



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Технологический институт  
Федерального государственного образовательного  
учреждения высшего профессионального образования  
«Южный федеральный университет»**

КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**Руководство к циклу лабораторных работ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ  
ЧАСТОТНЫХ ДИСКРИМИНАТОРОВ**

Для студентов специальностей 210304 Радиоэлектронные системы и  
210402 Средства связи с подвижными объектами  
всех форм обучения

**Р Т Ф**

Таганрог 2008

**Дятлов А. П., Дятлов П. А.** Руководство к циклу лабораторных работ «Моделирование автокорреляционных частотных дискриминаторов». — Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. — 40 с.

В руководстве рассматриваются принципы моделирования автокорреляционных частотных дискриминаторов на основе использования системы схемотехнического моделирования «Micro-Cap (5—8)». Исследуются особенности функционирования четырех типов автокорреляционных частотных дискриминаторов при воздействии гармонических, простых импульсных и шумовых сигналов.

Предназначается студентам специальностей 210304 «Радиоэлектронные системы» и 210402 «Средства связи с подвижными объектами» очной, заочной и дистанционной форм обучения.

Табл. 1. Ил. 22. Библиогр.: 8 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Технологического института ЮФУ.

Рецензент Ю. Ф. Евдокимов, канд. техн. наук, профессор кафедры радиотехнических и телекоммуникационных систем ТТИ ЮФУ.

© Технологический институт ЮФУ, 2008

© Дятлов А. П., 2008

© Дятлов П. А., 2008

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Бурный прогресс науки и техники вызывает у широких слоев населения потребность в непрерывном повышении образовательного уровня, что делает актуальным развитие не только традиционных (контактных), но и дистанционных форм обучения.

В процессе дистанционного обучения для развития комплексного восприятия полученных знаний, навыков, умений и обеспечения индивидуализации перерабатываемого материала особую актуальность приобретают электронные междисциплинарные методические разработки, на основе которых возможно проведение лекционных и практических занятий, лабораторных и контрольных работ, а также курсового проектирования.

Данное руководство предназначено для изучения методов анализа и моделирования автокорреляционных частотных дискриминаторов и основаны на использовании следующих междисциплинарных связей: 1) для специальности 210304 между такими курсами, как «Радиотехнические цепи и сигналы», «Радиолокационные и радионавигационные системы», «Прикладная информатика», «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоустройств и радиосистем», «Технико-экономическое проектирование РТС»; 2) для специальности 210402 между такими курсами, как «Теория электрической связи», «Основы теории систем связи с подвижными объектами», «Прикладная информатика», «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств», «Системы и сети связи с подвижными объектами», «Технико-экономическое проектирование средств связи».

В настоящее время имеется целый ряд учебных пособий [1—3], посвященных анализу измерителей частоты. Однако указанные пособия предназначены в основном для контактного вида обучения. Главной проблемой при дистанционном обучении является процесс контроля и тестирования обучаемого студента преподавателем, а также выполнение лабораторного практикума.

Для решения указанной проблемы дистанционного обучения предлагается электронная методическая разработка, состоящая из краткого теоретического базиса и методических указаний к лабораторным работам. Для моделирования автокорреляционных частотных дискриминаторов в процессе выполнения лабораторных работ предлагается использовать демонстрационные версии системы схемотехнического моделирования «Micro-Cap (5—8)» [4—5], ориентированные на IBM PC-совместимые персональные компьютеры.

Данное руководство обеспечивает процесс самостоятельного, но при этом управляемого и контролируемого усвоения студентами определенного объема знаний и умений по наиболее важным разделам базовых дисциплин. Возможность дистанционного проведения практических занятий и лабораторных работ сокращает сроки и стоимость обучения по сравнению с «кейсовой» технологией, что позволяет рекомендовать использование указаний не только для студентов дневной и заочной форм обучения, но и для специалистов, повышающих квалификацию в центрах переподготовки кадров.

## **1. СОДЕРЖАНИЕ ЦИКЛА РАБОТ**

1. Моделирование широкополосного фазовращателя.
2. Моделирование автокорреляционного частотного дискриминатора (АЧД).
3. Моделирование АЧД с квадратурной обработкой (АЧД КО).
4. Моделирование АЧД с корреляционно-фильтровой обработкой (АЧД КФ).
5. Моделирование АЧД с корреляционно-фильтровой обработкой и квадратурной обработкой (АЧД КФ КО).

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 2.1. Алгоритмы и структуры

#### автокорреляционных частотных дискриминаторов

Оценивание несущей частоты радиосигналов, наряду с их обнаружением, относится к числу основных задач первичной обработки информации в радиолокации, радионавигации, радиомониторинге и т. д.

Статистическая задача оценивания несущей частоты радиосигналов формулируется следующим образом. На основе наблюдения в течение времени  $T$  случайного процесса  $y_2(t)$ , представляющего собой аддитивную смесь сигнала  $S(t, f_s, \bar{\alpha})$  и белого шума  $n(t)$ , при постоянных на интервале наблюдения значениях параметров сигнала  $f_s$  и  $\bar{\alpha}$  необходимо получить оптимальную оценку несущей частоты радиосигнала  $\hat{f}_s$ . Полагаем, что исходные условия при оценивании несущей частоты радиосигналов являются такими же, как при обнаружении радиосигналов.

В условиях априорной неопределённости о статистических характеристиках параметров сигналов для получения их оптимальной оценки широкое распространение получил метод максимального правдоподобия.

Алгоритм оптимального оценивающего устройства определяется из уравнения максимального правдоподобия

$$\frac{d \ln \Lambda(y_2 / l)}{dl} = 0,$$

где  $\Lambda(y_2/l)$  — отношение правдоподобия.

Структура оптимального оценивающего устройства является многоканальной. При этом в каждом из  $m$  каналов формируется отношение правдоподобия для некоторого фиксированного значения информативного параметра  $l$ , т.е. для значений  $l_i$  при  $i = \{1, m\}$ , где  $m = \Delta L / \Delta l$ ,  $\Delta L$  — интервал неопределённости по  $l$ ;  $\Delta l = l_{i+1} - l_i$  — разрешающая способность по  $l$ . Оценка информативного пара-

метра  $\hat{l}$  соответствует значению информативного параметра в канале с максимальным выходным эффектом.

В тех случаях, когда многоканальный принцип построения оценивающего устройства неприемлем из-за сложности, используют дискриминаторный принцип, при котором оценка информативного параметра  $\hat{l}$  определяется из следующего соотношения:

$$\hat{l} = l_0 - \left[ \frac{d \ln \Lambda(y_2 / l)}{dl} \right]_{l=l_0} \cdot \left[ \frac{d^2 \ln \Lambda(y_2 / l)}{dl^2} \right]_{l=l_0}^{-1},$$

где  $l_0$  — опорное значение  $l$ , соответствующее среднему значению интервала неопределенности  $\Delta l$ .

При оценивании неэнергетических параметров сигналов, в том числе  $f_s$ , алгоритм оценивающего устройства несколько упрощается:

$$\Delta l = l_0 - \hat{l} = \frac{1}{K_g} \left[ \frac{d \ln \Lambda(y_2 / l)}{dl} \right]_{l=l_0},$$

где  $\Delta l$  — отклонение оцениваемого параметра сигнала от опорного значения;  $K_g$  — коэффициент пропорциональности.

Использование дискриминаторного принципа позволяет существенно упростить структуру и реализацию оценивающего устройства, и поэтому дискриминаторы, несмотря на проигрыш в качестве оценивания, получили широкое распространение на практике.

Автокорреляционные частотные дискриминаторы (АЧД) являются одним из видов частотных дискриминаторов (ЧД), основанных на использовании алгоритма автокорреляционной обработки, который способен обеспечивать высокую точность и быстродействие оценивания частоты в широком частотном диапазоне при высокой плотности импульсных сигналов. В настоящее время при построении АЧД широкое распространение получили следующие алгоритмы оценивания несущей (центральной) частоты сигналов с симметричным спектром:

$$\hat{f}_s = \frac{1}{2\pi\tau_1} \left[ \arcsin \left( \frac{2U_s(T, \tau_1)}{K_{\Pi} U_{ms}^2} \right) \right]; \quad U_s(T, \tau_1) = \frac{1}{T} \int_0^T y_{2\perp}(t) y_2(t - \tau_1) dt; \quad (2.1)$$

$$\hat{f}_c = \frac{1}{2\pi\tau_1} \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{U_s(T, \tau_1)}{U_c(T, \tau_1)} \right) \right]; \quad U_c(T, \tau_1) = \frac{1}{T} \int_0^T y_2(t) y_2(t - \tau_1) dt, \quad (2.2)$$

где  $y_2(t)$ ,  $y_{2\perp}(t)$  — квадратурные составляющие смеси сигнала и помехи;  $U_s(T, \tau_1)$ ,  $U_c(T, \tau_1)$  — синусная и косинусная составляющие выходного эффекта;  $\hat{f}_s$  — оценка частоты сигнала;  $K_{\Pi}$  — коэффициент передачи перемножителя размерностью 1/В;  $U_{ms}$  — амплитуда сигнала.

Алгоритм (2.1) соответствует типовому построению АЧД, а алгоритм (2.2) — АЧД с квадратурной обработкой.

Структуры АЧД, соответствующие алгоритмам (2.1) и (2.2), приведены на рис. 2.1 и 2.2, где приняты следующие обозначения: ВТ — входной тракт; ПФ — полосовой фильтр; Н — нормирующее устройство; ЛЗ — линия задержки с временем запаздывания  $\tau_1$ ; П — перемножитель; Инт — интегратор; РУ<sub>1</sub> — решающее устройство, выполняющее преобразования вида  $\frac{1}{2\pi\tau_1} \arcsin(U_{\text{ВЫХ}})$ ; Фвр — фазовращатель на угол  $\pi/2$ ; Дел — делитель напряжения; РУ<sub>2</sub> — решающее устройство, выполняющее преобразование вида  $\frac{1}{2\pi\tau_1} \operatorname{arctg}(U_{\text{ВЫХ}})$ .

В целом ряде случаев из РУ исключают сложные реализации операции  $\arcsin$  и  $\operatorname{arctg}$ . При этом в РУ<sub>1</sub> и РУ<sub>2</sub> осуществляется преобразование вида  $\frac{1}{2\pi\tau_1} (U_{\text{ВЫХ}})$ .

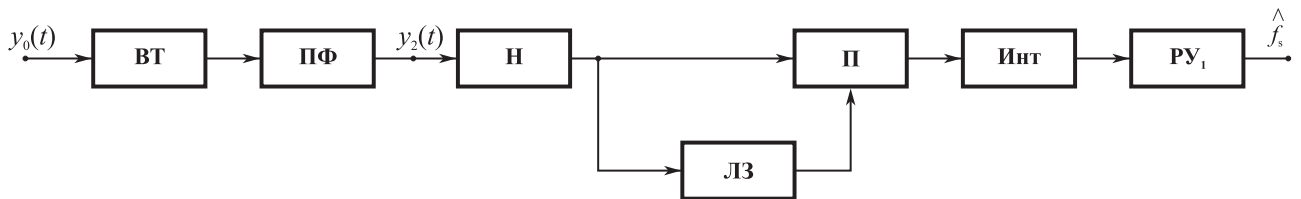


Рис. 2.1

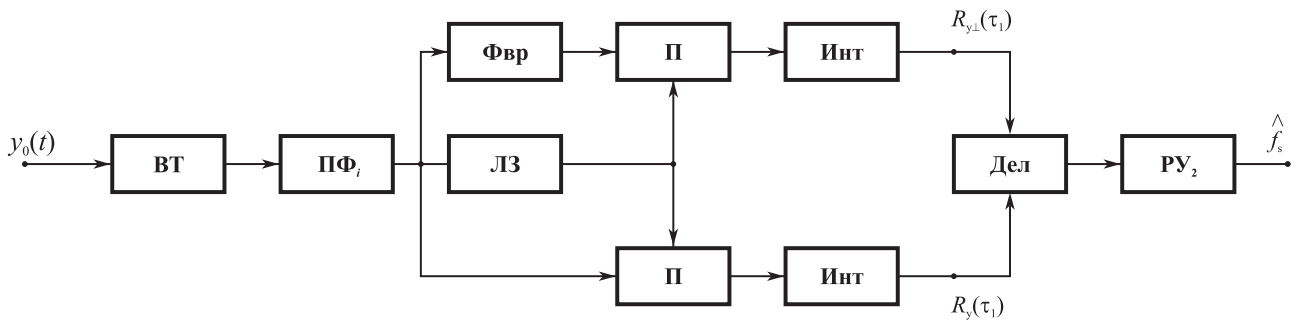


Рис. 2.2

Дискриминационные характеристики  $U_{\text{вых}} = F(f_s)$  рассмотренных выше АЧД при исключении тригонометрических преобразований из  $РУ_1$  и  $РУ_2$  приведены на рис. 2.3 и 2.4. Форма дискриминационной характеристики в АЧД с типовой структурой существенно зависит от соотношения амплитуд напряжений на входах перемножителя  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$ . Если  $U_{m2} \gg U_{m1}$ , то дискриминационная характеристика имеет вид

$$U_{\text{вых}} = K_n U_{m1} \sin(\omega_s \tau_1),$$

где  $U_{\text{вых}}$  — эффект на выходе интегратора АЧД;  $K_n$  — коэффициент передачи перемножителя.

При  $U_{m1} = U_{m2}$  дискриминационная характеристика имеет следующий вид:

$$U_{\text{вых}} = K_n U_{m1} \{ |\cos(\omega_s \tau_1 / 2)| - |\sin(\omega_s \tau_1 / 2)| \}.$$

Второй режим работы перемножителя является предпочтительным, поскольку дискриминационная характеристика при этом близка к линейной в пределах от  $f_n - 1/4\tau_1$  до  $f_n + 1/4\tau_1$ , где  $f_n$  — средняя частота рабочего частотного диапазона АЧД.

Дискриминационные характеристики АЧД имеют циклический характер, что приводит к неоднозначности отсчета  $f_s$ , в связи с чем необходимо использовать многоскальное построение или варьировать такими параметрами АЧД, как ширина рабочего частотного диапазона  $\Delta f_n$  и крутизна дискриминационной характеристики  $S$ .

При одинаковых параметрах в АЧД с квадратурной обработкой диапазон однозначного отсчета  $f_s$  в два раза меньше, чем в АЧД с типовой структурой, в случае исключения из  $РУ_1$  и  $РУ_2$  тригонометрических преобразований. Однако оценка частоты АЧД с типовой структурой неинварианта к уровню сигнала, что



приводит к необходимости введения в его состав нормирующего устройства (Н).

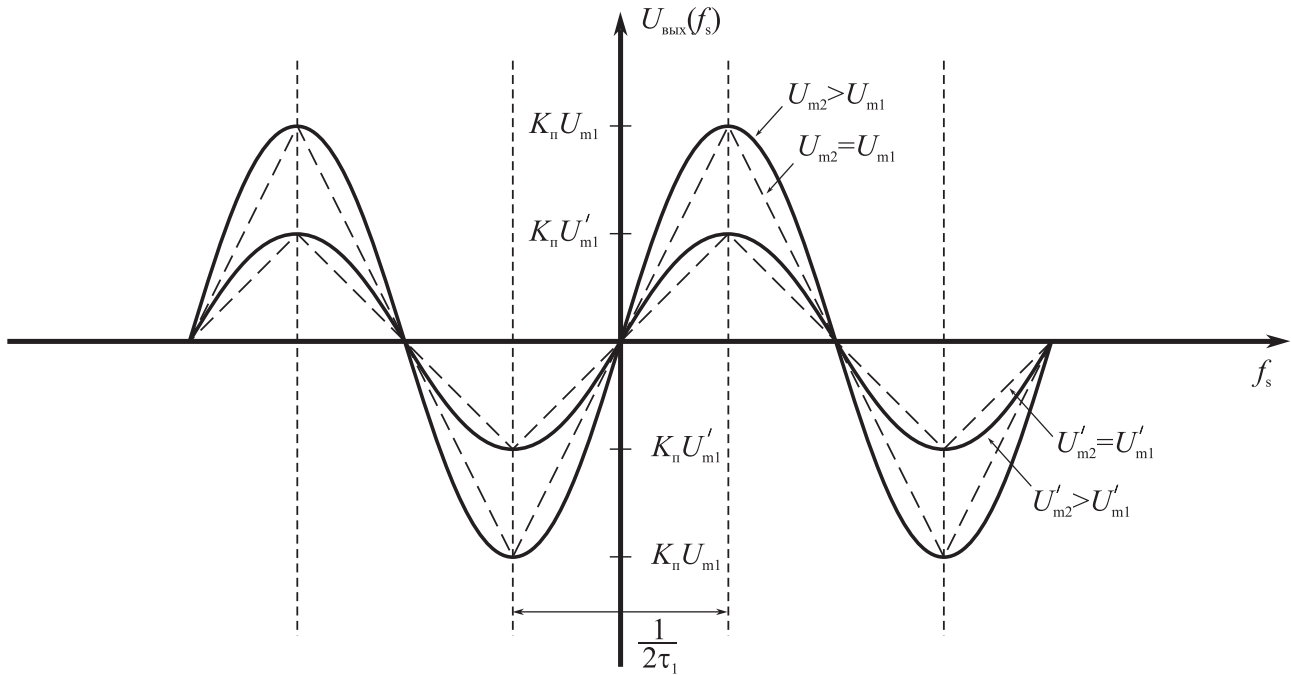


Рис. 2.3

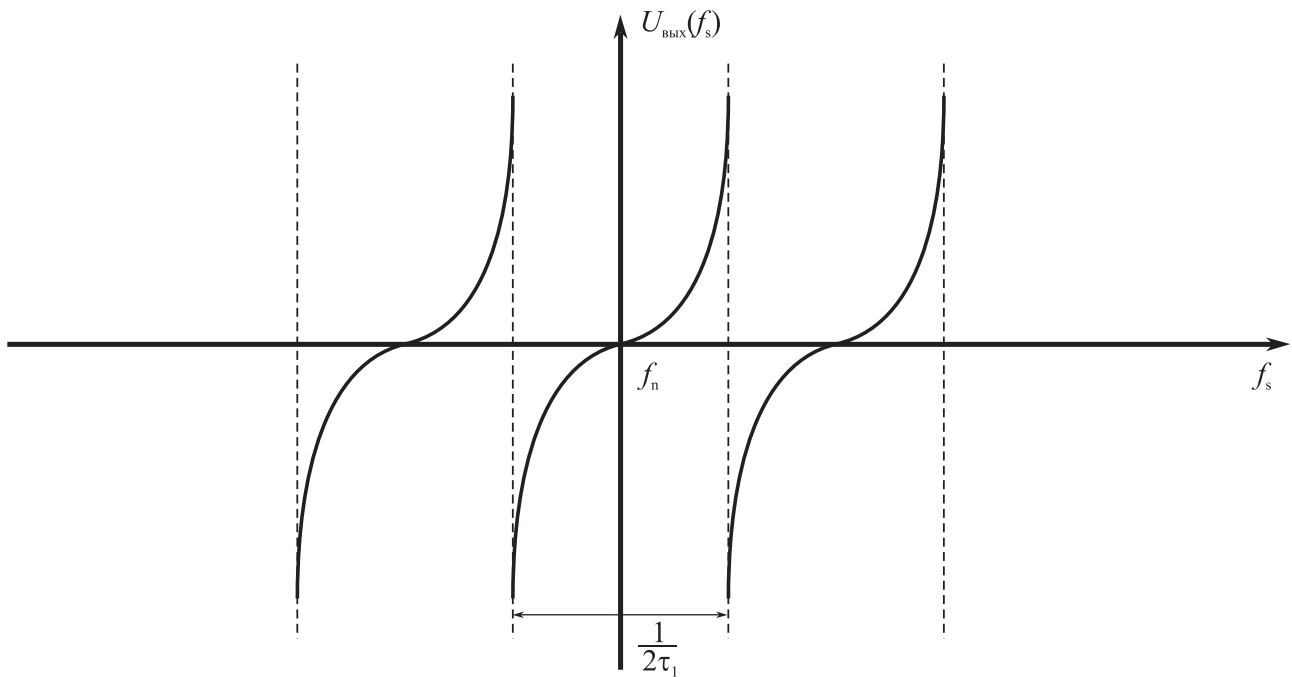


Рис. 2.4

Наряду с рассмотренными выше структурами широкое распространение получили структуры на основе корреляционно-фильтровой обработки, приведенные на рис. 2.5 и 2.6, где дополнительно к обозначениям, принятым на рис. 2.1 и 2.2, имеем: См — смеситель; Г — фиксированный гетеродин с частотой  $f_p$ ; ПФр — полосовой фильтр разностной частоты; ФД — фазовый детектор.

Целесообразность использования в АЧД корреляционно-фильтрового преобразования (КФП) обусловлена следующими факторами: 1) в АЧД КФП (см. рис. 2.5) появляется возможность повысить эффективность нормирующего устройства (Н) по сравнению с АЧД (см. рис. 2.1), поскольку полоса пропускания ПФр  $\Delta f_{\text{ПФр}}$  меньше, чем  $\Delta f_n$ , и это обстоятельство позволяет снизить уровень порога нормировки; 2) в АЧД с корреляционно-фильтровым преобразованием и квадратурной обработкой (АЧД КФП КО) (см. рис. 2.6) можно вместо широкополосного Фвр использовать узкополосный Фвр и увеличить по сравнению с АЧД с квадратурной обработкой (см. рис. 2.2) динамический диапазон за счет введения нормирующего устройства (Н) на выходе ПФр.

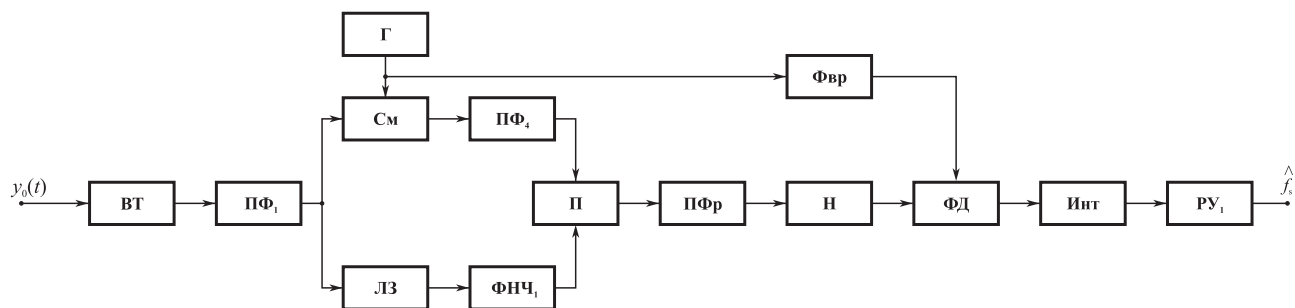


Рис. 2.5

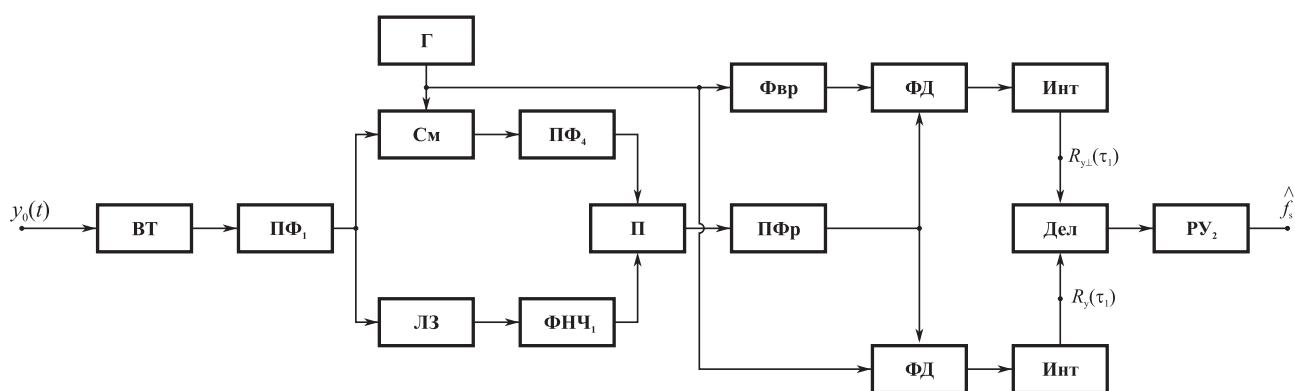


Рис. 2.6

## 2.2. Основные характеристики автокорреляционных частотных дискриминаторов

АЧД являются составной частью радиосистем первичной обработки информации (РСПОИ). В том случае, когда РСПОИ включает в себя совокупность широкополосного беспойска по частоте ВТ и АЧД, то обеспечивается мгновенное моноимпульсное оценивание частоты при плотностях потока сигналов

до 106 импульсов в секунду, что важно на этапе обнаружения и установления контакта с целью. При использовании в РСПОИ АЧД в совокупности с супергетеродинным ВТ обеспечивается детальный анализ сигнала, в ходе которого оцениваются несущая частота, интервал корреляции, вид и параметры угловой модуляции. В данном случае рассматривается использование АЧД для оценивания несущей частоты сигнала.

К числу основных характеристик АЧД следует отнести:

- погрешность оценивания частоты;
- пороговую чувствительность;
- помехоустойчивость;
- рабочий частотный диапазон;
- разрешающую способность;
- динамический диапазон;
- быстродействие;
- вид индикации.

Среднеквадратичная погрешность оценивания частоты  $\sigma f_s$  является важной характеристикой АЧД. Погрешность  $\sigma f_s$  определяется совокупностью таких частных погрешностей, как флюктуационная  $\sigma f_\phi$ , аппаратурная  $\sigma f_a$ , методическая  $\sigma f_m$  и погрешность классификации  $\sigma f_k$ :

$$\sigma f_s = \sqrt{\sigma f_\phi^2 + \sigma f_a^2 + \sigma f_m^2 + \sigma f_k^2} .$$

В данном случае полагаем, что среднеквадратичная погрешность  $\sigma f_s$  определяется величиной флюктуационной погрешности  $\sigma f_\phi$  и, как показано в работе [3], определяется следующим соотношением:

$$\sigma f_s = \frac{1}{Sg} ,$$

где  $S$  — крутизна дискриминационной характеристики АЧД;  $g$  — отношение сигнал/помеха по напряжению на выходе АЧД.

При приеме гармонических сигналов (ГС) имеем:

$$S_{\Gamma} = 2\pi\tau_1; g_{\Gamma} = \frac{g_{\text{BX}}^2 \sqrt{\Delta f_n T}}{\sqrt{1 + 2g_{\text{BX}}^2}},$$

где  $g_{\text{BX}}$  — входное отношение сигнал/помеха по напряжению.

При приеме простых импульсных сигналов (ПИС) имеем:

$$S_{\Pi} = 2\pi\tau_1; g_{\Pi} = \frac{g_{\text{BX}}^2 r_{\text{сп}}(\tau_1) \sqrt{\Delta f_n T}}{\sqrt{1 + 2g_{\text{BX}}^2}}; r_{\text{сп}}(\tau_1) = 1 - \frac{|\tau_1|}{\tau_{\text{и}}},$$

где  $r_{\text{сп}}(\tau_1)$  — огибающая коэффициента автокорреляции ПИС;  $\tau_{\text{и}}$  — длительность импульса.

При приеме шумовых сигналов (ШС) имеем:

$$S_{\text{ш}} = 2\pi\tau_1; g_{\text{ш}} = \frac{\sqrt{2}g_{\text{BX}}^2 r_{\text{шш}}(\tau_1) \sqrt{\Delta f_n T}}{\sqrt{1 + 2g_{\text{BX}}^2 + \sqrt{2}g_{\text{BX}}^4 (1 + r_{\text{шш}}^2(\tau_1)) \frac{\Delta f_n}{\Delta f_s}}} \text{ при } \Delta f_s \leq \Delta f_n;$$

$$r_{\text{шш}}(\tau_1) = \text{sinc}(\pi\Delta f_s \tau_1),$$

где  $r_{\text{шш}}(\tau_1)$  — огибающая коэффициента автокорреляции ШС;  $\Delta f_s$  — ширина спектра ШС.

Пороговая чувствительность АЧД определяется так же, как и для приемника прямого усиления, поскольку при работе в широком частотном диапазоне  $\Delta f_n$  и необходимости обеспечения однозначного отсчета частоты, т. е. при  $\tau_1/\tau_{\text{кп}} \ll 1$ , где  $\tau_{\text{кп}}$  — интервал корреляции помехи  $n(t)$  на выходе ПФ<sub>1</sub>, отношение сигнал/помеха на выходе АЧД соответствует отношению сигнал/помеха на выходе энергетического обнаружителя. Пороговая чувствительность  $P$  определяется параметрами ВТ и постоянной интегрирования  $T$  на выходе АЧД

$$P = k_0 T_0 N_{\text{ш}} \sqrt{2\Delta f_n / T},$$

где  $k_0$  — постоянная Больцмана;  $T_0$  — температура окружающей среды по шкале Кельвина;  $N_{\text{ш}}$  — коэффициент шума РСПОИ.

Помехоустойчивость АЧД при использовании в режиме обнаружения характеризуется вероятностью обнаружения импульса  $P_{\text{по}}$  и вероятностью ложных тревог  $P_{\text{лт}}$ .

Задачи оценивания частоты должны решаться только при наличии сигнала на входе АЧД. Поэтому в структуру АЧД необходимо вводить обнаружитель сигналов (ОС) и логическое устройство (ЛУ), обеспечивающее исключение псевдооценок. Структура АЧД, осуществляющего оценивание частоты при отсутствии априорной информации о наличии сигнала на его входе, приведена на рис. 2.7.

В качестве ОС может использоваться энергетический обнаружитель. Рабочий частотный диапазон АЧД  $\Delta f_n$  определяется требованиями к РСПОИ, в составе которой он используется, и технико-эксплуатационными характеристиками широкополосных функциональных узлов, входящих в состав АЧД. При использовании АЧД в составе РСПОИ, предназначенных для мгновенного измерения частоты, в настоящее время реализованы АЧД с коэффициентом частотного перекрытия, равным октаве, в пределах от 2 до 10 ГГц. В том случае, когда в АЧД величина  $\tau_1$ , которая прямо пропорциональна крутизне дискриминационной характеристики, выбрана фиксированной, ширина рабочего частотного диапазона АЧД, в котором обеспечивается однозначное оценивание, определяется из соотношения

$$\Delta f_n = \frac{1}{2\tau_1}.$$

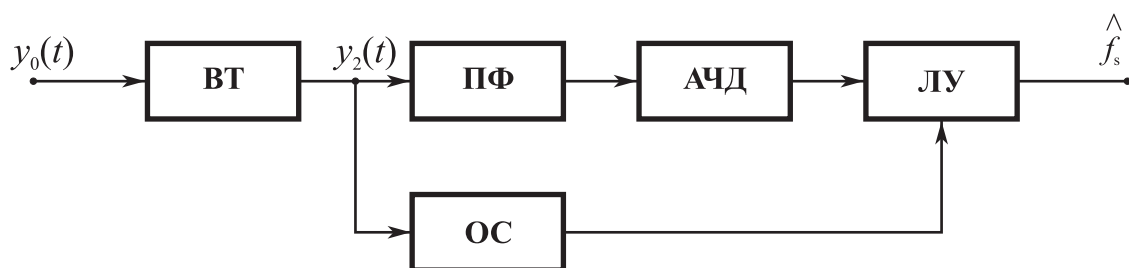


Рис. 2.7

Центральная частота АЧД  $f_n$  соответствует нулю дискриминационной характеристики при выполнении условия

$$\Delta f_n = \frac{2K + 1}{2\tau_1},$$

где  $K$  — целое число.

Разрешающая способность АЧД определяется шириной рабочего частотного диапазона  $\Delta f_n$ , поскольку в случае одновременного приема двух или нескольких сигналов на его выходе формируется один отсчет, не совпадающий в общем случае ни с одной из частот принимаемых сигналов. С учетом этого область применения рассматриваемых АЧД ограничивается случаем приема потока импульсных несовпадающих во времени сигналов или одиночных непрерывных сигналов. С целью расширения области применения АЧД для более сложных моделей радиоэлектронной обстановки необходима его модернизация на основе использования перестраиваемого преселектора или введения в его состав автокорреляционного защитного устройства.

Верхняя граница динамического диапазона входных сигналов определяется уровнем сигнала на входе АЧД, при котором не происходит увеличения погрешности оценивания частоты  $\sigma f_s$  выше допустимой. Нижняя граница динамического диапазона определяется уровнем сигнала, при котором нормирующее устройство (Н) обеспечивает допустимое влияние флуктуации сигнала на величину  $\sigma f_s$ .

При использовании в качестве нормирующего устройства АРУ влияние уровня сигнала на величину  $\sigma f_s$  можно оценить нормированным коэффициентом  $K_{нф}$ , определяющим проигрыш по крутизне дискриминационной характеристики АЧД

$$K_{нор} = \frac{g_{вх}}{\sqrt{1 + g_{вх}^2}}. \quad (2.3)$$

Соотношение (2.3) справедливо для АЧД с типовой структурой (см. рис. 2.1). При переходе к АЧД КФП нижняя граница динамического диапазона может быть снижена в количество раз, пропорциональное отношению  $g_{ПФр}/g_{вх}$ , где  $g_{ПФр}$  — отношение сигнал/помеха по напряжению на выходе ПФр, а при переходе к АЧД КФП КО — пропорциональное отношению  $g_{дел}/g_{вх}$ , где  $g_{дел}$  — отношение сигнал/помеха по напряжению на выходе Дел.

Динамический диапазон АЧД зависит от особенностей ВТ и находится в пределах от 40 до 70 дБ.

Быстродействие АЧД определяется величиной временного сдвига  $\tau_1$ , вносимого ЛЗ, постоянной интегрирования  $T$  и временем обработки сигнала в РУ. При использовании цифровой обработки сигналов в РУ максимальное быстродействие может составлять доли микросекунды.

В АЧД, входящих в состав РСПОИ, предназначенной для мгновенного оценивания частоты, наибольшее распространение получили два вида индикации:

- индикация в полярных координатах на экране электронно-лучевой трубки, при которой амплитуда радиального отклонения луча пропорциональна мощности сигнала, а угол относительно начала отсчета пропорционален частоте  $f_c$ ;
- индикация в цифровой форме в виде двоичного или позиционного кодов.

АЧД обеспечивает поимпульсную индикацию частоты сигнала. Однако для повышения достоверности индикации необходимо осуществлять прием нескольких импульсов, что приводит к увеличению времени обработки сигналов с учетом периодичности их повторения до 2—10 мс.

### **3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ № 1—5**

#### **«МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЧАСТОТНЫХ ДИСКРИМИНАТОРОВ»**

#### **3.1. Содержание лабораторных работ**

В лабораторной работе № 1 выполняется моделирование широкополосного фазовращателя АЧД. В лабораторной работе № 2 выполняется моделирование АЧД. В лабораторной работе № 3 выполняется моделирование АЧД КО. В лабораторной работе № 4 выполняется моделирование АЧД КФП. В лабораторной работе № 5 выполняется моделирование АЧД КФП КО.

#### **3.2. Цель работ**

1. Ознакомление с системой схемотехнического моделирования «Micro-Cap (5—8)».

2. Изучение методов моделирования формирования сигналов и помех и их прохождение через функциональные узлы (ФУ) заданного типа АЧД.

3. Изучение методов моделирования заданного типа АЧД и ФУ, входящих в его состав.

### 3.3. Содержание лабораторной работы № 1

1. Произвести формирование эквивалентной структуры в соответствии с рис. 3.1 на основе рекомендаций по использованию «Micro-Cap (5–8)» и приведенных в «руководстве пользователя» макросов. На рис. 3.1 приняты следующие обозначения: Г — генератор сигнала; ПФ<sub>1</sub> — полосовой фильтр; ФНЧ — фильтр нижних частот; П — перемножитель; Фвр — фазовращатель на 90°, состоящий из полосовых фильтров ПФ<sub>2</sub> и ПФ<sub>3</sub>.

2. На основе использования макросов, приведенных в «руководстве пользователя», составить полную функциональную схему, приведенную на рис. 3.1, произвести установку параметров всех функциональных узлов (ФУ).

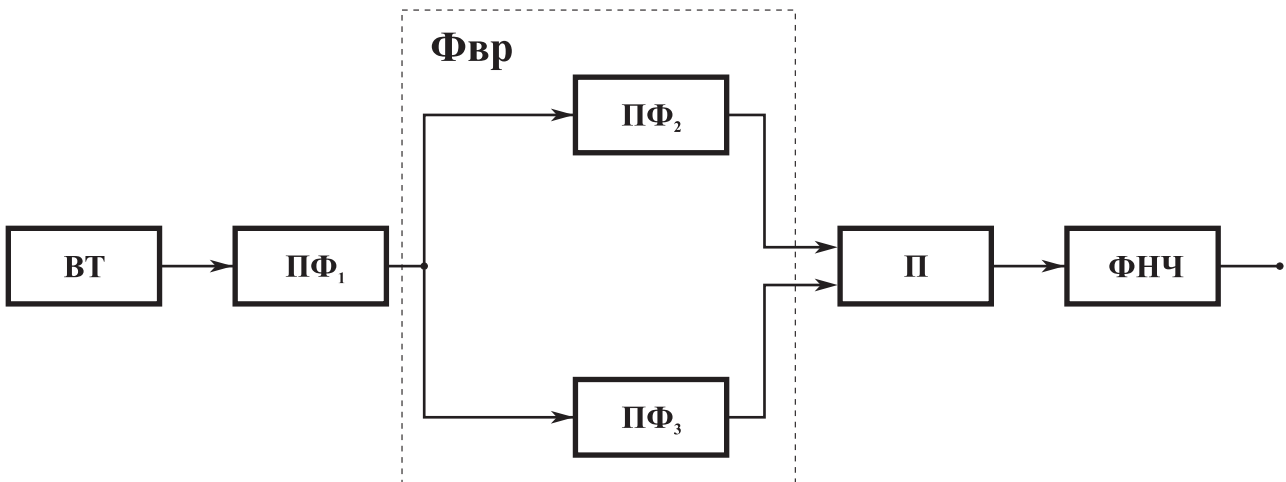


Рис. 3.1

### 3.4. Методические указания к проведению лабораторной работы № 1

1. Формирование функциональной схемы, представленной на рис. 3.1, следует осуществлять на основе рекомендаций, приведенных в [4, 5] и руководстве пользователя [6].

2. При моделировании амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ПФ<sub>1</sub> и АЧХ ФНЧ на основе метода частотного анализа следует использовать структуры, приведенные на рис. 3.2, а и б.



При моделировании АЧХ ПФ<sub>1</sub> средняя частота  $f_{\phi 1} = f_n$ , где  $f_n$  — средняя частота рабочего частотного диапазона, и полоса пропускания  $\Delta f_{\phi 1} = \Delta f_n$ ,  $\Delta f_n$  — ширина рабочего частотного диапазона.

При моделировании АЧХ ФНЧ частота среза определяется из следующего выражения:

$$f_c \geq 10/t_{\text{мод}},$$

где  $t_{\text{мод}}$  — время моделирования.

Формирование макросов ПФ и ФНЧ приведено в прил. П1.



Рис.3.2

3. Широкополосный фазовращатель (Фвр) реализуется на основе фазоразностной цепи, состоящей из ПФ<sub>2</sub> и ПФ<sub>3</sub>.

Параметры АЧХ ПФ<sub>2</sub> выбираются из следующих условий:

$$\Delta f_{\phi 2} = f_n, \Delta f_{\phi 2} \geq 7,5\Delta f_n,$$

где  $f_{\phi 2}$ ,  $\Delta f_{\phi 2}$  — средняя частота и полоса пропускания ПФ<sub>2</sub>.

По результатам моделирования в режиме частотного анализа для ПФ<sub>2</sub> снимается зависимость  $t_{\text{гр2}}(f)$  и определяется величина группового времени запаздывания на частоте  $f_n$  —  $t_{\text{гр2}}(f_n)$ . После этого параметры АЧХ ПФ<sub>3</sub> выбираются из следующих соотношений:

$$\Delta f_{\phi 2} = \Delta f_3, a f_{\phi 3} = f_{\phi 2} - \Delta f, \Delta f = 1/4 t_{\text{гр2}}(f_n),$$

где  $\Delta f$  — величина частотного сдвига, обеспечивающего  $\Delta \varphi \approx 90^\circ$ .

4. В режиме частотного анализа промоделировать АЧХ ПФ<sub>1</sub> и ФНЧ и зафиксировать их на графиках<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> При составлении графической части отчета по лабораторной работе полезным средством является набор команд из меню **Edit**, например, таких как **Copy the Select Box Part in BMP Format**, **Copy the Entire Window in WMF Format** и **Copy the Entire Window in EMF Format**. Использование данных команд приведет к копированию графического окна программы в графических форматах BMP, WMF и EMF соответственно.

5. В режиме частотного анализа промоделировать АЧХ и ФЧХ ПФ<sub>2</sub> и ПФ<sub>3</sub>:  $K_{\phi 2}(f)$ ,  $K_{\phi 3}(f)$ ,  $\varphi_{\phi 2}(f)$ ,  $\varphi_{\phi 3}(f)$ , а также зависимости группового времени запаздывания от частоты  $t_{гр2}(f)$  и  $t_{гр3}(f)$ , зафиксировать их на графиках.

6. Произвести коррекцию средней частоты ПФ<sub>3</sub>  $f_{\phi 3}$  таким образом, чтобы в пределах заданного рабочего частотного диапазона  $\Delta f_n$  разность фаз соответствовала следующему условию:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\phi 2}(f) - \varphi_{\phi 3}(f) = \rightarrow 90^\circ.$$

7. В режиме временного анализа Г формирует гармоническое колебание с амплитудой  $U_m = 1$  В и частотой  $f_c = f_n$ , равной средней частоте рабочего частотного диапазона, которое подается на вход ПФ<sub>1</sub> и далее после прохождения через ПФ<sub>2</sub>, ПФ<sub>3</sub> и П фиксируется в виде постоянного напряжения на выходе ФНЧ

$$U_{=} = U_m \cos \Delta\varphi = U_m \sin \sigma\varphi,$$

где  $|\delta\varphi| = \Delta\varphi - 90^\circ$ ,  $\delta\varphi$  — погрешность в установке фазового сдвига  $90^\circ$ .

В тех случаях, когда

$$U_{=} = F(f_c) = U_m \sin \delta\varphi(f_c) > \Delta U_d$$

или

$$\delta\varphi(f_c) > \delta\varphi_d \text{ при } f_c \in [(f_n - \Delta f_n/2); (f_n + \Delta f_n/2)],$$

где  $U_d$  — допустимая погрешность величины напряжения  $U_{=}$  на выходе ФНЧ;

$\delta\varphi_d$  — допустимая погрешность в установке фазового сдвига  $90^\circ$ ,

необходимо произвести дополнительную коррекцию средней частоты  $f_{\phi 3}$ , после чего можно сделать вывод о том, что ФВр, реализованный на основе ПФ<sub>2</sub> и ПФ<sub>3</sub>, готов к использованию при моделировании АЧД КО.

### 3.5. Методические указания к проведению лабораторных работ № 2—5

В соответствии с заданным номером варианта следует:

1. Произвести формирование эквивалентной структуры АЧД в соответствии с рис. 3.3—3.6 на основе рекомендаций по использованию «Micro-Cap (5—8)» и приведенных в прил. П1.

На рис.3.3—3.6 приняты следующие обозначения: ГС — генератор сигнала; ГШ — генератор шума; Сум — сумматор; ПФ<sub>1</sub>, ПФ<sub>2</sub>, ПФ<sub>3</sub> — полосовые фильтры; П — перемножитель; ФВр — фазовращатель; У — усилитель; ЛЗ — линия задержки; ФНЧ — фильтр нижних частот; ФП<sub>1</sub>, ФП<sub>2</sub> — функциональные

преобразователи; Дел — делитель напряжений; Гр — генератор разностной частоты; ПФр — полосовой фильтр разностной частоты.

2. На основе использования макросов, составить полную функциональную схему заданного АЧД и произвести установку параметров всех ФУ.

3. В режиме частотного анализа промоделировать АЧХ ПФ<sub>1</sub> и ФНЧ и зафиксировать их на графиках.

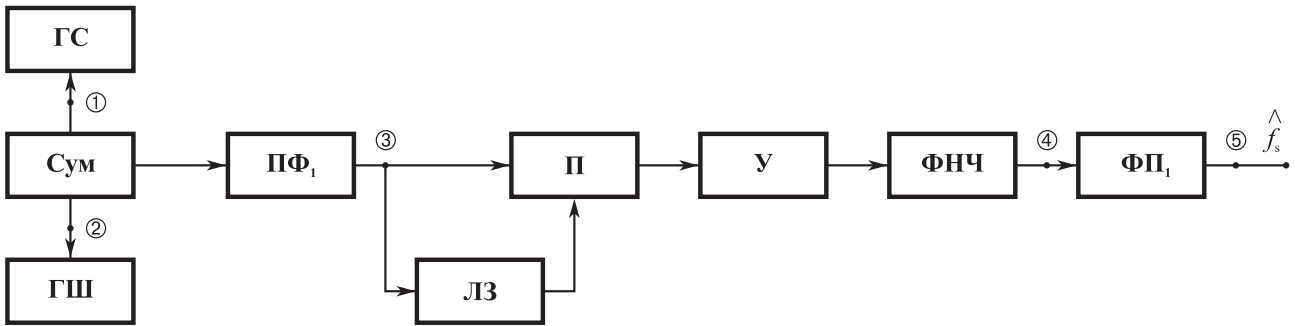


Рис. 3.3

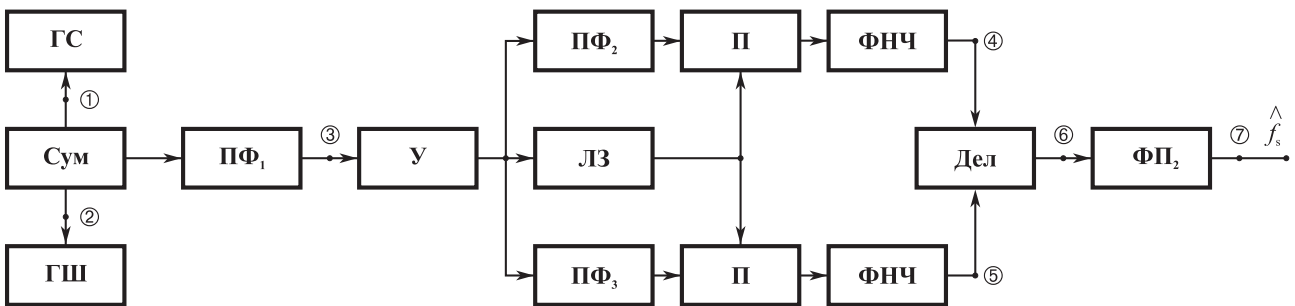


Рис. 3.4

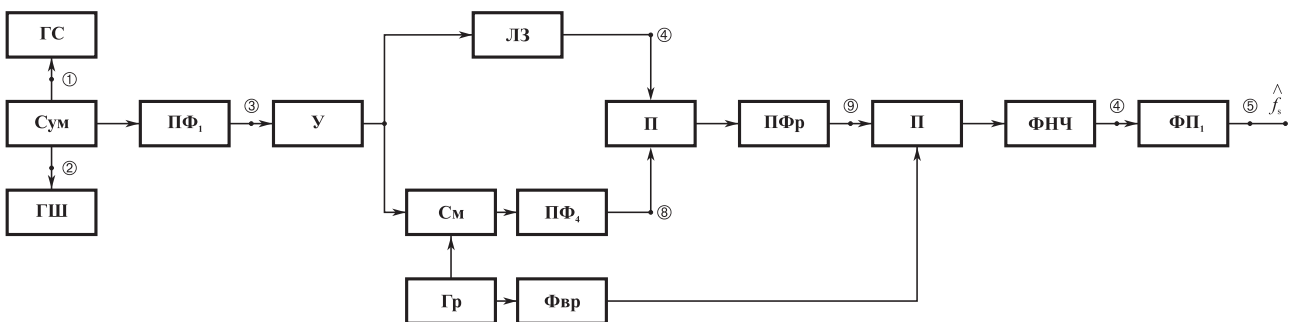


Рис. 3.5

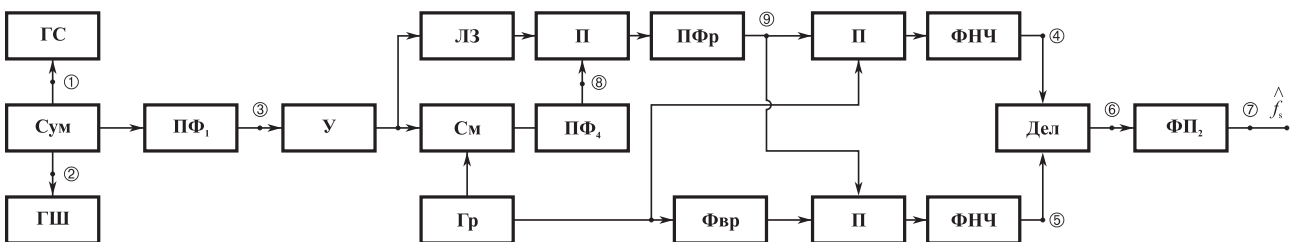


Рис. 3.6

4. В режиме спектрального анализа промоделировать процессы на выходах генератора сигналов (ГС), генератора шума (ГШ) и на выходе ПФ<sub>1</sub> и зафиксировать эпюры на графиках.

5. В режиме временного анализа промоделировать прохождение сигнала через ФУ и зафиксировать эпюры в контрольных точках 1 — 9 эквивалентной схемы.

6. Подать на вход АЧД помеху от ГШ с заданной спектральной плотностью  $N_n$  (Вт/Гц), и в режиме временного анализа установить коэффициент передачи АЧД в масштабном усилителе  $У$ , необходимом для того, чтобы уровень шума на выходе ФНЧ соответствовал заданному  $U_d$ , например  $U_d = 0,1$  В.

7. В режиме временного анализа снять дискриминационные характеристики (ДХ)  $U_{\text{вых}} = F(f_s)$  при подаче на вход АЧД только сигнала с амплитудой  $U_{\text{мс}} \in [0,1; 1]$  В, определить крутизну ДХ  $S$  и диапазон однозначного отсчета частоты  $\Delta f_{\text{од}}$ .

8. В режиме временного анализа снять ДХ  $U_{\text{вых}} = F(f_s)$  при подаче на вход АЧД сигнала и шума  $y_2(t)$  при разных входных отношениях сигнал/шум  $g_{\text{вх}}$  и определить допустимое значение  $g_{\text{вх д}}$  для обеспечения заданной относительной погрешности частоты  $\sigma/f_s$ .

### 3.6. Методические указания по выполнению лабораторных работ № 2—5

1. Моделирование АЧД осуществляется при воздействии на его вход двухкомпонентной смеси  $y_2(t) = S(t) + n(t)$ , где  $S(t)$  — сигнал;  $n(t)$  — квазибелый шум на выходе ПФ<sub>1</sub>.

В качестве полезных сигналов используются гармонический процесс  $S_r(t)$  или квазибелый шум  $S_{\text{ш}}(t)$ , описываемые следующими соотношениями:

$$S_r(t) = U_{\text{мс}} \cos 2\pi f_s t; \quad R_r(\tau_1) = \frac{U_{\text{мс}}^2}{2} \cos 2\pi f_s \tau_1;$$

$$S_{\text{ш}}(t) = U_n(t) \cos [2\pi f_s t + \varphi_n(t)];$$

$$R_{\text{ш}}(\tau_1) = \sigma_s^2 \text{sinc}(2\pi \Delta f_s \tau_1) \cos(2\pi f_s \tau_1);$$

$$\sigma_s^2 = N_s \Delta f_s,$$

где  $R_r(\tau_1)$ ,  $R_{ш}(\tau_1)$  — автокорреляционные функции  $S_r(t)$  и  $S_{ш}(t)$ ;  $f_s$ ,  $\Delta f_s$  — средняя частота и ширина спектра сигнала;  $\sigma_s^2$ ,  $N_s$  — дисперсия и спектральная плотность  $S_{ш}(t)$ .

Квазибелый шум  $n(t)$  имеет автокорреляционную функцию

$$R_n(\tau_1) = \sigma_n^2 \operatorname{sinc}(2\pi\Delta f_n\tau_1) \cos(2\pi f_n\tau_1); \quad \sigma_n^2 = N_n\Delta f_n,$$

где  $\sigma_n^2$ ,  $N_n$  — дисперсия и спектральная плотность  $n(t)$ ;  $f_n$ ,  $\Delta f_n$  — средняя частота и ширина спектра  $n(t)$ .

2. Алгоритм АЧД (см. рис. 3.3) может быть представлен следующими соотношениями:

$$\hat{f}_s = \frac{1}{2\pi\tau_1} \arcsin U_y(T); \quad U_y(T) = \frac{1}{T} \int_0^T y_2(t)y_2(t-\tau_1)dt; \quad T = \frac{1}{2\pi f_c},$$

где  $\hat{f}_s$  — оценка частоты сигнала;  $U_y(T)$  — напряжение на выходе ФНЧ;  $T$  — постоянная интегрирования;  $f_c$  — частота среза ФНЧ.

Алгоритм АЧД КО (см. рис. 3.4) может быть представлен следующими соотношениями:

$$\hat{f}_s = \frac{1}{2\pi\tau_1} \operatorname{arctg} U_{\text{дел}}(T); \quad U_{\text{дел}}(T) = \frac{U_{y\perp}(T)}{U_y(T)}; \quad U_{y\perp}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T y_{2\perp}(t)y_2(t-\tau_1)dt,$$

где  $U_{y\perp}(T)$ ,  $U_y(T)$  — квадратурные составляющие выходного эффекта.

Алгоритм АЧД КФП (см. рис. 3.5) может быть представлен следующими соотношениями:

$$\hat{f}_s = \frac{1}{2\pi\tau_1} \arcsin U_y(T); \quad U_y(T) = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{Фр}}(t)U_{\text{Гр}}(t)dt;$$

$$U_{\text{Фр}}(T) = \int_{-\infty}^t h_{\text{Фр}}(t-x)y_2(x-\tau_1)y_2(x)U_{\text{Гр}}(x)dx;$$

$$h_{\text{Фр}}(t) = 2\Delta f_p \sin \pi\Delta f_p t \cos 2\pi f_p t; \quad U_{\text{Гр}}(t) = U_r \cos 2\pi f_p t,$$

где  $U_{\text{Фр}}(t)$ ,  $U_{\text{Гр}}(t)$  — напряжение на выходе ПФр и Гр;  $h_{\text{Фр}}(t)$  — импульсная реакция ПФр;  $f_p$ ,  $\Delta f_p$  — средняя частота и полоса пропускания ПФр.

Алгоритм АЧД КФП КО (см. рис. 3.6) может быть представлен следующими соотношениями:

$$\hat{f}_s = \frac{1}{2\pi\tau_1} \operatorname{arctg} U_{\text{дел}}(T); \quad U_{\text{дел}}(T) = \frac{U_{y\perp}(T)}{U_y(T)};$$

$$U_{y\perp}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\Phi p}(t) U_{\Gamma p\perp}(t) dt; \quad U_y(T) = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\Phi p}(t) U_{\Gamma p}(t) dt,$$

где  $U_{\Gamma p\perp}(T)$ ,  $U_{\Gamma p}(T)$  — квадратуры напряжения  $\Gamma p$ .

3. При моделировании ПФ<sub>1</sub>, ПФ<sub>2</sub>, ПФ<sub>3</sub> следует воспользоваться методикой, приведенной в подразд. 3.4.

4. При моделировании ПФ<sub>4</sub> необходимо его параметры выбирать из следующих условий:

$$\Delta f_{\Phi 4} = \Delta f_n; \quad f_{\Phi 4} = f_n + f_p; \quad f_p = 3\Delta f_n,$$

где  $f_{\Phi 4}$ ,  $\Delta f_{\Phi 4}$  — средняя частота и полоса пропускания ПФ<sub>4</sub>.

5. При моделировании ПФ<sub>p</sub> необходимо его параметры выбирать из следующих условий:

$$f_{\text{ПФ}p} = f_p; \quad \Delta f_{\text{ПФ}p} = 2f_c,$$

где  $f_{\text{ПФ}p}$ ,  $\Delta f_{\text{ПФ}p}$  — средняя частота и полоса пропускания ПФ<sub>p</sub>;  $f_c$  — частота среза ФНЧ.

6. При снятии ДХ АЧД при подаче на его вход одного сигнала для набора частот (не менее десяти) в пределах рабочего частотного диапазона АЧД в таблицы заносятся отсчеты:

- для АЧД с типовой структурой  $U_{\text{фнч}} = F[f_s, U_{\text{мс}}]$  и  $U_{\text{фп1}} = F[f_s, U_{\text{мс}}]$ ;
- для АЧД КО  $U_{\text{дел}} = F[f_s, U_{\text{мс}}]$  и  $U_{\text{фп2}} = F[f_s, U_{\text{мс}}]$ ;
- для АЧД КФ  $U_{\text{фнч}} = F[f_s, U_{\text{мс}}]$  и  $U_{\text{фп1}} = F[f_s, U_{\text{мс}}]$ ;
- для АЧД КФ КО  $U_{\text{дел}} = F[f_s, U_{\text{мс}}]$  и  $U_{\text{фп2}} = F[f_s, U_{\text{мс}}]$ .

Затем строятся наборы ДХ АЧД и далее на частоте  $f_s = f_n$  определяется крутизна  $S$  и зависимость величины  $S$  от амплитуды сигнала.

7. Зависимость выходного отношения сигнал/помеха  $g$  по напряжению ко входному отношению сигнал/помеха, записываемая как функция следующего вида:

$$g_m = F[g_{\text{вх}}], \quad (3.1)$$

где  $g_m$  — максимальное отношение сигнал/помеха по напряжению, снимается в виде отсчетов на выходе ФНЧ соответствующих АЧД при частоте сигнала  $f_s$ , выбираемой из следующего условия:

$$\sin 2\pi f_s \tau_1 = 1.$$

По результатам отсчетов строится график функции (3.1).

Для снятия зависимости (3.1) на вход АЧД (точка 3) подается смесь  $y_2(t)$ , в которой от одного сеанса моделирования к другому меняется величина  $g_{\text{вх}}$  путем изменения уровня сигнала  $U_{\text{мс}}$  при фиксированной спектральной плотности помехи  $N_n$ .

Моделирование осуществляется в режиме временного анализа. Выходной эффект  $U_y(T)$  фиксируется на выходе ФНЧ.

Установление входного отношения сигнал/помеха по мощности  $g_{\text{вх}}^2$  в точке 3 осуществляется путем изменения уровня сигнала в  $\Gamma$ , с учетом постоянства дисперсии помехи  $\sigma_n^2 = N_n \Delta f_{\text{ф}}$ .

Для оценки выходного отношения сигнал/помеха по напряжению  $g$  используется статистическая обработка массива отсчетов  $U_y(T)$ :

$$g = \frac{M_1[U_y(T)] - M_1[U_n(T)]}{\sqrt{D[U_y(T)]}} = \frac{M_1[U_s(T)]}{\sqrt{D[U_y(T)]}},$$

$$D[U_y(T)] = M_2[U_y(T)] - M_1^2[U_y(T)],$$

где  $M_1[U_s(T)]$ ,  $M_1[U_n(T)]$  — математические ожидания выходного эффекта  $U_s(T)$  и  $U_n(T)$ , обусловленные воздействием на вход обнаружителя сигнала  $S(t)$  или помехи  $n(t)$ ;  $M_1[U_y(T)]$ ,  $M_2[U_y(T)]$  — первый и второй центральный моменты выходного эффекта  $U_y(T)$ , обусловленные воздействием смеси  $y(t) = S(t) + n(t)$ ;  $D[U_y(T)]$  — дисперсия выходного эффекта  $U_y(T)$ . Оценка статистических харак-

теристик выходного эффекта  $U_y(T)$  рассчитывается на основе использования следующих соотношений:

$$\hat{M}_1[U_s(T)] = \frac{\sum_{i=1}^m U_{si}}{m}; \quad \hat{M}_1[U_n(T)] = \frac{\sum_{i=1}^m U_{ni}}{m};$$

$$\hat{M}_1[U_y(T)] = \frac{\sum_{i=1}^m U_{yi}}{m} = \hat{M}_1[U_s(T)] + \hat{M}_1[U_n(T)];$$

$$\hat{D}[U_y(T)] = \frac{\sum_{i=1}^m U_{yi}^2}{m-1} - \hat{M}_1^2[U_y(T)], \quad m \geq 30,$$

где  $U_{si}(T)$ ,  $U_{ni}(T)$ ,  $U_{yi}(T)$  — отсчеты  $U_s(T)$ ,  $U_n(T)$ ,  $U_y(T)$  в  $i$ -м сеансе моделирования;  $m$  — количество сеансов моделирования в массиве.

В ходе выполнения лабораторных работ моделирование и расчеты выполняются в каждом сеансе в виде следующих этапов:

1) оценка  $\hat{M}_1[U_s(T)]$  получается при подаче на вход АЧД сигнала с фиксированной амплитудой  $U_{mc}$  для конкретного значения  $g_{вх}$ ;

2) оценка  $\hat{M}_1[U_n(T)]$  получается при подаче на вход АЧД помехи с фиксированной спектральной плотностью  $N_n$ ;

3) оценка  $\hat{M}_1[U_y(T)]$  вычисляется по формуле  $\hat{M}_1[U_y(T)] = \hat{M}_1[U_s(T)] + \hat{M}_1[U_n(T)]$ ;

4)  $\hat{M}_2[U_y(T)] = \frac{\sum_{i=1}^m U_{yi}^2}{m-1}$  получается при подаче на вход АЧД смеси

$$y_2(t) = S(t) + n(t);$$

5) оценка  $\hat{D}[U_y(T)]$  вычисляется по формуле  $\hat{D}[U_y(T)] = \hat{M}_2[U_y(T)] - \hat{M}_1^2[U_y(T)]$ .

По полученным результатам рассчитываются  $g$  при различных  $g_{вх}$  и затем строится графическая зависимость при представлении  $g_{вх}$  и  $g$  (в разгах децибел).



8. При снятии ДХ АЧД при подаче на его вход смеси  $y_2(t)$  для набора частот (не менее десяти) в пределах рабочего частотного диапазона АЧД в таблицы за-  
носятся отсчеты для  $g_m = 30; 10; 3$  математических ожиданий  $\hat{M}_1[U_s(T)]$  и сред-  
неквадратичных значений  $\hat{\sigma}[U_y(T)]$ , усредненных по  $m$  сеансам моделирования.  
На основе табличных данных строятся наборы ДХ  $U_{\text{фп}} = F[f_s, g_m]$ , по которым  
определяется допустимая величина  $g_{\text{вх}}$ , необходимая для обеспечения заданной  
величины  $\sigma f/f_s$ .

### 3.7. Варианты исходных данных к лабораторным работам № 1—5

1.1 — ГС; 1.2 — ШС;

2.1 —  $\sigma f/f_s = 10^{-1}$ ; 2.2 —  $\sigma f/f_s = 3 \cdot 10^{-2}$ ; 2.3 —  $\sigma f/f_s = 10^{-2}$ ;

3.1 —  $f_s = 10^3$  Гц; 3.2 —  $f_s = 10^4$  Гц;

4.1 —  $\Delta f_n = 10^6$  Гц; 4.2 —  $\Delta f_n = 3 \cdot 10^5$  Гц; 4.3 —  $\Delta f_n = 10^5$  Гц;

5.1 —  $N_n = 10^{-7}$  Вт/Гц; 5.2 —  $N_n = 10^{-9}$  Вт/Гц;

Таблица 1

| Варианты | Параметры АЧД |     |     |     |     | Варианты | Параметры АЧД |     |     |     |     |
|----------|---------------|-----|-----|-----|-----|----------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| 1        | 1.1           | 2.1 | 3.1 | 4.1 | 5.1 | 13       | 1.3           | 2.3 | 3.1 | 4.1 | 5.1 |
| 2        | 1.1           | 2.1 | 3.1 | 4.2 | 5.1 | 14       | 1.3           | 2.3 | 3.1 | 4.2 | 5.1 |
| 3        | 1.1           | 2.1 | 3.1 | 4.3 | 5.1 | 15       | 1.3           | 2.3 | 3.1 | 4.3 | 5.1 |
| 4        | 1.1           | 2.1 | 3.2 | 4.1 | 5.1 | 16       | 1.3           | 2.3 | 3.2 | 4.1 | 5.1 |
| 5        | 1.1           | 2.1 | 3.2 | 4.2 | 5.1 | 17       | 1.3           | 2.3 | 3.2 | 4.2 | 5.1 |
| 6        | 1.1           | 2.1 | 3.2 | 4.3 | 5.1 | 18       | 1.3           | 2.3 | 3.2 | 4.3 | 5.1 |
| 7        | 1.2           | 2.2 | 3.1 | 4.1 | 5.2 | 19       | 1.4           | 2.1 | 3.1 | 4.1 | 5.2 |
| 8        | 1.2           | 2.2 | 3.1 | 4.2 | 5.2 | 20       | 1.4           | 2.1 | 3.1 | 4.2 | 5.2 |
| 9        | 1.2           | 2.2 | 3.1 | 4.3 | 5.2 | 21       | 1.4           | 2.1 | 3.1 | 4.3 | 5.2 |
| 10       | 1.2           | 2.2 | 3.2 | 4.1 | 5.2 | 22       | 1.4           | 2.1 | 3.2 | 4.1 | 5.2 |
| 11       | 1.2           | 2.2 | 3.2 | 4.2 | 5.2 | 23       | 1.4           | 2.1 | 3.2 | 4.2 | 5.2 |
| 12       | 1.2           | 2.2 | 3.2 | 4.3 | 5.2 | 24       | 1.4           | 2.1 | 3.2 | 4.3 | 5.2 |

### 3.8. ОТЧЁТЫ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

В соответствии с заданным вариантом составляются отчеты по контрольной и лабораторным работам.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- результаты выполнения лабораторной работы;
- сравнительный анализ лабораторных исследований с теоретическими расчетами;
- выводы по работе.

### 3.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Дать определения и привести примеры по следующим аспектам проблемы обнаружения сигналов на фоне помех.

1. Временные характеристики сигналов и помех.
2. Спектральные характеристики сигналов и помех.
3. Энергетические характеристики сигналов и помех.
4. Корреляционные характеристики сигналов и помех.
5. Статистические характеристики сигналов и помех.
6. Энергетический критерий помехоустойчивости измерителей частоты (ИЧ).
7. Статистические критерии помехоустойчивости ИЧ.
8. Виды и области применения различных типов ИЧ.
9. Простые и сложные сигналы.
10. Сравнение корреляционной обработки и согласованной фильтрации.
11. Собственный шум сигнала и его влияние на помехоустойчивость обнаружителей.
12. Механизм свертки спектра сигналов.
13. Механизм сжатия сигналов во времени.
14. Сравнение шумовых и сложных сигналов.
15. Пороговый эффект и причины его возникновения.

16. Сравнительный анализ помехоустойчивости когерентного и некогерентного обнаружителей.
17. Сравнительный анализ помехоустойчивости автокорреляционного и энергетического обнаружителей.
18. Отношение максимального правдоподобия.
19. Влияние уровня априорной неопределенности сигналов на погрешность оценивания частоты.
20. Модели радиообстановки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / Под ред. Ю.М. Казаринова. — М.: Сов. радио, 1975. — 296 с.
2. Белавин О.В. Основы радионавигации. — М.: Сов. радио, 1967. — 472 с.
3. Дятлов А.П. Корреляционные устройства в радионавигации: Учебное пособие. Ч. 2. — Таганрог: ТРТИ, 1988. — 60 с.
4. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования «Micro-Cap V». — М.: Изд-во «Солон», 1997. — 273 с.
5. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования «Micro-Cap VI». — М.: Изд-во «Горячая линия — Телеком», 2001. — 344 с.
6. Дятлов П.А. Руководство пользователя пакета прикладных программ «Micro-Cap»: Методические указания к лабораторно-практическим занятиям. — Таганрог: ТРТУ, кафедра РТС. [http://rts.tsure.ru/mc\\_v.pdf](http://rts.tsure.ru/mc_v.pdf). 2002. — 64 с.
7. Екимов В.Д., Павлов К.М. Проектирование радиоприемных устройств. — М.: Связь, 1970. — 260 с.
8. Дятлов А.П., Дятлов А.П. Руководство к циклу лабораторных работ «Моделирование демодуляторов ФМС». — Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, №4053, 2007. — 56 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П1. ОПИСАНИЕ МАКРОМОДЕЛЕЙ

Лабораторные работы №1—5, посвященные моделированию автокорреляционных частотных дискриминаторов необходимо выполнить в программе «Micro-Cap». Как показано в работе [8], система схемотехнического моделирования «Micro-Cap» предназначена, прежде всего, для решения схемотехнических задач, но при этом существует возможность модернизации системы «Micro-Cap» до системотехнического уровня благодаря использованию макромоделей.

Макромодель представляет собой схему замещения одного из функциональных узлов радиотехнических устройств. На основе применения макромоделей процесс моделирования становится более удобным, наглядным и многофункциональным с точки зрения проведения анализа радиотехнических систем при различных исходных данных функциональных узлов, генераторов сигналов и помех, а также проведения моделирования при различных параметрах.

В работе [8] рассмотрен механизм формирования макромоделей и их добавления в библиотеку компонентов программы «Micro-Cap».

В данном руководстве выполнен обзор построения макромоделей таких устройств, как генератор белого шума, полосового фильтра, фильтра нижних частот, линии задержки, а также приведен пример построения на основе данных макромоделей автокорреляционного частотного дискриминатора с квадратурной обработкой.

#### П1.1. Макромодель генератора белого шума

Макромодель генератора белого шума представлена на рис. П1.1, на котором используются следующие обозначения: E1, E2 — функциональные источники напряжения; X1 — перемножитель; R1 — резистор; .Parameters(Sigma) — системная директива программы «Micro-Cap», используемая для задания пара-

метров макромодели (в данном случае используется параметр Sigma — дисперсия белого шума).

Для реализации генератора белого шума воспользуемся следующей методикой. Распределение двух независимых случайных величин, одна из которых имеет релеевское распределение, а другая распределена по закону арксинуса с параметрами  $(0, \frac{1}{2})$ , т.е. с нулевым средним значением и дисперсией, равной  $\frac{1}{2}$ , является нормальным.

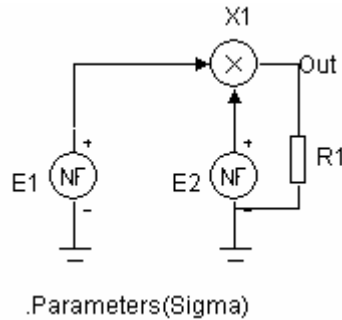


Рис. П1.1

Алгоритм макромодели белого шума записывается на основе следующего соотношения:

$$y = \sigma \sqrt{-2 \ln(x_1)} \sin(2\pi x_2), \quad (\text{П1.1})$$

где  $y$  — отсчет шумового напряжения;  $\sigma$  — требуемое среднеквадратичное отклонение шума;  $x_1, x_2$  — статистически независимые случайные числа, равномерно распределенные на интервале  $(0, 1)$ .

Для реализации алгоритма (П1.1) воспользуемся таким компонентом программы «Micro-Cap», как функциональный источник напряжения, задаваемый алгебраическим выражением, определяющим значение переменной выхода как функцию любого набора определенных переменных времени.

Вставка функциональных источников напряжения E1 и E2 в графическое окно программы «Micro-Cap» выполняется по команде **Component** → **Analog Primitives** → **Function Sources** → **NFV**.

В функциональном источнике напряжения E1 в качестве аргумента необходимо указать:

$$\text{VALUE} = \text{sqrt}(-2 * \ln(\text{rnd})),$$

а в качестве аргумента функционального источника напряжения E2 выступает следующее выражение:

$$\text{VALUE} = \text{Sigma} * \sin(2 * \pi * \text{rnd}).$$

Вставка компонента перемножителя в графическое окно программы «Micro-Cap» выполняется по команде **Component** → **Analog Primitives** → **Macros** → **Mul**.

В качестве параметра перемножителя используется коэффициент, определяющий амплитуду выходного напряжения. Положим его равным 1 В.

Необходимость использования двух источников и перемножителя крайне важна и обусловлена тем, что только в этом случае аргументы синуса и натурального логарифма будут статически независимыми. В противном случае, если использовать один источник с аргументом

$$\text{VALUE} = \text{Sigma} * \sin(2 * \pi * \text{rnd}) * \sqrt{-2 * \ln(\text{rnd})},$$

то получится неверная реализация белого шума, поскольку оба псевдослучайных числа оказываются равными в силу особенности программы «Micro-Cap».

Полученное шумовое напряжение  $U_{\text{ш}}(t)$  при  $\text{Sigma} = 1$  В в пределах  $t_0 \div T_{\text{мод}}$  ( $f_T = 1/T_{\text{мод}}$ ) представлено на рис. П1.2, а, а его спектральное распределение  $G_{\text{ш}}(f)$  — на рис. П1.2, б,

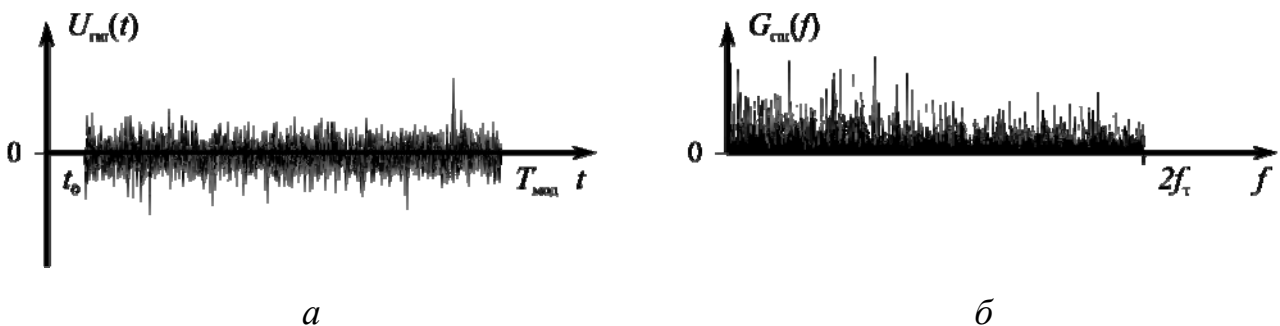


Рис. П1.2

где  $t_0$  — время начала моделирования;  $T_{\text{мод}}$  — время, в течение которого производилось моделирование.

### П1.2. Макромодель полосового фильтра

Макромодель полосового фильтра (ПФ) представлена на рис. П1.3, на котором используются следующие обозначения: E1, E2 — идеальные линейные

функциональные преобразователи входного напряжения в выходное; C1÷C9 — конденсаторы; R1÷R3 — резисторы; L1÷L5 — индуктивности.

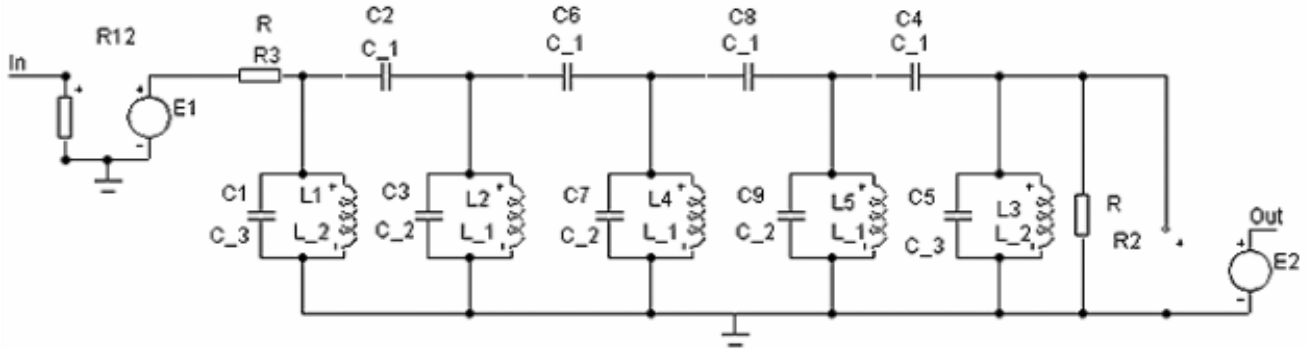


Рис. П1.3

При построении макромодели ПФ используется фильтр Баттерворта 5-го порядка с максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой.

Параметрами ПФ являются его центральная частота  $f_0$  и ширина полосы пропускания  $df$ . С помощью этих параметров определяются значения всех элементов ПФ по следующим формулам:

```
.parameters (f0, df)
.define R 50000
.define c_1 1/(2*PI*f0*R)
.define c_2 (1/(PI*df*R)-2*c_1)
.define c_3 0.5*c_2
.define L_1 df*R/(4*PI*f0*f0)
.define L_2 2*L_1
```

Данная запись должна быть выполнена в строгой точности, без знаков препинания и разделителей, в текстовом окне программы «Micro-Cap», переход к которому осуществляется нажатием сочетания клавиш «Ctrl-G». Без соответствующей зависимости электрических элементов схемы от ее основных параметров макромодель ПФ будет недееспособной.

Параметры элементов ПФ рассчитываются по методике, приведенной в работе [7]. В окне параметров всех резисторов в поле VALUE следует вписать R; для конденсаторов C2, C4, C6 и C8 аргументом служит C\_1; для конденсаторов

C3, C7, C9 — C\_2; для индуктивностей L1, L5 — L\_1; для индуктивностей L2÷L4 — L\_2. Введенные обозначения используются как переменные в расчетных формулах, приведенных выше. Вставка компонентов резисторов, конденсаторов и индуктивностей в графическое окно программы «Micro-Cap» выполняется по команде **Component** → **Analog Primitives** → **Passive Components** → **Resistor (Capacitor, Inductor)**.

На рис. П1.4 представлены АЧХ, ФЧХ и групповое время запаздывания ПФ при  $f_0 = 50$  МГц и  $\Delta f = 15$  МГц.

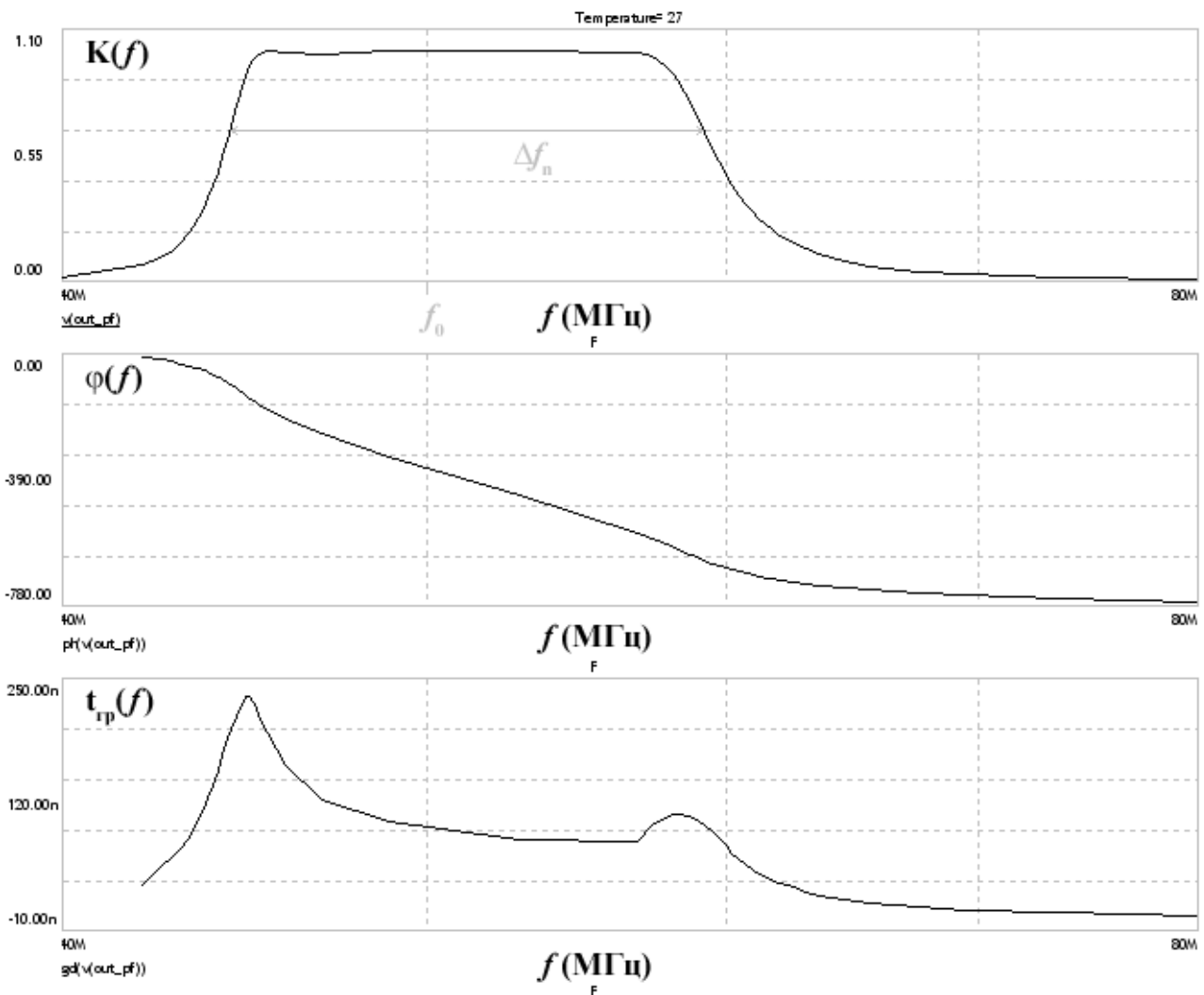


Рис. П1.4

Источники E1 и E2 — идеальные линейные функциональные преобразователи входного напряжения в выходное, их единственным параметром является коэффициент передачи. Зададим в окне параметров источников E1 и E2 в поле VALUE значение 1. Вставка компонентов источников E1 и E2 в графическое



окно программы «Micro-Cap» выполняется по команде **Component** → **Analog Primitives** → **Depend Sources** → **VofV**.

### П1.3. Макромодель фильтра нижних частот

Макромодель фильтра нижних частот (ФНЧ) представлена на рис. П1.5, на котором используются такие же обозначения, как на рис. П1.3.

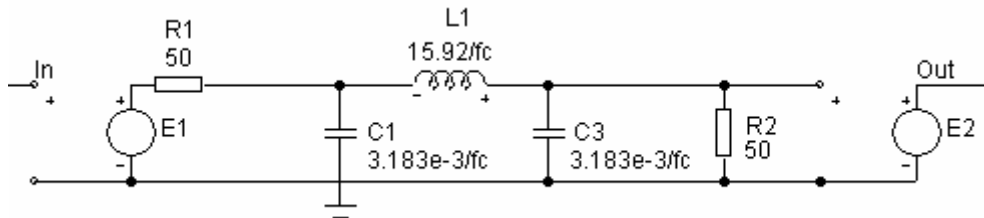


Рис. П1.5

На рис. П1.6 представлены АЧХ, ФЧХ и групповое время запаздывания ФНЧ при  $f_c = 3$  кГц.

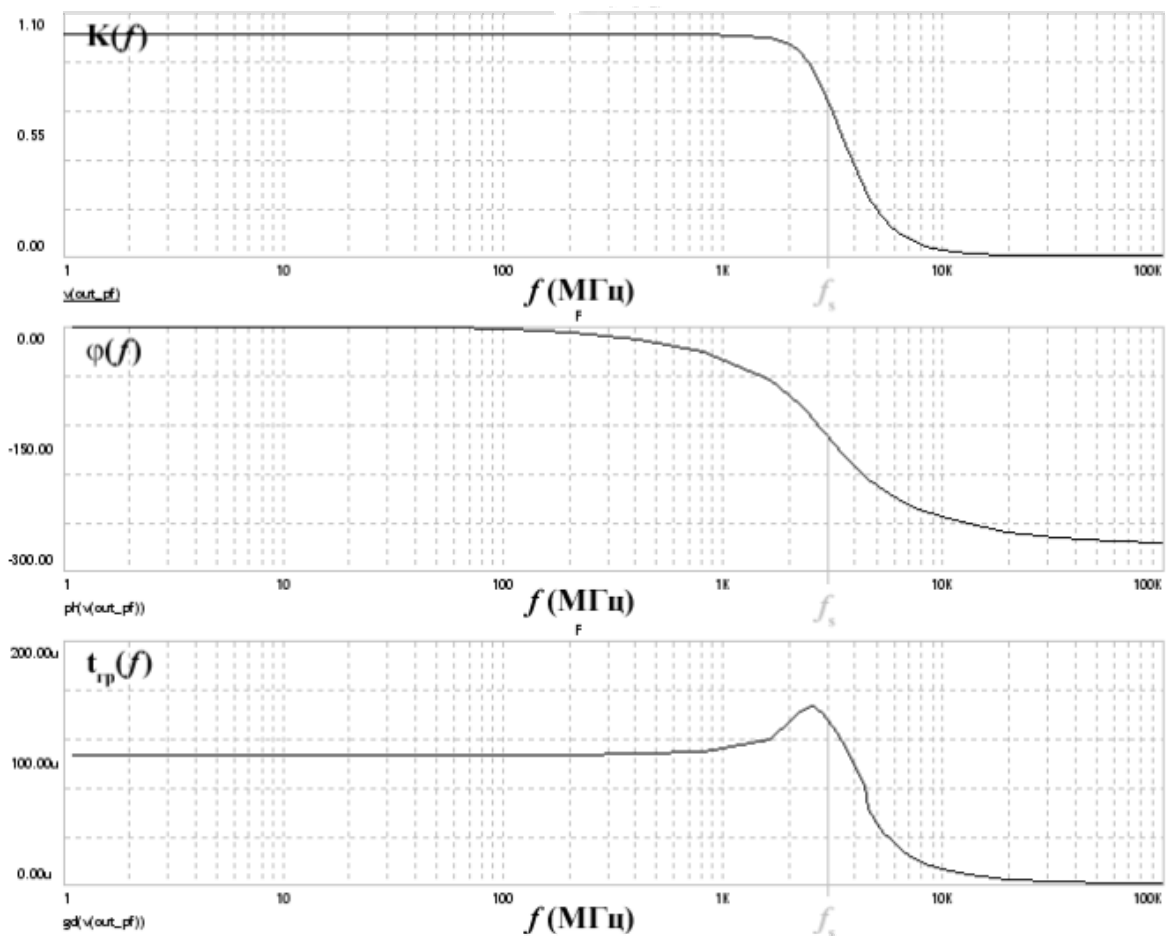


Рис. П1.6

Единственным параметром ФНЧ является частота среза  $f_c$ . Номиналы элементов вычисляются по значениям, приведенным на рис. П1.5, под обозначениями соответствующих элементов. Параметры источников E1 и E2 такие же как у макромодели ПФ (см. подразд. П1.2).

#### П1.4. Макромодель линии задержки

Макромодель линии задержки (ЛЗ) представлена на рис. П1.7, на котором дополнительно к обозначениям, приведенным для рис. П1.3, введен компонент T1 — линия задержки.

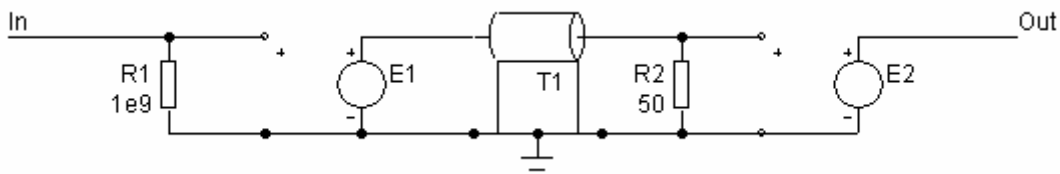


Рис. П1.7

Задержка по времени осуществляется с помощью отрезка длиной линии, на основе которой построена макромодель ЛЗ. Вставка компонента ЛЗ T1 в графическое окно программы «Micro-Cap» выполняется по команде **Component** → **Analog Primitives** → **Passive Components** → **TLine**.

Параметрами ЛЗ являются волновое сопротивление  $z_0$  и время задержки  $t_d$ . Через окно параметров зададим в поле для ввода VALUE следующие значения:  $z_0=50$   $t_d=Delay$ . Эта запись должна быть выполнена без знаков препинания и означает, что волновое сопротивление ЛЗ равно 50 Ом, а времени задержки присваивается переменная Delay, которая представляет основной параметр макромодели ЛЗ. При этом в текстовом окне программы «Micro-Cap», переход к которому осуществляется нажатием сочетания клавиш «Ctrl-G», необходимо добавить строку `.parameters (f0, df)`.

Резисторы R1 и R2 служат для согласования волновых сопротивлений и имеют значение 50 Ом, которое задается в окне параметров строкой `VALUE = 50`. Источники E1 и E2 имеют значение строки `VALUE = 1`.

### П1.5. Макромодель функционального преобразователя

Макромодель функционального преобразователя (ФП) представлена на рис. П1.8, на котором используются следующие обозначения: А — входной контакт; Е1 — функциональный источник напряжения.

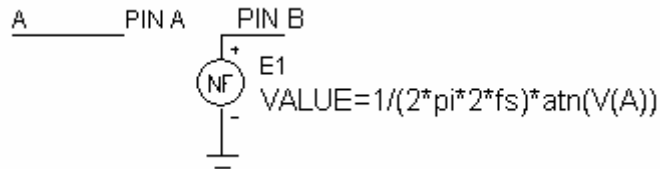


Рис. П1.8

Макромодель ФП состоит из единственного компонента функционального источника напряжения Е1. В качестве его параметров задается следующее выражение:

$$\text{VALUE} = 1 / (2 * \pi * 2 * t1) * \text{atn}(V(A)), \quad (\text{П1.2})$$

где  $\pi$  — число  $\pi$ ;  $t1$  — время линии задержки;  $\text{atn}(V(A))$  — функция  $\text{arctg}$  напряжения, снимаемого с узла в точке А.

В выражении (П1.2) переменная  $t1$  в явном виде не определена и будет использоваться в качестве параметра макромодели ФП. Для задания корректной работы макромодели ФП необходимо добавить на схеме в любом месте строку следующего вида:

`.parameters (t1) .`

Вставка функционального источника напряжения Е1 в графическое окно программы «Micro-Cap» выполняется по команде **Component** → **Analog Primitives** → **Function Sources** → **NFV**.

### П1.6. Пример построения автокорреляционного дискриминатора с квадратурной обработкой

На основе вышеприведённых макромоделей и компонентов из библиотеки программы «Micro-Cap» схема автокорреляционного дискриминатора с квадратурной обработкой (АЧД КО) представлена на рис. П1.9, на котором использу-

ются следующие обозначения: V1 — генератор гармонического колебания\*; X1 — генератор шума\*\*; X2 — сумматор\*; X3, X4, X5 — полосовые фильтры\*\*; X6 — линия задержки\*\*; X7, X8 — умножители\*; X9, X10 — фильтры нижних частот\*\*; X11 — делитель\*; X12 — функциональный преобразователь\*\*.

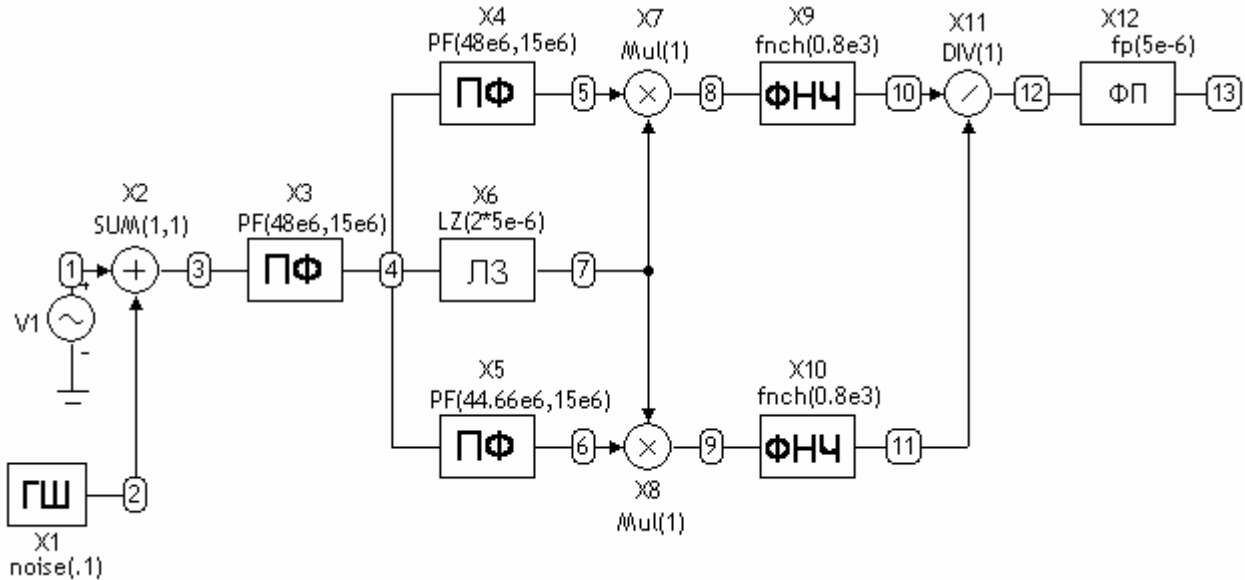


Рис. П1.9

Параметры макромоделей функциональных узлов АЧД КО приведены в круглых скобках после наименования ФУ на рис. П1.9.

## П2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Алгоритм** — последовательность операций при решении задачи.

**Дискриминационная характеристика** — зависимость  $U_{\text{вых}} = F(f_s)$ .

**Информативный параметр сигнала** — параметр сигнала, используемый для передачи информации.

**Информация** — сведения (данные), являющиеся объектом хранения, передачи, преобразования.

**Корреляционная функция** — характеристика скорости изменения процесса во времени.

**Корреляция** — степень статистической взаимосвязи процессов.

\* — компонент библиотеки программы «Micro-Cap»;

\*\* — макромодель, рассмотренная в данном руководстве.

**Критерий Неймана-Пирсона** — статистический критерий помехоустойчивости обнаружителей, соответствующий оптимизации вероятности правильного обнаружения сигнала при фиксированном значении вероятности ложных тревог.

**Линейные искажения** — искажения сигнала при прохождении через линейные функциональные узлы, обусловленные неидеальностью их АЧХ и ФЧХ.

**Линейный тракт приемника (ЛТ)** — совокупность функциональных узлов от входа антенны до выхода УПЧ, которые обладают сквозной линейной амплитудной характеристикой и обеспечивают выполнение условий принципа суперпозиции.

**Модель** — формальное описание объекта исследований в компактной форме, отражающее наиболее важные особенности.

**Нелинейные искажения** — искажения, вносимые при прохождении сигнала через функциональные узлы обнаружителя, обусловленные нелинейностью их амплитудных характеристик.

**Обнаружение сигналов** — статистическая задача по установлению факта наличия сигнала (гипотеза  $H_1$ ) или его отсутствия (гипотеза  $H_0$ ) в аддитивной смеси сигнала и помехи.

**Оценивание частоты** — статистическая задача определения несущей частоты сигнала при обработке аддитивной смеси сигнала и помехи в течение сеанса наблюдения.

**Помеха** — физический процесс, затрудняющий выделение сигнала.

**Помехоустойчивость обнаружителя** — способность обнаружителя обеспечивать необходимую эффективность обнаружения сигнала на фоне помех.

**Радиообстановка (РО)** — совокупность сигналов и помех и способов их взаимодействия при решении различных тактико-технических задач.

**Радиосистема обработки информации (РСОИ)** — совокупность радиоустройств, предназначенных для решения комплекса технических задач, связанных с обработкой информации в интересах различных областей радиоэлектроники, в соответствии с единым алгоритмом и заданным критерием эффективности.

**Сигнал** — физический процесс, несущий в себе информацию.

**Сопутствующие (неинформативные) параметры сигнала** — параметры сигнала, которые не используются для передачи сигнала, но затрудняющие его обнаружение из-за отсутствия соответствующей априорной информации.

**Спектральное распределение** — зависимость распределения параметра процесса (амплитуды, фазы, энергии) от частоты.

**Типовое радиозвено (ТРЗ)** — простейшая модель РСОИ.

**Функция правдоподобия** — условная плотность вероятности принимаемой аддитивной смеси сигнала и помехи при наиболее правдоподобном значении информативного параметра сигнала, устанавливаемого в опорном напряжении.

**Эквивалентная шумовая полоса пропускания** — полоса пропускания линейной цепи при замене его реальной АЧХ формой идеальной (прямоугольной) АЧХ с коэффициентом передачи, равным коэффициенту передачи на средней для ПФ или нулевой для ФНЧ частоте.

**Эффективности критерий** — мера оценки эффективности, например вероятность правильного обнаружения, или среднеквадратичная погрешность оценивания параметра сигнала.

**Эффективность** — степень соответствия объекта исследований своему назначению.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Предисловие .....  | 3  |
| 1. Содержание цикла работ.....   | 4  |
| 2. Краткие теоретические сведения .....  | 5  |
| 2.1. Алгоритмы и структуры<br>автокорреляционных частотных дискриминаторов.....                    | 5  |
| 2.2. Основные характеристики<br>автокорреляционных частотных дискриминаторов.....                  | 10 |
| 3. Лабораторные работы № 1—5 «Моделирование<br>автокорреляционных частотных дискриминаторов» ..... | 15 |
| 3.1. Содержание лабораторных работ .....   | 15 |
| 3.2. Цель работ .....  | 15 |
| 3.3. Содержание лабораторной работы № 1 .....  | 16 |
| 3.4. Методические указания к проведению<br>лабораторной работы № 1 .....                           | 16 |
| 3.5. Методические указания к проведению<br>лабораторных работ № 2—5 .....                          | 18 |
| 3.6. Методические указания по выполнению<br>лабораторных работ № 2—5 .....                         | 20 |
| 3.7. Варианты исходных данных к лабораторным работам № 1—5 .....                                   | 25 |
| 3.8. Отчёты по лабораторным работам .....  | 26 |
| 3.9. Контрольные вопросы для самопроверки .....  | 26 |
| Библиографический список .....   | 27 |
| Приложения .....   | 28 |
| П1. Описание макромоделей .....  | 28 |
| П1.1. Макромодель генератора белого шума.....  | 28 |
| П1.2. Макромодель полосового фильтра .....   | 30 |
| П1.3. Макромодель фильтра нижних частот .....  | 33 |
| П1.4. Макромодель линии задержки .....   | 34 |
| П1.5. Макромодель функционального преобразователя .....  | 35 |
| П1.6. Пример построения автокорреляционного дискриминатора<br>с квадратурной обработкой .....      | 35 |
| П2. Основные определения.....  | 36 |

Дятлов Анатолий Павлович

Дятлов Павел Анатольевич

Руководство к циклу лабораторных работ  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ  
ЧАСТОТНЫХ ДИСКРИМИНАТОРОВ**

Для студентов специальностей 210304 **Радиоэлектронные системы**  
и 210402 **Средства связи с подвижными объектами** всех форм обучения

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| <i>Ответственный за выпуск</i> | <i>Дятлов А. П.</i>   |
| <i>Редактор</i>                | <i>Проценко И. А.</i> |
| <i>Корректор</i>               | <i>Надточий В. И.</i> |
| <i>Компьютерная вёрстка</i>    | <i>Дятлов П. А.</i>   |

ЛР № 020565 от 25 июня 1997 г. Подписано к печати

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. п.л. — 2,5. Уч.-изд. л. — 2,4.

Заказ №                      Тираж                      экз.

«С»

---

Издательство Технологического института  
Южного федерального университета  
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44  
Типография Технологического института  
Южного федерального университета  
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1