

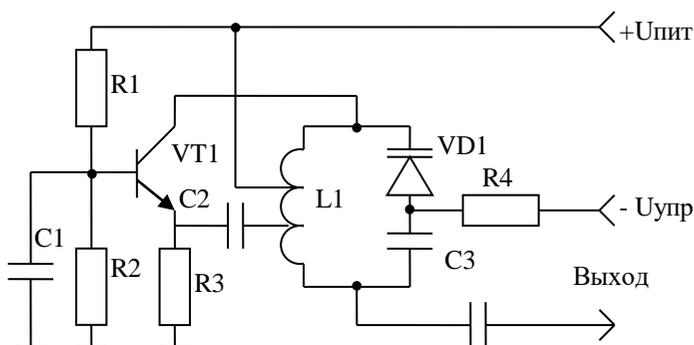
ФГОУ ВО  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ  
СИСТЕМ ЧАСТОТНОЙ И ФАЗОВОЙ  
АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ И СОСТАВЛЕНИЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭТИХ  
СИСТЕМ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе № 1 по дисциплине  
«Радиоавтоматика»  
для студентов специальности 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»  
и направления 11.03.01 «Радиотехника»



Воронеж 2019

Составитель: канд. техн. наук А.В. Володько

УДК 621.396

Исследование функциональных узлов систем частотной и фазовой автоподстройки частоты и составление математических моделей этих систем: методические указания к лабораторной работе №1 по дисциплине «Радиоавтоматика» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и направления 11.03.01 «Радиотехника» / ФГОУВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.В. Володько. Воронеж, 2019. 24 с.

Работа содержит практические и лабораторные задания по двум разделам указанного курса, посвященным исследованию функциональных узлов систем частотной и фазовой автоподстройки частоты и составлению математических моделей этих систем. В методических указаниях содержатся все необходимые для этого расчетно-методические материалы.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «Лабораторная работа №1.pdf»

Табл. 3. Ил. 11. Библиогр.: 2 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доцент С.М. Федоров

Ответственный за выпуск зав. кафедрой  
д-р физ. -мат. наук, проф. Ю.С. Балашов

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

©ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2019

# 1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

**Цель работы** - практическое освоение методики составления математического описания основных электрических узлов следящих систем радиоавтоматики по их техническому описанию и электрическим функциональным и принципиальным схемам.

Объектами исследования во всем цикле работ являются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) перестраиваемого генератора (ПГ) и частотной автоподстройки (ЧАП), используемые для стабилизации промежуточной частоты радиоприемника.

Структурные электрические схемы изучаемых устройств приведены на рис. 1. Принцип их работы сводится к следующему [1,2].

Если на входе радиоприемника с системой ЧАП (рис. 1,а) частота полезного сигнала  $\omega_C$  увеличится на величину  $\delta\omega_C$ , то при неизменной частоте перестраиваемого генератора (ПГ)  $\omega_G$  на такую же величину изменится и промежуточная частота приемника, так как  $\omega_{ПР} = \omega_C - \omega_G$ . Однако такой «уход» промежуточной частоты приведет к ее отклонению (расстройке) на величину  $\Omega$  от центральной частоты настройки  $\omega_{ДГ}$  частотного дискриминатора (ЧД):  $\Omega = \omega_{ПР} - \omega_{ДГ}$ . На выходе дискриминатора появится постоянное напряжение  $U_{Д}$ , величина которого пропорциональна расстройке  $\Omega$ . После фильтрации и возможного усиления в фильтре нижних частот постоянное напряжение поступит на управляющий элемент (УЭ) перестраиваемого генератора. Частота перестраиваемого генератора возрастет на величину  $\delta\omega_G$ , и «уход» промежуточной частоты  $\delta\omega_{ПР} = \delta\omega_C - \delta\omega_G$  окажется меньше, чем начальная расстройка входного сигнала  $\delta\omega_C$ , то есть будет наблюдаться стабилизация промежуточной частоты приемника.

В радиоприемнике с системой ФАПЧ (рис. 1,б) вместо частотного дискриминатора используется фазовый

дискриминатор (ФД), на один из входов которого подается опорное напряжение стабильной частоты  $\omega$ , равной номинальному значению промежуточной частоты. На эту частоту настроен усилитель промежуточной частоты, ей же равна переходная частота  $\omega_d$  частотного дискриминатора из предыдущей схемы. В идеальном случае «уход» частоты входного сигнала  $\delta\omega_c$  вызовет такой же «уход» промежуточной частоты:  $\delta\omega_{пр} = \delta\omega_c$ . Это в свою очередь приведет к отклонению фазы сигнала с промежуточной частотой от текущей фазы опорного сигнала. На выходе фазового дискриминатора появится постоянное напряжение  $U_d$ , под действием которого перестроится генератор так, что промежуточная частота  $\delta\omega_{пр} = \delta\omega_c - \delta\omega_g$  останется практически неизменной.

Количественный анализ эффективности работы рассмотренных систем ЧАП и ФАПЧ может быть проведен на основе строгой теории следящих систем, что и будет сделано в последующих работах.

В настоящей работе необходимо составить математическое описание функциональных узлов, из которых состоят электрические схемы анализируемых систем: усилителей радио- и промежуточной частоты (УРЧ и УПЧ), перестраиваемого генератора, частотного и фазового дискриминаторов. Характеристики узлов, необходимые для такого описания, будут использованы при составлении математической структурной схемы следящих систем.

Лабораторно-практическое занятие проводится в компьютерном классе, поскольку основная (содержательная) часть лабораторных заданий выполняется посредством численного моделирования на персональном компьютере. При этом используется моделирующая программа «L1.exe». Часть заданий выполняется студентами без использования указанной программы. Такие задания помечены звездочкой (\*).

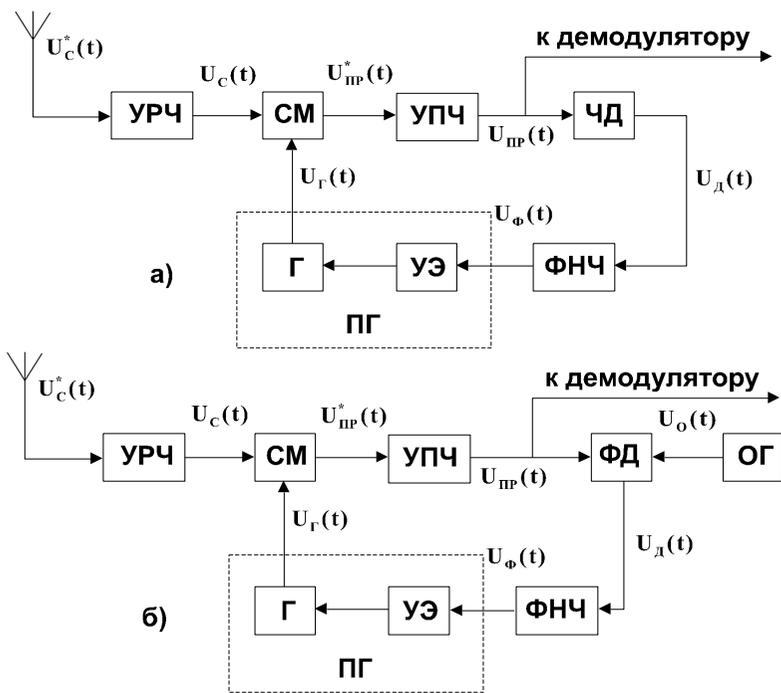


Рис. 1. Структурная электрическая схема радиоприемного устройства: а – с системой ЧАП; б – с системой ФАПЧ.

Здесь УРЧ - усилитель сигналов радиочастоты; СМ - смеситель сигналов; УПЧ - усилитель сигналов промежуточной частоты; ПГ - перестраиваемый по частоте генератор Г; ЧД - частотный дискриминатор; ФНЧ - фильтр нижних частот; УЭ - управляющий элемент; ФД - фазовый дискриминатор; ОГ - опорный генератор гармонического сигнала

## 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

### 2.1. Задание первое (\*)

Изучить принцип работы и структурные электрические схемы систем ЧАП и ФАПЧ,

предназначенных для стабилизации промежуточной частоты радиоприемника.

Для выполнения задания следует проработать общие указания к работе и занести в отчет по работе структурные схемы систем ЧАП и ФАПЧ, представленные на рис. 1.

## 2.2. Задание второе (\*)

Составить математическое описание многокаскадного резонансного усилителя, полагая, что его влияние на отслеживаемый параметр радиосигнала заключается только в задержке по времени закона изменения этого параметра. Исследовать влияние на время задержки радиосигнала числа каскадов усилителя и его эквивалентной полосы пропускания.

Важнейшим фактором, влияющим на работу следящих радиосистем, является задержка сигналов в усилителях. При этом имеется в виду запаздывание изменений отслеживаемого параметра на выходе усилителя (например, закона изменения частоты) по отношению к его вариациям на входе. Таким образом, основным параметром усилителя оказывается не его коэффициент усиления, а время задержки сигнала  $T_3$ . При оговоренных условиях характеристикой резонансного усилителя, используемой для его математического описания при составлении структурной математической схемы системы радиоавтоматики, будет передаточная функция

$$K(p) = \exp(-p \cdot T_3), \quad (1)$$

где  $p$  – комплексная частота (переменная в преобразовании Лапласа).

Если усилитель представляет собой  $N$  последовательно соединенных и одинаково настроенных одноконтурных каскадов и его эквивалентная полоса пропускания равна  $\Pi_{yc}$ , то время задержки сигнала в таком усилителе определяется как

$$T_3 = \frac{N \cdot \sqrt{\sqrt{2} - 1}}{\pi \cdot \Pi_{yc}}. \quad (2)$$

Время задержки сигнала в усилителе радиочастоты, учитывая его широкую полосу пропускания и малое число каскадов, может быть принято равным нулю.

Для усилителей промежуточной частоты время задержки сигнала рассчитывается по формуле (2). С помощью выражения (2) постройте график зависимости времени задержки сигнала в УПЧ от числа его каскадов. Необходимые для расчетов параметры УПЧ указаны в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные ко второму заданию.

Номер варианта (последняя цифра номера студенческого билета)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Полоса пропускания усилителя $\Pi_{УС}$ , кГц								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число каскадов $N = 1, 2, 3, 4, 5$ для всех вариантов								

Выясните какова может быть по величине максимальная задержка  $T_3$  для усилителей реальных сигналов. Сведения о возможных значениях числа каскадов  $N$  и полосы пропускания  $\Pi_{УС}$  возьмите в этом случае исходя из собственных представлений о параметрах радиоприемных устройств и используемых на практике сигналов.

Зарисуйте в отчет структурную математическую схему, являющуюся моделью УРЧ, смесителя и УПЧ радиоприемника (рис. 2). Укажите на ней передаточные функции математических звеньев, соответствующих УПЧ и УРЧ.

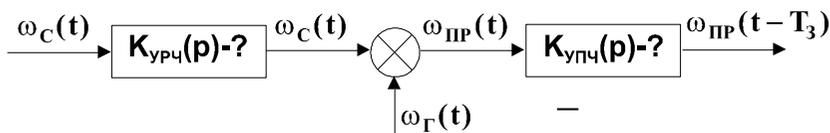


Рис. 2. Структурная математическая схема УРЧ, смесителя и УПЧ приемника

### 2.3. Задание третье (\*)

Рассчитать и построить регулировочную характеристику перестраиваемого генератора, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 3.

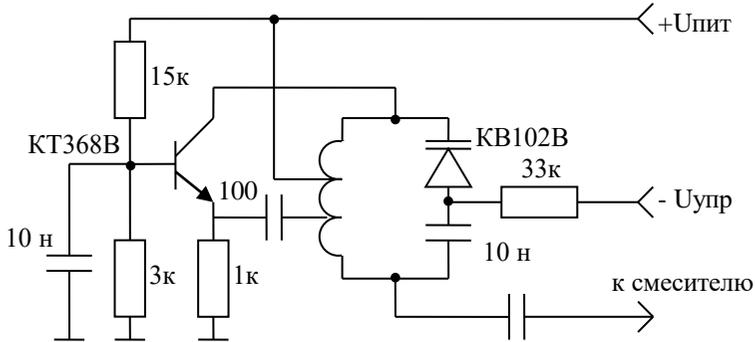


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема ПГ

Основным элементом электрической схемы генератора является транзистор КТ368Б, выполняющий в сочетании с колебательным контуром и источником питания роль усилительного устройства с положительной автотрансформаторной обратной связью. Транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Его коллекторной нагрузкой является параллельный колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и варикапа КВ102В. Варикап в перестраиваемом генераторе играет роль управляющего элемента, поскольку его емкость, а следовательно, и частота генерируемых колебаний обусловлена величиной приложенного к нему управляющего напряжения. Отрицательное начальное смещение на варикапе обеспечивается с помощью делителя.

Емкость диода-варикапа  $C_d$  зависит от приложенного к нему напряжения  $U$  и определяется его вольт-фарадной характеристикой. Эта характеристика чаще всего задается в справочниках графически (см. рис. 4), но на практике она с достаточной точностью может быть описана следующим выражением:

$$C_D(U) = 2 \cdot C_0 / \sqrt{|U|}, \quad (3)$$

где  $C_0$  - номинальное значение емкости варикапа при напряжении, соответствующем начальному смещению  $U_0$  (возьмите  $U_0 = -4$  В); значение емкости  $C_0$  определите по вольт-фарадной характеристике, представленной на рис. 4;  $U$  - управляющее напряжение на варикапе (на рис. 3 оно обозначено как  $U_{\Phi}(t)$  - напряжение, снимаемое с выхода ФНЧ системы автоподстройки частоты).

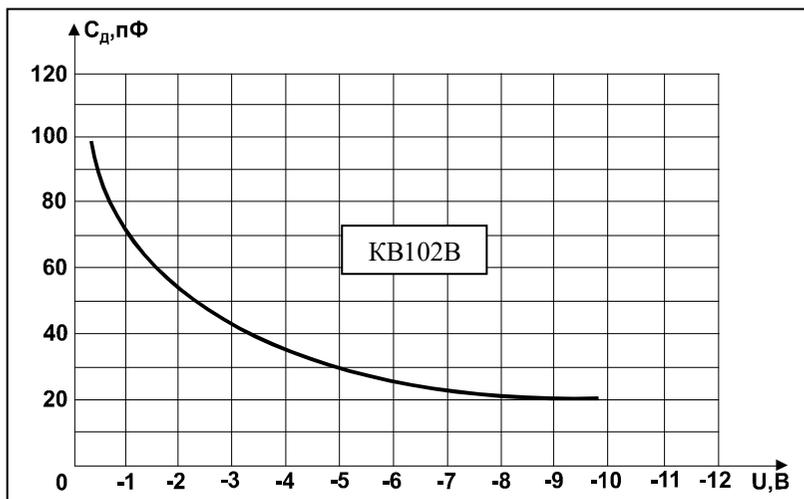


Рис.4. Вольт-фарадная характеристика варикапа

Регулировочная характеристика (характеристика управления), представляющая собой зависимость частоты перестраиваемого генератора от управляющего напряжения, может быть рассчитана с помощью формулы Томпсона

$$\omega_{\Gamma}(U) = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_K(U)}}, \quad (4)$$

где  $L$  - индуктивность колебательного контура генератора;  
 $C_K(U)$  - емкость контура;  $U$  - напряжение на варикапе.

Емкость контура для схемы, приведенной на рис. 3, складывается из емкости варикапа  $C_D(U)$ , емкости монтажа  $C_M = 6$  пФ и емкости коллектор-эмиттер транзистора КТ368В  $C_{КЭ} = 4$  пФ. Таким образом

$$C_K(U) = C_M + C_{КЭ} + C_D(U). \quad (5)$$

Значение индуктивности  $L$  в миллигенри возьмите равным номеру Вашего варианта, умноженному на десять (например, номер варианта - 5, тогда  $L = 50$  мГн).

Определите частоту покоя перестраиваемого генератора  $\omega_{Г0}$ , соответствующую номинальному значению управляющего напряжения, равному начальному смещению  $U_0 = -4$  В.

Постройте регулировочную характеристику  $R(U) = \omega_{Г}(U) - \omega_{Г0}$  (как функцию аргумента  $U - U_0$ ), приняв за начало координат точку с координатами  $(U_0, \omega_{Г0})$  и отложив по осям координат отклонения напряжения и частоты от номинальных значений.

Определите крутизну регулировочной характеристики  $S_p$  при  $U = 0$ , как отношение приращения частоты перестраиваемого генератора к приращению напряжения. Линеаризируйте характеристику управления на интервале напряжений  $[-1В, +1В]$ . Определите диапазон перестройки частоты генератора, приняв за апертуру этот интервал. Укажите крутизну  $S_p$  в кГц/В и апертуру в кГц на поле графика регулировочной характеристики.

Учитывая малую инерционность электронных перестраиваемых генераторов, регулировочной характеристики обычно бывает достаточно для математического описания их работы в системах радиоавтоматики. Для системы ЧАП такое описание оформляется в виде структурной математической схемы рис. 5,а. При составлении математического описания системы ФАП ее часто рассматривают как систему слежения за текущей фазой входного сигнала, а поэтому в качестве выходной величины, характеризующей работу генератора,

принимается текущая фаза его сигнала  $\varphi_{\Gamma}(t)$ . В этом случае математическое описание работы ПГ должно быть дополнено известным выражением, связывающим мгновенную частоту  $\omega_{\Gamma}(t)$  и текущую фазу колебания  $\varphi_{\Gamma}(t)$ :

$$\varphi_{\Gamma}(t) = \int_0^t \omega_{\Gamma}(t) dt.$$

Учитывая, что в математике оператор интегрирования обозначается  $1/p$ , в структурную схему перестраиваемого генератора системы ФАП (рис. 5,б) вводят условное интегрирующее звено с передаточной функцией  $K(p)=1/p$ .

Занесите в отчет математические структурные схемы перестраиваемого генератора, представленные на рис. 5, внося в них значения параметров, соответствующих Вашему варианту.

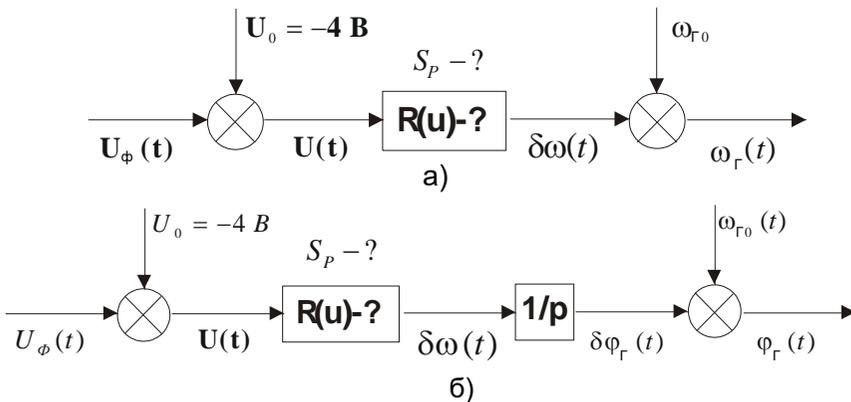


Рис. 5. Математическая модель перестраиваемого генератора:  
а – в системе ЧАП; б – в системе ФАПЧ

## 2.4. Задание четвертое

Исследовать влияние расстройки, а также добротности контуров частотного дискриминатора на форму и параметры (крутизну, апертуру) его дискриминационной характеристики. Выбрать оптимальное значение расстройки контуров.

В работе исследуется частотный дискриминатор на расстроенных контурах, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 6.

Рассматриваемый дискриминатор содержит два резонансных усилителя на транзисторах VT1 и VT2. Резонансные контуры этих усилителей L1C1 и L2C2 настроены на разные, но близкие по величине резонансные частоты  $\omega_{K1}$  и  $\omega_{K2}$  (рис. 7). На входы обоих усилителей подается одно и то же напряжение сигнала  $U_{\text{пр}}(t)$  промежуточной частоты  $\omega_{\text{пр}}$ . Если эта частота не равна переходной частоте дискриминатора  $\omega_{\text{д}}$ , то амплитуды гармонических сигналов  $U_{K1}$  и  $U_{K2}$ , снимаемых с контуров, не будут равны. Поэтому будут отличаться по величине и выпрямленные амплитудными детекторами (построенными на диодах VD1 и VD2) напряжения на нагрузках RC (добротности контуров и параметры детекторов должны быть идентичными). Поскольку полярности выпрямленных напряжений  $U_{\text{д1}}$  и  $U_{\text{д2}}$  противоположны (на катодах диодов способен накапливаться только положительный потенциал), то общее напряжение  $U_{\text{д}}$  на выходе дискриминатора будет равно

$$U_{\text{д}} = K_{\text{д}} \cdot (|U_{K1}| - |U_{K2}|), \quad (6)$$

где  $K_{\text{д}}$  - коэффициент передачи каждого из амплитудных детекторов. Зависимость напряжения на выходе дискриминатора от частотной расстройки –  $U_{\text{д}} = F(\Omega)$ , – определяемая при установившихся значениях расстроек, называется статической дискриминационной характеристикой (СДХ) частотного дискриминатора (или просто – дискриминационной характеристикой).

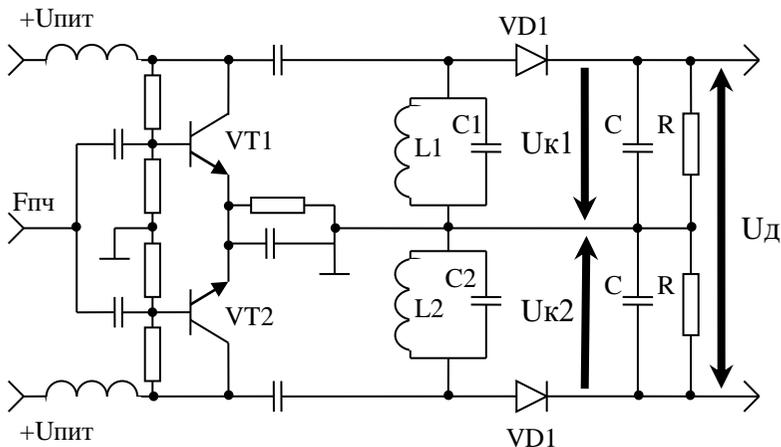


Рис. 6. Схема принципиальная электрическая частотного дискриминатора на расстроенных контурах

На рис. 7 поясняется принцип формирования СДХ. Важнейшими ее параметрами являются крутизна  $S_D$  при нулевой расстройке сигнала и апертюра  $2\Delta\omega_p$  (чаще выражаемая в Гц и обозначаемая  $2F_m$ ). Апертюра определяется как расстояние по оси частот между абсциссами точек максимума и минимума дискриминационной характеристики.

Для выполнения задания необходимо воспользоваться программой «L1.exe». После «запуска» программы нажатием клавиши, соответствующей первой позиции меню, войдите в режим исследования статических характеристик частотного дискриминатора при отсутствии помех.

В этом режиме, нажимая клавишу «Добротность ...», введите в ЭВМ значение добротности контуров  $Q$  из табл. 2, а клавишей «Переходная частота» – соответственно значение переходной частоты дискриминатора  $F_D$ , также указанное для Вашего номера варианта в табл. 2.

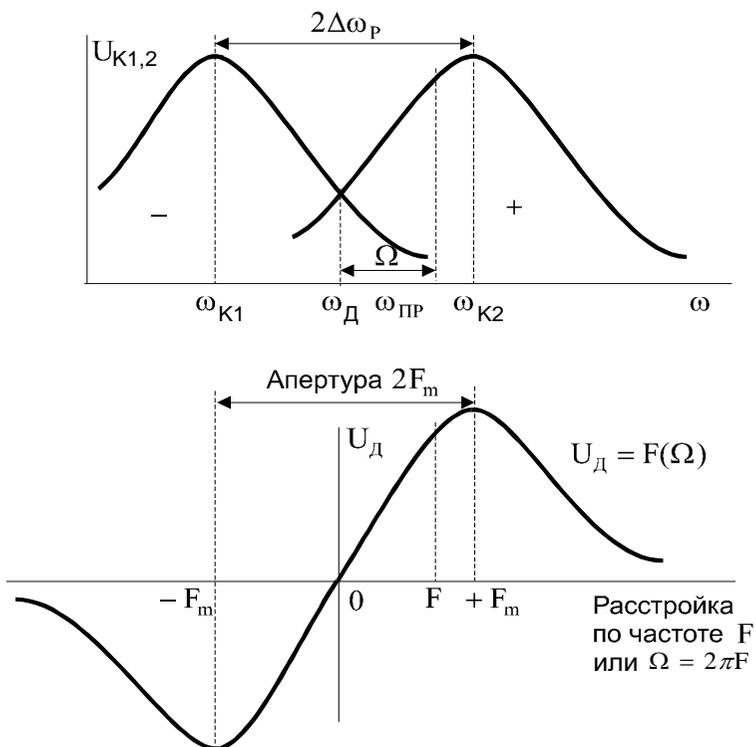


Рис. 7. Формирование статической дискриминационной характеристики частотного дискриминатора

Меняя значение расстройки контуров  $\Delta F_p$  от нуля до 21 кГц с шагом 3-5 кГц (клавишей «Расстройка ...»), постройте на экране монитора семейство статических дискриминационных характеристик. Оцените их крутизну и апертуру. Выявите расстройку  $\Delta F_{p\text{ опт}}$ , дающую наибольшую крутизну  $S_d$  дискриминационной характеристики, при которой еще не наблюдается уменьшения максимума выходного напряжения дискриминатора и сохраняется достаточно широкой его апертура  $2F_m$ , определяемая по абсциссе максимума  $F_m$  характеристики ЧД (см. рис. 7). Занесите графики в отчет по работе. Сделайте соответствующие комментарии и выводы.

Задайтесь расстройкой контуров  $\Delta F_p$  в дискриминаторе в соответствии с табл. 2. Меняя добротность контуров  $Q$ , постройте соответствующее семейство статических дискриминационных характеристик. Исследуйте влияние добротности на качество СДХ. Занесите графики в отчет о работе. Сделайте выводы.

Таблица 2

Исходные данные к четвертому заданию.

Номер варианта								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Переходная частота дискриминатора $F_d$ , кГц (равная частоте настройке УПЧ; $\omega_d = \omega_0 = 2\pi \cdot F_d$ )								
1500			1000			2000		
Добротность контуров дискриминатора $Q$								
120	130	140	150	160	170	180	190	200
Расстройка контуров $\Delta F_p$ , кГц								
2	4	6	8	10	12	14	16	18

Проанализировав все имеющиеся у Вас графики, убедитесь в том, что наилучшей характеристика частотного дискриминатора будет при соблюдении следующего соотношения:

$$\Delta F_{\text{РОПТ}} = 1.25 \cdot F_d / Q. \quad (7)$$

Запишите на поле графика оптимальной дискриминационной характеристики ЧД значение ее крутизны  $S_d$  в В/кГц, максимального напряжения  $U_{d\text{max}}$ ,  $V$  и апертуры  $2F_m$  в кГц.

## 2.5. Задание пятое (\*)

Исследовать влияние отношения сигнал/шум на дискриминационную характеристику частного дискриминатора.

На входе частотного дискриминатора помимо полезного сигнала с промежуточной частотой воздействуют шумовые помехи, описываемые, как правило, моделью белого шума. Предполагается, что усиление УПЧ постоянно в полосе пропускания и равно нулю вне этой полосы, а эффективное напряжение смеси сигнала и шума на входе ЧД поддерживается неизменным за счет системы автоматической регулировки усиления УПЧ. Воздействие сигнала и шума на ЧД приводит к тому, что напряжение  $U_d(t)$  на его выходе не является постоянным даже при установившейся расстройке. Оно флуктуирует относительно своего среднего значения, величина которого зависит от расстройки по частоте сигнала относительно переходной частоты дискриминатора. Эта зависимость является важнейшей характеристикой дискриминатора и называется обобщенной дискриминационной характеристикой (ОДХ). Ее вид зависит от отношения  $q$  мощности сигнала на входе ЧД к мощности шума. Если полагать, что статическая дискриминационная характеристика описывается линейной зависимостью в пределах апертуры, а вне ее тождественно равна нулю, то расчетная формула для обобщенной дискриминационной характеристики имеет следующий вид:

$$F_{\text{Об}}(F) = \begin{cases} S_d \cdot F \cdot \frac{q^2}{1+q^2} & \text{при } |F| \leq F_m, \\ 0 & \text{при } |F| > F_m. \end{cases} \quad (8)$$

Взяв параметры (крутизну  $S_d$  и апертуру  $2F_m$ ) частотного дискриминатора с оптимальной статической дискриминационной характеристикой, полученной Вами при выполнении четвертого задания, и изменяя отношение сигнал/шум  $q$  на его входе от нуля до десяти, постройте семейство обобщенных дискриминационных характеристик.

Обратите внимание на то, что при  $q = \infty$  исследуемая характеристика имеет наибольшую крутизну, равную  $S_d$ : обобщенная дискриминационная характеристика превращается в обычную статическую характеристику.

Итак, для учета воздействия шумов в структурную математическую схему дискриминатора необходимо ввести вместо статической дискриминационной характеристики  $F(\Omega)$  обобщенную характеристику  $F_{Об}(\Omega)$ .

## 2.6. Задание шестое

Исследовать влияние отношения сигнал/шум и параметров частотного дискриминатора на его флюктуационную характеристику.

Известно, что спектр шумового процесса  $\xi(t)$  на выходе частотного дискриминатора сосредоточен в области низких частот. На выходе дискриминатора, как правило, включен фильтр нижних частот, задачей которого является предотвращение проникновения флюктуаций на управляющий элемент перестраиваемого генератора, и который, следовательно, имеет полосу пропускания намного более узкую, чем спектр этих флюктуаций. Поэтому можно считать, что важнейшая составляющая спектральной плотности мощности шума  $S_\xi(\omega)$  приходится на область частот, непосредственно примыкающую к нулевой частоте:  $S_\xi(0)$ .

Зависимость значения спектральной плотности мощности выходных флюктуаций частотного дискриминатора на нулевой частоте  $S_\xi(0)$  от частотной расстройки  $F$  полезного сигнала относительно переходной частоты  $F_d$  называется флюктуационной характеристикой частотного дискриминатора и обозначается  $S_\xi(0, F)$ . Рассчитать флюктуационную характеристику достаточно сложно, однако, в простейших случаях используют приближенное выражение [1], которое и использовано для моделирования.

Для выполнения задания обратитесь к основному меню программы «L1.exe», нажав клавишу «Исследование флюктуационной характеристики ...». С помощью программы можно рассчитать флюктуационные характеристики частотного дискриминатора при разных отношениях сигнал/шум  $q$ , апертуре  $2F_m$ , варьируя крутизну дискриминатора  $S_d$ . Введите в программу значения крутизны  $S_d$  и апертury  $2F_m$  для лучшего из исследованных Вами в четвертом задании дискриминаторов. Меняя отношение сигнал/шум от нуля до десяти, постройте семейство флюктуационных характеристик дискриминатора.

Постройте зависимость спектральной плотности мощности флюктуаций на выходе ЧД при нулевой расстройке полезного сигнала  $S_\xi(0,0)$ , то есть при его точной настройке на переходную частоту ЧД ( $F=0$ ), от отношения сигнал/шум. По полученным результатам сформулируйте выводы.

Воспользуйтесь результатами исследования лучшего частотного дискриминатора и составьте его математическую структурную схему (рис. 8) для ситуации, в которой отношение сигнал/шум  $q=1$ . Обратите внимание на то, что при идеальной работе схемы АРУ величина  $S_\xi(0,0)$  для флюктуаций на выходе ЧД не зависит от абсолютного значения мощности шума на входе радиоприемника.

## 2.7. Задание седьмое

Исследуйте статическую дискриминационную характеристику фазового дискриминатора векторомерного типа и покажите практическое совпадение ее точной аппроксимации

$$U_d(\varphi) = U_0 \cdot \cos \Theta \cdot \left( \sqrt{1+a^2/4+a \cdot \sin \varphi} - \sqrt{1+a^2/4-a \cdot \sin \varphi} \right) \quad (9)$$

и упрощенного выражения, полученного из (9) при  $a \ll 1$

$$U_d(\varphi) = U_{\text{ПР}} \cdot \cos \Theta \cdot \sin \varphi, \quad (10)$$

где  $a = U_{\text{ПР}}/U_0$ ;

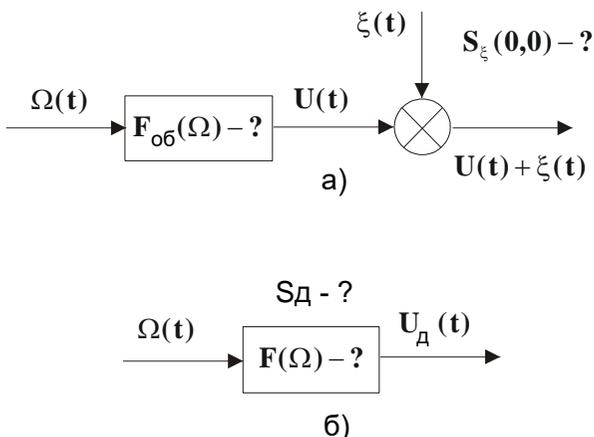


Рис. 8. Математическая модель частотного дискриминатора:

а – при учете шумов в радиоприемнике; б – без учета шумов.

$U_{\text{ПР}}$  – амплитуда напряжения промежуточной частоты (в расчетах принято  $U_{\text{ПР}} = 0.2 \text{ В}$ );

$U_0$  – амплитуда напряжения опорного сигнала;

$\Theta$  – угол отсечки амплитудного детектора в схеме фазового дискриминатора.

Принципиальная электрическая схема векторомерного фазового дискриминатора, предназначенного для преобразования разности фаз  $\varphi$  двух сигналов в напряжение расстройки  $U_{\text{д}}$ , приведена на рис. 9, а принцип его работы кратко заключается в следующем.

У фазового дискриминатора два входа, на один из которых подается опорное напряжение от специального стабильного генератора  $U_0(t) = U_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)$ , а на другой – напряжение входного сигнала нестабильной промежуточной частоты  $U_{\text{ПР}}(t) = U_{\text{ПР}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_{\text{ПР}}(t))$ . Напряжение  $U_{\text{ПР}}(t)$  делится с помощью трансформатора  $\text{Tr}1$  с отводом от средней точки на две равные части  $U_{\text{ПР}}(t)/2$ . Очевидно, что обе эти части синфазны и составляют в сумме напряжение на вторичной обмотке трансформатора  $U_{\text{ПР}}(t)$ . Опорное

напряжение  $U_0(t)$  передается во вторичную обмотку трансформатора  $Tr2$ , так что оно вместе с напряжением полуобмоток трансформатора  $Tr1$  поступает на диоды  $VD1$  и  $VD2$  амплитудных детекторов. Итак, напряжение  $U_0(t)$  складывается с напряжением верхней полуобмотки на диоде  $VD1$  и вычитается из напряжения нижней полуобмотки на диоде  $VD2$ . Выпрямленные напряжения амплитудных детекторов  $U_{д1}$  и  $U_{д2}$  при указанном на схеме включении диодов оказываются направленными навстречу друг другу, так что общее напряжение  $U_{д}$  на выходе дискриминатора будет равно их разности:  $U_{д} = U_{д1} - U_{д2}$ . В соответствии с векторной диаграммой напряжений фазового дискриминатора, представленной на рис. 10, выражение для статической дискриминационной характеристики будет описываться выражением (9).

Для выполнения задания необходимо воспользоваться моделирующей программой. Нажав клавишу «Исследование статической характеристики фазового векторомерного дискриминатора» в соответствии со второй позицией меню, перейдите в режим исследования ФД.

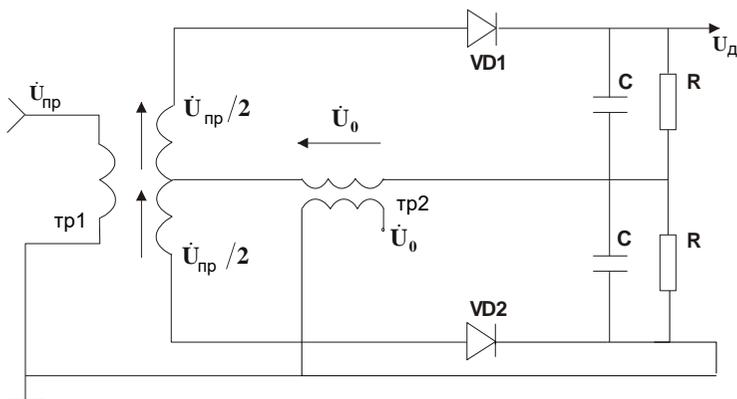


Рис. 9. Схема принципиальная электрическая векторомерного фазового дискриминатора

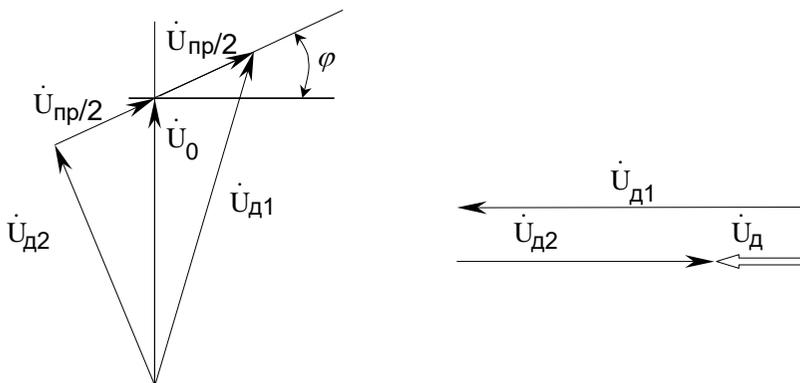


Рис. 10. Векторная диаграмма напряжений на диодах дискриминатора и соответствующее ей выпрямленное напряжение на выходе ФД.

Задайтесь интервалом исследуемых разностей фаз входного и опорного сигналов  $\varphi$  (в радианах) и введите его в ЭВМ клавишей 2 меню исследования СДХ фазового дискриминатора. Задавшись различными значениями отношения  $a$ , постройте статические дискриминационные характеристики по формулам (9) и (10). Сделайте выводы об идентичности кривых. При каких рассогласованиях фаз они разнятся в наибольшей степени?

Занесите график дискриминационной характеристики фазового дискриминатора в отчет по работе. Определите крутизну дискриминационной характеристики  $S_d$  [В/рад] в начале координат и наибольшее значение напряжения  $U_{d\max}$  [В], достигаемое на выходе дискриминатора. Запишите эти значения.

### 2.8. Задание восьмое (\*)

Исследовать влияние интенсивности шума на входе радиоприемника на дискриминационную и флюктуационную характеристики фазового дискриминатора при гармоническом полезном сигнале.

При наличии белого шума на входе приемника и при гармоническом полезном сигнале, настроенном на среднюю частоту УПЧ, обобщенная дискриминационная характеристика фазового дискриминатора определяется формулой

$$F_{\text{Об}}(\varphi) = M\{U_{\text{Д}}(t)\} = k_{\text{Д}} \cdot U_{\text{ПР}} \cdot U_0 \cdot \sin \varphi, \quad (11)$$

где  $M\{\}$  – символ математического ожидания;

$k_{\text{Д}}$  [1/В] – коэффициент передачи ФД (принять равным 0.5).

Как видно из выражения (9) дискриминационная характеристика фазового дискриминатора не зависит от интенсивности шума.

Флюктуационная характеристика ФД определяется выражением

$$S_{\xi}(0, \varphi) = 2 \cdot k_{\text{Д}}^2 \cdot U_0^2 \cdot S_{\xi}(\omega_0), \quad (12)$$

где  $\omega_0$  – средняя частота УПЧ;

$S_{\xi}(\omega)$  – спектральная плотность мощности шума на выходе N-каскадного УПЧ, определяемая по формуле

$$S_{\xi}(\omega) = \frac{S_{\text{Ш}} \cdot K_{\text{I}}^{2 \cdot N}}{|1 + 2j \cdot (\omega - \omega_0) \cdot Q_{\text{Э}} / \omega_0|^{2 \cdot N}}, \quad (13)$$

$K_{\text{I}}$  – коэффициент усиления одного каскада УПЧ на средней частоте  $\omega_0$ ;

$Q_{\text{Э}}$  – эквивалентная добротность резонансного каскада усиления;

$S_{\text{Ш}}$  – спектральная плотность мощности шумов на входе УПЧ:

$$S_{\text{Ш}} = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot n, \quad (14)$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – постоянная Больцмана;

$T = 290$  К – температура антенной системы;

$R = 75 \text{ Ом}$  – внутреннее сопротивление антенной системы;

$n$  – коэффициент шума ( $n = 20$ ), характеризующий усиление мощности шума антенны за счет шумовых ЭДС каскадов радиоприемника.

Задавшись  $K_1 = 10$  и  $U_0 = 1 \text{ В}$  и меняя число каскадов  $N$  в УПЧ, постройте семейство флюктуационных характеристик фазового дискриминатора. Зарисуйте их в отчет. Сделайте вывод о влиянии количества каскадов УПЧ на эту характеристику.

Постройте семейство флюктуационных характеристик ФД, приняв  $N = 3$ , и меняя усиление каскадов  $K_1$  от пяти до десяти. Сделайте соответствующие выводы.

По результатам анализа конкретизируйте математическую модель дискриминатора, приведенную на рис. 11.

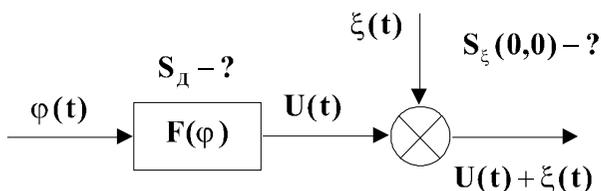


Рис. 11. Модель фазового дискриминатора с учетом шумов радиоприемника

### 3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ МАТЕРИАЛА

1. Каковы принципы работы и функциональные схемы систем ЧАП и ФАПЧ, используемых для стабилизации промежуточной частоты в супергетеродинных радиоприемниках?

2. Как изменяется отслеживаемый параметр радиосигнала при прохождении этого сигнала через смеситель и УПЧ? Каково математическое описание этих устройств?

3. От каких параметров УПЧ зависит время задержки сигнала в этом усилителе?

4. Объясните принцип работы частотного дискриминатора на расстроенных контурах. Приведите его принципиальную электрическую схему.

5. Как влияет расстройка контуров в частотном дискриминаторе на форму его статической дискриминационной характеристики?

6. Что такое флюктуационная характеристика и каков ее вид у фазового и частотного дискриминаторов?

7. Каковы модели частотного дискриминатора, используемые при наличии и отсутствии шумов в канале приемника?

8. Изобразите вид спектральной плотности мощности шумов антенны, шума на выходе УПЧ и на выходе частотного дискриминатора.

9. Как изменяется спектральная плотность мощности флюктуаций на выходе частотного дискриминатора при изменении отношения сигнал/шум на его входе?

10. Как изменяются флюктуационные характеристики частотного дискриминатора при изменении отношения сигнал/шум?

11. Что произойдет с обобщенной дискриминационной характеристикой частотного дискриминатора при увеличении отношения сигнал/шум?

12. Нарисуйте принципиальную электрическую схему векторомерного фазового дискриминатора. Объясните принцип его работы.

13. Определите напряжение на выходе фазового дискриминатора, если на его вход поступает напряжение с амплитудой  $U_{\text{пр}}$ , синфазное с опорным напряжением, имеющим амплитуду  $U_0$ .

14. В каких единицах выражается крутизна дискриминационных характеристик частотного и фазового дискриминаторов?

15. Нарисуйте принципиальную электрическую схему управляемого генератора с варикапом. В каких единицах выражается крутизна регулировочной характеристики генератора?

16. За счет чего можно увеличить крутизну регулировочной характеристики генератора с варикапом?

17. Чем принципиально различны флюктуационные характеристики частотного и фазового дискриминаторов?

18. Как учесть в структурных схемах ЧАП и ФАПЧ наличие шумов в радиоприемном устройстве?

19. Чем отличается статическая дискриминационная характеристика частотного дискриминатора от его обобщенной характеристики?

20. Как меняется форма кривой спектральной плотности мощности шумов на выходе УПЧ при изменении полосы пропускания, коэффициента усиления УПЧ и числа его каскадов?

В дальнейших лабораторных работах Вам потребуются результаты, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Итоговые результаты исследований  
линейных звеньев систем РА

Наименование параметра или характеристики	Обозначение	Значение
1. Время задержки сигнала в УПЧ, с	$T_3$	
2. Крутизна регулировочной характеристики генератора, кГц/В	$S_P$	
3. Крутизна СДХ частотного дискриминатора, В/кГц;	$S_D$	
4. Крутизна СДХ фазового дискриминатора, В/рад	$S_D$	
5. Апертура частотного дискриминатора, кГц	$2F_m$	
6. Максимальное напряжение на выходе частотного дискриминатора, В	$U_{D \max}$	

Приведите эти результаты в отчете.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов А.И. Радиоавтоматика [Текст]: учеб. пособие / А.И. Соколов, Ю.С. Юрченко. - М.: Academia, 2010. -272 с.
2. Перов А.И. Радиоавтоматика [Текст]: учеб. пособие / А.И. Перов, В.Н. Замолодчиков, В.М. Чиликин. - М.: Радиотехника, 2014. - 320 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие указания	1
2. Лабораторные задания и указания по их выполнению	3
2.1. Задание первое	3
2.2. Задание второе	4
2.3. Задание третье	6
2.4. Задание четвертое	10
2.5. Задание пятое	14
2.6. Задание шестое	15
2.7. Задание седьмое	16
2.8. Задание восьмое	19
3. Контрольные вопросы для проверки усвоения материала	21
Библиографический список	24

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ СИСТЕМ  
ЧАСТОТНОЙ И ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ  
ЧАСТОТЫ И СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ  
МОДЕЛЕЙ ЭТИХ СИСТЕМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к лабораторной работе № 1 по дисциплине  
«Радиоавтоматика» для студентов специальности  
11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и  
направления 11.03.01 «Радиотехника»

Составитель: Володько Александр Владиславович

Компьютерный набор А.В. Володько.

Подписано к изданию 15.06.2019  
Уч. Изд.л. 1,5

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14.