1.13) и (1.1) положительный  $k > 0$ :

$$k = X_2 / X_1; \text{ ИТ: } k = L_2 / L_1; \text{ ЕТ: } k = C_2 / C_1. \quad (1.16)$$

Резонансное сопротивление контура

$$R_k = X_1^2 / r = p^2 \rho \cdot Q = p^2 \rho^2 / r; \quad Q = Q_{\text{нен}} (1 - \eta_k); \quad R_k = R_{k, \text{нен}} (1 - \eta_k), \quad (1.17)$$

где  $\eta_k$  - КПД контура,  $p$  - коэффициент включения контура в коллекторную цепь

$$p = X_1 / \rho; \text{ ИТ: } p = L_1 / L_{\text{сум}}; \text{ ЕТ: } p = C_{\text{сум}} / C_1. \quad (1.18)$$

Режимы АГ, как и усилителя мощности различают по напряженности. В недонапряженном режиме (НР) и критическом (КР) форма импульса

коллекторного тока косинусоидальная, поэтому по заданным питающим напряжениям с помощью уравнения стационарного режима (1.12) можно рассчитать показатели режима: токи, напряжения, мощности, КПД.

В НР

$$S_1 = S \cdot \gamma_1(\theta). \quad (1.19)$$

Угол отсечки коллекторного тока  $\theta$  из (1.12)

$$\gamma_1(\theta) = 1/SR_y. \quad (1.20)$$

Напряжение возбуждения  $U_{\epsilon}$  зависит от выбора смещения  $E_{см}$ :

$$U_{\epsilon} = (E' - E_{см})/\cos \theta. \quad (1.21)$$

В КР, если АГ работает с внешним смещением

$$U_{к,кр} = [E_{нк} + S(E' - E_{см})/S_{кр}] / (1 + kS/S_{кр}), \quad (1.22)$$

$$U_{\epsilon,кр} = k \cdot U_{к,кр}. \quad (1.23)$$

Приблизительно, когда  $E_{нк} \gg S(E' - E_{см})/S_{кр}$ ;  $1 \gg k \cdot S/S_{кр}$  имеем

$$U_{к,кр} \approx E_{нк}; \quad U_{\epsilon,кр} \approx k \cdot E_{нк}. \quad (1.24)$$

АГ – автономная система, в которой колебания зарождаются с малых флуктуаций. Они увеличиваются до стационарного значения, если выполняется условие самовозбуждения, когда мощность, отдаваемая транзистором в контур, больше, чем требуется на покрытие его потерь:

$$0.5I_{к1}U_{к} > U_{к}^2 / 2R_{к}. \quad (1.25)$$

При малых флуктуациях  $I_{к1} = S_0U_{\epsilon}$ , где  $S_0$  – крутизна статической характеристики коллекторного тока в рабочей точке, определяемой выбором напряжения смещения. Преобразуем (1.25):

$$S_0U_{\epsilon} > U_{к} / R_{к}; \quad S_0k > 1/R_{к}; \quad S_0kR_{к} > 1; \quad S_0R_y > 1. \quad (1.26)$$

Биполярные транзисторы (БТ) имеют правые характеристики  $E' > 0$ , поэтому при  $u_{бэ} = 0$ ,  $i_{к} = S_0 = 0$  колебания не возбуждятся. Приходится подавать на базу начальное напряжение  $E_{н} > E'$  чтобы обеспечить  $S_0 > 0$ ,  $S_0R_y > 1$ .

Из условия (1.26) следует, что чем больше  $S_0R_y$  по сравнению с единицей, тем больше запас у АГ к началу возбуждения колебаний, тем надежнее работает АГ при внешних воздействиях, старении БТ и деталей схемы, замене деталей с учетом их технологического разброса и т.п. Рекомендуется выбирать

$$S_0R_y \geq 2. \quad (1.27)$$

Если принять кусочно-линейную аппроксимацию статических характеристик БТ, то  $S_0 = S$ , а из уравнения стационарного режима (1.20) в НР с учетом (1.27) получаются требования к углу отсечки  $\theta$ :

$$\gamma_1(\theta) = 1/SR_y \leq 1/2; \quad \theta \leq \pi/2. \quad (1.28)$$

Для удовлетворения противоречивых требований, а именно,  $E_n > E'$  при возбуждении колебаний и  $E_{cm} \leq E'$ ,  $\theta \leq \pi/2$  в стационарном режиме, наряду с внешним применяют автоматическое смещение, создаваемое постоянными составляющими токов базы и эмиттера.

В ПР можно удовлетворить оба условия, но такой режим не применяют из-за повышенной нестабильности частоты.

### 1.1. Схемы автогенераторов

Питающие напряжения на электроды БТ подают по тем же принципам, что и в усилителе мощности, применяя для этой цели блокировочные элементы.

По высокой частоте (вч) можно заземлять любой электрод БТ, при этом уравнение стационарного режима и показатели режима не меняются. Выбор заземленного электрода определяется конструктивными, технологическими и др. требованиями.

В стационарном режиме напряжение смещения на базе  $E_{cm}$  создается начальным  $E_n$  и падением напряжений от постоянных составляющих тока базы  $I_{b0}$  на сопротивлении  $R_b$  и тока эмиттера  $I_{e0}$  на  $R_e$ :

$$E_{cm} = E_n - I_{b0}R_b - I_{e0}R_e; \quad I_{e0} = I_{b0} + I_{k0}. \quad (1.29)$$

Для безинерционного БТ токи базы  $i_b$  и коллектора  $i_k$  связаны статическим коэффициентом усиления:

$$h_{21э} = i_k / i_b. \quad (1.30)$$

В НР и КР любые составляющие токов тоже связаны  $h_{21э}$ :

$$I_{k0}/I_{b0} = I_{k1}/I_{b1} = h_{21э}. \quad (1.31)$$

Известно, что в НР и КР

$$I_{k0,n} = S U_b \gamma_{0,n}(\theta) = \alpha_{0,n}(\theta) I_{km} = S(E' - E_{cm}) \beta_{0,n}(\theta), \quad (1.32)$$

$$g_1(\theta) = I_{k1}/I_{k0}.$$

Коэффициент разложения косинусоидального импульса приведены в приложении.

Напряжение смещения  $E_{cm}$

$$E_{cm} = E' - U_b \cos \theta. \quad (1.33)$$

Подставим (1.32), (1.33) с учетом (1.31) в (1.29), решим относительно напряжения возбуждения в стационарном режиме

$$U_b = (E_n - E') / \left[ S \gamma_0(\theta) \left[ R_e + (R_e + R_b) / h_{21э} \right] - \cos \theta \right]. \quad (1.34)$$

Амплитуду колебаний  $U_b$  в НР и КР можно менять путем вариаций  $E_n$ ,  $R_b$ ,  $R_e$ .

В КР, согласно (1.22) с учетом (1.33), (1.29), (1.31):



$$U_{\kappa, \kappa p} = E_{n\kappa} / \left[ 1 + k(1 - \cos \theta) S / S_{\kappa p} + k S R_{\gamma} \gamma_0(\theta) (1 + 1/h_{21\gamma}) \right]. \quad (1.35)$$

В ПР можно приближенно считать

$$U_{\kappa} \approx U_{\kappa, \kappa p} = U_{\nu, \kappa p} / k. \quad (1.36)$$

Блокировочные элементы считаются идеальными, если дроссели – короткое замыкание (кз) для постоянных и разрыв для вч токов, а конденсаторы – кз для вч и разрыв для постоянных токов.

Для расчета  $L$  и  $C$  по их реактивным сопротивлениям ( $X_L = \omega L$ ,  $X_C = 1/\omega C$  в [Ом]) и длине волны  $\lambda$  в [м] можно применить выражения:

$$L = 0.53 \lambda X_L \cdot 10^{-3} [\text{мкГн}]; \quad C = 530 \lambda / X_C [\text{пФ}]. \quad (1.37)$$

### Примеры решения типовых задач

**1.1.** Какой электрод заземлен по вч в АГ по схеме рис.5.2 и рис.5.3?

**Решение**

По вч заземлен эмиттер.

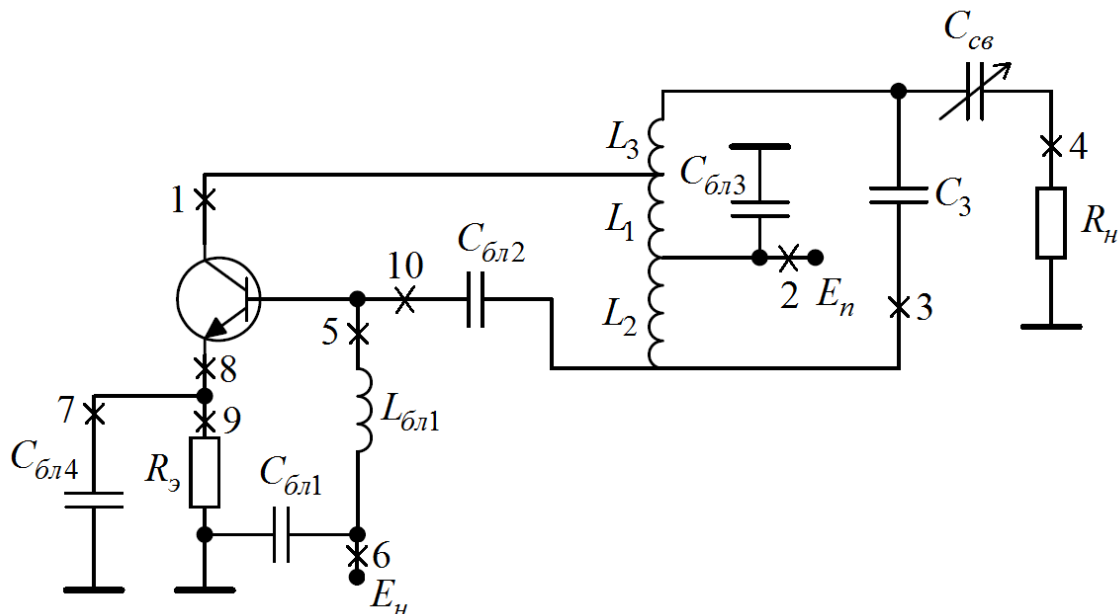


Рис.1.2. Схема индуктивной трехточки

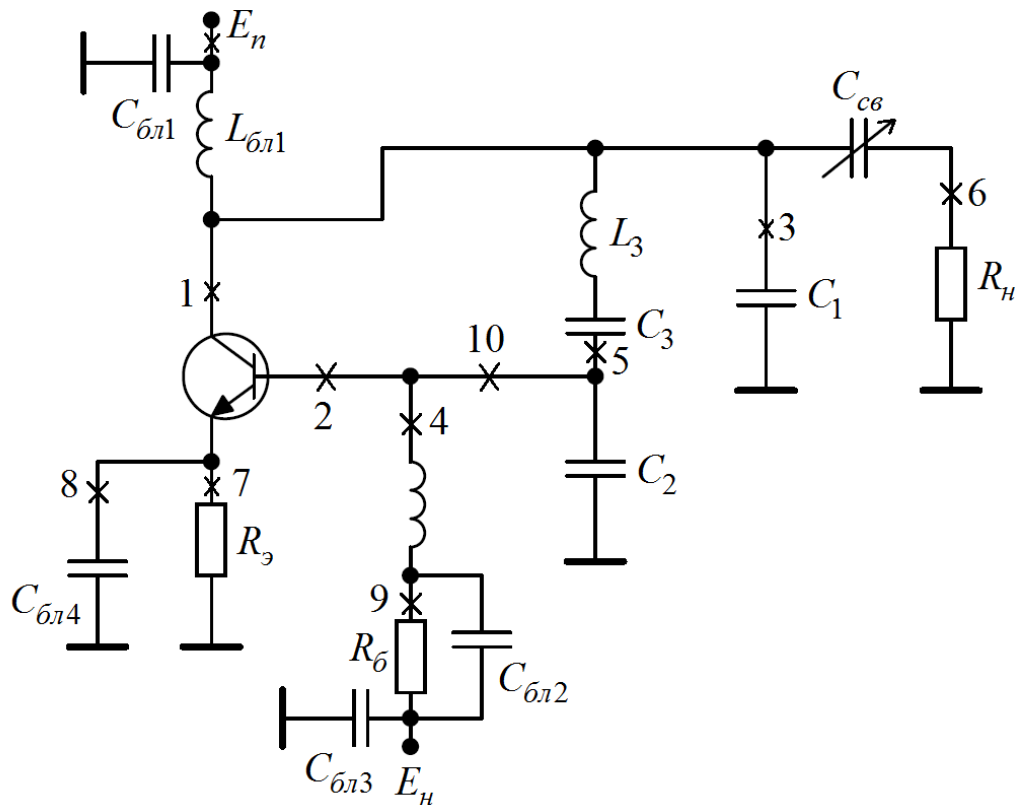


Рис.1.3. Схема емкостной трехточки

**1.2.** В каких проводах, отмеченных на рис.1.2 цифрами, протекают токи, зависимости которых во времени соответствуют рис.1.4а,б,в,г? На каких элементах схемы лежат напряжения, аналогичные изображенным на рис.1.5а,б,в? Блокировочные элементы считать идеальными.

**Решение**

Рис.1.4: а) 1,8; б) 2,5,6,9; в) 3,4; г) 7,10.

Рис.1.5: а)  $C_{бл1}, C_{бл2}, C_{бл3}, C_{бл4}, R_г$ ; б)  $C_{св}, R_н$ ; в)  $L_{1,2,3}, C_3, L_{бл1}$ .

**1.3.** В каких проводах, отмеченных на рис.1.2 цифрами, протекают токи, зависимости которых во времени соответствуют рис.1.4а,б,в,г? На каких элементах схемы лежат напряжения, аналогичные изображенным на рис.1.5а,б,в? Блокировочные элементы считать идеальными.

**Решение**

Рис.1.4: а) 1,2; б) 3,4,7,9,11; в) 5,6; г) 8,10.

Рис.1.5: а)  $C_{бл1}, C_{бл2}, C_{бл3}, C_{бл4}, R_г, R_к$ ; б)  $C_{1,2,3}, C_{св}, R_н$ ; в)  $L_3, L_{бл1}, L_{бл2}$ .

**1.4.** Для АГ по схеме рис.1.6 дано  $L_1 = 0.53 \text{ мкГн}$ ,  $L_2 = 0.106 \text{ мкГн}$ ,  $C_3 = 1060 \text{ пФ}$ ,  $Q = 50$ ,  $f_0 = 3 \text{ МГц}$ . Определить  $k, p, R_к, R_у$ . Какой электрод БТ заземлен по вч?

**Решение**

Схема ИТ. Согласно (1.16)  $k = L_2/L_1 = 0.2$ . Для нахождения  $p$  и  $R_к$  (1.17) рассчитаем

$$\rho = \omega_0 L_{\text{сум}} = 1/\omega_0 C_{\text{сум}} = \sqrt{L_{\text{сум}}/C_{\text{сум}}} = 50 \text{ Ом}.$$

(1.38)

Здесь  $C_{\text{сум}} = C_3$ ,  $L_{\text{сум}} = 2,65 \text{ мкГн}$ . Далее находим  $p = L_1/L_{\text{сум}} = 0.2$ ,  $R_K = p^2 \rho Q = 100 \text{ Ом}$ . Согласно (1.12)  $R_y = k R_K = 20 \text{ Ом}$ .

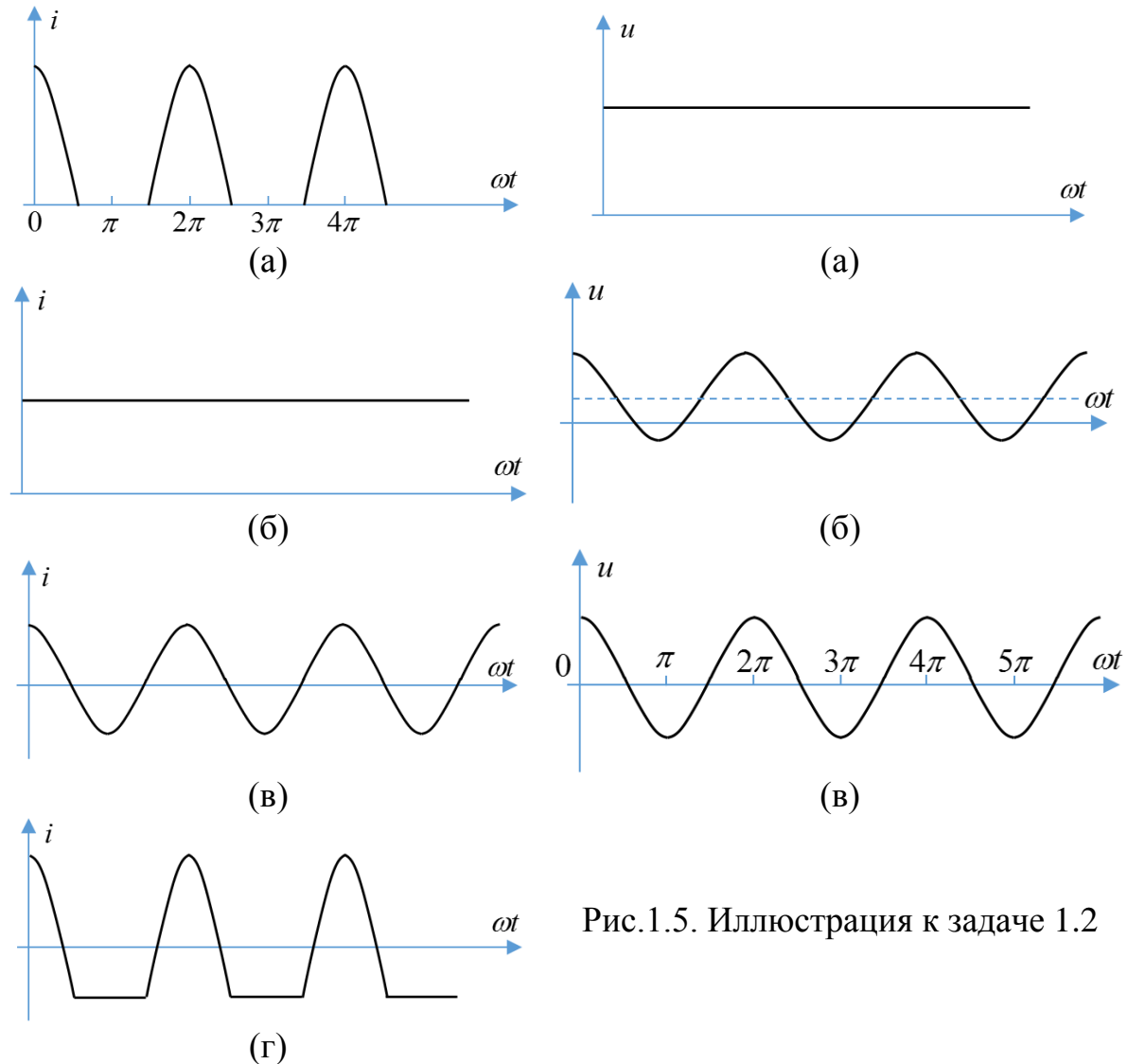


Рис.1.4. Иллюстрация к задаче 1.2

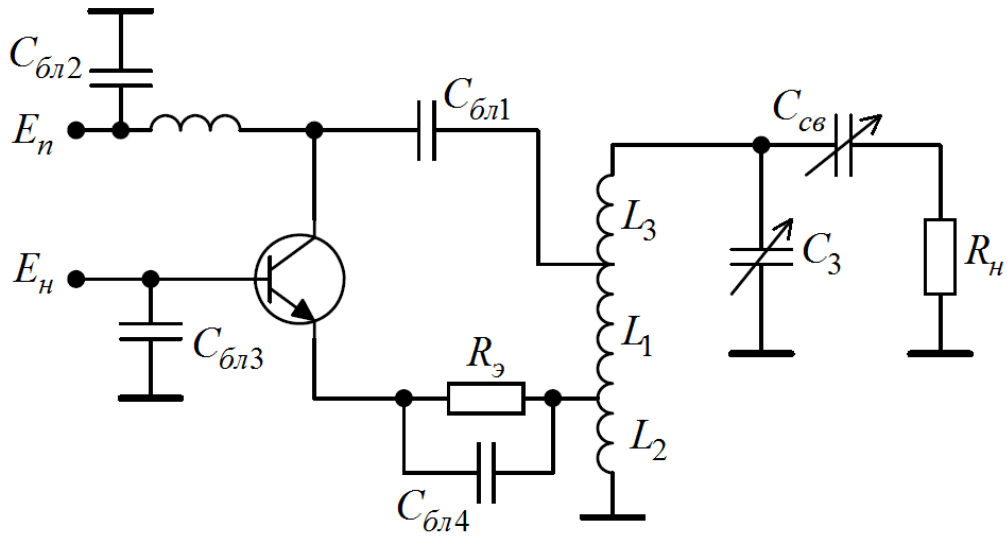
Рис.1.5. Иллюстрация к задаче 1.2

**1.5.** Как изменятся  $k, p, R_K, R_y$ , если в условиях задачи 1.3 при  $L_1 + L_3, L_2, C_3, Q = \text{const}$  индуктивность  $L_1$  в 2 раза уменьшить? увеличить?

**Решение**

По условиям задачи  $L_{\text{сум}} = L_1 + L_2 + L_3 = \text{const}; C_3 = \text{const}$ , поэтому  $f_0, \rho = \text{const}$ .

1.  $L_1 = 0.265 \text{ мкГн}$ ; из (1.16)  $k = 0.4$ ; из (1.18)  $p = L_1 / L_{\text{сум}} = 0.1$ ; из (1.17)  $R_k = p^2 \rho Q = 25 \text{ Ом}$ ;  $R_y = k R_k = 10 \text{ Ом}$ .
2.  $L_1 = 1.06 \text{ мкГн}$ ;  $k = 0.1$ ;  $p = 0.4$ ;  $R_k = 400 \text{ Ом}$ ;  $R_y = 40 \text{ Ом}$ .



3.

4. Рис.1.6. Схема индуктивной трехточки

**1.6.** Для АГ по схеме рис.1.7 дано:  $C_1 = 530 \text{ нФ}$ ,  $C_2 = 10600 \text{ нФ}$ ,  $C_3 = 560 \text{ нФ}$ ,  $L_3 = 0.424 \text{ мкГн}$ ,  $Q = 50$ . Рассчитать  $f_0, k, p, R_k, R_y$ . Какой электрод заземлен по вч?

**Решение**

Схема ЕТ. В этой схеме  $L_{\text{сум}} = L_3$ , а  $C_{\text{сум}}$  (1.4) для удобства расчета преобразуем к виду (при учете (1.16)):

$$C_{\text{сум}} = C_1 / (1 + k + C_1 / C_3).$$

(1.39)

Собственная частота контура  $f_0$  (1.3)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 + k + C_1 / C_3}{C_1 L_3}}.$$

(1.40)

Характеристическое сопротивление  $\rho$  (1.38)

$$\rho = \sqrt{L_3 (1 + k + C_1 / C_3) / C_1}.$$

(1.41)

Согласно (1.16)  $k = C_1 / C_2 = 0.05$ ,  $C_1 / C_3 = 0.9464$ ; из (1.40)  $f_0 = 15 \text{ МГц}$ ; для расчета  $R_k$  определяем коэффициент включения  $p$  (1.18), применив (1.39):

$$p = C_{\text{сум}} / C_1 = 1 / (1 + k + C_1 / C_3).$$

(1.42)

Находим  $p = 0.5$ ,  $\rho = 400\text{Ом}$ ,  $R_k = p^2 \rho Q = 500\text{Ом}$ ,  $R_y = k R_k = 250\text{Ом}$ .

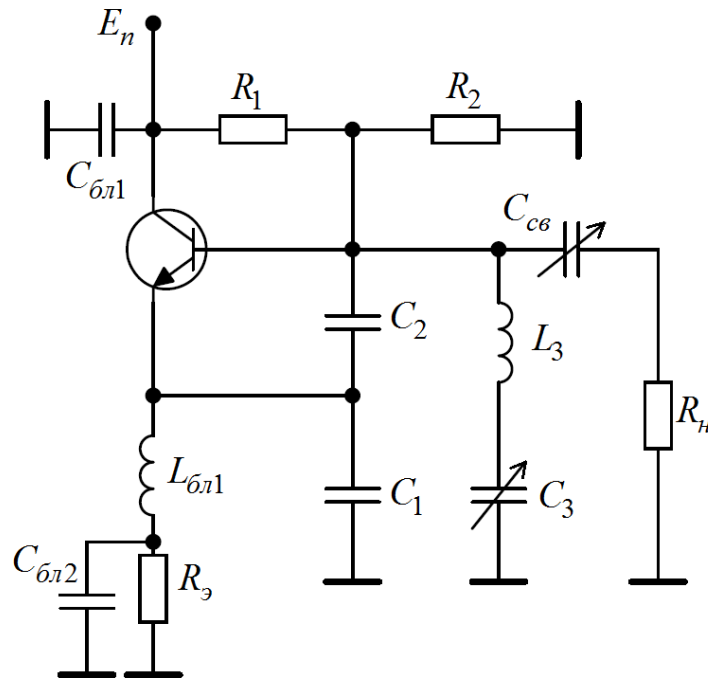


Рис.1.7. Схема емкостной трехточки

### Задачи для самостоятельного решения

- 1.7. Как изменятся  $f_0, k, p, R_k, R_y$ , если в условиях задачи 1.4 при  $L_1, L_2, L_3, Q = \text{const}$  емкость  $C_3$  в 4 раза уменьшить? увеличить?
- 1.8. Как изменятся  $f_0, k, p, R_k, R_y$ , если в условиях задачи 1.4 при  $L_1, L_2, C_3, Q = \text{const}$  индуктивность  $L_3$  в 2 раза уменьшить? увеличить?
- 1.9. Как изменятся  $f_0, k, p, R_k, R_y$ , если в условиях задачи 1.4 при  $L_1 + L_2, L_3, C_3, Q = \text{const}$  индуктивность  $L_2$  в 2 раза уменьшить? увеличить?
- 1.10. Как изменятся  $f_0, k, p, R_k, R_y$ , если в условиях задачи 1.6 при  $C_1, C_2, C_3, Q = \text{const}$  индуктивность  $L_3$  в 4 раза уменьшить? увеличить?
- 1.11. Как изменятся  $f_0, k, p, R_k, R_y$ , если в условиях задачи 1.6 при  $C_1, C_2, L_3, Q = \text{const}$  емкость  $C_3$  в 4 раза уменьшить? увеличить?
- 1.12. Как изменятся  $f_0, k, p, R_k, R_y$ , если в условиях задачи 1.6 при  $C_2, C_3, L_3, Q = \text{const}$  емкость  $C_1$  в 2 раза уменьшить? увеличить?
- 1.13. Как изменятся  $f_0, k, p, R_k, R_y$ , если в условиях задачи 1.6 при  $C_1, C_3, L_3, Q = \text{const}$  емкость  $C_2$  в 2 раза уменьшить? увеличить?

**1.14.** В АГ по схеме 1.2:  $X_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $\rho = 50 \text{ Ом}$ ,  $f_0 = 3 \text{ МГц}$ . Определить  $k, R_k, R_y$ . Как изменятся  $k, R_k, R_y, f_0$  при кз  $L_{бл1}$ ?  $C_{бл1}$ ?  $C_{бл3}$ ?  $C_{бл4}$ ?

**1.15.** В АГ по схеме 1.3:  $X_1 = -20 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = -5 \text{ Ом}$ ,  $\rho = 80 \text{ Ом}$ ,  $Q = 40$ ,  $f_0 = 6 \text{ МГц}$ . Определить  $k, R_k, R_y$ . Как изменятся  $k, R_k, R_y, f_0$  при кз  $L_{бл1}$ ?  $L_{бл2}$ ?  $C_{бл1}$ ?  $C_{бл2}$ ?  $C_{бл3}$ ?  $C_{бл4}$ ?

## 1.2. Режимы автогенераторов

Напряжённость режима БТ зависит от того, какие участки статических характеристик коллекторного тока захватываются за период колебаний при изменении напряжений на базе  $u_{бэ}$  и коллекторе  $u_{кэ}$

$$u_{бэ} = E_c + U_\epsilon \cos \omega t; u_{кэ} = E_k - U_k \cos \omega t.$$

В случае применения сопротивления автосмещения в цепи эмиттера  $R_\epsilon$  напряжение  $E_k < E_n$

$$E_k = E_n - I_{\epsilon 0} R_\epsilon. \quad (1.43)$$

Мощность источника в цепи коллектора

$$P_{ист} = I_{к0} E_n, \quad (1.44)$$

а потребляемая цепью коллектора

$$P_0 = I_{к0} E_k. \quad (1.45)$$

Часть мощности источника  $E_n$  рассеивается на сопротивлении  $R_\epsilon$ .

КПД цепи коллектора меньше  $\eta_\epsilon$ :

$$\eta = P_1 / P_{ист}; \eta_\epsilon = P_1 / P_0 = 0.5 g_1 \xi; \xi = U_k / E_k. \quad (1.46)$$

Мощность источника начального смещения

$$P_{нач} = I_{б0} E_n. \quad (1.47)$$

Падение напряжения на резисторе  $R_\epsilon$

$$E_\epsilon = (I_{б0} + I_{к0}) R_\epsilon. \quad (1.48)$$

Мощность, рассеиваемая резистором  $R_\epsilon$ :

$$P_\epsilon = (I_{б0} + I_{к0})^2 R_\epsilon. \quad (1.49)$$

Мощность, рассеиваемая коллектором и базой:

$$P_{рас} = P_0 - P_1 = P_0 (1 - \eta_\epsilon); \quad (1.50)$$

$$P_{рас,б} = P_{б0} + P_{б1} = I_{б0} E_c + 0.5 I_{б1} U_\epsilon. \quad (1.51)$$

При решении вопроса о напряженности режима АГ рекомендуется сравнивать с КР:

$$R_k < R_{ккр}; R_y < R_{ykk}; U_\epsilon < U_{\epsilon кр}; E_n < E_{нкр}, E_n > E_{нкр} - \text{НР};$$

$$R_k > R_{ккр}; R_y > R_{ykk}; U_\epsilon > U_{\epsilon кр}; E_n > E_{нкр}; E_n < E_{нкр} - \text{ПР}.$$

## Примеры решения типовых задач

**1.16.** АГ по схеме рис.1.2 работает в НР:  $X_1 = 10 \text{ Ом}; X_2 = 2 \text{ Ом}; \rho = 50 \text{ Ом}; Q = 50; P_1 = 20 \text{ мВт}; S = 0.2 \text{ А/В}$ . Рассчитать  $U_\epsilon, I_{\kappa 0}$ .

**Решение**

Применим (1.16), (1.17), (1.18) и (1.12):

$$k = X_2 / X_1 = 2 / 10 = 0.2; P = X_1 / \rho = 10 / 50 = 0.2;$$

$$R_\kappa = p^2 \rho Q = 0.04 \cdot 50 \cdot 50 = 100 \text{ Ом}; R_y = k R_\kappa = 0.2 \cdot 100 = 2 \text{ Ом}.$$

Угол отсечки  $\theta$  находим из уравнения стационарного режима (1.20):

$$\gamma_1(\theta) = 1 / S R_y = 1 / 0.2 \cdot 20 = 0.25; \text{ по таблице приложения}$$

$$\theta \approx 66^\circ; g_1 = 1.75; \gamma_0 = 0.142. \text{ Напряжение на контуре}$$

$$U_\kappa = \sqrt{2 P_1 P_\kappa} = \sqrt{2 \cdot 0.02 \cdot 100} = 2 \text{ В}; U_\epsilon = k U_\kappa = 0.2 \cdot 2 = 0.4 \text{ В}; \text{ Ток (1.32)}$$

$$I_{\kappa 0} = S U_\epsilon \gamma_0(\theta) = 0.2 \cdot 0.4 \cdot 0.142 = 11.5 \text{ мА}.$$

**1.17.** АГ по схеме рис.1.7 работает в КР:  $C_1 = 2.12 \text{ нФ}; C_2 = 16.96 \text{ нФ};$

$$L_3 = 0.848 \text{ мкГн}; Q = 20; \lambda = 40 \text{ м}; P_1 = 4 \text{ Вт}; E_\kappa = 20 \text{ В}; S = 0.8 \text{ А/В}.$$

Рассчитать  $P_0$  и  $\eta_s$ . Как изменятся  $\theta, \lambda$ , если  $L_3$  уменьшить в 2 раза? В 3 раза?

**Решение**

Для расчета  $\theta$  (1.20) следует сначала определить  $R_y$  (1.12), а поэтому

$$k \text{ (1.16) и } R_\kappa \text{ (1.17):}$$

$$k = C_1 / C_2 = 2.12 / 16.96 = 0.125; R_\kappa = p^2 \rho Q, \text{ где}$$

$$\rho = \omega L_3 = \frac{0.848 \cdot 10^3}{0.53 \cdot 40} = 40 \text{ Ом}; X_1 = \frac{530 \cdot 40}{2120} = 10 \text{ Ом}; p = 10 / 40 = 0.25;$$

$$R_\kappa = 0.0625 \cdot 40 \cdot 20 = 50 \text{ Ом}; R_y = 0.125 \cdot 50 = 6.25 \text{ Ом};$$

$$\gamma_1(\theta) = 1 / 0.8 \cdot 6.25 = 0.2; \theta \approx 60^\circ.$$

Мощность  $P_0 = I_{\kappa 0} E_\kappa$  (1.16);  $I_{\kappa 0} = I_{\kappa 1} / g_1(\theta)$  (1.32);

$$I_{\kappa 1} = \sqrt{2 P_1 / P_\kappa} = \sqrt{2 \cdot 4 / 50} = 0.4 \text{ А};$$

$$g_1(60^\circ) = 1.8; I_{\kappa 0} = 0.4 / 1.8 = 0.222 \text{ А}; P_0 = 0.222 \cdot 20 = 5.55 \text{ Вт};$$

$$\eta_s = P_1 / P_0 \text{ (1.46); } \eta_s = 4 / 5.55 = 0.72. \text{ Если } L_3 \text{ уменьшается в 2 раза:}$$

$$k, p = \text{const}; \lambda, \rho \text{ уменьшаются в } \sqrt{2} \text{ раз, поэтому } R_\kappa, R_y \text{ уменьшаются в}$$

$$\sqrt{2} \text{ раз, } \gamma_1(\theta) \text{ увеличивается в } \sqrt{2} \text{ раз, } \gamma_1(\theta) = 0.2828, \text{ при этом } \theta \approx 70^\circ.$$

Расчет справедлив, так как  $R_y < R_{y \text{ кр}}$ . Если  $L_3$  уменьшается в 3 раза, то

$$\lambda \approx 23 \text{ м}; \theta \approx 76^\circ.$$

**1.18.** В АГ по схеме рис.1.6 меняется емкость  $C_3$  (рис.1.8) при  $L_1, L_2, L_3, Q = \text{const}$ . В каком диапазоне частот выполняются условия самовозбуждения, если  $S = 0.1 \text{ А/В}$ , при каких значениях  $C_3$ ? Почему характер зависимостей  $f(C_3)$  и  $R_y(C_3)$  одинаковый?

**Решение**

Колебания возбуждятся, если выполняется (1.26):  $R_y > 1/0.1$ ;  $R_y > 10$  Ом. Граничное значение  $R_{y\text{ } \text{зр}} = R_{y\text{ } \text{min}} = 10$  Ом. На этом уровне проведена горизонтальная прямая (пунктир на рис.1.8),  $C_{3\text{ } \text{зр}} = 1.1$  нФ;  $f_{\text{зр}} = 3.5$  МГц. Колебания возможны, если  $C_3 < 1.1$  нФ;  $f > 3.5$  МГц. Частота  $f = f_0 = 1 / 2\pi\sqrt{L_\Sigma C_3}$ ;  $k, p = \text{const}$ ;  $\rho = \sqrt{L_\Sigma / C_3}$ , поэтому  $R_y = kp^2 \rho Q \sim \rho$ . Таким образом,  $f \sim 1 / \sqrt{C_3}$ ,  $R_y \sim 1 / \sqrt{C_3}$ .

**1.19.** АГ по схеме рис.1.2 работает в КР:  $\theta = 60^\circ$ ;  $P_1 = 80$  мВт;  $k = 0.2$ ;  $L_\Sigma = 1.06$  мкГн;  $Q = 50$ ;  $\lambda = 40$  м;  $S = 0.25$  А/В. Рассчитать  $L_1, L_2, L_3, C_3, U_\epsilon$ .

### Решение

Из уравнения (1.20) находим

$R_y = 1 / S\gamma_1(\theta)$ ;  $\gamma_1(60^\circ) \approx 0.2$ ;  $R_y = 1 / 0.25 \cdot 0.2 = 20$  Ом. Сопротивление контура  $R_\kappa = R_y / \kappa = 20 / 0.2 = 100$  Ом. Характеристическое

сопротивление (1.38) с учетом (1.37)  $\rho = \frac{L_\Sigma \cdot 10^3}{0.53\lambda} = \frac{1.06 \cdot 10^3}{0.53 \cdot 40} = 50$  Ом.

Коэффициент включения из (1.17)  $p = \sqrt{R_\kappa / \rho Q} = \sqrt{100 / 50 \cdot 50} = 0.2$ .

Зная  $p$  и  $\rho$ , применим (1.17) и определим  $X_1$ , а затем  $L_1$ :

$X_1 = p\rho = 0.2 \cdot 100 = 20$  Ом;  $L_1 = 0.53 \cdot 40 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0.212$  мкГн.

Индуктивность  $L_2$  из (1.16):

$L_2 = kL_1 = 0.2 \cdot 0.212 = 0.0424$  мкГн;  $L_3 = L_\Sigma - L_1 - L_2 = 1.06 - 0.212(1 + 0.2) = 0.8056$  мкГн. Из (1.37) емкость  $C_3 = 530\lambda / \rho = 530 \cdot 40 / 50 = 424$  пФ.

Напряжения на контуре  $U_\kappa$  и возбуждения  $U_\epsilon$ :

$U_\kappa = \sqrt{2P_1 P_\kappa} = \sqrt{2 \cdot 0.08 \cdot 100} = 4$  В.

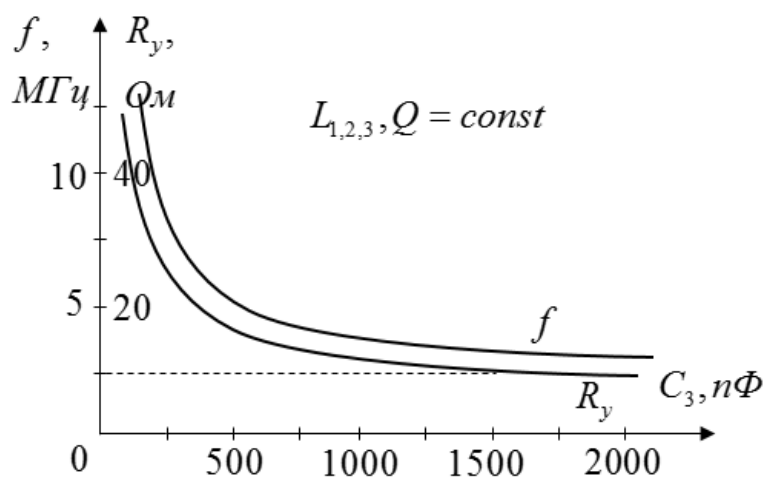


Рис.1.8. Иллюстрация к задаче 1.18



### Задачи для самостоятельного решения

- 1.20.** АГ по схеме рис.1.7 работает в НР:  $I_{\kappa 0} = 5.5$  мА;  $C_1 = 2650$  пФ;  $C_2 = 13250$  пФ;  $L_3 = 5.3$  мкГн;  $\lambda = 100$  м;  $Q = 50$ ;  $S = 0.125$  А/В;  $E_n = 6$  В. Рассчитать  $U_\epsilon, P_{уст}, \eta$ .
- 1.21.** АГ по схеме рис.1.3. работает в НР:  $\theta = 60^\circ$ ;  $P_1 = 16$  мВт;  $U_\kappa = 4$  В;  $S = 0.125$  А/В;  $E_n = 6$  В. Рассчитать  $k, R_\kappa, \eta$ .
- 1.22.** АГ по схеме рис.1.6 работает в КР:  $U_\epsilon = 0.4$  В;  $L_1 = 0.53$  мкГн;  $C_3 = 1060$  пФ;  $k = 0.2$ ;  $Q = 50$ ;  $\lambda = 100$  м;  $S = 0.25$  А/В. Рассчитать  $P_1$  и емкость  $C_{\bar{o}l1}$ . Как изменятся напряженность режима АГ и  $\lambda$ , если емкость  $C_3$  уменьшить в 4 раза?
- 1.23.** АГ по схеме рис.1.6 работает в НР:  $I_{\kappa 0} = 5.5$  мА;  $L_1 = 0.265$  мкГн;  $C_3 = 530$  пФ;  $k = 0.5$ ;  $Q = 50$ ;  $\lambda = 50$  м;  $S = 0.1$  А/В. Рассчитать  $P_1$  и  $L_3$ .
- 1.24.** АГ по схеме рис.1.7 работает в КР:  $U_\kappa = 2$  В;  $\theta = 60^\circ$ ;  $S = 0.2$  А/В;  $C_1 = 530$  пФ;  $k = 0.1$ ;  $\lambda = 100$  м. Рассчитать  $P_1$  и  $L_{\bar{o}l1}$ .
- 1.25.** АГ по схеме рис.1.3 работает в НР:  $C_1 = 530$  пФ;  $k = 0.1$ ;  $\theta = 60^\circ$ ;  $P_1 = 2$  Вт;  $\lambda = 100$  м;  $S = 0.5$  А/В. Рассчитать  $I_{\kappa 1}, C_2, L_{\bar{o}l2}$ .
- 1.26.** АГ по схеме рис.1.3 работает в КР:  $U_\epsilon = 0.4$  В;  $\theta = 60^\circ$ ;  $k = 0.1$ ;  $E_\kappa = 5$  В;  $\lambda = 20$  м;  $S = 0.2$  А/В. Рассчитать  $\eta$  и  $C_{\bar{o}l1}$ . Как изменится  $\theta$ , если  $S$  уменьшится до 0.08 А/В? 0.04 А/В?
- 1.27.** АГ по схеме рис.1.2 работает в НР:  $P_1 = 20$  мВт;  $L_1 = 0.53$  мкГн;  $L_3 = 2.014$  мкГн;  $C_3 = 1.06$  пФ;  $Q = 50$ ;  $\lambda = 100$  м;  $S = 0.25$  А/В. Определить  $U_\epsilon, U_\kappa, I_{\kappa 0}$ . Как изменится  $U_\epsilon$  при КЗ  $L_{\bar{o}l1}$ ?  $L_{\bar{o}l2}$ ?
- 1.28.** АГ по схеме рис.1.3 работает в НР:  $C_1 = 530$  пФ;  $C_2 = 10$  пФ;  $C_3 = 560$  пФ;  $L_3 = 0.424$  мкГн;  $Q = 50$ ;  $S = 0.2$  А/В. Рассчитать  $f$  и  $\theta$ . Как изменятся  $f$  и  $\theta$ , если  $L_3$  уменьшить в 4 раза? Если произойдет КЗ  $L_{\bar{o}l2}$ ?
- 1.29.** АГ по схеме рис.1.3 работает в НР:  $P_1 = 8$  мВт;  $C_1 = 530$  пФ;  $C_2 = 10.6$  пФ;  $L_3 = 0.53$  мкГн;  $Q = 50$ ;  $\lambda = 20$  м;  $S = 0.25$  А/В. Рассчитать  $I_{\kappa 0}$ . Как изменится  $P_1$  при КЗ  $L_{\bar{o}l1}$ ?  $C_{\bar{o}l1}$ ?  $C_{\bar{o}l3}$ ?
- 1.30.** АГ по схеме рис.1.7 работает в НР:  $C_1 = 1.06$  пФ;  $C_2 = 10.6$  нФ;  $L_3 = 1.06$  мкГн;  $Q = 50$ ;  $\lambda = 40$  м;  $S = 0.125$  А/В. Рассчитать  $\theta$ . Как изменится  $\theta, \lambda$ , если  $L_3$  уменьшить в 2 раза? Произойдет КЗ  $C_{\bar{o}l3}$ ?
- 1.31.** АГ работает в КР по схеме рис.1.6:  $P_1 = 2$  Вт;  $\theta = 60^\circ$ ;  $L_1 = 5.3$  мкГн;  $L_2 = 0.53$  мкГн;  $\lambda = 100$  м;  $S = 0.5$  А/В. Рассчитать  $I_{\kappa 1}, L_{\bar{o}l1}$ . Как изменятся  $\lambda, \theta$ , если  $C_3$  увеличить в 2 раза? В 4 раза?

**1.32.** По графикам рис.1.8 определить емкость  $C_3$ , при которой можно реализовать работу АГ в НР с  $\theta = 90^\circ, 80^\circ, 60^\circ$ , если  $S = 0.2$  А/В. Чему равна частота колебаний в каждом из этих режимов?

**1.33.** В АГ по схеме рис.1.6 меняется индуктивность  $L_1$  так, что  $L_1 + L_2 = 0.6$  мкГн = const;  $L_3 = 1$  мкГн;  $f = 5$  МГц;  $Q = 25$ ;  $\eta_k = 0.75$ ;  $S = 0.04$  А/В. По графикам  $k, R_y(L_1)$  (рис.1.9,а) определить интервал значений  $L_1$ , где выполняются условия самовозбуждения. Как меняются  $k$  и  $\theta$ ? Как изменится  $\theta_{\min}$ , если, уменьшив  $C_{св}$  при  $f = \text{const}$ , сделать  $\eta_k = 0.5$  В?

**1.34.** В АГ по схеме рис.1.6 меняется индуктивность  $L_2$  так, что  $L_1 + L_2 = 0.6$  мкГн = const;  $L_3 = 1$  мкГн;  $Q = 25$ ;  $S = 0.04$  А/В;  $\eta_s = 0.75$ . По графикам  $k, R_y(L_2)$  (рис.1.9,б) определить интервал значений  $L_2, k, \theta$ , где выполняются условия самовозбуждения. Как изменится  $\theta_{\min}$ , если  $\eta_k$  увеличить до 0.8?

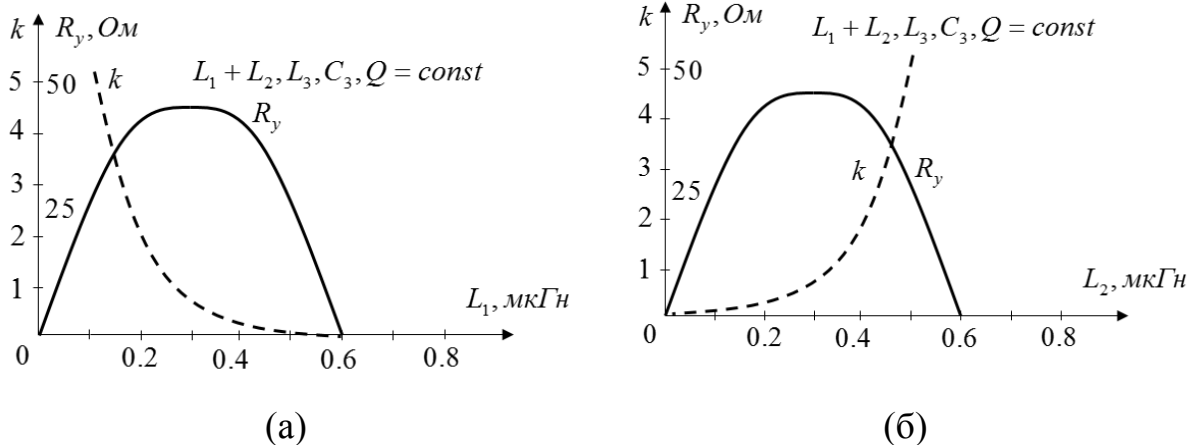


Рис.1.9. Иллюстрации к задачам 1.33, 1.34

**1.35.** По условиям задачи 1.33 рассчитать  $U_\theta, U_k, I_{k1}$  в моменты возбуждения и срыва колебаний, если  $E_n = 1$  В;  $E' = 0.3$  В;  $R_s = 100$  Ом;  $h_{21s} \gg 1$ , а также при  $R_y = R_{y \max}$ .

**1.36.** В АГ по схеме рис.1.7 меняется индуктивность  $L_3$ ;  $C_1, C_2, C_3, Q = \text{const}$ . По графикам  $f, R_y(L_3)$  (рис.1.10) определить интервал значений  $L_3, f$ , где выполняются условия самовозбуждения, если  $S = 0.05$  А/В.

**1.37.** В АГ по схеме рис.1.7 меняется емкость  $C_1$  при  $C_2, C_3, L_3, Q = \text{const}$ ,  $S = 0.05$  А/В. По графикам  $f, R_y(C_1)$  (рис.1.11) определить, в каком интервале значений  $C_1$  выполняется условие самовозбуждения, в каких пределах меняются  $f, k, R_k$ , если  $C_2 = 2$  нФ.

**1.38.** В АГ по схеме рис.1.7 меняется емкость  $C_3$  при  $C_1, C_2, L_3, Q = \text{const}$ ;  $S = 0.05 \text{ A/B}$ . По графикам  $f, R_y(C_3)$  (рис.1.12) определить, при каких значениях  $C_3$  выполняются условия самовозбуждения, как меняются  $f, Q$ ?

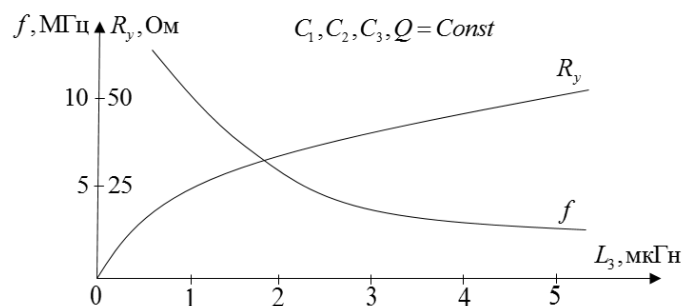


Рис.1.10. Иллюстрация к задаче 1.36

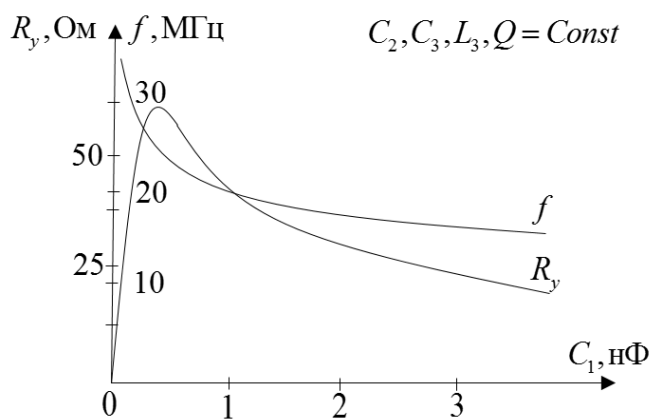


Рис.1.11. Иллюстрация к задаче 1.37

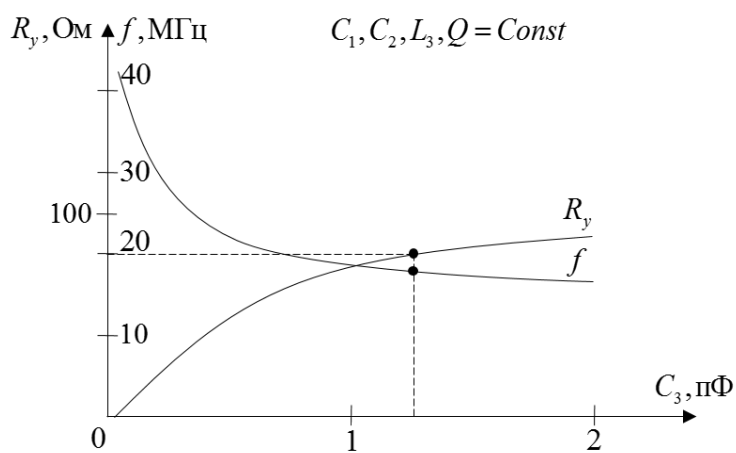


Рис.1.12. Иллюстрация к задаче 1.38

### 1.3. Диаграммы срыва и смещения

Диаграмма срыва – зависимость напряжения возбуждения  $U_\epsilon$  от смещения в установившемся режиме при  $E_\kappa, SR_y = const$ . Для расчета в НР справедливо (1.21)

$$U_\epsilon = (E' - E_c) / \cos \theta$$

– прямая с началом при  $E_c = E'$ , наклон которой определяется  $\theta$  или  $SR_y$  (1.20).

Линия критического режима (ЛКР) имеет отрицательный наклон (1.22) и проходит на уровне, который в основном определяется  $E_\kappa$  и  $k$ .

В ПР импульс коллекторного тока разрушается быстрее, чем в усилителе, потому что одновременно меняются  $U_\epsilon, U_\kappa$  ( $U_\epsilon = kU_\kappa$ ). Расчет  $I_{\kappa 1}$  в ПР можно выполнить, как в усилителе. Зависимость  $I_{\kappa 1}(U_\epsilon)$  или  $I_{\kappa 1}(U_\kappa)$  при фиксированных  $E_c, E_\kappa, k$  называют колебательной характеристикой (рис.1.13).

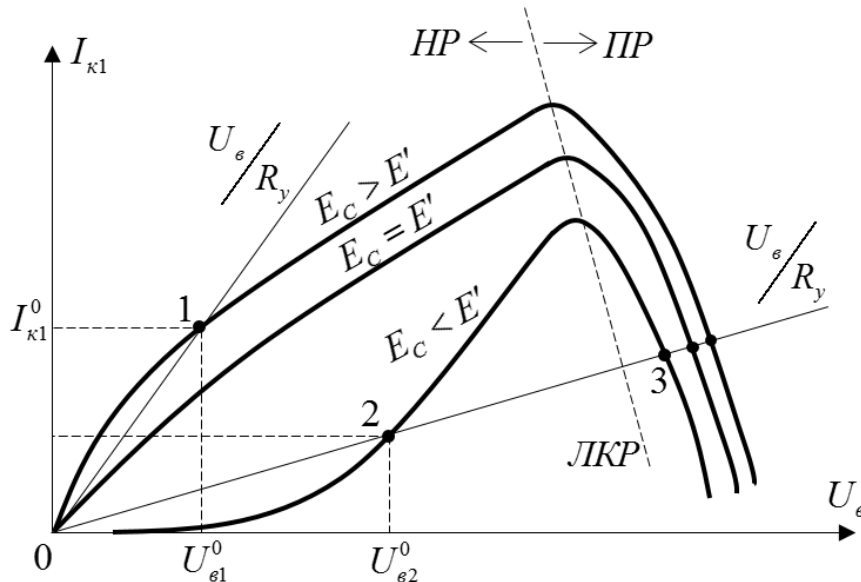


Рис.1.13. Колебательная характеристика транзисторного АГ

Уравнение стационарного режима (1.12) можно преобразовать:

$$S_1 = 1 / R_y \rightarrow S_1 U_\epsilon = U_\epsilon / R_y \rightarrow I_{\kappa 1}(U_\epsilon) = U_\epsilon / R_y. \quad (1.52)$$

Правую часть уравнений (1.53) называют прямой обратной связи.

Точки пересечения прямой обратной связи с колебательной характеристикой определяют значения тока  $I_{\kappa 1}^0$  и напряжения  $U_\epsilon^0$  в стационарном режиме. Для  $E_c < E'$  (рис.1.13) – две точки пересечения.

Уравнение (1.53) означает, что в стационарном режиме мощность, отдаваемая БТ в контур, равна мощности потерь в нем. Если  $I_{\kappa 1}(U_\epsilon) < U_\epsilon / R_y$ , БТ отдает больше, чем идет на покрытие потерь в

контуре, амплитуда колебаний  $U_\epsilon$  будет возрастать, если  $I_{\kappa 1}(U_\epsilon) < U_\epsilon / R_y$ , наоборот – падать.

Выясним вопрос устойчивости стационарного режима. Рассмотрим т.1 (рис.1.13): при увеличении  $U_\epsilon = U_\epsilon^0 + \Delta U_\epsilon$  ток  $I_{\kappa 1}(U_\epsilon) < U_\epsilon / R_y$ , напряжение  $U_\epsilon$  уменьшается, возвращая режим АГ в т.1, при уменьшении  $U_\epsilon = U_\epsilon^0 - \Delta U_\epsilon$ ,  $I_{\kappa 1}(U_\epsilon) > U_\epsilon / R_y$ ,  $U_\epsilon$  возрастает и снова восстанавливается режим в т.1. Стационарный режим АГ при  $E_c < E'$  устойчивый.

Аналогичные рассуждения для режима в т.2 ( $E_c < E'$ ) показывают, что он неустойчивый, а в т.3 – устойчивый, но при небольших  $\Delta U_\epsilon$ .

В т.0  $U_\epsilon = 0$  (точка покоя, нет колебаний) для  $E_c > E'$  режим неустойчивый, для  $E_c < E'$  – устойчивый.

Условие устойчивости стационарного режима можно записать так: наклон касательной к колебательной характеристике при  $U_\epsilon^0$  должен быть меньше угла наклона прямой обратной связи или

$$\left. \frac{dI_{\kappa 1}}{dU_\epsilon} \right|_{U_\epsilon^0} < 1 / R_y. \quad (1.53)$$

Реализовать такую работу АГ в НР с  $SR_y > 2$  (1.28) не удастся, поскольку при  $\theta < 90^\circ$ ,  $E_c < E'$  стационарный режим неустойчивый, а в точке покоя самовозбуждение невозможно. В результате применяют внешнее  $E_H$  и автоматическое смещение (комбинированное) (1.29), которое зависит от  $I_{\epsilon 0}, I_{\epsilon 0}$  (1.32).

*Диаграмма смещения* – зависимость напряжения смещения  $E_c$  от возбуждения  $U_\epsilon$  в стационарном режиме при фиксированных  $R_y, R_\epsilon, E_H$ .

Значения  $U_\epsilon, E_c$  в стационарном режиме графически определяются точкой пересечения диаграмм срыва и смещения (рис.1.14). Режимы, устойчивые при внешнем смещении, сохраняют свою устойчивость и при комбинированном, а неустойчивые становятся устойчивыми, если цепь автосмещения безынерционная:

$$T_{AC} \ll T_\kappa, \quad (1.54)$$

постоянная времени цепи автосмещения  $T_{AC}$  значительно меньше постоянной времени контура  $T_\kappa$ . Условие (1.54) означает, что  $E_c$  мгновенно следит за любыми изменениями  $U_\epsilon$  (как показано стрелками на рис. 1.14), возвращая АГ в исходный стационарный режим (А). Условие (1.54) желательное, но достаточно для устойчивости стационарного режима, чтобы

$$T_{AC} \leq T_{\kappa} / (SR_y - 1). \quad (1.55)$$

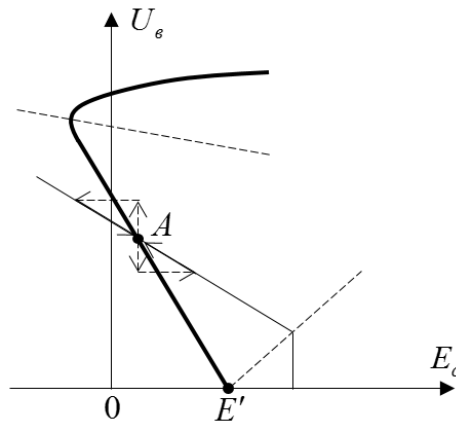


Рис.1.14. Диаграмма смещения транзисторного АГ

### Примеры решения типовых задач

**1.39.** Дано:  $T_{\kappa} = 5$  мкс;  $R_3 = 100$  Ом;  $R_6 = 0$ . Выбрать емкость  $C_{6л}$ , шунтирующую  $R_3$  так, чтобы автосмещение было безынерционным.

**Решение**

Задаемся  $T_{AC} = 0.1T_{\kappa} = 0.1 \cdot 5 = 0.5$  мкс;  $T_{AC} = C_{6л} \cdot R_3$ ;  $C_{6л} = T_{AC} / R_3 = 0.5 \cdot 10^{-6} / 100 = 5 \cdot 10^{-9}$  Ф = 5 нФ. На какой минимальной частоте генерации и при какой добротности контура  $Q$  можно выполнить условия  $T_{AC} = 0.5$  мкс;  $T_{\kappa} = 5$  мкс?

**Решение**

$C_{6л}$  – КЗ для токов ВЧ, если  $1 / \omega C_{6л} = R_3 / N$ . Положим  $N = 20$ , тогда  $1 / \omega X_{6л} = 100 / 20 = 5$  Ом;  $\omega_{\min} = 1 / 5C_{6л}$  или

$$\lambda_{\max} = \frac{X_c \cdot C_{6л}}{530} = \frac{5 \cdot 5 \cdot 10^3}{530} \approx 47 \text{ м}, \quad f_{\min} = 6.36 \text{ МГц}.$$

$$T_{\kappa} = 2Q / \omega; Q = T_{\kappa} \omega / 2 = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 6.36 \cdot 10^6 / 2 \approx 100.$$

**1.40.** АГ по схеме рис.1.3 работает в КР:  $\theta = 60^\circ$ ;  $U_{\kappa} = 4$  В;  $k = 0.2$ ; параметры БТ:  $S = 0.1$  А/В;  $S_{\kappa p} = 0.08$  А/В;  $E' = 0.3$  В;  $h_{21э} = 20$ . Рассчитать сопротивление автосмещения  $R_6$ , если  $R_3 = 0$ , а также  $\eta$ .

**Решение.** Напряжение смещения (1.33)  $E_c = E' - U_{\epsilon} \cos \theta$  и (1.29)

$$E_c = E_H - I_{60} R_6. \text{ Известно: } U_{\epsilon} = \kappa U_{\kappa} = 0.2 \cdot 4 = 0.8 \text{ В; } E_c = 0.3 - 0.8 \cos 60^\circ = 0.3 - 0.4 = -0.1 \text{ В. В (1.29) два неизвестных } E_H \text{ и } R_6. \text{ Задаемся } E_H > E',$$

$$\text{например, } E_H = 0.5 \text{ В. Из (1.29) } R_6 = (E_H - E_c) / I_{60}. \text{ Из (1.32)}$$

$$I_{\kappa 0} = S U_{\epsilon} \gamma_0(60^\circ) = 0.1 \cdot 0.8 \cdot 0.11 = 8.72 \text{ мА; } I_{60} = I_{\kappa 0} \cdot h_{21э} = 8.72 / 20 = 0.436 \text{ мА;}$$

$R_{\sigma} = (0.5 + 0.1) / 0.436 = 1.376 \text{ кОм}$ . Мощность  $P_I = 0.5 I_{\kappa} U_{\kappa}$ , где  $I_{\kappa} = g_1(60^\circ) I_{\kappa 0} = 1.8 \cdot 8.72 = 15.7 \text{ мА}$ ;  $P_I = 0.5 \cdot 15.7 \cdot 4 = 31.4 \text{ мВт}$ .

Для расчета  $\eta$  следует определить  $E_n$  (1.43) и  $P_{уст}$  (1.44). В КР для БТ справедливы соотношения, как в усилителе:

$$E_{\kappa \text{ кр}} = U_{\kappa \text{ кр}} + U_{\kappa \varepsilon \text{ кр}} = U_{\kappa \text{ кр}} + I_{\kappa \text{ м}} / S_{\text{кр}}, \quad (1.56)$$

где из (1.32)  $I_{\kappa \text{ м}} = I_{\kappa 1} / \alpha(\theta) = I_{\kappa 0} / \alpha_0(\theta) = 0.0157 / 0.391 = 0.04 \text{ А}$ ,  
 $E_{\kappa \text{ кр}} = 4 + 0.04 / 0.08 = 4.5 \text{ В}$ .

В случае  $R_{\sigma} = 0$

$E_n = E_{\kappa} = 4.5 \text{ В}$ ;  $P_{уст} = P_0 = I_{\kappa 0} E_{\kappa}$ .  $P_{уст} = 8.72 \cdot 4.5 = 39.24 \text{ мВт}$ ;

$\eta = \eta_{\sigma} = P_I / P_0 = 31.4 / 39.24 = 0.8$ .

**1.41.** АГ по схеме рис.1.6 работает в КР:  $P_I = 5 \text{ Вт}$ ;  $E_{\kappa} = 20 \text{ В}$ . Параметры БТ:  $S = 2 \text{ А/В}$ ;  $S_{\text{кр}} = 0.5 \text{ А/В}$ ;  $E' = 0.7 \text{ В}$ ;  $h_{21\sigma} = 20$ ;  $SR_y = 5$ . Рассчитать  $E_n$  и  $E_{\sigma}$ .

### Решение

Расчет АГ в КР по заданным  $P_I, E_{\kappa}, \theta$  и параметрам БТ, как и в усилителе, начинают с определения  $\xi_{\text{кр}}$ :

$$\xi_{\text{кр}} = 0.5 + 0.5 \sqrt{1 - 8P_I / \alpha_1 S_{\text{кр}} E_{\kappa}^2}. \quad (1.57)$$

Для  $SR_y = 5$  из (1.20)  $\gamma_1(\theta) = 1 / \Sigma P_y = 1 / 5 = 0.2$ ;  $\theta \cong 60^\circ$ ,  $\alpha_1 = 0.39$ ;

( $g_1 = 1.8 \cos 60^\circ = 0.5$ ;  $\gamma_0(60^\circ) \cong 0.11$ ). Далее  $\xi_{\text{кр}} = 0.85$ ;  $U_{\kappa \text{ кр}} = \xi_{\text{кр}} E_{\kappa} = 17 \text{ В}$ ;

$I_{\kappa 1} = 2P_I / U_{\kappa} = 2 \cdot 5 / 17 = 0.59 \text{ А}$ ;  $I_{\kappa 0} = I_{\kappa} / g_1 = 0.59 / 1.8 = 0.33 \text{ А}$ .

Напряжение возбуждения из (1.32)

$U_{\sigma} = I_{\kappa 1} / S \gamma_1 = 0.59 / 2 \cdot 0.2 = 1.48 \text{ В}$ , напряжение смещения (1.33)

$E_{\sigma} = E' - U_{\sigma} \cos \theta = 0.7 - 1.48 \cdot 0.5 = -0.04 \text{ В}$ .

Для расчета  $E_n$  и  $E_{\sigma}$  необходимо выбрать сопротивления  $R_{\sigma}$  и  $R_{\sigma}$ , но в схеме рис.1.6  $R_{\sigma} = 0$ . Можно рекомендовать

$$R_{\sigma} = (2 \dots 10) / S \quad (1.58)$$

и так, чтобы  $E_n > E'$  или знаменатель в (1.34) был положительный:

$$R_{\sigma} + (R_{\sigma} + R_{\sigma}) / h_{21\sigma} > \cos \theta / S \gamma_0(\theta). \quad (1.59)$$

Согласно (1.58),  $R_{\sigma} = (2 \dots 10) / 2 = 1 \dots 5 \text{ Ом}$ , а из (1.59)  $R_{\sigma} > 2.27$ .

Чем  $R_{\sigma}$  больше, тем лучше его стабилизирующее действие, но выше  $E_n$  и ниже  $\eta$ . Выбираем  $R_{\sigma} = 2.5 \text{ Ом}$ .

Согласно (1.34), начальное смещение

$$E_n = E' + U_{\sigma} [S \gamma_0(\theta) R_{\sigma} (1 + 1 / h_{21\sigma}) - \cos \theta];$$

$$E_n = 0.7 + 1.48 \cdot [2 \cdot 0.11 \cdot 2.5 \cdot 1.05 - 0.5] = 0.815 \text{ В}.$$

Напряжение  $E_n$  (1.43)

$$E_n = E_\kappa + I_{\kappa 0} \left( I + I / h_{219} \right) = 20 + 0.33 \cdot 1.05 \cdot 2.5 = 20.9 \text{ В.}$$

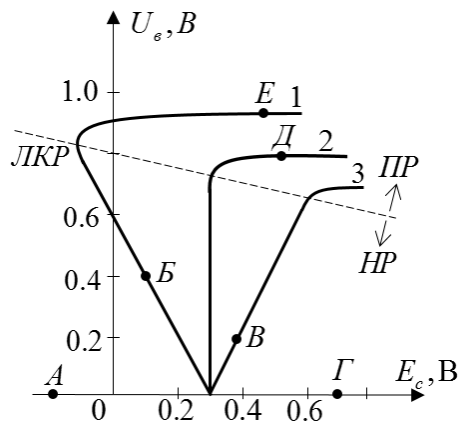


Рис.1.15

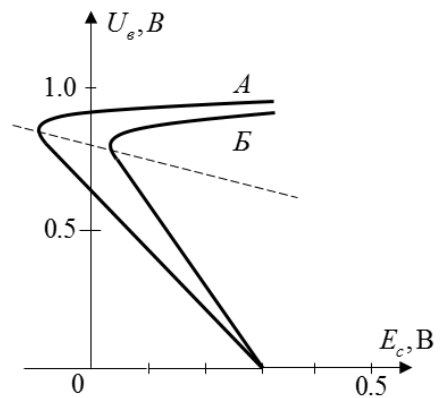


Рис.1.16

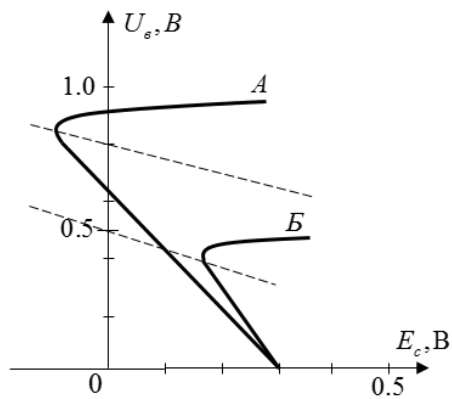


Рис.1.17

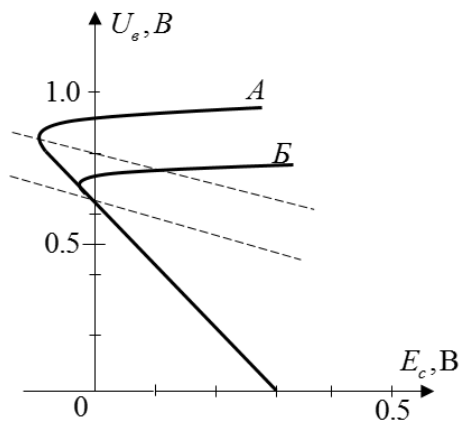


Рис.1.18

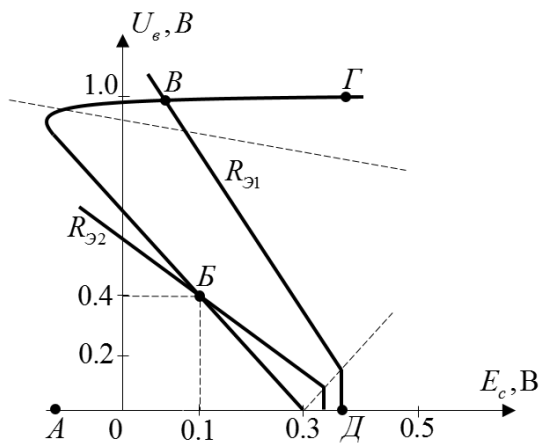


Рис.1.19

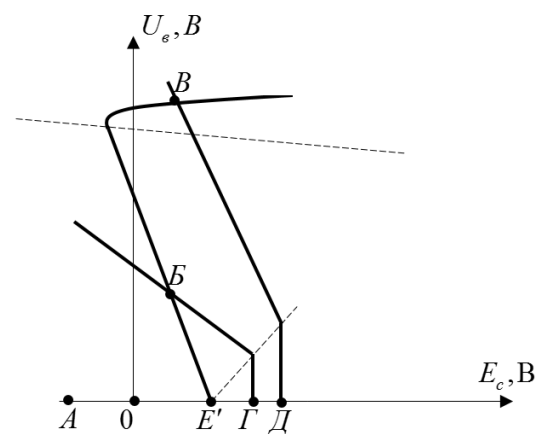


Рис.1.20

Задачи для самостоятельного решения



- 1.42.** Каким значениям  $SR_y$  соответствуют диаграммы срыва, отмеченные на рис.1.15 цифрами 1,2,3?
- 1.43.** АГ работает с внешним смещением. Что можно сказать об устойчивости стационарных режимов, отмеченных на рис.1.15 буквами А,Б,В,Г,Д,Е?
- 1.44.** Каким значениям  $SR_y$  соответствуют диаграммы срыва, отмеченные на рис.1.16 буквами А и Б?
- 1.45.** Диаграмма срыва А на рис.1.17 построена для  $k = 0.2$ . Что можно сказать о  $k$  для диаграммы Б? В каком соотношении  $SR_y$  для диаграмм А и Б?
- 1.46.** Диаграммы срыва А и Б на рис.1.18 построены для разных значений  $E_k$ . В каком они соотношении?
- 1.47.** АГ работает с внешним и безынерционным автосмещением. Что можно сказать об устойчивости стационарных режимов, отмеченных на рис.1.19 буквами А,Б,В,Г,Д? В каком соотношении сопротивления  $R_{\beta 1}, R_{\beta 2}$ , если  $E_H = const$ ? Как изменить  $E_H$  и  $R_{\beta}$ , чтобы реализовать стационарный режим Г?
- 1.48.** АГ работает с внешним и автосмещением от тока эмиттера. Постоянные времени  $T_k = 2$  мкс,  $T_{AC} \geq 50$  мкс. Что можно сказать об устойчивости стационарных режимов, отмеченных на рис.1.20 буквами А,Б,В,Г,Д?
- 1.49.** По условиям задачи 1.48 определить для  $R_{\beta 1}$  и  $R_{\beta 2}$ , в каких пределах будут меняться напряжения  $U_{\beta}$  для  $E_c$ , если  $E' = 0.3$  В;  $U_{\beta кр} = 1.2$  В;  $E_{с кр} = -0.25$  В; напряжение  $U_{\beta}$  в Б;  $U_{\beta б} = 1.4$  В.
- 1.50.** Для стационарного режима Б на рис.1.19 рассчитать  $E_H, U_k, P_I, I_{k0}$ , если  $k = 0.2$ ;  $R_{\beta 2} = 100$  Ом;  $R_{\beta} = 0$ ;  $h_{21\beta} = 50$ ;  $S = 0.1$  А/В;  $E' = 0.3$  В.
- 1.51.** АГ по схеме рис.1.2 работает с безынерционным автосмещением:  $S = 0.1$  А/В;  $S_{кр} = 0.05$  А/В;  $E' = 0.3$  В;  $h_{21\beta} \gg I$ ;  $E_H = 0.8$  В;  $E_{II} = 8$  Ом;  $R_k = 200$  Ом. Определить напряженность режима АГ и  $U_{\beta}$  для: а)  $R_{\beta} = 20$  Ом;  $k = 0.1$ ; б)  $R_{\beta} = 100$  Ом;  $k = 0.25$ ; в)  $R_{\beta} = 300$  Ом;  $k = 0.5$ . Каким образом менять  $k$ , чтобы  $R_k = const$ ?
- 1.52.** По условиям задачи 1.51 определить максимальное напряжение на  $L_{\beta 1}, C_3, L_1$ , если  $Q = 25$ ;  $\rho = 50$  Ом. Рассчитать мощность, потребляемую от источника  $E_{II}(P_{ист})$ , мощность, рассеиваемую коллектором и  $R_{\beta}$  для  $R_{\beta} = 100$  Ом.
- 1.53.** По условиям задачи 1.40 рассчитать сопротивление  $R_{\beta}$ , если  $R_{\beta} = 0$ ,  $E_H = 0.5$  В, а также  $\eta$ .

**1.54.** По условиям задачи 1.40 рассчитать сопротивления  $R_3$  и  $R_6$ , если  $E_n = 0.5$  В, а также  $\eta$ . Принять для определенности, что  $I_{30}R_3 = I_{60}R_6$ . Сравнить  $\eta$  с результатами расчета задач 1.53, 1.40.

**1.55.** АГ по схеме рис.1.7 работает в КР:  $E_n = 1.2$  В;  $\kappa = 0.2$ ;  $R_k = 175$  Ом;  $R_3 = 60$  Ом. Параметры БТ:  $S = 0.146$  А/В;  $S_{кр} = 0.1$  А/В;  $E' = 0.7$  В;  $h_{213} = 20$ . Определить  $E_n$ .

## 1.4. Нагрузочные характеристики

Нагрузочные характеристики – это зависимости показателей режима от сопротивления в цепи коллектора при фиксированных  $E_n, E_H, R_3, R_6$ . Сопротивление  $R_k$  может меняться при перестройке по диапазону частот за счет вариации реактивных параметров контура, при изменении связи с нагрузкой. С помощью нагрузочных характеристик можно выбрать оптимальный режим и реализовать его при настройке по приборам.

В НР показатели режима можно рассчитать по формулам, приведенным ранее. В ПР расчет значительно сложнее, для приближенных оценок можно считать, что АГ ведет себя как генератор напряжения и принимать:

$$U_k \approx U_{к кр}; I_{к1} \approx U_{к кр} / R_k; P_1 \approx U_{к кр}^2 / 2R_k. \quad (1.60)$$

Для наглядности нагрузочную характеристику  $U_e(R_y)$  можно построить по семейству диаграмм срыва (рис.1.21), определяя точки пересечения с диаграммой смещения. Зависимость  $U_e(R_y)$  дана на рис.1.22.

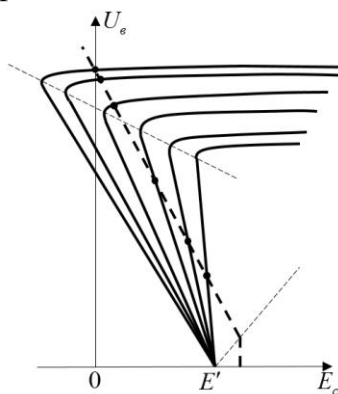


Рис.1.21

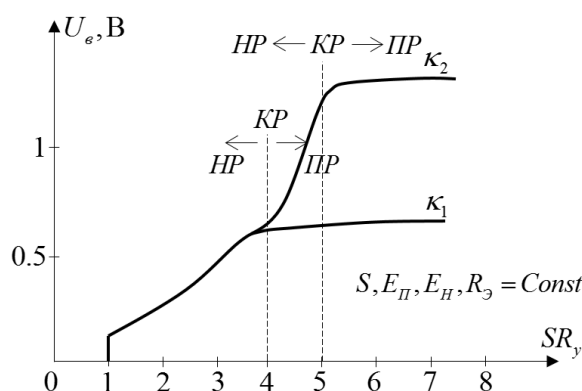


Рис.1.22

## Примеры решения типовых задач

**1.56.** АГ по схеме рис.1.1,б работает в КР,  $k=0.1$ . Как изменятся напряженность режима и  $k$ , если при  $L_2, C_3, S, Q, E_{II}, E_H, R_3 = const$  индуктивность  $L_1$  уменьшить в 2 раза? Увеличить в 2 раза?

**Решение**

Вариации  $L_1$  приведут к изменению  $k, p, \rho, R_k, R_y$ . Для расчета  $p$  и  $\rho$  преобразуем (1.18) и (1.38) к виду

$$p = L_1 / L_{\Sigma} = L_1 / (L_1 + L_2 + L_3) = 1 / (1 + k + L_3 / L_1);$$

$$L_{\Sigma} = L_1 (1 + k + L_3 / L_1).$$

$$\rho = \sqrt{L_{\Sigma} / C_3} = \sqrt{L_1 (1 + k + L_3 / L_1) / C_3}.$$

В схеме рис.1.1,б  $L_3 = 0$ ,  $p = 1 / (1 + k)$ ;  $\rho = \sqrt{L_1 (1 + k) / C_3}$ .

1. Если  $L_1$  уменьшить в 2 раза,  $L'_1 = 0.5L_1$ , то  $k' = L_2 / L'_1$  возрастает в 2 раза;

$$k' = 0.2; \rho' = 1 / 1.2; \rho' = \rho \sqrt{0.6 / 1.1}; R'_k = R_k \cdot 0.62; R'_y = 1.24R_y.$$

Поскольку  $R'_y > R_{y\text{кр}}$ , то ПР.

2. Если  $L_1$  увеличить в 2 раза:  $L''_1 = 2L_1$ , то  $k'' = 0.05$ ;  $p'' = 1 / 1.05$ ;  
 $R''_k = 1.516R_{k\text{кр}}$ , а  $R''_y = 0.758R_{y\text{кр}}$ , НР.

**1.57.** В АГ по схеме рис.1.7 меняется емкость  $C_3$  при  $C_1, C_2, L_3, S, Q, E_{II}, E_H, R_3 = const$ ;  $S = 0.0625$  А/В;  $E_H = 1$  В;  $R_3 = 200$  Ом;  $C_1 = 0.5$  нФ;  $C_2 = 2$  нФ;  $E' = 0.3$  В;  $h_{213} \gg 1$ . При каких значениях  $C_3$  и  $f$  можно реализовать НР с  $\theta = 60^\circ$ ? Применить зависимости рис.1.12. Рассчитать  $U_\phi, U_k, P_1$ .

**Решение**

Из (1.19)  $R_y = 1 / S\gamma_1(\theta)$ ,  $\gamma_1(60^\circ) \approx 0.2$ ;  $S\gamma_1 = 0.0125$  А/В;  $R_y = 80$  Ом. По рис.1.12 (точки):  $f = 18.5$  МГц;  $C_3 = 1.30$  нФ. Для расчета  $U_\phi$  в НР воспользуемся (1.34)  $\gamma_0 \approx 0.11$ . Имеем  $U_\phi = 0.8$  В;  $U_k = U_\phi / k$ ;  $k = C_1 / C_2 = 0.25$ ;  $U_k = 3.2$  В;  $R_k = R_y / k = 320$  Ом;  $P_1 = U_k^2 / 2R_k = 0.016$  Вт.

**Задачи для самостоятельного решения**

**1.58.** Какая нагрузочная характеристика  $I_{k0}(R_k)$  на рис.1.23 соответствует большему значению  $k$ , если  $E_H, E_H, S_1R_3 = const$ ? Что будет показывать прибор, измеряющий ток  $I_{k0}$ , при отсутствии колебаний и в момент их возникновения?

**1.59.** По нагрузочным характеристикам  $I_{k0}(R_k)$  на рис.1.23 рассчитать и построить  $P_0(R_k)$ , если  $E_k = 8$  В.

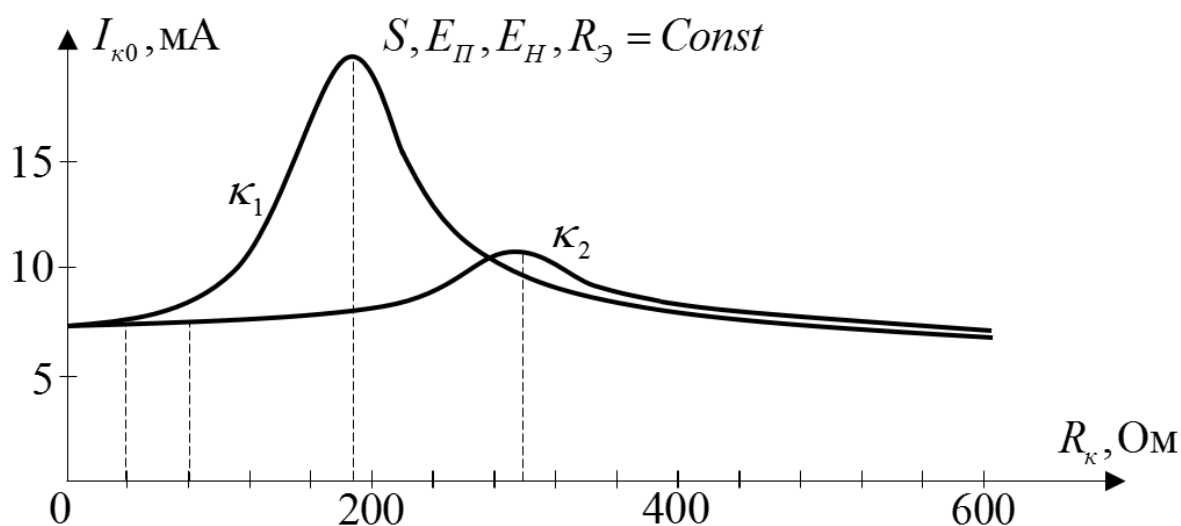


Рис.1.23. Иллюстрация к задаче 1.59

**1.60.** Какая нагрузочная характеристика  $I_{\kappa 1}(R_{\kappa})$  на рис.1.24 соответствует большему значению  $E_H$ , если  $S, R_{\text{э}}, E_H, k = \text{const}$ ? Определить  $R_{\kappa \text{ кр}}, U_{\kappa \text{ кр}}$  для обоих значений  $E_H$ . Изобразить характер зависимостей  $U_{\kappa}, P_I(R_{\kappa})$  для двух  $E_H$ .

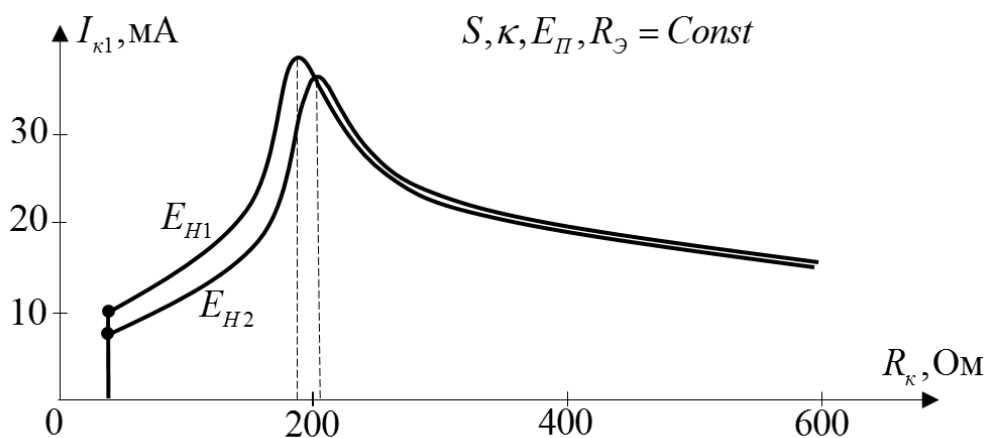


Рис.1.24. Иллюстрация к задаче 1.60

**1.61.** Какая нагрузочная характеристика  $U_{\kappa}(R_{\kappa})$  на рис.1.25 соответствует большему напряжению  $E_{\Pi}$ , если  $E_H, S, kR_{\text{э}} = \text{const}$ ? Рассчитать  $I_{\kappa 1}$  для обоих значений  $E_{\Pi}$  при  $R_{\kappa} = 150$  и  $400$  Ом. Изобразить характер зависимостей  $I_{\kappa 1}, P_1(R_{\kappa})$  для двух  $E_{\Pi}$ .

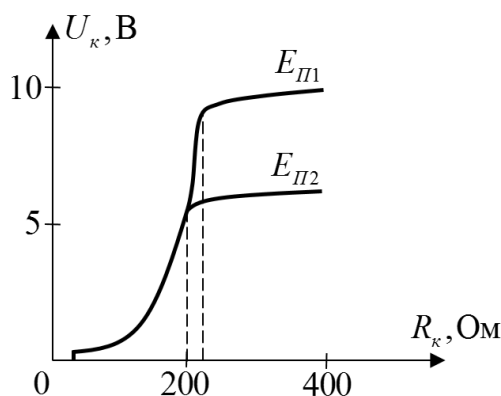


Рис.1.25

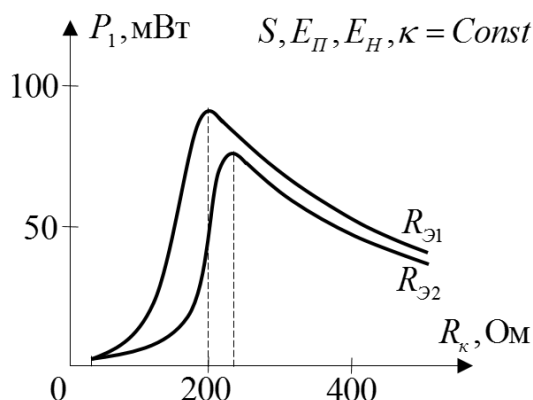


Рис.1.26

**1.62.** Какая нагрузочная характеристика  $P_1(R_k)$  на рис.1.26 соответствует большему  $R_э$ ? Определить  $I_{к1\text{ кр}}, U_{к\text{ кр}}$  для обоих значений  $R_э$ . Изобразить характер зависимостей  $I_{к1}, U_{к1}(R_k)$  для двух  $R_э$ .

**1.63.** АГ по схеме рис.1.6 работает в КР:  $R_{к\text{ кр}} = 200 \text{ Ом}$ ;  $I_{к1\text{ кр}} = 20 \text{ мА}$ ;  $\eta_k = 0.5$ . Рассчитать  $P_1, U_{к1}$ . Как изменятся  $I_{к1}, U_{к1}, P_1$  при обрыве  $R_n$ ?

**1.64.** АГ по схеме рис.1.2 работает в КР:  $P_1 = 40 \text{ мВт}$ ;  $f = 17 \text{ МГц}$ ;  $\theta = 100^\circ$ ;  $C_3 = 300 \text{ пФ}$ . Как изменятся напряженность режима  $f$  и  $P_1$ , если при  $S, Q, \kappa, E_{П1}, E_{н1}, R_э = \text{const}$  емкость  $C_3$  в 4 раза увеличить? Уменьшить?

**1.65.** В АГ по схеме рис.1.6 меняется индуктивность  $L_1$  так, что  $L_1 + L_2, L_3, Q, C_3, E_{П1}, E_{н1}, R_э, S = \text{const}$  (рис.1.9,а),  $S = 0.05 \text{ А/В}$ . Применяя зависимость рис.1.22, построить  $U_{к1}, U_{к2}(L_1)$ , если АГ работает в НР.

**1.66.** В АГ по схеме рис.1.7 индуктивность  $L_3$  меняется от 0.4 до 5 мкГн (рис.1.10) при  $C_1, C_2, C_3, S, Q, E_{П1}, E_{н1}, R_э = \text{const}$ . Колебания возбуждаются при  $L_3 = 0.4 \text{ мкГн}$  с частотой  $f = 16.5 \text{ МГц}$ . Применяя зависимости рис.1.10 и рис.1.27, построить  $f, U_{к1}(L_3)$  для  $k = k_1$ .

**1.67.** В АГ по схеме рис.1.6 меняется индуктивность  $L_2$  так, что  $L_1 + L_2, L_3, Q, C_3, E_{П1}, E_{н1}, R_э, S = \text{const}$  (рис.1.9б);  $S = 0.05 \text{ А/В}$ . Применяя зависимость  $U_{к1}(SR_y)$  на рис.1.22 в НР, построить  $U_{к1}(L_2)$ .

**1.68.** В АГ по схеме рис.1.7 индуктивность  $L_3$  меняется от 0.4 до 5 мкГн при  $C_1, C_2, C_3, S, Q, E_{П1}, E_{н1}, R_э = \text{const}$ . Колебания возбуждаются при  $L_3 = 0.8 \text{ мкГн}$ ;  $f = 12 \text{ МГц}$ . Применяя зависимости рис.1.10 и рис.1.22, построить  $U_{к1}(L_3)$  для  $k_1$  и  $k_2$ .

**1.69.** В АГ по схеме рис.1.7 емкость  $C_1$  меняется от 0.05 до 5 нФ при  $C_2, C_3, L_3, S, Q, E_{П1}, E_{н1}, R_э = \text{const}$ . Колебания возбуждаются при

$C_1 = 0.1$  нФ;  $f = 35$  МГц. Применяя зависимости рис.1.11 и рис.1.22, построить в НР  $U_\kappa(C_1)$ .

**1.70.** АГ по схеме рис.1.3 работает в КР:  $C_1 = 800$  пФ;  $C_2 = 8$  нФ;  $C_3 = 400$  пФ;  $Q = 50$ ;  $f = 6$  МГц;  $R_3 = 100$  Ом;  $E_H = 1.1$  В;  $R_H = 100$  Ом;  $\eta_\kappa = 0.5$ . Параметры БТ:

$S = 0.0955$  А/В;  $S_{кр} = 0.05$  А/В;  $E' = 0.7$  В;  $h_{219} = 20$ .

Рассчитать максимальные значения токов, протекающих в проводах, отмеченными цифрами 1,2,5,6 и напряжений на  $C_2, C_3, L_3$ . Как изменятся напряженность режима и ток в проводе 6, если при  $S, k, E_H, E_H, R_3 = const$  уменьшили  $\eta_\kappa$  до 0.25? Увеличили до 0.75? Увеличили  $R_3$  в 2 раза?

**1.71.** В АГ по схеме рис.1.7 меняется емкость  $C_3$  от 0.1 до 3 нФ при  $C_1, C_2, L_3, S, Q, E_H, E_H, R_3 = const$ . Колебания возбуждаются при  $C_3 = 0.25$  нФ;  $f = 25$  МГц. Применяя графики рис.1.12 и рис.1.22, построить зависимость  $U_\kappa(C_3)$  для двух значений  $k$ . Как пойдет зависимость  $I_{\kappa 1}(C_3)$ ?

**1.72.** В АГ по схеме рис.1.6 меняется емкость  $C_3$  от 0.25 до 1.5 нФ при  $L_1, L_2, L_3, S, Q, E_H, E_H, R_3 = const$ . Колебания возбуждаются при  $C_3 = 1.1$  нФ. По графикам рис.1.8 и рис.1.27 построить зависимости  $U_\kappa(C_3)$  для двух  $k$ . Как пойдет зависимость  $I_{\kappa 1}(C_3)$ ?

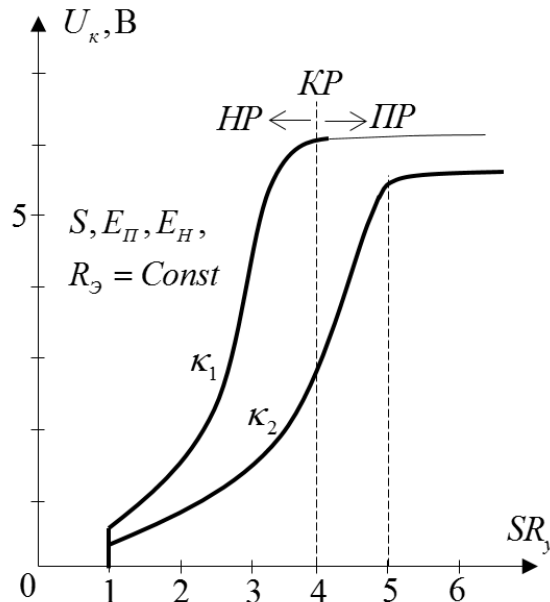


Рис.1.27. Иллюстрация к задаче 1.72

**1.73.** АГ по схеме рис.1.3 работает в КР,  $U_{\kappa кр} = 5$  В. Как изменятся напряженность режима и  $U_\kappa$ , если при  $S, k, E_H, E_H, R_3 = const$  емкость  $C_{CB}$  уменьшить? Увеличить?

**1.74.** АГ по схеме 1.1, в работает в КР,  $k=0.2$ . Как изменятся напряженность режима и  $k$ , если при  $C_1, C_3, L_3, S, Q, E_{II}, E_H, R_3 = const$  емкость  $C_2$  в два раза увеличить? Уменьшить?

**1.75.** АГ по схеме рис.1.6 работает в КР,  $f=10$  МГц. Как изменятся напряженность режима и  $f$ , если при  $L_1, L_2, L_3, S, Q, E_{II}, E_H, R_3 = const$  емкость  $C_3$  в 2 раза увеличить? Уменьшить?

**1.76.** Как изменятся  $U_{\epsilon}, U_{\kappa}, P_1$ , если в условиях задачи 1.57 напряжение  $E_H$  уменьшить до 0.8 В? Увеличить  $R_3$  до 400 Ом? Меняются ли при этом  $R_y$  и  $\theta$ ?

**1.77.** В АГ по схеме рис.1.7 меняется емкость  $C_1$  при  $C_2, C_3, L_3, \theta = const$ ;  $S=0.05$  А/В;  $C_2=2$  нФ. Рассчитать, применяя графики рис.1.11,  $U_{\epsilon}, U_{\kappa}$  при возбуждении и срыве колебаний, а также  $R_{y\max}=58$  Ом, если  $E_H - E' = 0.61$  В;  $R_3=100$  Ом;  $h_{21\epsilon}=500$ , режим критический.

**1.78.** АГ по схеме рис.1.2 работает в КР:  $P_1=50$  мВт;  $\eta_{\kappa}=0.5$ ;  $f=10$  МГц;

$L_1=0.265$  мкГн;  $L_2=0.053$  мкГн;  $C_3=318$  пФ;  $Q=50$ ;  $R_3=100$  Ом. Параметры БТ:  $S=0.1$  А/В;  $S_{кр}=0.08$  А/В;  $E'=0.3$  В;  $h_{21\epsilon}=20$ . Считая блокировочные элементы идеальными, рассчитать максимальные значения токов, протекающих в проводах, отмеченных цифрами 1,2,3,6,8 и напряжений на  $L_3, C_3, C_{\text{бл1}}, C_{\text{бл2}}, C_{\text{бл3}}, C_{\text{бл4}}$ .

**1.79.** Как изменятся токи в проводах 2,3 и напряжение на  $C_3$  в условиях задачи 1.78, если  $\eta_{\kappa}$  уменьшить до 0.25? Увеличить до 0.75?

## 1.5. Влияние питающих напряжений на режим автогенератора

### Примеры решения типовых задач

**1.80.** АГ по схеме рис.1.2 работает в КР:  $R_{\kappa}=250$  Ом;  $U_{\epsilon}=1.6$  В;  $k=0.2$ ;  $R_3=80$  Ом. Параметры БТ:  $S=0.125$  А/В;  $S_{кр}=0.0625$  А/В;  $E'=0.3$  В;  $h_{21\epsilon}=100$ . Рассчитать  $E_{II}, E_H$ .

#### Решение

$E_{II\text{ кр}}$  можно рассчитать, применив (1.35):

$$E_{II\text{ кр}} = U_{\kappa\text{ кр}} \left[ 1 + k(1 - \cos \theta) S / S_{кр} + k S R_3 \gamma_0(\theta) (1 + 1/h_{21\epsilon}) \right].$$

Напряжение  $U_{\kappa\text{ кр}} = U_{\epsilon} / k = 8$  В, угол отсечки  $\theta$  определяем из (1.20), а сначала рассчитываем  $R_y = k R_{\kappa} = 50$  Ом;  $\gamma_1(\theta) = 0.16$ . По таблице в приложении  $\theta = 55.5^\circ$ ,  $\cos \theta = 0.5664$ ,  $\gamma_0(\theta) = 0.088$ .  $E_{II} \approx 10$  В. Из (1.34)  $E_H \approx 0.816$  В.

### Задачи для самостоятельного решения

**1.81.** Как изменятся напряженность режима,  $U_{\epsilon}, I_{\kappa 0}$ , если в условиях задачи 1.80 напряжение  $E_n$  уменьшить до 0.55 В? На какую мощность выбирать источник  $E_n$ ?

**1.82.** Как изменятся напряженность режима,  $U_{\epsilon}, I_{\kappa 0}$ , если в условиях задачи 1.80 напряжение  $E_{II}$  уменьшить до 6 В? Как изменится мощность, на которую рассчитывает источник  $E_{II}$  и  $\eta$ ?

**1.83.** АГ по схеме рис.1.7 работает в КР:  $U_{\epsilon} = 0.8$  В;  $E_{II} = 6$  В;  $\eta = 0.6$ . Как изменятся напряженность режима,  $U_{\epsilon}, \eta$ , если при  $S, R_y, E_n, R_3 = const$  увеличить  $E_{II}$  до 8 В?

**1.84.** АГ работает в КР:  $E_{II} = 15.6$  В;  $R_{\kappa} = 204$  Ом;  $k = 0.2$ ;  $R_3 = 80$  Ом;  $R_6 = 0$ ;  $S = 0.125$  А/В;  $S_{кр} = 0.1$  А/В;  $E' = 0.6$  В;  $h_{21Э} = 50$ . Рассчитать  $E_n$ , мощности источников в цепи базы и коллектора, мощности, рассеиваемые сопротивлением  $R_3$ , базой и коллектором.

**1.85.** АГ по схеме рис.1.7 работает в НР:  $I_{\kappa 0} = 5.5$  мА;  $C_1 = 13.25$  нФ;  $L_3 = 5.3$  мкГн;  $Q = 50$ ;  $\lambda = 100$  м;  $R = 100$  Ом. Параметры БТ:  $S = 0.125$  А/В;  $E' = 0.3$  В;  $h_{21Э} = 50$ . Рассчитать  $U_{\epsilon}, E_n$ . Как следует изменить  $E_n$ , если германиевый БТ заменить кремниевым, у которого  $S, h_{21Э}$  одинаковые, а  $E = 0.6$  В?

**1.86.** Как изменятся  $U_{\epsilon}, I_{\kappa 0}$ , если в условиях задачи 1.85 увеличить  $E_n$  до 1.2 В? Режим сохранился НР.

#### Примечание

При полигональной аппроксимации статических характеристик токов БТ можно считать, что  $S(E_n) = const$  параметры контура не меняются, поэтому  $R_y = const$ , а следовательно,  $SR_y$  и  $\theta$ . Знаменатель в (1.34) не меняется, и новое значение напряжения возбуждения  $U'_{\epsilon}$  можно определить из соотношения

$$U_{\epsilon} / U'_{\epsilon} = (E'_n - E') / (E_n - E').$$

**1.87.** Как изменятся  $U_{\epsilon}, I_{\kappa 0}$ , если в условиях задачи 1.86 сопротивление  $R_3$  увеличить в 2 раза?

**1.88.** На рис.1.28 построены статические модуляционные характеристики  $I_{\kappa 1}, \eta(E_{II})$ . Расчет выполнен приближенно при условии, что в ПР  $U_{\kappa} \cong U_{\kappa кр}$ . Параметры БТ:  $S = 0.146$  А/В;  $S_{кр} = 0.1$  А/В;  $E' = 0.74$ ;  $h_{21Э} = 20$ . В КР при  $k = 0.2$ ;  $R_{\kappa} = 175$  Ом;  $R_3 = 60$  Ом напряжение  $E_{II кр} = 12$  В. При



каких  $E_H$  построены сплошная и пунктирная характеристики, если  $I_{к1\text{ кр}}$  отличаются в 2 раза?

**1.89.** По условиям задачи 1.88 построить зависимости  $U_K, P_1(E_H)$  для двух значений  $E_H$ .

**1.90.** АГ работает в КР:  $E_H = 1.3$  В;  $\theta = 60^\circ$ ;  $k = 0.2$ ;  $U_\epsilon = 2.4$  В. Параметры БТ:  $S = 0.1$  А/В;  $S_{кр} = 0.05$  А/В;  $E' = 0.7$  В;  $h_{21Э} = 20$ . Рассчитать  $R_\epsilon$  и  $E_H$ .

**1.91.** На рис.1.29 по исходным данным задачи 1.90 построена статическая модуляционная характеристика (сплошная)  $I_{к1}(E_H)$ . Определить  $E_H$  для  $I_{к1}(E_H)$ , изображенной пунктиром, если токи в КР отличаются в 2 раза.

**1.92.** АГ по схеме рис.1.3 работает в КР,  $I_{к0} = 8$  мА. Как изменяются напряженность режима и  $I_{к0}$ , если при  $SR_y, E_H, R_\epsilon = \text{const}$  увеличить  $E_H$ ?

**1.93.** АГ по схеме рис.1.6 работает в КР,  $U_K = 8$  В.

Как изменятся напряженность режима и  $U_K$ , если :

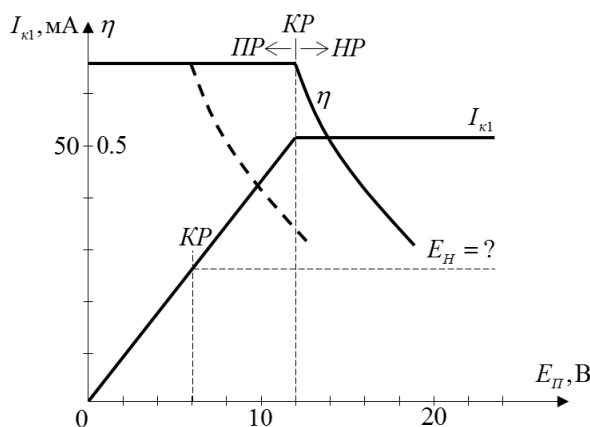
а) при  $S, E_H, E_H, R_\epsilon = \text{const}$  увеличить  $R_K$ ?

б) при  $SR_y, E_H, E_H = \text{const}$  уменьшить  $R_K$ ?

в) при  $SR_y, E_H, R_\epsilon = \text{const}$  уменьшить  $E_H$ ?

**1.94.** По условиям задачи 6.75 построить зависимости  $U_K, P_1, \eta(E_H)$  для двух  $E_H$ .

**1.95.** АГ работает в КР,  $U_{к\text{ кр}} = 10$  В. Как изменятся напряженность режима и  $U_K$ , если при  $SR_y, E_H, R_\epsilon = \text{const}$  напряжение  $E_H$  уменьшить в 2 раза? Увеличить в 2 раза?



## 2. УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ В ОДНОКОНТУРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРАХ

В АГ частота колебаний  $f$  приблизительно равна собственной частоте контура  $f_0$ , поэтому наиболее эффективный способ управления частотой – это изменение его индуктивности и емкости. Реактивный нелинейный двухполюсник, параметры которого меняются под действием электрического сигнала информации, называют частотным модулятором.

В АГ на биполярных транзисторах наибольшее применение нашли варикапы – полупроводниковые диоды, у которых барьерная емкость закрытого р-п перехода ( $C_m$ ) меняется от приложенного к нему напряжения ( $e_m$ ):

$$C_m = C_m(0) [\varphi(\varphi - \varepsilon_m)]^m, \quad (2.1)$$

где  $C_m(0)$  – емкость при  $e_m = 0$ ;  $\varphi$  – напряжение, при котором переход открывается:  $\varphi = 0.5 \dots 0.7$  В;  $m = 0.5 \dots 1$ .

Напряжение на переходе  $e_m$  должно находиться в интервале значений (рис.2.1)

$$e_{nd} \leq e_m \leq 0, \quad (2.2)$$

$e_{nd}$  – напряжение перехода.

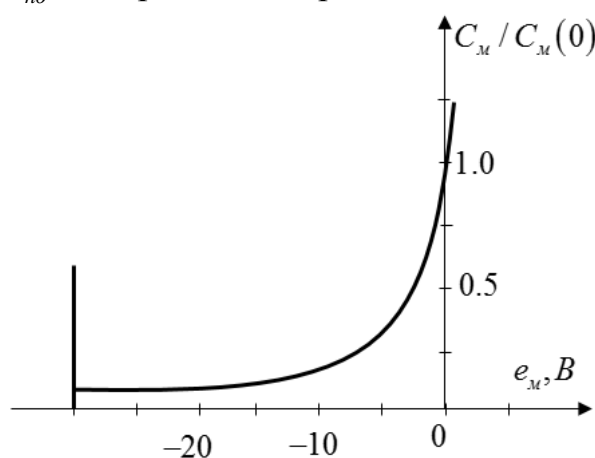
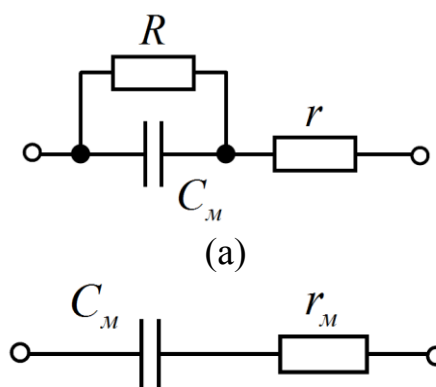


Рис.2.1



(б)

Рис.2.2

Эквивалентная схема варикапа (рис.2.2,а), кроме барьерной емкости  $C_m$ , включает сопротивление полупроводника и контактов  $r$  (единицы и доли Ом) и сопротивление утечки  $R$  (десятки и сотни килоом). В последовательной схеме замещения (рис.2.2,б)

$$r_m = r + 1 / \omega^2 C_m^2 R = r + X_m^2 / R; \quad X_m = 1 / \omega C_m, \quad (2.3)$$

добротность варикапа

$$Q_{\text{м}} = X_{\text{м}} / r_{\text{м}} = [\omega C_{\text{м}} r + 1 / \omega C_{\text{м}} R]^{-1} = [r / X_{\text{м}} + X_{\text{м}} / R]^{-1}. \quad (2.4)$$

Анализ (2.4) показывает, что добротность варикапа зависит от частоты  $f$  и емкости  $C_{\text{м}}$ . На фиксированной частоте ( $f_1, f_2, f_3$ ) на рис.2.3) при вариации напряжения  $e_{\text{м}}$  меняются емкость  $C_{\text{м}}$ , а, следовательно, и добротность  $Q_{\text{м}}$ . С ростом  $e_{\text{м}}(C_{\text{м}})$  добротность сначала увеличивается, проходит через максимум, а затем падает. Экспериментальное значение добротности  $Q_{\text{м max}}$  и емкость  $C_{\text{м э}}$ , при которой оно реализуется, определяются соотношениями

$$Q_{\text{м max}} = R / 2\sqrt{rR}; C_{\text{м э}} = 1 / \omega\sqrt{rR}. \quad (2.5)$$

Видно, что  $Q_{\text{м max}}$  определяется только сопротивлениями  $R, r$ , а  $C_{\text{м э}}$  зависит от частоты.

Обычно варикап применяют на частотах, где его добротность  $Q_{\text{м}}$  достаточно велика, чтобы в процессе управления частотой не проявлялось побочное явление, вызванное изменением потерь в контуре АГ и приводящее к изменениям амплитуды колебаний.

В задачах принимаем, что сигнал информации меняется по гармоническому закону

$$u_{\Omega} = U_{\Omega} \cos \Omega t, \quad (2.6)$$

а варикап безынерционный.

При подключении варикапа к контуру АГ (рис.2.4, рис.2.5) на нем лежит ВЧ напряжение

$$u_{\text{м}} = U_{\text{м}} \cos \omega t, \quad (2.7)$$

а после подачи модулирующего  $U_{\Omega}$  и задающего  $E_{\text{м0}}$  напряжения, обеспечивающего режим молчания, на переходе:

$$e_{\text{м}} = E_{\text{м0}} + U_{\Omega} \cos \Omega t + U_{\text{м}} \cos \omega t. \quad (2.8)$$

Собственная частота контура  $\omega_0$  при вариации его емкости  $C_{\Sigma}$  на  $\Delta C_{\Sigma}$  меняется по нелинейному закону

$$\omega'_0 = 1 / \sqrt{L_{\Sigma} (C_{\Sigma 0} + \Delta C_{\Sigma})} = \omega_0 (1 + \Delta C_{\Sigma} / C_{\Sigma 0})^{-0.5}; \quad (2.9)$$

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{L_{\Sigma} C_{\Sigma 0}}; \Delta C_{\Sigma} = C_{\Sigma} - C_{\Sigma 0}. \quad (2.10)$$

Для небольших вариаций емкости  $\Delta C_{\Sigma} / C_{\Sigma 0}$ , если

$$\frac{3}{8} \cdot \left( \frac{\Delta C_{\Sigma}}{C_{\Sigma 0}} \right)^2 \ll 1, \quad (2.11)$$

Приближенно (2.9) можно линеаризовать:

$$(\omega'_0 - \omega_0) / \omega_0 = \Delta\omega / \omega_0 \approx -0.5\Delta C_\Sigma / C_{\Sigma 0}. \quad (2.12)$$

$\Delta C_\Sigma$  – изменения емкости контура АГ за счет вариации емкости варикапа на

$$\Delta C_\Sigma = C_\Sigma - C_{\Sigma 0}, \quad (2.13)$$

$C_{\Sigma 0}$  – емкость при  $e_\Sigma = E_{\Sigma 0}$ .

Емкости  $\Delta C_\Sigma$  и  $\Delta C_M$  связаны коэффициентом включения варикапа к контуру АГ

$$P_\Sigma = U_\Sigma / U, \quad (2.14)$$

$$\Delta C_\Sigma = p_\Sigma^2 \cdot \Delta C_M, \quad (2.15)$$

$U$  – напряжение на контуре, на  $C_{\Sigma 0}$ , или  $L_\Sigma$ :

$$U = U_\kappa / p, \quad (2.16)$$

$U_\kappa$  – напряжение на контуре АГ между коллектором и эмиттером;

$p$  – коэффициент включения контура. Из-за нелинейности воль-фарадовой характеристики варикапа (рис.2.1) напряжение ВЧ на нем  $u_\Sigma$  приводит к изменению средней емкости. Однако для приближенных расчетов девиации частоты можно пренебречь этим обстоятельством и применить частотную характеристику варикапа  $C_\Sigma(e_\Sigma)$ .

Зависимость частоты колебаний  $f$  от запирающего напряжения на варикапе  $E_\Sigma$  называют статической модуляционной характеристикой (СМХ) управляемого АГ (УАГ). Обычно ее центрируют относительно  $E_{\Sigma 0}$ , тогда СМХ – это зависимость  $\Delta f(\Delta E_\Sigma)$ , где

$$\Delta f = f - f_0, \Delta E_\Sigma = E_\Sigma - E_{\Sigma 0}. \quad (2.17)$$

Емкость варикапа (2.1) без учета ВЧ напряжения

$$C_\Sigma = C_{\Sigma 0} [1 - \Delta E_\Sigma / (\varphi - E_\Sigma)]^{-m}; \quad C_{\Sigma 0} = C_\Sigma(0) [\varphi / (\varphi - E_\Sigma)]^m. \quad (2.18)$$

Зависимость  $C_\Sigma(\Delta E_\Sigma)$  – нелинейная, но при небольших относительных изменениях напряжения  $\Delta E_\Sigma / E_\Sigma$ , когда

$$\frac{3}{8} (\Delta E_\Sigma / E_{\Sigma 0})^2 \ll 1, \quad (2.19)$$

для  $m = 0.5$ , (2.18) линеаризуется:

$$C_\Sigma \approx C_{\Sigma 0} [1 + 0.5 \Delta E_\Sigma / (\varphi - E_{\Sigma 0})], \quad (2.20)$$

а вариации емкости

$$\Delta C_\Sigma / C_\Sigma = 0.5 \Delta E_\Sigma / (\varphi - E_{\Sigma 0}). \quad (2.21)$$

Подставим (2.21) в (2.15) и (2.12), получим выражения для СМХ

$$\Delta f / f_0 = -0.25 p_m^2 \frac{C_{m0}}{C_{\Sigma 0}} \cdot \frac{\Delta E_m}{\varphi - E_{m0}}, \quad (2.22)$$

а если  $\varphi \ll (E_{m0})$ , то

$$\Delta f / f_0 = 0.25 p_m^2 \frac{C_{m0}}{C_{\Sigma 0}} \cdot \frac{\Delta E_m}{E_{m0}}. \quad (2.23)$$

При расчетах СМХ следует иметь ввиду, что пределы измерения  $\Delta E_m$  ограничены. Напряжение на переходе (7.8) при  $U_\Omega = 0$

$$e_m = E_{m0} + U_m \cos \omega t, \quad (2.24)$$

для  $\omega t = 0$ :  $e_m = e_{m \max} = E_{m \max} + U_m$ ,

для  $\omega t = \pi$ :  $e_m = e_{m \min} = E_{m \min} - U_m$ .

Условие (2.2) будет выполняться, если  $e_{m \max} = 0$ ,  $e_{m \min} = e_{nd}$ , а размах СМХ по напряжению

$$E_{m \max} - E_{m \min} - e_{nd} - 2U_m = |e_{nd}| - 2U_m. \quad (2.25)$$

Если выбрать

$$E_{m0} = -0.5e_{nd}, \Delta E_{m \max} = 0.5|e_{nd}| - U_m. \quad (2.26)$$

Пределы изменения напряжения  $\Delta E_m$  зависят от выбора связи варикапа с контуром ( $p_m$ ), которая определяет ВЧ напряжение на нем  $U_m$ . С ростом  $U_m$  вариации  $\Delta E_{m \max}$  уменьшаются, это приведет к уменьшению девиации частоты (2.23), однако увеличением  $p_m$ , наоборот, увеличивает ее, поэтому существует оптимальный коэффициент включения:

$$\left\{ \begin{array}{l} |e_{nd}| < 3U, p_{m \text{ opt}} \cong |e_{nd}| / 3U, \\ |e_{nd}| > 3U, p_{m \text{ opt}} = 1. \end{array} \right\} \quad (2.27)$$

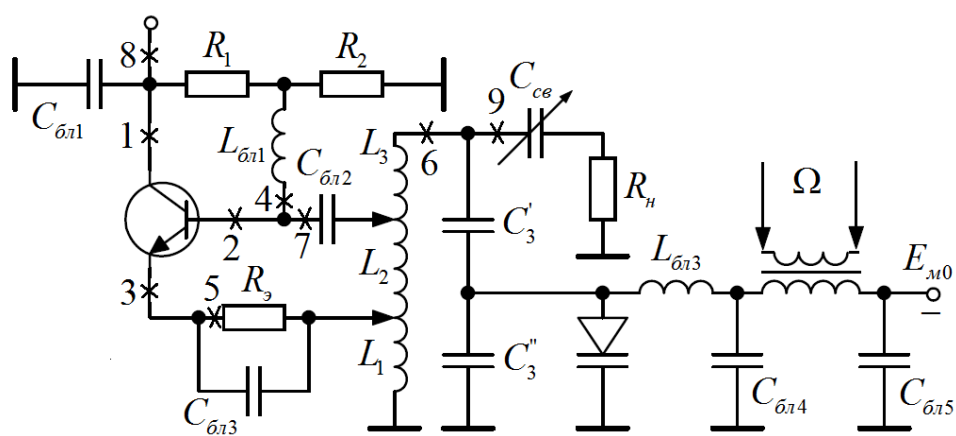
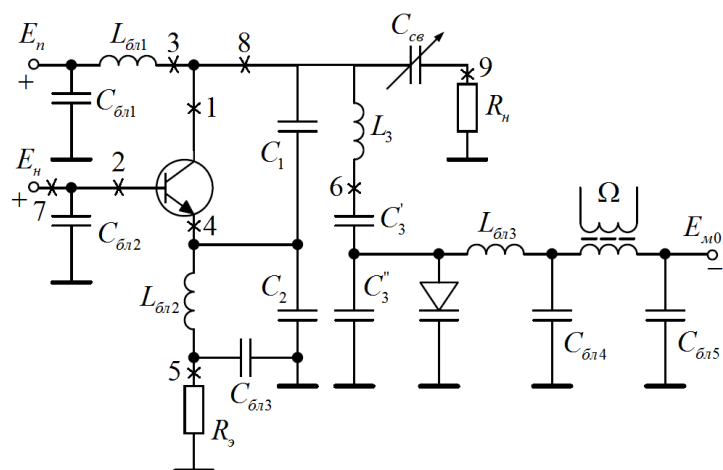
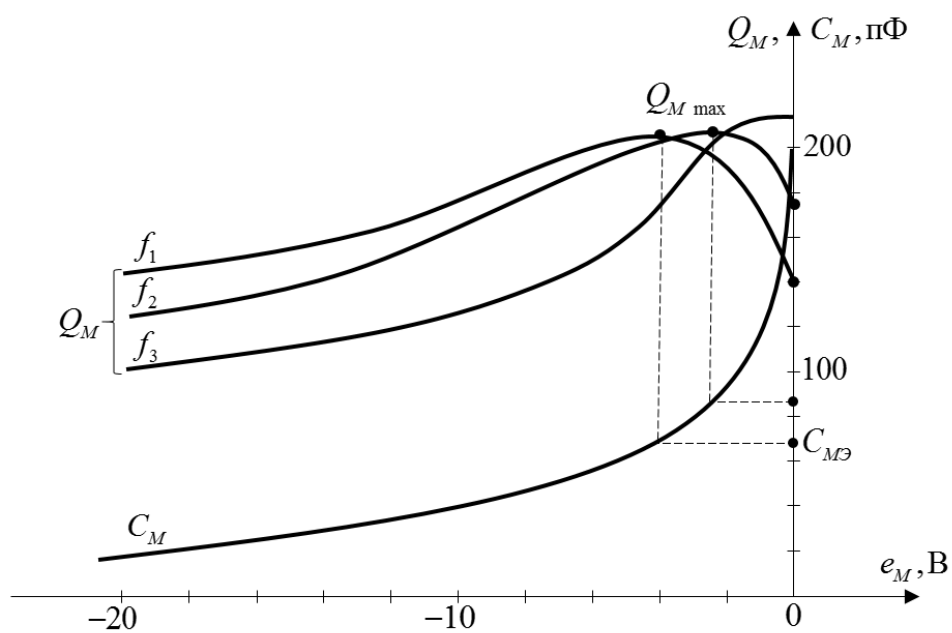
При модуляции  $\Delta E_m = U_\Omega$ , согласно (2.23), наибольшее отклонение частоты (девиация)

$$|\Delta f| / f_0 = 0.25 p_m^2 \frac{C_{m0}}{C_{\Sigma 0}} \cdot \frac{U_\Omega}{C_{\Sigma 0}}. \quad (2.28)$$

Крутизна СМХ

$$S_m = |\Delta f| / |\Delta E_m| = 0.25 p_m^2 \frac{C_{m0}}{C_{\Sigma 0}} \cdot \frac{f_0}{E_{m0}}, \text{ кГц/В}; \quad (2.29)$$

$$\sigma_m = |\Delta f / f_0| / |\Delta E_m| = 0.25 p_m^2 \frac{C_{m0}}{C_{\Sigma 0}} \cdot \frac{1}{-E_{m0}}, \text{ 1/В}. \quad (2.30)$$



## 2.1. Схемы управляемых автогенераторов

Схемы УАГ строятся по тем принципам, что и неуправляемых, рассмотренных в гл.1. Особенность состоит в том, чтобы подключение варикапа и его питающих напряжений вносило только полезные изменения емкости контура и не нарушало режима работы АГ по цепям питания. С этой целью применяют блокировочные дроссели и конденсаторы. Электрод БТ, заземленный по ВЧ выбирают обычно из конструктивных соображений и удобства подачи питающих напряжений.

### Задачи для самостоятельного решения

**2.1.** Считая блокировочные элементы идеальными, указать, в каких проводах, отмеченными цифрами на рис.2.4, протекают токи, зависимости которых во времени соответствуют рис.2.6,а,б,в,г? На каких элементах схемы лежат напряжения, изображенные на рис.2.7,а,б,в,г,д? Какой электрод БТ заземлен по ВЧ?

**2.2.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР, девиация частоты  $\Delta f_m = 50$  кГц. Как изменятся напряженность режима и  $\Delta f_m$ , если произойдет КЗ  $L_{бл2} ? L_{бл3} ? C_{бл2} ? C_{бл3} ?$

**2.3.** Считая блокировочные элементы идеальными, указать, в каких проводах, отмеченных на рис.2.5 цифрами, протекают токи, зависимости которых во времени соответствуют рис.2.6,а,б,в? На каких элементах схемы лежат напряжения, изображенные на рис.2.7,а,б,в,г,д? Какой электрод БТ заземлен по ВЧ?

**2.4.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР,  $\Delta f_m = 25$  кГц. Как изменятся напряженность режима и  $\Delta f_m$ , если произойдет КЗ  $L_{бл1} ? L_{бл2} ? C_{бл3} ? C_{бл4} ? R_2 ?$

**2.5.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР,  $\Delta f_m = 75$  кГц. Как изменятся напряженность режима и  $\Delta f_m$ , если уменьшить  $E_{II}$ ? Увеличить  $E_n$ ? Увеличить  $R_3$ ? Уменьшить  $U_\Omega$  в 2 раза?

**2.6.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР,  $f_0 = 50$  МГц,  $\Delta f_m = 40$  кГц. Как изменятся напряженность режима,  $f_0$ ,  $\Delta f_m$ , если  $U_\Omega = 0$ ?

**2.7.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР,  $f_0 = 20$  МГц,  $\Delta f_m = 20$  кГц. Как изменятся напряженность режима,  $f_0$ ,  $\Delta f_m$ , если при  $C_\Sigma, E_{II}, E_n, S, R_3, Q = const$  индуктивность  $L_\Sigma$  увеличить в 4 раза? Уменьшить в 4 раза?

**2.8.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР,  $f_0 = 25$  МГц,  $\Delta f_m = 25$  кГц,  $C'_3 = \infty$ ,  $C''_3 = 0$ . Чему равно  $p_m$ ? Как изменятся напряженность режима,  $f_0$ ,  $\Delta f_m$ ,  $p_m$ , если при  $E_{II}, E_n, S, R_3, Q, C_3, L_\Sigma = const$  параллельно варикапу включить конденсатор с емкостью  $C'_3 = C_{m0}$ ?

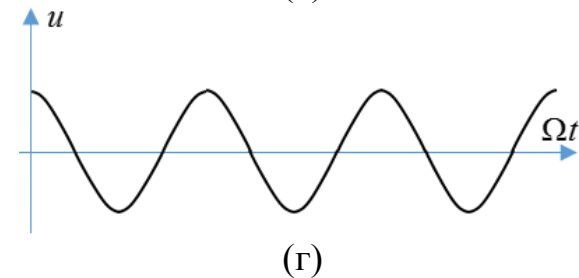
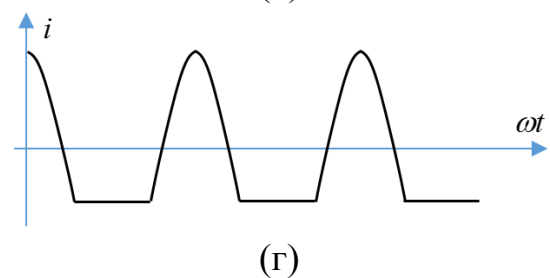
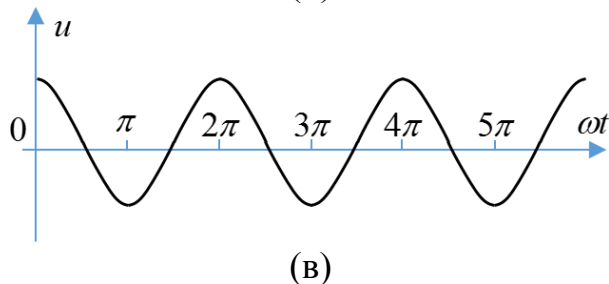
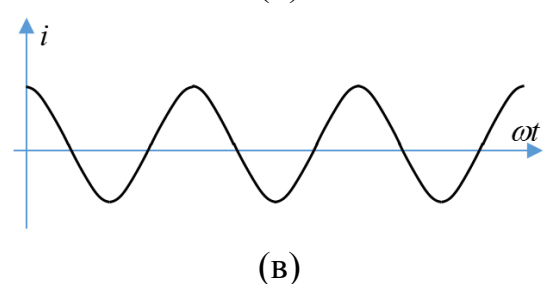
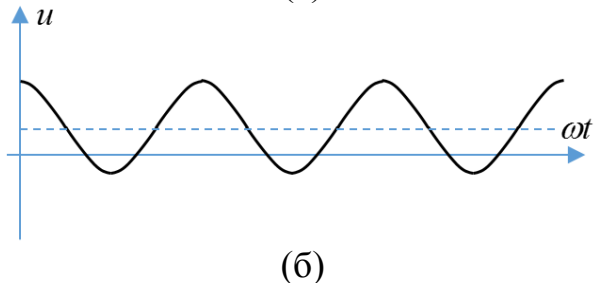
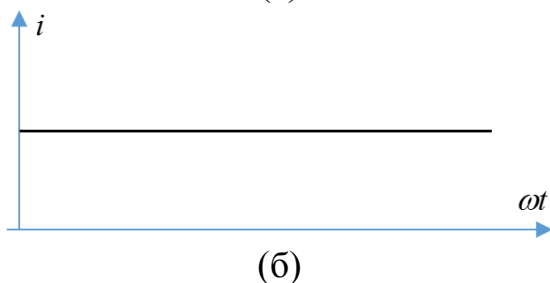
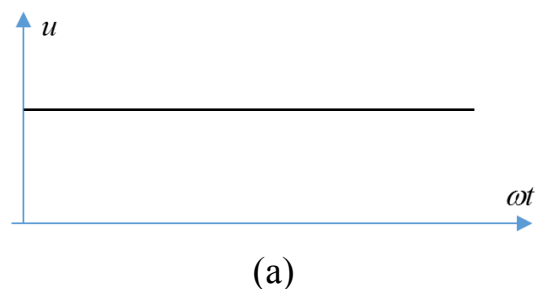
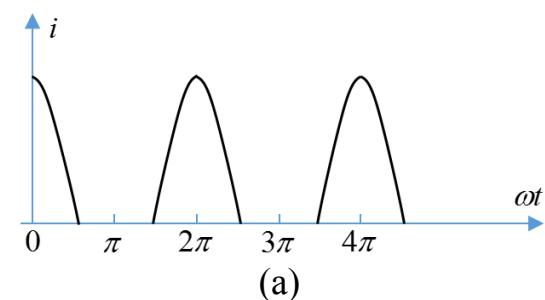


Рис.2.6.

Рис.2.7.

**2.9.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР,  $f_0 = 10$  МГц,  $\Delta f_m = 10$  кГц. Как изменятся напряженность режима, если при  $E_{II}, E_H, R_s, S, Q = const$  индуктивность  $L_3$  увеличили так, что  $L_\Sigma$  возросла в 2 раза?

**2.10.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР,  $f_0 = 20$  МГц,  $\Delta f_m = 25$  кГц,  $C'_3 = \infty$ ,  $C''_3 = 0$ . Как изменятся напряженность режима,  $f_0$ ,  $\Delta f_m$ , если параллельно подсоединить варикап, идентичный первому?

**2.11.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР,  $f_0 = 25$  МГц,  $\Delta f_m = 25$  кГц,  $p_m = 0.5$ . Как изменятся напряженность режима,  $f_0$ ,  $\Delta f_m$ , если произойдет пробой конденсатора  $C'_3$ ?  $C''_3$ ?

**2.12.** В каком соотношении находятся частоты  $f_1, f_2, f_3$ , для которых построены графики  $Q_m(e_m)$  на рис.2.3? Чему равны  $C_{m\varphi}$ ?



**2.13.** По графикам рис.2.8,а,б определить  $|e_{nd}|$ , если напряжение на контуре  $U = 10$  В. Изобразить  $U_{\Omega \max}(P_M)$ .

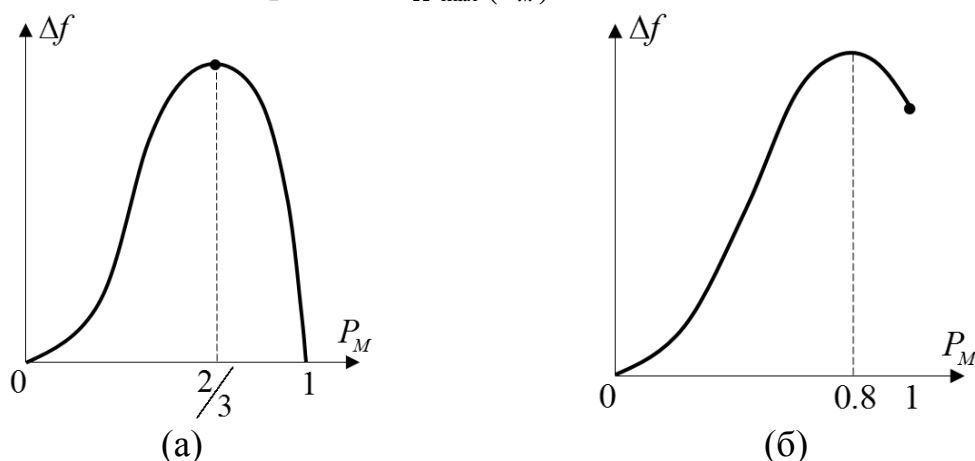


Рис.2.8. Иллюстрации к задаче 2.13

**2.14.** Что можно сказать о соотношении между  $|e_{nd}|$  и  $U$ , если зависимость  $\Delta f(P_M)$  соответствует рис.2.9?

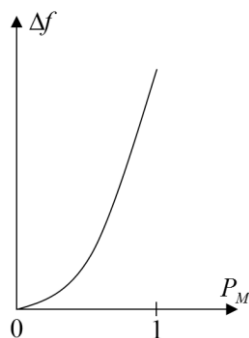


Рис.2.9. Иллюстрация к задаче 2.14

## 2.2. Расчет параметров контура и девиации частоты

Параметры контура УАГ рассчитываются по формулам, приведенным в гл.1. Особенность состоит в том, что их определяют в режиме молчания, когда  $U_{\Omega} = 0$  и частота колебаний  $f = f_0 = f(E_{m0})$ . Кроме того, для реализации оптимального коэффициента включения варикапа в контур  $P_{Mopt}$  появляются дополнительные элементы связи.

### Примеры решения типовых задач

**2.15.** В АГ по схеме рис.2.5:  $L_{\Sigma} = 1.1236$  мкГн;  $k = p = 0.2$ ;  $U_{\varepsilon} = 0.2$  В;  $\lambda_0 = 40$  м. Параметры варикапа:  $C_{m0} = 40$  пФ;  $|e_{nd}| = 20$  В;  $p_M = 0.8$ ;  $\varphi = 0.5$  В. Рассчитать максимальную девиацию частоты  $|\Delta f|_{\max}$ .

#### Решение

Согласно (2.26),  $E_{m0} = -0.5 \cdot 20 = -10$  В. Напряжение ВЧ на варикапе  $U_M = p_M U = p_M U_{\kappa} / p = 4$  В. Из (2.26)  $\Delta E_{M \max} = 0.5 |e_{nd}| - U_M = 6$  В. Для

расчета отклонения частоты можно применить (2.23), поскольку  $\varphi \ll |E_{m0}|$ , но сначала необходимо определить  $C_{\Sigma 0}$ . По известному значению  $L_{\Sigma}$  находим (1.37)  $\rho = \frac{L_{\Sigma} \cdot 10^3}{0.53 \cdot \lambda_0} = 53 \text{ Ом}$ , емкость (1.37)

$$C_{\Sigma 0} = 530 \lambda_0 / \rho = 400 \text{ пФ. Относительные изменения частоты (2.23)}$$

$$|\Delta f|_{\max} / f_0 = 0.25 \cdot 0.64 \cdot \frac{40}{400} \cdot \frac{6}{10} = 0.0096 \text{ и } |\Delta f|_{\max} = 72 \text{ кГц.}$$

**2.16.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР:  $L_1 = 0.106 \text{ мкГн}$ ;  $L_2 = 0.0106 \text{ мкГн}$ ;  $L_3 = 0.4134 \text{ мкГн}$ ;  $\lambda_0 = 20 \text{ м}$ ;  $U_{\kappa} = 4 \text{ В}$ . Параметры варикапа:  $C_M(0) = 556,8 \text{ пФ}$ ;  $|e_{nd}| = 30 \text{ В}$ ;  $m = \varphi = 0.5$ . Рассчитать емкости  $C'_3$ ,  $C''_3$  и  $|\Delta f|_{\max}$  при  $P_{m \text{ opt}}$ .

### Решение

Для определения  $P_{m \text{ opt}}$  сначала находим напряжение на контуре  $U = U_{\kappa} / p$ , где  $p = L_1 / L_{\Sigma} = 0.106 / 0.53 = 0.2$  и  $U = 4 / 0.2 = 20 \text{ В}$ . Поскольку  $|e_{nd}| < 3U$ , согласно (2.27),  $P_{m \text{ opt}} = U_M / U = |e_{nd}| / 3U = 0.5$ ;  $U_M = 10 \text{ В}$ .

Коэффициент включения варикапа к контуру  $p_m$  определяется выбором емкостей  $C'_3$  и  $C''_3$ :

$$p_m = C_{\Sigma 0} / (C''_3 + C_{m0}); \quad (2.31)$$

$$1 / C_{\Sigma 0} = 1 / C'_3 + 1 / (C''_3 + C_{m0}); p_m = C'_3 / (C'_3 + C''_3 + C_{m0}). \quad (2.32)$$

Емкость контура  $C_{\Sigma 0}$  определяем по характеристическому сопротивлению  $\rho$ , а из (1.37)  $\rho = 50 \text{ Ом}$ ;  $C_{\Sigma 0} = 212 \text{ пФ}$ .

По известным  $P_m$  и  $C_{\Sigma 0}$  находим  $C'_3 + C_{m0} = C_{\Sigma 0} / P_m = 0.424 \text{ пФ}$ .

Выбираем  $E_{m0} = -0.5 |e_{nd}| = -15 \text{ В}$ , затем с помощью (2.1) рассчитываем  $C_{m0} = 100 \text{ пФ}$ ;  $C''_3 = 324 \text{ пФ}$ . Из (2.32)

$$1 / C'_3 = 1 / C_{\Sigma 0} - 1 / (C''_3 + C_{m0}) = 1 / C_{\Sigma 0} - P_m / C_{\Sigma 0} = 0.5 / C_{\Sigma 0}; C'_3 = 424 \text{ пФ.}$$

Максимально допустимое изменение запирающего напряжения (2.26)

$$\Delta E_{m \text{ max}} = 0.5 |e_{nd}| - U_M = 5 \text{ В,} \quad \text{а} \quad \text{из} \quad (2.23)$$

$$|\Delta f|_{\max} / f_0 \cong 0.00983; |\Delta f|_{\max} = 147.4 \text{ кГц.}$$

**2.17.** Как изменятся напряженность режима АГ,  $f_0$ ,  $|\Delta f|_{\max}$ , если в условиях задачи 2.16 при  $L_1, L_2, L_3, C''_3, C_{m0}, E_{II}, E_n, E_{m0}, S, Q = \text{const}$  емкость  $C'_3$  увеличить в 2 раза? Уменьшить в 2 раза?

### Решение

Емкость  $C'_3 = 424 \text{ пФ}$ , при этом  $C_{\Sigma 0} = 212 \text{ пФ}$ ,  $P_m = 0.5 \cdot 1$ . Если  $C_3 = 212 \text{ пФ}$ , то  $C'_{\Sigma 0} = 141.33 \text{ пФ}$ . В результате  $\rho = \sqrt{L_{\Sigma} / C_{\Sigma 0}}$  возрастает,

$R_\kappa$  и  $R_y$  тоже, ПР,  $U \approx 20$  В. Частота  $f'_0 = f_0 \sqrt{C_{\Sigma 0} / C'_{\Sigma 0}} = 18.37$  МГц. Согласно (2.31),  $P'_m = 11/3$ ;  $U'_m = 6.67$  В; из (2.26)  $|\Delta E'_m|_{\max} = 8.33$  В. Применим (2.23):

Было  $|\Delta f|_{\max} / f_0 = 0.25 \cdot 0.25 \cdot 100 \cdot 5 / 212 \cdot 15$ ;

Стало  $|\Delta f'|_{\max} / f_0 = 0.25 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 8.33 / 9 \cdot 141.33 \cdot 15$ , из их соотношения  $|\Delta f'|_{\max} = |\Delta f|_{\max} \cdot f_0 \cdot 4 \cdot 212 \cdot 8.33 / f_0 \cdot 9 \cdot 141.3 \cdot 5 \cong 200$  кГц.

2. Если  $C'_3 = 424 \cdot 2 = 848$  пФ, то  $C_{\Sigma 0} = 282,67$  пФ, увеличение  $C_{\Sigma 0}$  приведет к уменьшению  $\rho, R_\kappa, R_y, \text{ПР}, U < 20$  В,  $p''_m = \frac{3}{2}$ ,  $U''_m < 13$  В,

$|\Delta E''_m|_{\max} \approx 2$  В. Частота  $f''_0$  уменьшается,

$$f''_0 = f_0 \sqrt{\frac{212}{282,6}} \cong 13 \text{ МГц. } |\Delta f''|_{\max} > 147,4 \cdot \frac{13}{15} \cdot \frac{16}{9} \cdot \frac{212}{282,6} \cdot \frac{2}{5} = 68 \text{ кГц.}$$

Девияция может быть больше, чем 68 кГц, за счет уменьшения  $U$  по сравнению с  $U = 20$  В.

**2.18.** АГ по схеме рис.2.4:  $C'_3 = 200$  пФ;  $C''_3 = 150$  пФ;  $C_{m0} = 50$  пФ;  $\Delta C_m = 8$  пФ;  $\rho = 0.4$ ;  $k = 0.2$ ;  $E_{m0} = -20$  В. Определить  $|\Delta f_m| / f_0, f_0, U_\Omega$ .

### Решение

Для расчета относительного изменения частоты применим (2.12) с учетом (2.15)

$$|\Delta f_m| / f_0 = 0.25 p_m^2 \frac{\Delta C_m}{C_{\Sigma 0}}. \quad (2.33)$$

В (2.33) известно только  $\Delta C_m$ , необходимо определить  $p_m$  и  $C_{\Sigma 0}$ .

Расчет выполним следующим образом. Характеристическое сопротивление контура (1.38)

$$\rho = 1 / \omega_0 C_{\Sigma 0} = 1 / \omega_0 C_3 + 1 / \omega_0 C_2 + 1 / \omega_0 C_1 = 1 / \omega_0 C_3 + \frac{1+k}{\omega_0 C_1}, \text{ но по (1.18)}$$

$$\rho = C_1 / C_\Sigma \text{ и } 1 / \omega_0 C_1 = p \rho, \text{ поэтому } \rho = 1 / \omega_0 C_3 + p \rho (1+k);$$

$$\rho = 1 / \omega_0 C_3 [1 - p(1+k)]; C_{\Sigma 0} = C_3 [1 - p(1+k)]. \quad (2.34)$$

Здесь

$$1 / C_3 = 1 / C'_3 + 1 / (C''_3 + C_{m0}); C_3 = 100 \text{ пФ; } C_{\Sigma 0} = 52 \text{ пФ.}$$

$$\text{Частота } f_0 = 1 / 2\pi \sqrt{L_3 C_{\Sigma 0}} \cong 30 \text{ МГц.}$$

Коэффициент включения варикапа (2.31)  $p_m = 0.26$ , а из (2.33)  $|\Delta f_m| / f_0 = 0.0052$ .

Но относительные вариации частоты определяются также (2.28). Сравнивая (2.33) и (2.38), получим

$$\Delta C_m / C_{m0} = 0.5 U_\Omega / -E_{m0},$$

отсюда  $U_{\Omega} = 2(-E_{m0})\Delta C_m / C_{m0} = 6.4 \text{ В}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**2.19.** По условиям задачи 2.15 определить  $P_{m \text{ opt}}$ . Как его реализовать, сохранив  $f_0$  и режим АГ? Каким станет  $|f_0|_{\max}$ ?

**2.20.** По условиям задачи (2.16) проверить неравенства (2.19), (2.11).

**2.21.** Как изменятся напряженность режима АГ,  $f_0, |\Delta f|_{\max}$ , если в условиях задачи 2.16 при  $L_1, L_2, L_3, C'_3, C''_3, C_{m0}, E_{II}, E_n, S, Q, R_3 = \text{const}$  емкость  $C''_3$  в 2 раза уменьшить? Увеличить?

**2.22.** В условиях задачи 2.16 КР реализуется, если  $E_n - E' = 0.4 \text{ В}$ . Как изменятся напряженность режима АГ,  $f_0, |\Delta f|_{\max}$ , если в условиях задачи 7.17 при  $L_1, L_2, L_3, C'_3, C''_3, C_{m0}, E_{II}, E_{m0}, S, Q, R_3 = \text{const}$  сделать  $E_n - E' = 0.2 \text{ В}$ ?  $0.6 \text{ В}$ ? Как можно увеличить  $|\Delta f|_{\max}$ , сохранив  $f_0 = 15 \text{ МГц}$ ?

**2.23.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР:  $k = 0.1$ ;  $C_1 = 1.06 \text{ нФ}$ ;  $L_3 = 0.53 \text{ мкГн}$ ;  $\lambda_0 = 20 \text{ м}$ ;  $U_e = 0.5 \text{ В}$ . Параметры и режим варикапа:  $C_{m0} = 60 \text{ пФ}$ ;  $E_{m0} = 0.5e_{m0} = -22.5 \text{ В}$ . Рассчитать  $p_{m \text{ opt}}, C'_3, C''_3, |\Delta f|_{\max}$ .

**2.24.** В АГ по схеме рис.2.4:  $U_e = 0.4 \text{ В}$ ;  $k = 0.1$ ;  $p = 0.4$ ;  $|e_{n0}| = 24 \text{ В}$ .

Определить  $P_{m \text{ opt}}, U_{\Omega \text{ max}}$ .

**2.25.** В АГ по схеме рис.2.5:  $U = 8 \text{ В}$ ;  $U_m = 4 \text{ В}$ ;  $\rho = 106 \text{ Ом}$ ;  $\lambda = 20 \text{ м}$ ;  $C_{m0} = 40 \text{ пФ}$ ;  $E_{m0} = 0.5e_{ng} = -10 \text{ В}$ . Принять  $\varphi = 0$ . Определить  $|\Delta f|_{\max}$ .

**2.26.** В АГ по схеме рис.2.5:  $C'_3 = \infty$ ;  $\rho = 53 \text{ Ом}$ ;  $\lambda_0 = 40 \text{ м}$ ;  $U = 6 \text{ В}$ ;  $C_{m0} = 40 \text{ пФ}$ ;  $E_{m0} = -0.5e_{ng} = -10 \text{ В}$ . Принять  $\varphi = 0$ . Определить  $|\Delta f|_{\max}$ .

**2.27.** В АГ по схеме рис.2.5:  $\rho = 53 \text{ Ом}$ ;  $\lambda_0 = 40 \text{ м}$ ;  $U = 6 \text{ В}$ ;  $E_{m0} = 0.5e_{ng} = -12 \text{ В}$ ;  $|\Delta f_m|_{\max} / f_0 = 0.015$  при  $P_m = P_{m \text{ opt}}$ . Рассчитать  $P_{m \text{ opt}}, C'_3, C''_3, C_{m0}$ .

**2.28.** В АГ по схеме рис.2.5:  $C'_3 = 200 \text{ пФ}$ ;  $C''_3 = C_{m0} = 100 \text{ пФ}$ ;  $E_{m0} = 0.5e_{ng} = -10 \text{ В}$ ;  $U_{\Omega \text{ max}} = 3 \text{ В}$ . Рассчитать  $p_m, U, |\Delta f_m|_{\max} / f_0$ .

**2.29.** Как изменятся  $p_m, |\Delta f_m|_{\max} / f_0$ , если в условиях задачи 2.28 при  $L_2, C'_3, C''_3, E_{II}, E_n, E_{m0}, S, Q, R_3, U_{\Omega} = \text{const}$  параллельно включить варикап, идентичный первому?

**2.30.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР:  $\lambda_0 = 50 \text{ м}$ ;  $\rho = 530 \text{ м}$ ;  $p_m = 1$ ;  $U_{\Omega} = 3 \text{ В}$ ;  $|\Delta f_m| / f_0 = 0.00625$ ;  $E_{m0} = -12 \text{ В}$ . Как изменятся напряженность режима и  $|\Delta f_m|$ , если при  $E_{II}, E_n, E_{m0}, S, Q, R_3, L_2, U_{\Omega} = \text{const}$  емкость  $C''_3$  уменьшить на  $250 \text{ пФ}$ ?

**2.31.** В АГ по схеме рис.2.4:  $\lambda_0 = 50$  м;  $\rho = 530$  м;  $p_m = 0.5$ ;  $U_{\Omega \max} = 4$  В;  $E_{m0} = -16$  В;  $\Delta C_m = 25$  пФ. Рассчитать  $U, U_m, |\Delta f|_{\max}$ .

**2.32.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР:  $\lambda_0 = 25$  м;  $\rho = 53$  Ом;  $U = 20$  В;  $E_{m0} = -15$  В;  $U_{\Omega \max} = 5$  В;  $|\Delta f_m|_{\max} / f_0 = 0.01$ . Рассчитать  $p_m, C_{m0}, C_3''$ .

Как изменятся напряженность режима,  $\lambda_0, |\Delta f_m|_{\max} / f_0$ , если при  $C_1, C_2, C_3, E_{II}, E_H, E_{m0}, S, R_3, Q, U_{\Omega \max} = const$  индуктивность  $L_3$  увеличить в 2 раза? Уменьшить в 2 раза?

**2.33.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР:  $p_m = 0.5$ ;  $C_{m0} = 0.4C_{\Sigma 0}$ ;  $E_{m0} = -10$  В;  $U_{\Omega \max} = 4$  В. Рассчитать  $|\Delta f_m|_{\max} / f_0$ .

Как изменятся напряженность режима и  $|\Delta f_m|_{\max} / f_0$ , если при  $E_{II}, E_{m0}, U_{\Omega \max}, R_3, S, Q, C_{\Sigma 0} / L_3 = const$  напряжение  $U_m$  за счет уменьшения  $E_H$  упало в 2 раза?

### 2.3. Статические модуляционные характеристики

При решении задач СМХ  $\Delta f (\Delta E_m)$  приближенно считаются линейными (2.22), (2.23) с отрицательным наклоном, проходящими через точку молчания  $E_{m0}$  с крутизной  $S_m$  (2.29) или  $\sigma_m$  (2.30). Размах по оси ординат  $\Delta f_{\max}$ , а по оси абсцисс  $\Delta E_{m \max}$  (рис.2.10).

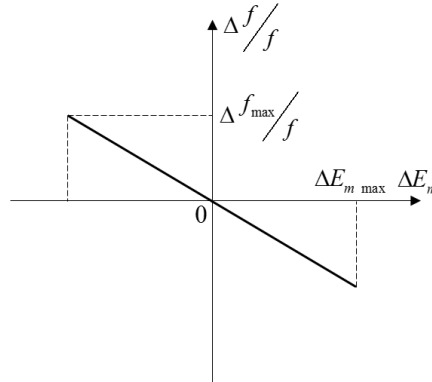


Рис.2.10. Статическая модуляционная характеристика АГ

#### Примеры решения типовых задач

**2.34.** АГ по схеме рис.2.5 работает в ПР:  $p_m = 0.5$ ;  $f_0 = 5$  МГц;  $U_m = 5$  В;  $C_{m0} = 50$  пФ;  $C_3 = 200$  пФ;  $E_{m0} = 0.5e_{n0} = -20$  В;  $m = 0.5$ ;  $\varphi = 0.5$  В. Определить  $S_m$  и  $|\Delta f|_{\max}$ , считая, что при вариации  $E_m$  режим АГ сохраняется ПР. Как изменятся  $S_m$  и  $|\Delta f|_{\max}$ , если выбрать  $E_{m0} = -10$  В?

**Решение**

Согласно (2.39), для расчета  $S_m$  сначала следует найти  $C_{\Sigma 0}$ . Поскольку  $p_m = 0.5$ , то из (2.31)  $C_{\Sigma 0} = 0.5(C_{m0} + C_3'')$ , а  $C_{m0} + C_3'' = C_3'$ ,  $C_{\Sigma 0} = 100$  пФ.  $S_m = 7.8$  кГц/В.

$$|\Delta f|_{\max} = S_m |\Delta E_m|_{\max} = S_m [0.5|e_{nd}| - U_m] = 117 \text{ кГц}.$$

При вариации  $E_{m0}$  меняются емкость  $C_{m0}$  (2.1) и напряжение

$$\Delta E_{m \max}. \text{ Из (7.1) } C_{m0}' / C_{m0} = \sqrt{\frac{\varphi - E_{m0}}{\varphi - E_{m0}'}} = 1.397; C_{m0}' = 1.397 \cdot C_{m0} \cong 70 \text{ пФ};$$

емкость  $C_3' = 150$  пФ;  $C_3' + C_{m0}' = 220$  пФ;  $C_{\Sigma 0}' \cong 105$  пФ;

$$p_m' = 0.476; U_m' = p_m' U = 4.76 \text{ В};$$

$$f_0' / f_0 = 0.976; f_0' = 0.976 \cdot 5 = 4.88 \text{ МГц};$$

$$S_m' = 0.25 \cdot 0.476^2 \cdot \frac{70}{105} \cdot \frac{4.88 \cdot 10^6}{10} \cong 18.4 \text{ кГц/В}.$$

$$\Delta E_{m \max}' = -E_{m0} - U_m = 5.24 \text{ В}; |\Delta f'|_{\max} = 96.4 \text{ кГц}.$$

**2.35.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР, СМХ приведена на рис.2.10. Как изменяется  $S_m, |\Delta f|_{\max}$ , если при  $C_1, C_2, C_3', C_3'', Q, S, R_y, E_H, E_{II}, E_{m0} = \text{const}$  индуктивность  $L_3$  в 2 раза увеличить? Уменьшить?

**Решение**

Если  $L_3$  увеличить в 2 раза, то  $\rho, R_k, R_y$  увеличатся в  $\sqrt{2}$  раз, режим станет ПР,  $U \approx \text{const}, U_m \approx \text{const}$ . Поскольку  $p_m, C_{\Sigma 0}, C_{m0}, E_{m0} = \text{const}$ , то, согласно (2.30),  $\sigma_m = \text{const}, |\Delta E_m|_{\max}$  тоже не меняется, СМХ на рис.2.10 не изменится. Из (2.29) следует, что  $S_m' = \sigma_m \cdot f_0' = \sigma_m \cdot f_0 / 2$  уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз,  $|\Delta f|_{\max} = S_m' \cdot |\Delta E_m|_{\max}$  — уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз.

Если  $L_3$  уменьшить в 2 раза, то  $\rho, R_k, R_y$  уменьшаются в  $\sqrt{2}$  раз, режим станет НР,  $|\Delta E_m|_{\max}$  увеличивается, поскольку  $U_m$  падает, поэтому СМХ на рис.2.10 можно продолжить,  $\sigma_m = \text{const}$ , частота  $f_0''$  увеличивается в  $\sqrt{2}$  раз, поэтому  $S_m''$  увеличивается в  $\sqrt{2}$  раз, а  $|\Delta f|_{\max}$  несколько больше, чем в  $\sqrt{2}$  раз.

### Задачи для самостоятельного решения

**2.36.** АГ по схеме рис.2.7 работает в КР:  $U = 20$  В;  $C_3 = 300$  пФ;  $C_{\Sigma 0} = 160$  пФ;  $C_{m0} = 100$  пФ;  $f_0 = 5$  МГц;  $E_{m0} = -12.5$  В. Рассчитать  $S_m$  и  $|\Delta f|_{\max}$ . Как изменятся  $S_m$  и  $|\Delta f|_{\max}$ , если в АГ увеличить  $E_H$ ? Уменьшить  $(E_H - E')$  в 2 раза?

**2.37.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР:  $C_{\Sigma 0} = 400$  пФ;  $C_3' = 800$  пФ;  $C_{m0} = 200$  пФ;  $p_m = 0.5$ ;  $E_{m0} = -12.5$  В;  $f_0 = 5$  МГц. Рассчитать  $S_m$ . Как изменится  $S_m$ , если при  $E_{II}, E_H, E_{m0}, R_9, S, L_2, C_3' = const$  емкость  $C_3''$  в 2 раза увеличить? Уменьшить?

**2.38.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР:  $C_3 = 1$  нФ;  $C_3'' = 0.75$  нФ;  $C_{m0} = 0.25$  нФ;  $E_{m0} = -12.5$  В;  $\sigma_m = 0.0025$  1/В. Как изменится  $\sigma_m$ , если при  $L_2, C_3'', Q, S, R_9, E_{m0}, E_H, E_{II} = const$  емкость  $C_3'$  в 2 раза уменьшить? Увеличить?

**2.39.** АГ по схеме рис.2.5 работает в КР:  $\sigma_m = 0.002$  1/В.

Как изменится  $\sigma_m$ , если при  $C_3', C_3'', Q, S, R_9, E_H, E_{II}, E_{m0} = const$

- 1)  $L_1$  увеличили? Уменьшили?  $L_2, L_3 = const$ ;
- 2)  $L_2$  увеличили? Уменьшили?  $L_1, L_3 = const$ ;
- 3)  $L_3$  увеличили? Уменьшили?  $L_1, L_2 = const$ .

**2.40.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР:  $U_m = 5$  В;  $E_{m0} = -10$  В. При снятии СМХ получили  $|\Delta f|_{\max} / f_0 = 0.005$ . Как изменится  $|\Delta f|_{\max} / f_0$ , если  $E_{II}$  уменьшить в 2 раза?

**2.41.** АГ по схеме рис.2.4 при снятии СМХ работал в НР  $U_m = 2$  В;  $E_{m0} = -10$  В;  $|\Delta f|_{\max} = 50$  кГц. Как изменится  $|\Delta f|_{\max}$ , если  $(E_H - E')$  увеличили в 2 раза, а режим остался НР?

**2.42.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР:  $C_2 = 1$  нФ;  $k = 0.5$ ;  $f_0 = 10$  МГц. СМХ приведена на рис.2.10. Как изменится СМХ, если емкость  $C_2$  увеличить до 2 нФ? Уменьшить до 0.5 нФ? Емкость  $C_1$  в 2 раза увеличить? Уменьшить? Во всех случаях вариации  $C_1$  или  $C_2$  емкостью  $C_3$  восстанавливается частота колебаний  $f_0 = 10$  МГц, а  $L_3, C_3'', Q, S, R_9, E_H, E_{II}, E_{m0} = const$ .

**2.43.** В УАГ по схеме рис.2.5:  $p_m = 1$ ;  $S_m = 5$  кГц/В у варикапа  $m = 0.5$ ; принять  $\varphi = 0$ . Как изменится  $S_m$ , если  $|E_{m0}|$  увеличить в 2 раза и путем вариации  $C_3''$  восстановить частоту  $f_0$  до прежнего значения?

**2.44.** В УАГ по схеме рис.2.5:  $p_m = 1$ ;  $S_m = 5$  кГц/В. Как изменится  $S_m$ , если  $L_2$  и  $C_{\Sigma 0}$  увеличить в 2 раза? Уменьшить в 2 раза?  $E_H, E_{II}, E_{m0}, Q, S, R_9 = const$ .

**2.45.** АГ по схеме рис.2.4 работает в КР,  $S_m = 10$  кГц/В за счет увеличения сопротивления  $R_9$  напряжение  $U_m$  уменьшилось в 2 раза. Как изменится  $S_m$ , если  $E_H, E_{II}, E_{m0}, Q, S, C_{\Sigma 0}, L_3 = const$ ?

**2.46.** В контур АГ по схеме рис.2.5 включена емкость  $C$ , как показано на рис.2.11, где ради простоты не изображены источники питания и

блокировочные элементы. Предлагается это сделать самостоятельно. Какой электрод БТ заземлен по ВЧ?

**2.47.** В АГ по схеме рис.2.11:  $p_m = 0.4$ ;  $C'_3 = 300$  пФ;  $C_{m0} = 100$  пФ;  $S_m = 10$  кГц/В;  $f_0 = 10$  МГц. Как изменятся  $S_m, C'_3, C$ , если емкость  $C'_3$  уменьшили так, что  $U_m$  упало в 2 раза, а емкостью  $C$  восстановили частоту  $f_0 = 10$  МГц? Как изменится  $S_m$ , если путем изменения  $C$  при  $C'_3, C''_3, C_{m0} = \text{const}$  частота  $f_0$  стала 15 МГц? Как изменится  $S_m$ , если один варикап заменить двумя идентичными, включенными параллельно, если при  $C'_3, C''_3 = \text{const}$  емкостью  $C$  восстановили  $f_0 = 10$  МГц?

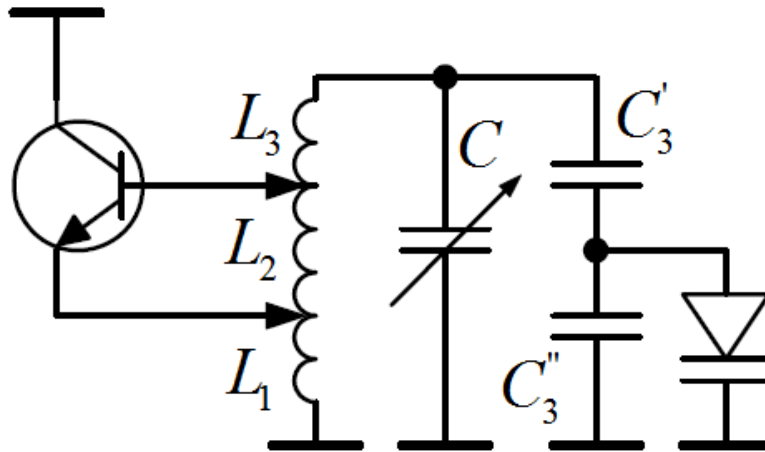


Рис.2.11. Иллюстрация к задаче 2.47

## 2.4. Паразитная амплитудная модуляция

За счет наличия потерь в варикапе (рис.2.2,а,б) при изменении напряжения на переходе происходит вариация сопротивления, вносимого в контур АГ, что приводит в свою очередь к изменению его резонансного сопротивления  $R_k$ , а следовательно,  $R_y$  и при фиксированных  $E_n, E_h, R_9$  — амплитуды колебаний  $U_6, U_k, U, U_m$ . В процессе модуляции напряжением  $U_\Omega$  одновременно с частотной наблюдается амплитудная модуляция, которая является паразитной, поскольку приводит к нежелательным искажениям.

### Задачи для самостоятельного решения

**2.48.** По СМХ  $\Delta f, U_k(\Delta E_m)$ , приведенным на рис.2.12, изобразить временные зависимости  $\Delta f, U_k(\Omega t)$  для  $U_\Omega = 5 \cos \Omega t$ . Какое из сопротивлений автосмещения  $R_9$  больше, если



$E_n, E_n, E_{m0}, Q, S, k, R_k = \text{const}$ ? Для обоих значений сопротивлений  $R_3$  рассчитать коэффициент паразитной АМ,  $m$ .

**2.49.** Каким следует выбрать  $U_\Omega$ , чтобы для каждого  $R_3$  на рис.2.12 реализовать  $m = 2\%$ ? Определить  $|\Delta f_m|_{\max}$  для каждого из  $R_3$  при этом  $m$ .

**2.50.** АГ по схеме рис.2.5 работает в НР:  $C'_3 = \infty$ ;  $C''_3 = 0$ . Влиянием какого сопротивления  $r$  или  $R$  в эквивалентной схеме рис.2.2, а объясняется зависимость  $U_k(\Delta E_m)$  на рис.2.12?

**2.51.** Как следует выбрать напряженность режима АГ, чтобы в условиях задачи 2.48 при  $U_\Omega = 5$  В сохранить  $|\Delta f|_{\max}$ , а  $m$  уменьшить до 2%?

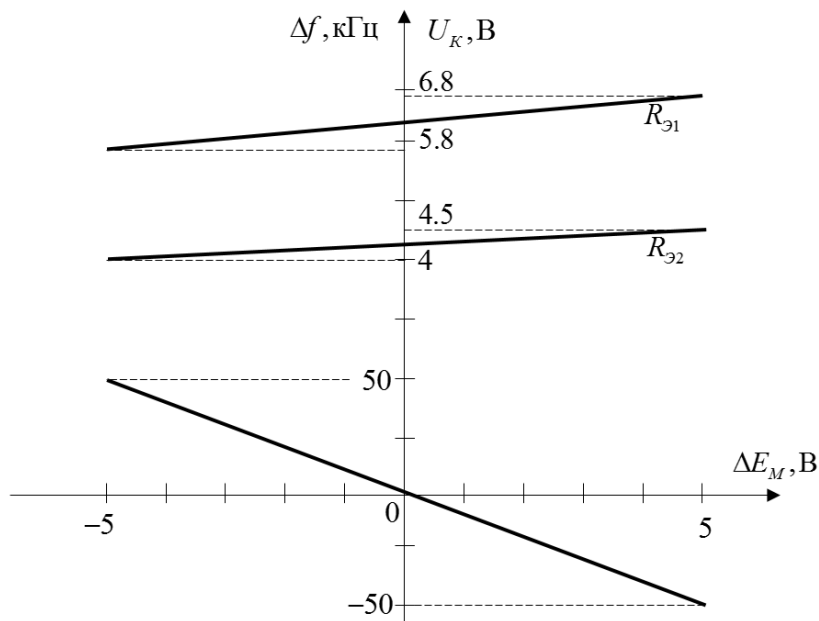


Рис.2.12. Иллюстрация к задаче 2.50

### 3. НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ ОДНОКОНТУРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

При расчете показателей стационарного режима АГ и параметров контура не учитывали фазу средней крутизны коллекторного тока  $\varphi_s$  и коэффициента обратной связи  $\varphi_{oc}$ , поскольку их вклад незначителен. Однако оценка и расчет неустойчивости частоты относительно наибольших ее изменений вынуждает ввести  $\varphi_c$  и  $\varphi_{oc}$ .

Представим комплексные крутизну коллекторного тока  $\dot{S}_1$ , коэффициент обратной связи  $\dot{k}$  и сопротивление контура  $Z_\kappa$  в показательной форме:

$$\dot{S}_1 = S_1 e^{j\varphi_s}; \dot{k} = k e^{j\varphi_{oc}}; Z_\kappa = Z_\kappa e^{j\varphi_\kappa} \quad (3.1)$$

и подставим в комплексное уравнение стационарного режима (1.9):

$$S_1 e^{j\varphi_s} \cdot k e^{j\varphi_{oc}} \cdot Z_\kappa e^{j\varphi_\kappa} = 1.$$

Оно распадается на два:

$$S_1 k Z_\kappa = 1, \quad (3.2)$$

$$\varphi_s + \varphi_{oc} + \varphi_\kappa = 0. \quad (3.3)$$

Частоту колебаний в АГ определяет контур. Приблизительно она равна его собственной частоте ( $f \approx f_0$ ), а более точно находится из (3.3), где от частоты  $f$ , вернее даже от ее небольших отклонений  $\Delta f = f - f_0$ , зависит фаза контура в цепи коллектора  $\varphi_\kappa$ :

$$\operatorname{tg} \varphi_\kappa = -\alpha \approx -2Q\Delta f / f_0, \quad (3.4)$$

$$\Delta f = f - f_0. \quad (3.5)$$

Из (3.3)

$$\varphi_\kappa = -(\varphi_s + \varphi_{oc}); \operatorname{tg} \varphi_\kappa = -\operatorname{tg}(\varphi_s + \varphi_{oc}), \quad (3.6)$$

а согласно (3.4):

$$\Delta f / f_0 = -\operatorname{tg} \varphi_\kappa / 2Q = 0.5 \operatorname{tg}(\varphi_s + \varphi_{oc}), \quad (3.7)$$

$$\delta = 1 / Q. \quad (3.8)$$

Для небольших  $\varphi_s + \varphi_{oc}$ ,  $\operatorname{tg}(\varphi_s + \varphi_{oc}) \approx \varphi_s + \varphi_{oc}$  и (8.7)

$$\Delta f / f_0 \approx 0.5\delta(\varphi_s + \varphi_{oc}), \quad (3.9)$$

а частота колебаний

$$f = f_0 [1 + 0.5\delta(\varphi_s + \varphi_{oc})]. \quad (3.10)$$

Поправка к собственной частоте контура

$$\Delta f = 0.5 f_0 \delta (\varphi_s + \varphi_{oc}). \quad (3.11)$$

тем меньше, чем меньше затухание контура  $\delta$  или чем больше крутизна его фазовой характеристики (рис.3.1,а).

Факторы, влияющие на частоту колебаний, называются дестабилизирующими (ДФ). К ним относятся изменения внешних условий работы (температуры, влажности, давления и др.), питающих напряжений и времени, с которым связаны необратимые процессы изменения параметров БТ и деталей схемы (старение).

ДФ влияют на частоту колебаний по двум каналам: на фазы  $\varphi_s, \varphi_{oc}$  (рис.3.1,а) и на собственную частоту контура  $f_0$  (рис.3.1,б). Частота  $f_0$  определяется как индуктивностями катушек и емкостями конденсаторов контура, так и междуэлектродными емкостями БТ, индуктивностями его выводов, а также емкостями и индуктивностями монтажа.

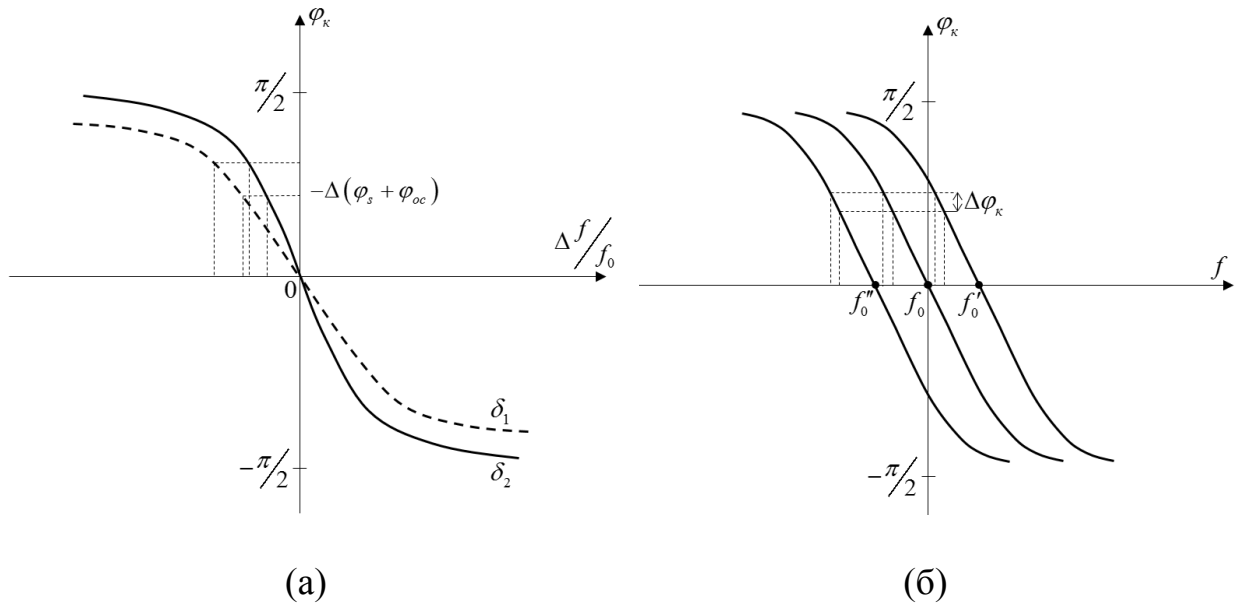


Рис.3.1. Зависимости фаз  $\varphi_s, \varphi_{oc}$  от  $\Delta f / f_0$  (а) и  $f$  (б)

Оценим значения  $\varphi_s$  и  $\varphi_{oc}$ . Поскольку  $\Delta f / f_0 \ll 1$ , то и  $\varphi_{oc}$  можно рассчитывать на частоте  $f_0$ . Комплексная крутизна, усредненная за период колебаний:

$$\dot{S}_1 = S\gamma_1(\theta) / (1 + j\omega\tau), \quad (3.12)$$

ее фаза

$$tg\varphi_s = -\omega\tau_s = -\omega_0\tau_s = -f_0 / f_s; f_s = f_{zp} / Sr_{\bar{o}}, \quad (3.13)$$

$$tg\varphi_s = -f_0 Sr_{\bar{o}} / f_{zp} = -\psi Sr_{\bar{o}}, \psi = f_0 / f_{zp}. \quad (3.14)$$

Если  $tg\varphi_s \ll 1$ , то

$$\varphi_s = -\psi Sr_{\bar{o}}; \varphi_s < 0. \quad (3.15)$$

Фаза коэффициента обратной связи обусловлена наличием потерь в  $Z_2, Z_3$  (рис.1.1). Основное влияние оказывает учет входного сопротивления БТ ( $R_{ex}$  на рис.3.2,а):

$$tg\varphi_{oc} \cong kX_3 g_{ex} = kX_3 / R_{ex}. \quad (3.16)$$

В НР входное сопротивление [2]

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{в}} / I_{\text{в1}} = h_{21\text{э}} / \gamma_1(\theta), \quad (3.17)$$

а из уравнения стационарного режима АГ на безынерционном БТ

$$1 / S \gamma_1(\theta) = R_y; R_{\text{вх}} = R_y h_{21\text{э}} \quad (3.18)$$

и

$$\text{tg} \varphi_{\text{oc}} = k X_3 / R_y h_{21\text{э}}. \quad (3.19)$$

Для  $\text{tg} \varphi_{\text{oc}} \ll 1$

$$\varphi_{\text{oc}} \approx k X_3 / R_y h_{21\text{э}}. \quad (3.20)$$

Для АГ по схеме ЕТ сопротивление  $X_3 > 0, \varphi_{\text{oc}} > 0$ , а для ИТ  $X_3 < 0, \varphi_{\text{oc}} < 0$ . Поскольку  $\varphi_s < 0$ , то в схеме ЕТ возможно некоторое самофазирование.

Фаза средней крутизны  $\varphi_s$  (3.13) зависит от выбора типа БТ. Если  $f_0 \leq 0.1 f_{\text{ср}}, S = 0.1 - 0.2 \text{ А/В}, r_{\text{б}} = 20 - 100 \text{ Ом}$ , то  $\text{tg} \varphi_s \leq -(0.2 - 2)$ . Фаза коэффициента обратной связи (3.19) определяется параметрами контура  $(k, X_3, R_y)$ , БТ  $(h_{21\text{э}})$ , режима  $(R_{\text{вх}})$ . Обычно  $k = 0.1 - 0.5$ ;  $X_3 = p \rho (1 + k)$ ;

$p = 0.2 - 0.5$ ;  $Q = 50 - 100$ ;  $h_{21\text{э}} = 20 - 100$ ;  $\varphi_{\text{oc}} = (2 - 5) \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ . Обычно  $|\varphi_s| > |\varphi_{\text{oc}}|$ . Если  $|\varphi_s| > 0.5$ , следует при расчете стационарного режима учитывать модуль крутизны

$$|\dot{S}_1| = S \gamma_1(\theta) / \sqrt{1 + (f_0 / f_s)^2}. \quad (3.21)$$

Иногда для компенсации фазы средней крутизны включают фазирующую реактивность  $X_{\phi}$  (рис.3.2,б). В этом случае фаза и модуль коэффициента обратной связи

$$\text{tg} \varphi_{\text{oc}} = (k^{\circ} X_3 - X_{\phi}) g_{\text{вх}}; \kappa = k^{\circ} / R_{\text{вх}} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi_{\text{oc}}}, \quad (3.22)$$

$$k^{\circ} = X_2 / X_1. \quad (3.23)$$

Для реализации полного фазирования, когда

$$\varphi_{\kappa} = -(\varphi_s + \varphi_{\text{oc}}) = 0, \varphi_{\text{oc}} = -\varphi_s, \quad (3.24)$$

$$X_{\phi} = k^{\circ} X_3 - \psi r_{\text{б}} h_{21\text{э}} / \gamma_1(\theta). \quad (3.25)$$

Относительные изменения частоты колебаний от взаимодействия ДФ и старения составляют  $10^{-2} - 10^{-5}$ , поэтому можно оценивать степень их влияния независимо.

Нестабильность частоты за счет вариации реактивных параметров контура

$$\Delta f / f = -0.5 (\Delta C_{\Sigma} / C_{\Sigma} + \Delta L_{\Sigma} / L_{\Sigma}). \quad (3.26)$$

Нестабильность частоты за счет изменений междуэлектродных емкостей входной  $C_{\text{вх}}$ , проходной  $C_{\text{прох}}$ , выходной  $C_{\text{вых}}$

$$\Delta f / f = -p^2 \left[ \Delta C_{\text{вх}} + k^2 \Delta C_{\text{ex}} + (1+k)^2 \Delta C_{\text{нрox}} \right] / 2C_{\Sigma}. \quad (3.27)$$

Нестабильность частоты от изменений фаз  $\varphi_s$  и  $\varphi_{oc}$

$$\Delta f / f = 0.5 \delta (\Delta \varphi_s + \Delta \varphi_{oc}). \quad (3.28)$$

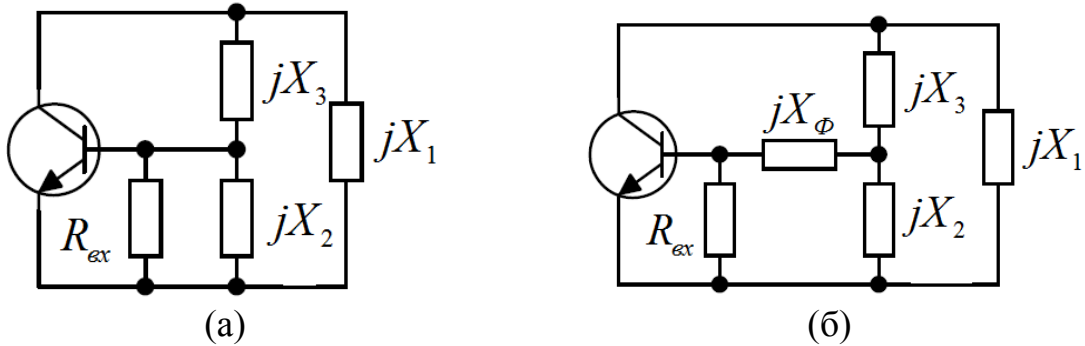


Рис.3.2. Схемы треточечного АГ с отмеченным входным сопротивлением БТ (а) и фазирующей реактивностью (б)

### 3.1. Влияние температуры

От вариаций температуры окружающей среды и за счет саморазогрева от рассеиваемой мощности меняются параметры деталей АГ и БТ.

Степень влияния температуры на изменения любого параметра  $\mu$  оценивается его температурным коэффициентом (ТК)

$$TK\mu = \Delta\mu / \mu \cdot \Delta t, \quad (3.29)$$

$\Delta t$  – диапазон изменения температуры, вызвавший относительную нестабильность параметра  $\mu$ .

Частота колебаний и ее нестабильность определяется в основном реактивными параметрами контура АГ, их температурные коэффициенты

$$TKL = \alpha_L = \Delta L / L \Delta t, \quad (3.30)$$

$$TKC = \alpha_C = \Delta C / C \Delta t. \quad (3.31)$$

Температурный коэффициент собственной частоты контура, согласно (3.26),

$$TKf_0 = \alpha_f = -0.5(\alpha_{L_{\Sigma}} + \alpha_{C_{\Sigma}}). \quad (3.32)$$

### Примеры решения типовых задач

**3.1.** В АГ по схеме рис.1.6:  $L_{\Sigma} = 2.65$  мкГн;  $\alpha_L = 10^{-5}$  1/°C; емкость  $C_3 = 1060$  пФ состоит из двух конденсаторов, включенных параллельно:  $C'_3 = 265$  пФ;  $\alpha_{C'_3} = -5 \cdot 10^{-5}$  1/°C;  $C''_3 = 795$  пФ;  $\alpha_{C''_3} = 5 \cdot 10^{-5}$  1/°C.

Определить относительную нестабильность собственной частоты контура в диапазоне температур от  $-40$  до  $+50^\circ\text{C}$ .

**Решение**

При параллельном включении  $m$  конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_m,$$

общий температурный коэффициент

$$\alpha_C = (\alpha_{C_1} \cdot C_1 + \alpha_{C_2} \cdot C_2 + \dots + \alpha_{C_m} \cdot C_m) / C. \quad (3.33)$$

$$\alpha_{C_3} = (-5 \cdot 10^{-5}) \cdot 265 / 1060 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot 795 / 1060 = 2.5 \cdot 10^{-5}. \text{ Согласно (3.32),}$$

$$\alpha_f = -0.5 \cdot (1 + 2.5) \cdot 10^{-5} = -1.575 \cdot 10^{-3}, \Delta f_0 / f_0 = \alpha_f \cdot \Delta t = -1.575 \cdot 10^{-3}.$$

**3.2.** АГ по схеме рис.1.3 работает в НР;  $I_{\kappa 0} = 6 \text{ мА}$ ;  $E_\kappa = 7 \text{ В}$ ;  $\theta = 60^\circ\text{C}$ ; параметры контура:  $Q = 50$ ;  $k = 0.15$ ;  $p = 0.2$ ; параметры БТ:  $f_{cp} = 300 \text{ МГц}$ ;  $r_{\bar{o}} = 65 \text{ Ом}$ ;  $R_{nc} = 0.4 \text{ }^\circ\text{C/мВт}$ ;  $E' = 0.6 \text{ В}$ ;  $\alpha_{E'} = 2 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$ ;  $E_n = \Delta h_{21\bar{o}} / \Delta t = 0.4 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $h_{21\bar{o}} = 72$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ . Известно, что БТ саморазогревается за 5 минут. Рассчитать частоту колебаний в момент включения АГ через 5 минут, если  $f_0 = 6 \text{ МГц}$ .

**Решение**

Поправка к собственной частоте контура (3.11) определяется через  $\varphi_s$  и  $\varphi_{oc}$ . Для их расчета сначала следует найти крутизну коллекторного тока  $S$ , которая зависит от температуры  $t$  и тока  $i_\kappa$ . В [3], [4] рекомендуется вести расчет  $i_\kappa = I_{\kappa 0}$ :

$$S_n = 42.5 I_{\kappa 0} / (1 + 3.66 \cdot 10^{-3} t), \quad (3.34)$$

$$S = h_{21\bar{o}} / (r_{\bar{o}} + r_\beta); r_\beta = h_{21\bar{o}} / S_n. \quad (3.35)$$

Для  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $I_{\kappa 0} = 6 \text{ мА}$ :  $S_n = 0.2376 \text{ А/В}$ ;  $S = 0.1956 \text{ А/В}$ .

Согласно (3.13), (3.14):

$$\text{tg } \varphi_s = -6 \cdot 0.1956 \cdot 65 / 300 = -0.254; \varphi_s \approx -0.25 \text{ рад.}$$

Для нахождения  $\varphi_{oc}$  сначала определим  $X_3 = p\rho(1+k)$ .

Характеристическое сопротивление

$$\rho = P_\kappa / p^2 Q; R_\kappa = R_y / k; R_y = 1 / S \gamma_1(\theta).$$

$$\gamma_1(60^\circ) = 0.196; R_y \approx 26 \text{ Ом}; \rho = 87 \text{ Ом}; X_3 = 20 \text{ Ом.}$$

Из (3.19)  $\text{tg } \varphi_{oc} = 0.15 \cdot 20 / 26 \cdot 72 = 1.6 \cdot 10^{-3}$ ;  $\varphi_{oc} = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$

Относительная поправка к частоте  $f_0$  (8.9) при  $t = 20^\circ\text{C}$ :

$$\Delta f_0 / f_0 = 0.5 \cdot 0.02 \cdot (-0.25 + 0.0016) = -2.484 \cdot 10^{-3}.$$

Мощность, рассеиваемая БТ,

$$P_{pac} = P_0 - P_1, P_0 = I_{\kappa 0} E_\kappa = 42 \text{ мВт}; P_1 = 0.5 I_{\kappa 1} U_\kappa; I_{\kappa 1} = g_1(\theta) I_{\kappa 0} I_{\kappa 0} = 10.8 \text{ мА};$$

$$U_{\kappa} = U_{\varepsilon} / k = I_{\kappa 0} / S U_{\varepsilon} \gamma_0(\theta) k = 1.876 \text{ В}; P_1 \cong 10 \text{ мВт}; P_{pac} \approx 32 \text{ мВт}.$$

Температура перехода БТ возрастает:

$$t_n = t_c + R_{nc} \cdot P_{pac}, \quad (3.36)$$

получаем  $t_n = 20 + 0.4 \cdot 32 = 33^\circ \text{C}$ .

Для  $t'_n = 33^\circ \text{C}$  крутизна  $S'_n = 0.2275 \text{ А/В}$  (полагаем, что

$$I'_{\kappa 0} \approx I_{\kappa 0}; I_{\kappa 0} = 6 \text{ мА}),$$

$$h'_{21\varnothing} = h_{21\varnothing}^0 + \varepsilon_n \cdot \Delta t, \quad (3.37)$$

получаем  $h'_{21\varnothing} = 72 + 0.4 \cdot 13 \approx 77$ , крутизна коллекторного тока  $S' \approx 0.19 \text{ А/В}$ .

Принимаем, что  $f_{zp}, r_{\theta}$  мало меняются от  $t$ ,

$$\operatorname{tg} \varphi'_s = -0.24756; \varphi'_s = -0.243 \text{ рад}; \varphi'_{oc} = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ рад}.$$

Поправка к частоте  $f_0$  после саморазогрева БТ  $\Delta f' / f_0 = -2.415 \cdot 10^{-3}$ .

Изменения частоты за 5 минут  $(\Delta f' - \Delta f^0) - f_0 = 6.9 \cdot 10^{-5}$ .

Абсолютные изменения частоты за 5 минут («выбег»)  $F = 6.9 \cdot 10^{-5} \cdot f_0 = 414 \text{ Гц}$ .

**3.3.** Выяснить, как меняется ток  $I_{\kappa 0}$  при саморазогреве БТ, если в условиях задачи 3.2 сопротивления автосмещения  $R_{\theta} = 0$ ;  $R_y = 200 \text{ Ом}$ .

#### Решение

Из уравнения стационарного режима новое значение угла отсечки  $\theta$  при  $t'_n = 33^\circ \text{C}$ ,  $\gamma_1(\theta') = 1 / S' R_y = 0.202$ ;  $g_1(\theta') \approx 1.8$ ;  $\gamma_0(\theta') = \gamma_1 / g_1 = 0.112$ ;  $\cos \theta' \approx 0.49$ .

По известным  $U_{\varepsilon}, E', S, \theta$  при  $t = 20^\circ \text{C}$  находим  $E_n$ :  $E_n = E' + U_{\varepsilon} [S \gamma_0(\theta) R_y - \cos \theta]$ ;  $E_n = 1.6577 \text{ В}$ .

При увеличении  $t$  уменьшается  $E' [1]$ :

$$E'(t'_n) = E'(t_n^0) - \alpha_{E'} \cdot \Delta t; \quad (3.38)$$

получаем  $E'(33^\circ \text{C}) = 0.6 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 13 = 0.574 \text{ В}$ .

Напряжение  $E_n = \text{const}$  и из (1.34)  $U'_{\varepsilon} = 0.2877 \text{ В}$ ;  $I'_{\kappa 0} = S' U'_{\varepsilon} \gamma_0(\theta') = 6.12 \text{ мА}$ .

Ток  $I_{\kappa 0}$  при увеличении  $t_n$  изменился незначительно, что объясняется влиянием большого сопротивления автосмещения  $R_y = 200 \text{ Ом}$ .

**3.4.** АГ по схеме рис.1.3 работает в НР,  $t_c = 20^\circ \text{C}$ . Параметры контура:  $f_0 = 18 \text{ МГц}$ ;  $Q = 50$ ;  $k = 0.2$ ;  $p = 0.25$ ;  $X_3 = 15 \text{ Ом}$ ;  $R_y = 32 \text{ Ом}$ . Параметры БТ:  $f_{zp} = 300 \text{ МГц}$ ;  $\varepsilon_h = \Delta h / \Delta t = 0.5 \text{ 1/}^\circ \text{C}$ ;  $r_{\theta} = 50 \text{ Ом}$ ;  $h_{21\varnothing} = 100$  при  $t_c = 20^\circ \text{C}$ . После разогрева БТ:  $S = 0.175 \text{ А/В}$ ;  $h_{21\varnothing} = 106$ . Рассчитать поправку к собственной частоте контура  $\Delta f / f_0$ . Как выбрать

фазирующую реактивность  $X_\phi$  (рис.3.2,б), чтобы реализовать  $\Delta f / f_0 = 0$ ?

**Решение**

Согласно (3.14),  $\operatorname{tg} \varphi_s = -0.525$ ;  $\varphi_s = -0.4834$ . Из (3.16)  $\operatorname{tg} \varphi_{oc} = 8.84 \cdot 10^{-4}$ , а поправка (3.9)  $\Delta f / f_0 = -4.825 \cdot 10^{-3}$ .

Выражение (3.35) приближается к виду:  $X_\phi = k^0 X_3 - \Psi r_0 h_{213} S R_y$ ;  $X_\phi = -1777.8 \text{ Ом}$ ;  $C_\phi = 4.97 \text{ пФ}$ .

**Задачи для самостоятельного решения**

**3.5.** Как изменится нестабильность частоты  $\Delta f_0 / f_0$ , если в условиях задачи 3.1 выбрано:  $C'_3 = C''_3 = 530 \text{ пФ}$ ;  $\alpha_{C'_3} = \alpha_{C''_3} = -5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ?

**3.6.** Как в условиях задачи 3.1 следует выбрать емкости  $C'_3$  и  $C''_3$ , чтобы получить  $\Delta f_0 / f_0 = 0$ ?

**3.7.** В условиях задачи 3.6 емкость  $C''_3$  меняется на  $\pm 100 \text{ пФ}$  при настройке АГ. Рассчитать  $\alpha_f$  для двух значений  $C''_3$ .

**3.8.** В АГ по схеме рис.1.6:  $L_2 = 2.65 \text{ мкГн}$ ;  $\alpha_L = 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $C_3 = 500 \text{ пФ}$  и состоит из двух конденсаторов, включенных параллельно:  $C'_3 = 795 \text{ пФ}$ ;  $\alpha_{C'_3} = -5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $C''_3 = 1590 \text{ пФ}$ ;  $\alpha_{C''_3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

Рассчитать относительную нестабильность частоты  $f_0$  в диапазоне температур от  $-30$  до  $+30^\circ\text{C}$ .

**Примечание**

При последовательном включении  $m$  конденсаторов

$$\begin{aligned} 1/C &= 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_m; \\ \alpha_C &= (\alpha_{C_1}/C_1 + \alpha_{C_2}/C_2 + \dots + \alpha_{C_m}/C_m) \cdot C. \end{aligned} \quad (3.39)$$

**3.9.** Как изменится нестабильность частоты  $f_0$ , если в условиях задачи 3.8 выбрать  $C'_3 = C''_3 = 1060 \text{ пФ}$ ?

**3.10.** Как в условиях задачи 3.8 следует выбрать емкости  $C'_3$  и  $C''_3$ , чтобы  $\alpha_f = 0$ ?

**3.11.** В АГ по схеме рис.1.7:  $L_3 = 0.424 \text{ мкГн}$ ;  $\alpha_L = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $C_1 = 530 \text{ пФ}$ ;  $C_2 = 10600 \text{ пФ}$ ;  $C_3 = 560 \text{ пФ}$ ;  $\alpha_{C_1} = \alpha_{C_2} = \alpha_{C_3} = -5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Рассчитать  $\alpha_f$ .

**3.12.** Как изменится  $\alpha_f$ , если в условиях задачи 3.11  $\alpha_{C_1} = -5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{C_2} = \alpha_{C_3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ?



- 3.13.** Как изменится  $\alpha_f$ , если в условиях задачи 3.11  $\alpha_{C_1} = \alpha_{C_2} = \alpha_{C_3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ?
- 3.14.** В АГ по схеме рис.1.6 индуктивность дросселя  $L_{\text{дл}} = 20L_1$ ;  $L_{\text{дл}} = 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $L_\Sigma = 2.65 \text{ мкГн}$ ;  $L_1 = 0.53 \text{ мкГн}$ ;  $L_2 = 0.106 \text{ мкГн}$ ;  $\alpha_L = 2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{C_3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Рассчитать относительную температурную нестабильность частоты в диапазоне температур  $\Delta t = 50^\circ\text{C}$ .
- Примечание**  
При параллельном включении  $m$  индуктивностей
- $$1/L = 1/L_1 + 1/L_2 + \dots + 1/L_m,$$
- $$\alpha_L = (\alpha_{L_1}/L_1 + \alpha_{L_2}/L_2 + \dots + \alpha_{L_m}/L_m) \cdot L. \quad (3.40)$$
- При последовательном включении  $m$  индуктивностей
- $$L = L_1 + L_2 + \dots + L_m,$$
- $$\alpha_L = (\alpha_{L_1} \cdot L_1 + \alpha_{L_2} \cdot L_2 + \dots + \alpha_{L_m} \cdot L_m) / L. \quad (3.41)$$
- 3.15.** В АГ по схеме рис.1.7 в диапазоне температур  $\Delta t = 50^\circ\text{C}$  нестабильность частоты  $\Delta f / f_0 = -3.8 \cdot 10^{-3}$ . Известно:  $k = p = 0.2$ ;  $\alpha_{L_3} = \alpha_{C_2} = 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Рассчитать  $\alpha_{C_1} = \alpha_{C_3}$ .
- 3.16.** В АГ по схеме рис.1.7:  $\alpha_{L_3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{C_1} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{C_3} = 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $k = p = 0.2$ . Рассчитать  $\alpha_{C_3}$ , при котором  $\alpha_f = 0$ .
- 3.17.** Как изменится частота колебаний («выбег») за счет саморазогрева БТ, если в условиях задачи 3.2 напряжение  $E_k$  вместо 7 В выбрали 10 В?
- 3.18.** Как изменится частота колебаний («выбег») за счет саморазогрева БТ, если в условиях задачи 3.2 при  $R_y, k, p, Q = \text{const}$  частота контура  $f_0 = 3 \text{ МГц}$ ? 9 МГц?
- 3.19.** Выяснить, как в условиях задачи 3.17 меняются ток  $I_{\kappa 0}$ , если  $R_\phi = 0$ , а  $R_y = 100, 200$  и  $300 \text{ Ом}$ .
- 3.20.** Как изменится частота колебаний, если в условиях задачи 3.2 через час работы АГ температура окружающей среды  $t_c$  увеличилась до  $50^\circ\text{C}$ ? Уменьшилась до  $-20^\circ\text{C}$ ? Принять  $\alpha_f = -10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .
- 3.21.** В АГ по данным задачи 3.20 температура окружающей среды меняется на  $\pm 20^\circ\text{C}$  относительно  $t_c = 20^\circ\text{C}$ . При этом фаза средней крутизны  $\varphi_s(0^\circ) = -0.504 \text{ рад}$ ;  $\varphi_s(40^\circ) = -0.462 \text{ рад}$ . Рассчитать нестабильность частоты АГ в диапазоне температур ( $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ ), если  $\alpha_f = -2.5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{cf} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Как изменится нестабильность частоты, если фазирующий конденсатор пробьется?

### 3.2. Влияние питающих напряжений

При вариации питающих напряжений меняется режим АГ и параметры БТ.

Коллекторное напряжение  $E_k$  в основном влияет на коллекторную емкость  $C_k$  и температуру перехода за счет изменений мощности рассеяния на БТ.

Напряжение начального смещения  $E_n$  влияет на изменение тока  $I_{k0}$ , фазы  $\varphi_s, \varphi_{oc}$  и температуры перехода.

Аналитических выражений для расчета изменения параметров БТ от питающих напряжений нет, обычно в справочниках приводятся некоторые экспериментальные зависимости.

В последующих задачах ограничимся оценкой порядка неустойчивости частоты.

#### Примеры решения типовых задач

**3.22.** АГ по схеме рис.1.2 работает в НР. Параметры контура:  $\kappa = 0.2$ ;  $p = 0.25$ ;  $Q = 50$ ;  $R_y = 30$  Ом;  $f_0 = 3$  МГц. Параметры БТ:  $f_{cp} = 300$  МГц;  $r_0 = 50$  Ом;  $R_{nc} = 0.5$  °C/мВт;  $\varepsilon_h = \Delta h_{21Э} / \Delta t = 0.5$  1/°C.

Режимные показатели:  $I_{k0} = 5$  мА;  $E_k = 6$  В; при этом  $t_n = 30$  °C;  $h_{21Э} = 100$ . Оценить неустойчивость частоты при изменении коллекторного напряжения от 5 до 7 В.

#### Решение

Изменения  $E_k$  влияют на частоту по двум каналам. Во-первых, за счет изменения температуры перехода, во-вторых, емкости коллекторного перехода  $C_k$ .

1. В НР ток  $I_{k0}$  от  $E_k$  меняется мало, мощность  $P_1$  тоже. Из уравнения стационарного режима при  $R_y = const$  следует, что

$$S\gamma_1(\theta) = 1 / R_y = const, \quad (3.42)$$

коэффициент формы  $g_1(\theta)$  при небольших изменениях угла отсечки, если  $\theta = 50 - 70^\circ$ , можно принять  $g_1(\theta) \approx const$ , поэтому

$$S\gamma_0(\theta) = S\gamma_1(\theta) / g_1(\theta) \approx const. \quad (3.43)$$

В результате

$$U_\varepsilon = S\gamma_0(\theta); U_k = U_\varepsilon / k; P_1 = 0.5 I_{k0} g_1(\theta) U_\varepsilon / k \quad (3.44)$$

меняются мало.

Таким образом, вариации  $E_\kappa$  приводят к изменениям мощностей  $P_0$  и  $P_{pac}$ .

Для  $E_\kappa^0 = 6$  В,  $P_0 = 30$  мВт;  $t_n = 30^\circ\text{C}$ . Для  $E_\kappa^0 = 5$  В,  $P_0 = 25$  мВт;  $\Delta P_0 = -5$  мВт;  $\Delta P_{pac} = \Delta P_0 = -5$  мВт.

$$\Delta t_n = R_{\kappa n} \cdot \Delta P_{pac}. \quad (3.45)$$

Получаем  $\Delta t_n = -2.5^\circ\text{C}$ ;  $t_{n1} = 27.5^\circ\text{C}$ . Для  $E_{\kappa 2} = 7$  В;  $P_0 = 35$  мВт;  $\Delta P_{pac} = 5$  мВт;  $\Delta t_n = 2.5^\circ\text{C}$ ;  $t_{n2} = 32.5^\circ\text{C}$ .

Согласно (3.37), (3.38), (3.13), (3.14):

$$S(E_{\kappa 1}) = 0.176 \text{ А/В}; \varphi_s(E_{\kappa 1}) = -8.796 \cdot 10^{-2} \text{ рад } (h_{21Э} \approx 99).$$

$$S(E_{\kappa 2}) = 0.1736 \text{ А/В}; \varphi_s(E_{\kappa 2}) = -8.68 \cdot 10^{-2} \text{ рад } (h_{21Э} \approx 101).$$

Фаза коэффициента обратной связи (3.19) меняется только от вариаций  $h_{21Э}$ , т.е. почти постоянная  $\Delta \varphi_s = \varphi_s(E_{\kappa 2}) - \varphi_s(E_{\kappa 1}) = 1.16 \cdot 10^{-3}$ .

$$\text{Уходы частоты (3.28) } \Delta f / f_0 = 1.16 \cdot 10^{-5}.$$

2. Емкость  $C_\kappa$  с ростом  $E_\kappa$  уменьшается (рис.3.3) с 5 пФ при  $E_\kappa = 5$  В до 4.2 пФ при  $E_\kappa = 7$  В. Принимаем, что  $\Delta C_{\text{вых}} = -0.8$  пФ, а также  $\Delta C_{\text{прох}} = -0.4$  пФ.

Выражение (3.27) можно записать в виде

$$\Delta f / f_0 = -0.5 \omega_0 R_\kappa \left[ \Delta C_{\text{вых}} + k^2 \Delta C_{\text{ex}} + (1+k)^2 \Delta C_{\text{прох}} \right]. \quad (3.46)$$

Здесь  $R_\kappa = R_y / k = 150$  Ом. Общая нестабильность частоты  $\Delta f / f_0 = 5.06 \cdot 10^{-5}$ .

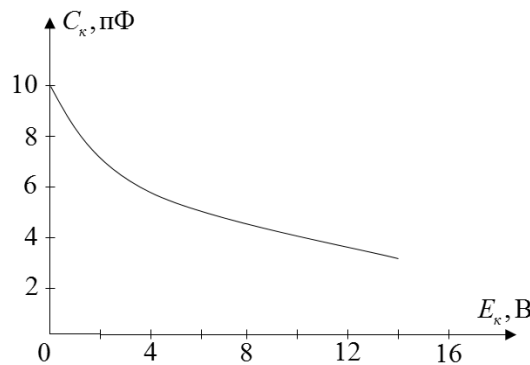


Рис.3.3. Иллюстрация к задаче 3.22

**3.23.** Оценить нестабильность частоты АГ, работающего по исходным данным задачи 3.23, если при  $E_\kappa = \text{const}$ ,  $R_9 = 200$  Ом напряжение начального смещения  $E_n$  меняется на  $\pm 10\%$ ,  $E' = 0.3$  В.

**Решение**

Сначала определим  $E_n$  в исходном режиме, применяя (1.34). Согласно (3.37), (3.38):  $S_n = 0.1915$  А/В;  $S = 0.1747$  А/В. Из (3.20):

$\gamma_1(\theta) = 1 / SR_y = 0.19$ ;  $g_1(\theta) = 1.8$ ;  $\gamma_0(\theta) = 0.106$ ; из (3.44):  $U_\epsilon^0 = 0.27$  В,  $E_n^0 = 1.165$  В.

Если принять приближенное условие (3.47), то можно найти для новых значений  $E_{n1} = 1.28$  В и  $E_{n2} = 1.048$  В.

1.  $E_{n1} = 1.28$  В;  $U_{\epsilon 1} = 0.306$  В;  $I_{\kappa 01} = 5.67$  мА. Из (3.44):  $P_1 = 7.81$  мВт,  $P_0 = 34.02$  мВт;  $P_{pac} = 26.2$  мВт.

2.  $E_{n2} = 1.048$  В;  $U_{\epsilon 2} = 0.234$  В;  $I_{\kappa 02} = 4.33$  мА;  $P_1 = 4.56$  мВт;  $P_0 = 25.98$  мВт;  $P_{pac} = 21.42$  мВт.

Принимаем, что  $h_{21Э}, f_{cp}$  в этой области значений  $I_{\kappa 0}$  меняются мало, тогда  $\varphi_{oc} = const$ .

Определим  $\varphi_s$  для двух значений  $E_n$ . Учтем, что при  $t_n = 30^\circ\text{C}$   $P_{pac} = 24$  мВт.

1.  $E_{n1} = 1.28$  В;  $\Delta P_{pac} = 2.2$  мВт;  $\Delta t_n = 1.1^\circ\text{C}$ ,  $t_n = 31.1^\circ\text{C}$ ;

$S' = 0.198$  А/В;  $\varphi'_s = -9.9 \cdot 10^{-2}$  рад.

2.  $E_{n2} = 1.048$  В;  $\Delta P_{pac} = 21.42 - 24 = -2.58$  мВт;  $\Delta t_n = -1.3^\circ\text{C}$ ,

$t_n = 28.7^\circ\text{C}$ ;  $S'' = 0.1537$  А/В;  $\varphi''_s = -7.7 \cdot 10^{-2}$  рад.

Получаем в итоге  $\Delta f / f_0 = 0.5 \delta \Delta \varphi_s = 0.5 \cdot \delta \cdot (\varphi''_s - \varphi'_s) = 2.2 \cdot 10^{-4}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**3.24.** Как изменится нестабильность частоты АГ, если в условиях задачи 3.23 ток  $I_{\kappa 0} = 6$  мА при  $t_n = 30^\circ\text{C}$ ?

**3.25.** При какой температуре окружающей среды работал АГ в исходном режиме ( $E_\kappa = 6$  В) по условиям задач 3.23 и 3.24?

**3.26.** Как изменится нестабильность частоты АГ, если в условиях задачи 8.23 собственная частота контура  $f_0 = 1$  МГц? 6 МГц?

**3.27.** Какой станет нестабильность частоты АГ, если в условиях задачи 3.23 изменится один параметр БТ, а именно:  $R_{nc} = 1^\circ\text{C/мВт}$ ?

**3.28.** Как изменится нестабильность частоты, если в условиях задачи 3.23 принять  $R_\epsilon = 100$  Ом?  $R_\epsilon = 300$  Ом?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жуховицкая В.П.** Транзисторные автогенераторы. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1989. - 82 с.
2. **Атаманцева Ф.С.** Радиопередающие устройства. Сборник задач и упражнений: Учеб. Пособие для техникумов. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
3. **Гарматюк С.С.** Задачник по устройствам генерирования и формирования радиосигналов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 672 с.
4. **Генерирование** колебаний и формирование радиосигналов. / В.Н. Кулешов, Н.Н. Удалов, В.М. Богачев и др.; под ред В.Н. Кулешова и Н.Н. Удалова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 415 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Коэффициенты разложения косинусоидального импульса

$\theta^\circ$	$\cos \theta$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\gamma_0$	$\gamma_1$	$\beta_0$	$\beta_1$	$g_1$
0	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.00
5	0.906	0.018	0.037	0.037	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.00
10	0.985	0.036	0.073	0.071	0.071	0.0005	0.001	0.0005	0.001	2.0
15	0.966	0.055	0.110	0.108	0.104	0.002	0.004	0.002	0.004	2.0
20	0.940	0.074	0.146	0.141	0.132	0.0045	0.0088	0.0047	0.0093	1.98
25	0.906	0.093	0.181	0.171	0.155	0.0087	0.017	0.010	0.019	1.95
30	0.866	0.111	0.215	0.198	0.172	0.015	0.029	0.017	0.033	1.94
35	0.819	0.129	0.248	0.221	0.181	0.023	0.045	0.028	0.055	1.92
40	0.766	0.147	0.280	0.241	0.185	0.034	0.066	0.045	0.086	1.90
45	0.707	0.169	0.311	0.256	0.181	0.048	0.091	0.068	0.129	1.88
50	0.643	0.183	0.339	0.267	0.171	0.065	0.121	0.101	0.188	1.85
55	0.574	0.201	0.366	0.273	0.157	0.086	0.156	0.150	0.272	1.82
60	0.500	0.218	0.391	0.276	0.138	0.109	0.196	0.218	0.391	1.80
65	0.423	0.236	0.414	0.274	0.116	0.136	0.239	0.322	0.565	1.76
70	0.342	0.253	0.436	0.267	0.091	0.166	0.288	0.486	0.842	1.73
75	0.259	0.269	0.455	0.258	0.067	0.199	0.337	0.765	1.302	1.69
80	0.174	0.286	0.472	0.245	0.043	0.236	0.390	1.365	2.247	1.65
85	0.087	0.302	0.487	0.230	0.020	0.276	0.445	3.168	5.106	1.61
90	0.000	0.319	0.500	0.212	0.000	0.319	0.500	$\infty$	$\infty$	1.57
95	-0.087	0.334	0.510	0.193	0.017	0.363	0.554	-4.279	-6.356	1.53
100	-0.174	0.350	0.520	0.172	0.030	0.411	0.611	-2.366	-3.518	1.49
105	-0.259	0.364	0.526	0.152	-0.039	0.458	0.662	-1.769	-2.558	1.45
110	-0.342	0.379	0.531	0.131	-0.045	0.509	0.713	-1.488	-2.085	1.40
115	-0.423	0.392	0.534	0.111	-0.047	0.558	0.760	-1.323	-1.799	1.36
120	-0.500	0.406	0.536	0.092	-0.046	0.609	0.805	-1.218	-1.610	1.32
125	-0.574	0.419	0.536	0.074	-0.042	0.659	0.843	-1.149	-1.469	1.28
130	-0.643	0.431	0.534	0.058	-0.037	0.708	0.878	-1.101	-1.350	1.24
135	-0.707	0.443	0.532	0.044	-0.031	0.756	0.908	-1.069	-1.284	1.20
140	-0.766	0.453	0.523	0.032	-0.024	0.801	0.934	-1.046	-1.216	1.17
145	-0.815	0.463	0.525	0.022	-0.018	0.842	0.955	-1.028	-1.166	1.13
150	-0.866	0.472	0.520	0.014	-0.012	0.881	0.970	-1.017	-1.120	1.10

Формулы для расчета коэффициентов разложения:

$$\gamma_0(\theta) = \frac{1}{\pi}(\sin \theta - \theta \cos \theta); \gamma_n(\theta) = \frac{1}{n\pi} \left( \frac{\sin(n-1)\theta}{n-1} - \frac{\sin(n+1)\theta}{n+1} \right); n > 1.$$

$$\gamma_1(\theta) = \frac{1}{2\pi}(2\theta - \sin 2\theta); \alpha_{0,n}(\theta) = \gamma_{0,n}(\theta)/(1 - \cos \theta);$$

$$\beta_{0,n}(\theta) = \gamma_{0,n}(\theta)/\cos \theta;$$

$$g_n(\theta) = \gamma_n(\theta)/\gamma_0(\theta) = \alpha_n(\theta)/\alpha_0(\theta) = \beta_n(\theta)/\beta_0(\theta).$$

*Учебное издание*

**Сафин Ансар Ризаевич**  
**Удалов Николай Николаевич**

**ТРАНЗИСТОРНЫЕ АВТОГЕНЕРАТОРЫ**  
**СБОРНИК ЗАДАЧ**

Редактор издательства М.П. Малахов  
Компьютерная верстка М.К. Петушкевой

---

Подписано в печать	Печать офсетная	Формат 60х84/16
Физ. печ. л. 3,7	Тираж 100 экз.	Изд. №
		Заказ №

---

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ»  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14  
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ»  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14