

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»
дневной формы обучения*



Могилев 2019



УДК 615.8
ББК 30.16
М 54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «5» октября 2018 г.,
протокол № 3

Составитель ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Даны рекомендации к практическим занятиям по дисциплине «Методы
обработки биомедицинских сигналов» для студентов направления подготовки
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» дневной формы обучения.

Учебно-методическое издание

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Технический редактор	А. Т. Червинская
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2019



Содержание

Введение.....	4
1 Разработка структурной схемы устройства обработки информации	5
2 Расчет спектра сигнала на выходе устройства прибора.....	9
3 Расчет характеристик и построение структурных схем согласованных фильтров	12
4 Расчет частотных коэффициентов передачи структурных звеньев системы обработки.....	15
5 Расчет значений действующих шумов в тракте обработки сигналов	19
6 Расчет необходимого отношения сигнал/шум и порогового уровня принятия решения	22
7 Расчет основных параметров устройства по требуемому отношению сигнал/шум.....	26
8 Расчет пороговой чувствительности. Расчет информационного содержания сигнала на выходе устройства. Расчет КПД системы обработки информации.....	27
Список литературы	30



Введение

Появление в последние годы в клинической практике многочисленной диагностической аппаратуры контроля физиологических показателей человека открывает большие возможности в совершенствовании методик медицинской диагностики. Значительное повышение технического уровня развития современных диагностических систем за счет совершенствования аппаратной реализации и технологий производства делает автоматизированные системы диагностики незаменимыми в повседневной практике.

Неотъемлемыми элементами медицинских диагностических систем являются первичные и вторичные преобразователи биомедицинских сигналов, обеспечивающие преобразование происходящих в организме человека физиологических процессов в диагностическую информацию.

Целью изучения дисциплины «Методы обработки биомедицинских сигналов» является обучение студентов общим вопросам правильного использования существующих математических методов и алгоритмов анализа экспериментальной медико-биологической информации различной физической природы, методам обработки сигналов и применению данных методов при проектировании и создании новых приборов и диагностических систем медицинского назначения.

Основной целью практических занятий по дисциплине является ознакомление студентов с основными приемами расчета параметров систем обработки медико-биологической информации.



1 Разработка структурной схемы устройства обработки информации

1.1 Общие теоретические сведения

Структурная схема – это условное обозначение совокупности элементов устройства обработки информации, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала от входа до выхода и обеспечивающих осуществление всех его преобразований, с указанием преобразуемых величин. При этом каждое преобразование сигнала происходит в отдельном звене или блоке.

Структурные схемы состоят из соединенных определенным образом структурных элементов (составных частей), предназначенных для выполнения одной из следующих функций:

- преобразования поступающего сигнала по форме или виду энергии;
- успокоения колебаний;
- защиты от помех;
- коммутации цепей;
- представления информации и т. п.

Основными составными частями средства измерения являются:

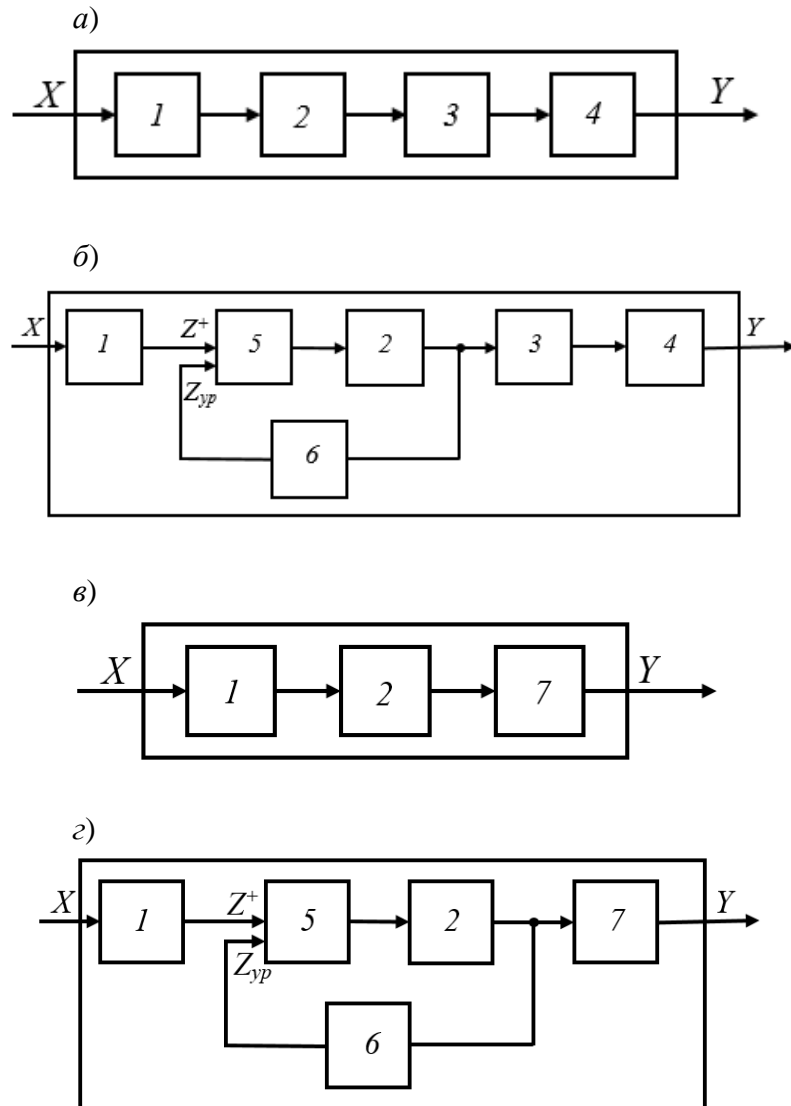
- преобразовательный элемент – элемент средства измерения, в котором происходит одно из ряда последовательных преобразований величины;
- измерительная цепь (измерительный канал) – совокупность элементов средства измерения, образующих непрерывный путь прохождения сигнала измерительной информации от входа до выхода;
- чувствительный элемент – часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входной измерительный сигнал;
- измерительное устройство – часть измерительного прибора, связанная с сигналом измерительной информации и имеющая обособленную конструкцию и назначение (например, регистрирующее устройство измерительного прибора);
- показывающее устройство – совокупность элементов средства измерений, обеспечивающих визуальное восприятие значений измеряемой величины или связанных с ней величин (цифровое табло или шкала с указателем);
- регистрирующее устройство – совокупность элементов средства измерений, регистрирующих значения измеряемой или связанной с ней величины.

Для удобства анализа различных соединений средств измерительной техники между собой и со средствами автоматического управления их принято рассматривать как некоторый преобразователь, служащий для преобразования входного сигнала X в выходной Y . Это позволяет применять при анализе систем хорошо разработанный аппарат теории автоматического регулирования. На структурных схемах элементы изображают в виде прямоугольников, внутри которых обозначено каким-либо образом их название. Кроме того, на схеме обязательно должно быть показано направление распространения измерительной информации, т. е. обозначены входы и выходы структурных элементов. Часто приводят поясняющие надписи, временные зависимости сигналов в харак-



терных точках и т. п.

На рисунке 1.1 приведены структурные схемы средств измерений (измерительных приборов и преобразователей) прямого действия (рисунок 1.1, а, в) и сравнения (рисунок 1.1, б, г). Первые часто называют средствами измерения прямого преобразования, а вторые – средствами измерения уравновешивающего (или компенсационного) преобразования.



а – измерительный прибор прямого действия; *б* – измерительный прибор сравнения; *в* – измерительный преобразователь прямого действия; *г* – измерительный преобразователь сравнения; 1 – чувствительный элемент; 2, 5, 6, 7 – преобразовательные элементы; 3 – измерительное устройство; 4 – показывающее устройство

Рисунок 1.1 – Структурные схемы средств измерений

Структурная схема измерительного прибора или преобразователя однозначно определяется используемым методом преобразования.

Измерительный прибор, основанный на методе прямого преобразования (см. рисунок 1.1, а), работает следующим образом. Измеряемая величина X поступает в чувствительный элемент 1, где преобразуется в другую физическую

величину, удобную для дальнейшего использования (например, ток, напряжение, давление, перемещение, сила), и поступает на промежуточный преобразовательный элемент 2, который обычно либо усиливает поступающий сигнал, либо преобразует его по форме (в частном случае элемент 2 может отсутствовать). *Выходной сигнал элемента 2* поступает к измерительному устройству 3, перемещение элементов которого определяется с помощью показывающего устройства 4. Выходной сигнал (показание) воспринимается органами чувств человека, который считывает показание с показывающего устройства. В качестве указателя на показывающем устройстве может быть подвижная стрелка, луч света, перо самописца, жидкокристаллический экран и др.

Измерительный прибор, структурная схема которого представлена на рисунке 1.1, б работает следующим образом. Сигнал Z , возникающий на выходе чувствительного элемента 1, поступает на преобразовательный элемент 5, который способен осуществлять сравнение двух величин, поступающих на его вход. Кроме величины Z , на выход элемента 5 подается с противоположным знаком величина $Z_{ур}$ (уравновешивающий сигнал), которая формируется на выходе обратного преобразовательного элемента 6. На выходе элемента 5 формируется сигнал, пропорциональный разности значений величин Z и $Z_{ур}$. Этот сигнал поступает в промежуточный преобразовательный элемент 2, выходной сигнал которого поступает одновременно на измерительное устройство 3 и на вход обратного преобразовательного элемента 6. В зависимости от типа промежуточного преобразовательного элемента 2 при каждом значении измеряемого параметра и соответствующем ему значении Z разность $Z - Z_{ур}$, поступающая на вход элемента 5, может сводиться к нулю или иметь некоторое малое значение, пропорциональное измеряемой величине.

На рисунке 1.1, в, г приведены структурные схемы измерительных преобразователей, основанных на методах прямого и уравновешивающего преобразования соответственно. В этих схемах отсутствуют измерительное и показывающее устройство, поскольку сигнал измерительных преобразователей имеет форму, недоступную для восприятия человеком. В то же время в составе измерительных преобразователей, как правило, имеется конечный преобразовательный элемент 7, который формирует выходной сигнал (усиливает его по мощности, преобразует в частоту колебаний и т. д.) таким образом, что его можно передавать на расстояние, хранить и обрабатывать.

Схемы средств измерений зачастую могут быть комбинированными, т. е. содержать цепь прямого преобразования, звенья которой охвачены отрицательной обратной связью. При этом принцип построения структурной схемы влияет на многие его параметры, динамические и другие характеристики средства измерения, которые, в свою очередь, определяют степень соответствия информации об измеряемой величине ее истинному значению.

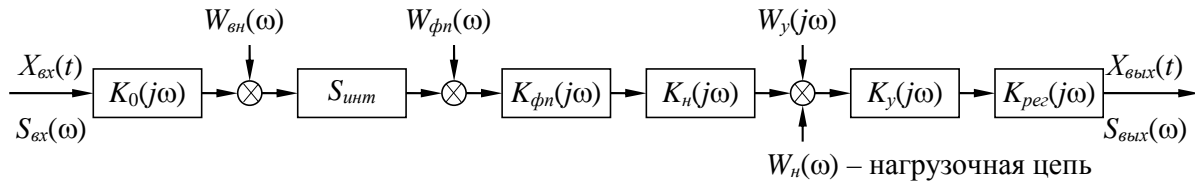
При составлении структурной схемы устройства преобразования сигналов каждый узел следует представить в виде линейной цепи, указать связи между этими узлами и указать точки приложения действующих шумов: внешних, фотоприемника, усилителя, нагрузочной цепи и др.

В качестве примера рассмотрим составление структурной схемы оптико-



электронного прибора, состоящего из источника излучения, приемника излучения, цепи нагрузки, усилителя и регистрирующего устройства. Каждый блок разрабатываемого прибора имеет свой частотный коэффициент передачи.

Если на ОЭП действуют входной сигнал $x_{ex}(t)$, имеющий спектр $S_{ex}(\omega)$, и совокупность помех и шумов (внешние помехи, шумы фотоприемника, нагрузочной цепи и усилителя электронного тракта), а приемник излучения обладает интегральной вольтовой чувствительностью $S_{инт}$, то структурную схему такого ОЭП можно представить в следующем виде (рисунок 1.2).



$K_0(j\omega)$ – оптической системы; $K_{\phi n}(j\omega)$ – фотоприемника; $K_n(j\omega)$ – нагрузочной цепи; $K_y(j\omega)$ – усилителя; $K_{rec}(j\omega)$ – регистрирующего прибора

Рисунок 1.2 – Структурная схема устройства обработки информации

1.2 Индивидуальное задание

Ознакомьтесь с основными структурными схемами средств измерений, по заданию преподавателя составить структурную схему устройства измерений.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое структурная схема?
- 2 Из каких основных структурных элементов состоит измерительное устройство?
- 3 По каким структурным схемам строятся измерительные устройства?
- 4 Поясните основные структурные схемы.
- 5 Какие параметры следует учитывать при разработке структурных схем измерительных устройств?
- 6 Следует ли при создании структурной схемы учитывать шумы, которые действуют в тракте обработки сигналов?

2 Расчет спектра сигнала на выходе устройства прибора

2.1 Общие теоретические сведения

Для описания одного и того же сигнала в зависимости от решаемых задач могут быть использованы математические представления, такие как временное и спектральное.

Временное представление – это описание сигнала с помощью функций времени. Оно определяет свойство и параметры сигнала во временной области (форму, длительность сигнала, энергию, мощность).

Однако при практическом применении сигналов важно знать их свойства не только во временной, но и в частотной области. В этом случае при анализе и расчетах сигналы представляются своими частотными характеристиками, что облегчает решение многих практических задач обработки сигнала. Обычно частотные характеристики называют частотными спектрами, или спектрами сигнала.

Определение спектра сигнала составляет задачу спектрального анализа. В основе спектрального анализа лежит разложение сигнала на спектральные составляющие. Математические методы спектрального анализа различаются для периодических и непериодических сигналов.

Периодическим называется сигнал, значение которого повторяется через определенные интервалы времени, которые называют периодом сигнала и обычно обозначают буквой T .

Простейшие периодические сигналы основаны на функциях косинуса или синуса.

$$s(t) = a \cos(\omega t), \quad (2.1)$$

где ω – круговая частота,

$$\omega = 2\pi f; \quad f = \frac{1}{T}; \quad f = \left[\frac{1}{c} \right],$$

Фурье в 20 гг. XIX в. доказал, что любой периодический сигнал можно представить в виде разложения на гармонические (составляющие) колебания

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)); \quad (2.2)$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_1 \Rightarrow f_1 = \frac{1}{T},$$

где T – период,

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(n\omega_1 t) dt; \quad (2.3)$$



$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(n\omega_1 t) dt. \quad (2.4)$$

Если сигнал описывается четной функцией времени, то тогда все коэффициенты b_n равны нулю и можно записать, что

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_1 t). \quad (2.5)$$

Если сигнал $s(t)$ описывается нечетной функцией времени, то тогда все коэффициенты a_n равны нулю и можно записать, что

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_1 t). \quad (2.6)$$

В общем случае, когда сигнал произвольный, используют другую, более удобную форму записи ряда Фурье:

$$s(t) = \frac{A_0}{2} + \sum A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n);$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \varphi_n = -\arctg \frac{b_n}{a_n}. \quad (2.7)$$

Формулы для нахождения a_n и b_n аналогичны формулам (2.3) и (2.4).

Это представление называют спектральным, или частотным, представлением сигнала. Спектральное представление сигнала – это постоянная составляющая ($A_0/2$) и бесконечное число гармонических составляющих (гармонических сигналов). Число n определяет порядковый номер гармоники. Каждая гармоника характеризуется амплитудой A_n , частотой $n\omega_1$ и начальной фазой φ_n . Гармоника, соответствующая $n = 1$, – это первая (основная) гармоника. Она имеет частоту, равную частоте сигнала.

Совокупность всех амплитуд гармоник A_n определяет амплитудный спектр сигнала, а совокупность всех начальных фаз называется фазовым спектром сигнала.

Спектральный анализ непериодических сигналов – это описание и исследование свойств непериодических сигналов в частотной области. Спектральный анализ непериодических сигналов проводится на основе интегральных преобразований Фурье.

Прямое преобразование Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2.8)$$



Обратное преобразование Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2.9)$$

Для нахождения спектра сигнала на выходе устройства обработки информации следует построить математическую модель сигнала на входе устройства обработки, затем определить спектр сигнала на входе, используя ряд Фурье или преобразование Фурье (в зависимости от периодичности сигнала). После нахождения спектра сигнала на входе устройства определяется спектр сигнала на выходе устройства. Для этого следует использовать частотный коэффициент передачи устройства. Спектр сигнала на выходе определяется по следующей формуле:

$$S_{\text{вых}}(\omega) = K(j\omega) \cdot S_{\text{вх}}(\omega). \quad (2.10)$$

При расчете спектра пачки импульсов, следующих на объект исследования, можно воспользоваться свойствами преобразований Фурье, а потом свернуть полученное выражение по формуле суммы членов прогрессии.

2.2 Индивидуальное задание

Ознакомьтесь с основными положениями спектрального анализа и методикой расчета спектральной плотности сигнала на выходе устройства. По заданию преподавателя рассчитать спектр сигнала на выходе устройства обработки сигналов при разных значениях количества входных импульсов и разной форме импульсов.

Контрольные вопросы

- 1 Как определяются коэффициенты ряда Фурье?
- 2 Какими свойствами обладают спектры периодических сигналов?
- 3 Запишите выражение для спектральной плотности периодического сигнала.
- 4 Как определяется фазочастотная характеристика?
- 5 Как определить спектр непериодического сигнала?
- 6 Как определяется спектр сигнала на выходе устройства обработки сигнала?
- 7 Какие свойства преобразований Фурье используются для определения спектра пачки импульсов?



3 Расчет характеристик и построение структурных схем согласованных фильтров

3.1 Основные теоретические сведения

Линейный фильтр, на выходе которого формируется максимально возможное пиковое значение отношения сигнал/шум при приеме детерминированного сигнала на фоне белого шума, называется согласованным фильтром.

Для согласованных фильтров применяют как спектральный, так и временной методы синтеза. Временной метод базируется на использовании связи между импульсной характеристикой фильтра и формой фильтруемого сигнала. При этом синтез согласованного фильтра состоит в построении такого линейного устройства, импульсная характеристика которого с точностью до постоянного коэффициента воспроизводит бы с некоторым запаздыванием функцию, являющуюся зеркальным отражением сигнала. Данный метод особенно удобен для сигналов симметричной формы.

По определению импульсная характеристика есть отклик линейной системы на δ -функцию. Поэтому нужно так подбирать блоки согласованного фильтра, чтобы при действии на его входе δ -функции на выходе воспроизводился сигнал заданной формы и длительности. Зеркальное отражение сигнала совпадает с самим сигналом, что значительно облегчает синтез согласованного фильтра.

Существуют различные подходы к синтезу оптимальных фильтров.

Для согласованного фильтра, который выделяет сигнал на фоне белого шума, возможно применение двух методов:

- спектрального;
- временного.

Спектральный метод. Спектральная мощность белого шума $W_{ex}(\omega) = W_0 = \text{const}$. В этом случае максимальное отношение сигнал/шум

$$\rho = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{W_0} d\omega = \frac{1}{2\pi W_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{1} d\omega. \quad (3.1)$$

Комплексный коэффициент передачи фильтра в этом случае

$$K(j\omega) = C \frac{S_{ex}^*(\omega)}{W_{ex}(\omega)} \cdot e^{-j\omega t_0} = \frac{C}{W_0} S_{ex}^*(\omega) \cdot e^{-j\omega t_0} = C_1 S_{ex}^*(\omega) \cdot e^{-j\omega t_0}. \quad (3.2)$$

Коэффициент $C_1 = \frac{C}{W_0}$ постоянный. Данный коэффициент имеет размер-

ность, обратную размерности спектральной плотности сигнала, если под комплексной передаточной функцией понимается безразмерная величина (например, отношение комплексных амплитуд на выходе и входе фильтра).



Следовательно, у согласованного фильтра функция $K(j\omega)$ согласована со спектральными характеристиками сигнала – амплитудной и фазовой.

Амплитудная характеристика фильтра должна отвечать условию

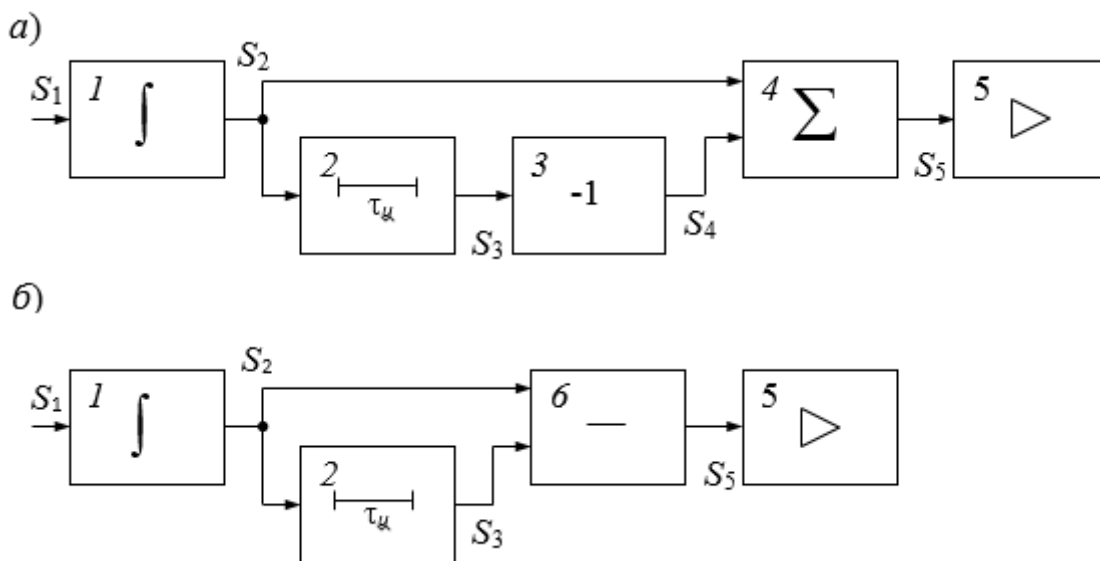
$$K(\omega) = C_1 S(\omega). \quad (3.3)$$

Это значит, что амплитудно-частотная характеристика фильтра должна по своей форме совпадать с амплитудным спектром сигнала.

Фильтры для выделения сигнала на фоне шума строятся обычно на основе применения спектрального метода, т. е. путем использования выражения для частотного коэффициента передачи

$$K(j\omega) = C \frac{S_{ex}^*(\omega)}{W_{ex}(\omega)} \cdot e^{-j\omega t}. \quad (3.4)$$

Структурные схемы согласованных фильтров, синтезированных спектральным методом, представлены на рисунке 3.1.



a – фильтр с инвертором; *b* – фильтр без инвертора; 1 – интегратор; 2 – линия задержки на τ_u ; 3 – инвертор; 4 – сумматор; 5 – усилитель; 6 – вычитающее устройство

Рисунок 3.1 – Структурные схемы согласованных фильтров, синтезированных спектральным методом

Временной метод базируется на использовании связи между импульсной характеристикой и сигналом:

$$h_0(t) = K \cdot S(t_0 - t). \quad (3.5)$$

Структурная схема фильтра, синтезированного временным методом представлена на рисунке 3.2.

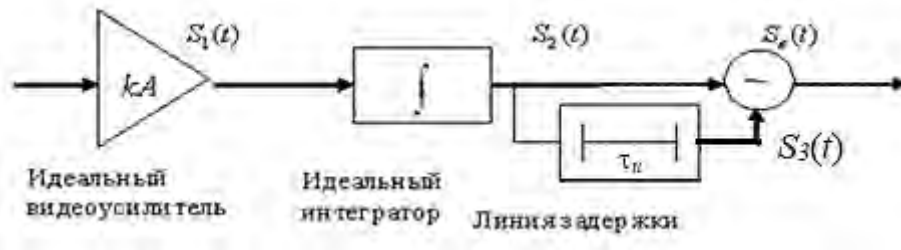


Рисунок 3.2 – Структурная схема согласованного фильтра, синтезированного временным методом

3.2 Индивидуальное задание

Ознакомьтесь с основными методами, которые используются для синтеза согласованных фильтров. Решить следующие задачи.

1 Синтезировать согласованный фильтр для прямоугольного видеоимпульса спектральным методом. Разработать его структурную схему, построить импульсную характеристику. Параметры сигнала: амплитуда – 5 В, длительность – 4 мкс, период следования – 2 мкс. На входе действует белый шум.

2 Синтезировать согласованный фильтр для прямоугольного видеоимпульса временным методом. Разработать его структурную схему, построить импульсную характеристику. Параметры сигнала: амплитуда – 5 В, длительность – 4 мкс, период следования – 2 мкс. На входе действует белый шум.

3 Синтезировать согласованный фильтр для сигнала Баркера, состоящего из семи позиций. Построить его импульсную характеристику.

4 Постройте импульсную характеристику фильтра, согласованного с входным сигналом треугольной формы длительностью τ . Укажите минимальное значение времени задержки t_0 .

5 Эквивалентным источником белого шума на входе фильтра служит резистор с сопротивлением $R = 500$ Ом, находящийся при температуре $T = 300$ К. Какова должна быть энергия выделяемого сигнала для того, чтобы согласованный фильтр мог обеспечить отношение сигнал/шум, равное пяти?

Контрольные вопросы

- 1 Что представляет собой согласованный фильтр?
- 2 Поясните назначение согласованного фильтра.
- 3 Какие существуют способы синтеза согласованных фильтров?
- 4 В чем сущность спектрального способа синтеза согласованного фильтра?
- 5 Из каких структурных элементов состоит согласованный фильтр, синтезированный спектральным методом?

6 На чем основан временной способ синтеза согласованного фильтра?

7 Из каких структурных элементов состоит согласованный фильтр, синтезированный временным методом?

4 Расчет частотных коэффициентов передачи структурных звеньев системы обработки

4.1 Основные теоретические сведения

Пусть на вход линейной стационарной цепи подан сигнал $S_{\text{вх}}(t)$. Это сигнал, будучи преобразованным системой обработки информации, остается неизменным по форме. Если имеется равенство

$$S_{\text{вых}}(t) = TS_{\text{вх}}(t) = \lambda S_{\text{вх}}(t), \quad (4.1)$$

то $S_{\text{вх}}(t)$ – собственная функция системного оператора T .

λ – в общем случае комплексное число – собственное значение.

В соответствии с интегралом Дюамеля

$$S_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega(t-\tau)} h(\tau) d\tau = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \right] e^{j\omega t} \quad (4.2)$$

Собственное значение системного оператора является комплексным числом:

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (4.3)$$

Это комплексное число называется частотным коэффициентом передачи системы.

Часто используют представление частотного коэффициента передачи в показательной форме:

$$K(j\omega) = |K(j\omega)| \exp[j\varphi_k(\omega)], \quad (4.4)$$

где $|K(j\omega)|$ – амплитудно-частотная характеристика системы;

$\varphi_k(\omega)$ – фазочастотная характеристика.

Если система обработки информации состоит из нескольких структурных элементов и каждый структурный элемент имеет собственный частотный коэффициент передачи, то суммарный коэффициент будет равен произведению частотных коэффициентов передачи.

Рассмотрим расчет частотных коэффициентов передачи системы, которая представляет собой оптико-электронный прибор.



Для расчета частотных коэффициентов передачи такой системы обработки информации следует учитывать принцип работы оптической системы, тип фотоприемника и его инерционные свойства, тип нагрузочной цепи, а также вид электронного тракта обработки и усиления сигналов.

4.1.1 Оптическая система. С достаточной степенью точности полагают, что $K_0(j\omega) = K_0$, где K_0 называют коэффициентом передачи.

Наиболее распространенные варианты работы ОЭП – это работа на основе изменения освещенности входного зрачка (точечный источник) и изменение яркости свечения объекта (протяженный источник). В первом случае можно записать, что световой поток Φ на выходе системы, определяется как

$$\Phi = A_{ex} \cdot E_{ex} \cdot \tau_0, \quad (4.5)$$

где A_{ex} – площадь входного зрачка;

E_{ex} – освещенность на входном зрачке;

τ_0 – коэффициент пропускания.

Тогда

$$K_0 = \frac{\partial \Phi}{\partial E_{ex}} = A_{ex} \tau_0. \quad (4.6)$$

В случае протяженного источника поток излучения

$$\Phi = A_{ex} \cdot \Delta\Omega \cdot \tau_0 \cdot L_c, \quad (4.7)$$

где $\Delta\Omega$ – угловое поле зрения;

L_c – яркость источника излучения.

Тогда

$$K_0 = \frac{\partial \Phi}{\partial L_c} = A_{ex} \cdot \Delta\Omega \cdot \tau_0 \quad (4.8)$$

Возможен и третий случай, когда ОЭП работает на основе изменения площади засветки. Тогда

$$K_0 = \frac{\partial \Phi}{\partial A_{ex}} = E_{ex} \cdot \tau_0. \quad (4.9)$$

4.1.2 Фотоприемники. В области малых и средних частот ($f < 10^8$ Гц) все фотоприемники считают с динамической точки зрения апериодическими звеньями первого порядка. В этом случае



$$K_{\phi n}(j\omega) = \frac{S_{\text{инт}}}{[1 + j\omega T_{\phi n}]}, \quad (4.10)$$

где $T_{\phi n}$ – постоянная времени фотоприемника;

$S_{\text{инт}}$ – интегральная чувствительность по току, если приемник представляется в схеме генератором тока, и интегральная чувствительность по напряжению, если представляется источником ЭДС.

Если область частот принимаемого сигнала больше $f < 10^8$ Гц и используются ФЭУ, то необходим учет времени прохождения электронов от фотокатода к аноду, а именно:

$$K(j\omega) = \frac{S_{\text{инт}} \cdot e^{j\omega t}}{[1 + j\omega T_{\phi n}]}, \quad (4.11)$$

где $e^{j\omega t}$ – звено, учитывающее задержку сигнала.

4.1.3 Нагрузочные цепи фотоприемников. Частотные передаточные функции $K_n(j\omega)$ нагрузочных цепей, соединяющих выход фотоприемника с первым каскадом усиления электронного тракта, зависят от типа связи между ними (емкостная или трансформаторная).

В реальных электронных схемах, помимо специально включаемых между ФП и входом первого каскада усилителя, учитывают всегда присутствующие реактивные элементы (емкости, индуктивности).

При нагрузочной цепи с емкостной связью частотный коэффициент передачи схемы с емкостной связью в области рабочих частот округляется:

$$K_n(j\omega) = \frac{k_n T_{c\phi 2}}{T_1}. \quad (4.12)$$

Величины k_n , $T_{c\phi 2}$, T_1 округляются исходя из реальных параметров схемы включения.

В случае использования нагрузочной цепи с трансформаторной связью частотный коэффициент передачи в области рабочих частот

$$K_n(j\omega) = \frac{n}{2}; \quad (4.13)$$

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

где ω_1 и ω_2 – число витков вторичной и первичной обмоток трансформатора.

4.1.4 Электронные тракты усиления и обработки сигнала. В общем случае частотные передаточные коэффициенты усилительного тракта могут быть



весьма сложными и зависящими от функциональной и структурной схем электронного тракта усиления и обработки. Однако в усилительном тракте можно выделить несколько устройств, которые присутствуют почти во всех приборах НК. Прежде всего, это оптимальный фильтр, функции которого обычно выполняет один или несколько каскадов усилителя. С точностью до постоянной:

$$K(j\omega) = \frac{S^*(\omega)e^{-j\omega t_0}}{W_n(\omega)}, \quad (4.14)$$

где $S^*(\omega)$ и $W_n(\omega)$ – комплексно сопряженный спектр Фурье полезного сигнала и спектральная плотность мощности помехи на входе в 1-й каскад усиления;

t_0 – время достижения максимума отношением сигнал/шум на выходе фильтра.

На практике часто применяют квазиоптимальные фильтры вместо оптимальных. Это обеспечивает более простую реализацию. Для данных целей используют избирательные усилители.

$$K(j\omega) = \frac{K_y}{1 + j(\omega - \omega_0)T_y}, \quad (4.15)$$

где K_y – коэффициент усиления при $\omega = \omega_0$, на которой сосредоточена основная энергия сигнала, $K_y = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$;

T_y – постоянная времени, которая связана с эффективной полосой пропускания соотношением $\Delta\omega_{\text{эф}} = \frac{2}{T_y}$. В данной полосе $K(j\omega) > \frac{K_y}{\sqrt{2}}$.

Постоянную времени T_y подбирают в соответствии с полосой частоты пропускания.

Усилители мощности чаще всего имеют передаточный коэффициент

$$K_y(j\omega) = \frac{k_y}{1 + j\omega T_y}, \quad (4.16)$$

где T_y – постоянная времени усилителя.

4.2 Индивидуальное задание

Ознакомиться с методиками расчета частотных коэффициентов передачи основных звеньев ОЭП. По заданию преподавателя рассчитать частотный коэффициент передачи ОЭП, состоящего из различных блоков.



Контрольные вопросы

- 1 Что такое частотный коэффициент передачи системы обработки информации?
- 2 Как связан частотный коэффициент передачи системы обработки информации с импульсной характеристикой?
- 3 Как определить частотный коэффициент передачи системы, состоящей из нескольких структурных блоков?
- 4 Как определяется частотный коэффициент передачи оптической системы?
- 5 Какие возможны варианты работы оптической системы?
- 6 Как определяется частотный коэффициент передачи фотоприемника?
- 7 Как определить частотный коэффициент передачи блока усиления сигналов?

5 Расчет значений действующих шумов в тракте обработки сигналов

5.1 Основные теоретические положения

Несмотря на возможность усиления сколь угодно слабых сигналов до любой величины, все же не всегда удается зарегистрировать их из-за хаотических флуктуаций или шумов. На зажимах любого приемника или системы, состоящей из приемника и усилителя, обычно существует определенный уровень шума. Этот шум определяет нижний предел энергии, которая еще может быть обнаружена.

Любая величина, характеризующая работу приемника излучения (напряжение, ток, сопротивление и т. д.), флуктуирует по случайному закону около своего среднего значения. Эта флуктуация – внутренний или *собственный шум приемника*.

Распределение яркости природных образований в поле зрения прибора также имеет случайный характер, создает неоднородный фон, препятствующий обнаружению объекта наблюдения. В процессе сканирования неравномерности яркости фона в пространстве преобразуются приемником излучения в случайные изменения вырабатываемого им сигнала, которые принято называть *шумом фона*.

Наряду с этим, *входная цепь усилителя и усилитель* характеризуются *собственными шумами усилителя*, увеличивающими общий уровень шума прибора.

Процесс регистрации сигнала при наличии шумов требует предварительного знания отличительных признаков сигнала и шума. Использование этих признаков позволяет решить задачу обнаружения – ответить на вопрос о наличии или отсутствии сигнала. Обычно ответ носит вероятностный характер, т. е. существует определенная вероятность и ложного решения. Это связано с тем, что любой признак или свойство в той или иной степени присущи как сигналу, так и шуму.

При расчете значений действующих шумов в первую очередь необходимо определять доминирующие шумы. В соответствии с видом шума следует запи-

сать его спектр мощности, а потом привести все шумы к одной точке схемы преобразования сигналов. Общее значение шума в данной точке можно находить в предположении, что все шумы независимы.

До поступления в оптимальный фильтр системы обнаружения полезный сигнал проходит через фотоприемник, нагрузочную цепь и предварительный усилитель. Спектр полезного сигнала на входе в оптимальный фильтр

$$S_{ex,\phi}(\omega) = S_{ex}(\omega) \cdot K_0(j\omega) \cdot S_{инт} \cdot W_{fn}(j\omega) \cdot K_n(j\omega) \cdot K_y(j\omega). \quad (5.1)$$

Спектральная плотность входного сигнала $S_{ex}(\omega)$ определяется видом используемого источника излучения (точечный, протяженный и др.) и зависит прежде всего от площади входного зрачка или углового поля зрения прибора.

Найдем теперь уравнение, связывающее спектральную плотность мощности помех $W_{ex,\phi}(\omega)$ на входе в оптимальный фильтр с параметрами оптической системы.

Внешние помехи обычно зависят от параметров системы и обусловлены, как правило, радиационным и фотонным шумами. Радиационные и фотонные шумы возникают вследствие статистического характера потока излучения, представляющего случайную совокупность потока квантов энергии электромагнитного поля.

Радиационные и фотонные внешние помехи при частотах менее 10^{10} Гц можно считать белыми шумами, мощность которых постоянна во всей области рассматриваемых частот.

Спектральная плотность мощности радиационных и фотонных помех, приведенных ко входу в оптимальный фильтр, определяется выражением, справедливым для обоих случаев:

$$W_{ex,\phi}(\omega) = |K_{fn}(j\omega) \cdot K_n(j\omega) \cdot K_y(j\omega)|^2 \cdot W_{б.ш.}(\omega) \cdot S_{инт}. \quad (5.2)$$

К внутренним шумам, зависящим от параметров оптической системы, относятся шумы, генерируемые в самих фотоприемниках и зависящие от протекающего в них тока. К ним относятся дробовые, токовые и генерационно-рекомбинационные шумы. Сюда же относятся тепловые шумы. Состав и количественные параметры спектральных плотностей мощности этих шумов зависят от типа применяемого фотоприемника. В общем виде спектральные плотности мощности перечисленных составляющих шумов представляются в следующем виде:

$$W_{op}(\omega) = k_{op} \cdot e \cdot \langle i \rangle; \quad (5.3)$$

$$W_{ток}(\omega) = k_{ток} \frac{(\langle i \rangle)^\alpha}{\omega^\beta}; \quad (5.4)$$



$$W_{z-p}(\omega) = \frac{K_{z-p}(\langle i \rangle)^2}{1 + \omega^2 T_n^2}; \quad (5.5)$$

$$W_m(\omega) = \frac{2kT}{R_{\phi n}}, \quad (5.6)$$

где $\langle i \rangle$ – среднее значение силы тока, протекающего через ФП;

e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/к;

T – температура фотоприемника, К;

T_n – среднее время жизни носителей заряда в полупроводниковых ФП;

$R_{\phi n}$ – внутреннее сопротивление теплового ФП, Ом;

$\alpha = 2$;

$\beta \approx 0,8 \dots 1,5$;

k_{op} , $k_{ток}$, k_{z-p} – коэффициенты, зависящие от конкретных образцов ФП, которые, как правило, определяются экспериментально.

Спектральная плотность мощности шумов ФП, приведенная ко входу оптимального фильтра

$$W_{\phi n, \phi}(\omega) = |W_{\phi n}(j\omega) \cdot K_n(j\omega) \cdot K_y(j\omega)|^2 \cdot W_{\phi n}, \quad (5.7)$$

где

$$W_{\phi n} = W_{op} + W_{ток} + W_{z-p} + W_m. \quad (5.8)$$

К внутренним помехам, не зависящим от параметров оптики, относятся шумы, генерируемые активными сопротивлениями нагрузочной цепи, и в элементах электронного тракта усилителя. При этом достаточным бывает учитывать шумы, генерируемые в первом каскаде усилительного тракта. Именно здесь полезный сигнал имеет еще малые значения по сравнению с генерируемыми шумами. На входе в усилитель шумы нагрузочной цепи и первого каскада усилителя представляются в виде

$$W_{\Sigma III}(\omega) = 2kTR_{\Sigma}, \quad (5.9)$$

где R_{Σ} – суммарное эквивалентное шумовое сопротивление элементов нагрузочной цепи и первого каскада усилителя;

T – температура элементов электронного тракта, $T = 300$ К.

Спектральная плотность мощности этих помех, приведенных ко входу в оптимальный фильтр,

$$W_{\Sigma \phi} = |W_y(j\omega)|^2 W_{\Sigma III}(\omega). \quad (5.10)$$



Таким образом, определены все составляющие помехи и приведены ко входу оптимального фильтра. Тогда

$$W_{ex}(\omega) = W_{вн,\Phi}(\omega) + W_{\phi n,\Phi}(\omega) + W_{\Sigma\Phi}(\omega). \quad (5.11)$$

5.2 Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными теоретическими сведениями об основных видах шумов, действующих в тракте обработки сигнала. По заданию преподавателя провести расчет шумов отдельных блоков системы обработки информации и определить результирующий шум на выходе системы.

Контрольные вопросы

- 1 Что представляет собой шум, который действует в тракте обработки сигналов?
- 2 Как можно охарактеризовать шум в частотной области?
- 3 Какие виды шумов могут действовать в тракте обработки сигнала?
- 4 Что представляет собой белый шум?
- 5 Какие шумы относятся к внутренним шумам системы обработки информации?
- 6 Как определить спектральную плотность мощности помех, приведенных ко входу в оптимальный фильтр?

6 Расчет необходимого отношения сигнал/шум и порогового уровня принятия решения

6.1 Основные теоретические сведения

Расчет необходимого соотношения сигнал/шум и порогового уровня принятия решения необходимо производить в зависимости от вида исходных данных: допустимого значения вероятности ложной тревоги, средней частоты или среднего периода появления ложной тревоги либо вероятности появления хотя бы одной ложной тревоги за определенное время наблюдения. При этом будет найден пороговый уровень принятия решения о наличии неоднородности. Увеличивать вероятность правильного обнаружения неоднородности можно за счет выбора значения соотношения сигнал/шум, большего, чем пороговое значение. В этом случае необходимо рассчитать вероятность правильного обнаружения, используя таблицу интеграла вероятности.

Допустимые параметры ложных тревог могут быть заданы тремя способами:
– допустимым значением вероятности ложной тревоги $P_{л.т.}$;



- средней частотой $\bar{N}_{л.т}$ или средним периодом $T_{л.т} = \frac{1}{\bar{N}_{л.т}}$ появления ложной тревоги;
- вероятностью появления хотя бы одной ложной тревоги за время наблюдения T_n (обычно используется при редких ложных тревогах).

Если задано значение вероятности ложной тревоги $P_{л.т}$, то рассчитывается величина

$$\Phi\left(\frac{x_0}{\sigma}\right) = 1 - 2P_{л.т}, \quad (6.1)$$

где x_0 – пороговое значение сигнала;

σ^2 – дисперсия действующего шума.

По таблицам интеграла вероятности $\Phi(\rho) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\rho e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ находится относительный порог $\rho_n = \frac{x_0}{\sigma}$, который и устанавливает необходимое значение сигнал/шум на выходе устройства обнаружения. Он называется параметром обнаружения.

Если дисперсия шума σ^2 на выходе фильтра известна, то пороговое значение сигнала $x_0 = \rho_n \sigma_n$.

Вероятность правильного обнаружения в случае, когда отношение сигнал/шум на выходе фильтра превышает величину параметра обнаружения, может быть найдена по формуле

$$P(A_1^* A_1) = 0,5(1 + \Phi(\rho - \rho_n)). \quad (6.2)$$

Если задана средняя частота появления ложных тревог, то для расчета требуемого порогового отношения сигнал/шум используют формулу

$$\bar{N}_{л.т} = \frac{\omega_n}{2\pi} e^{-\frac{\rho_n^2}{2}}, \quad (6.3)$$

где ω_n – средняя квадратичная круговая частота пересечения помехой на выходе фильтра нулевого уровня.

В случае установки перед пороговым устройством оптимального фильтра величина ω_n определяется следующим образом:



$$\omega_n^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \left[\omega^2 \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{W_n(\omega)} \right] d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{W_n(\omega)} d\omega}, \quad (6.4)$$

где $S_{ex}(\omega)$ – спектральная плотность сигнала;

$W_n(\omega)$ – спектр мощности действующего шума.

В тех случаях, когда перед пороговым устройством установлен фильтр нижних частот, то величина ω_n рассчитывается как

$$\omega_n^2 = \frac{\int_0^{\omega_m} \omega^2 d\omega}{\int_0^{\omega_m} d\omega} = \frac{\omega_m^2}{3}. \quad (6.5)$$

Для полосового и избирательного фильтров, соответственно, эта величина с достаточной степенью точности определяется следующим образом:

$$\omega_n^2 = \omega_0^2 \left(1 + \frac{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}{12} \right), \quad (6.6)$$

где ω_0 – середина полосы пропускания.

Из формулы (6.3) следует, что

$$\rho_n = \left[2 \ln \frac{\omega_n}{2\pi \bar{N}_{л.м}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6.7)$$

Если задана допустимая вероятность появления $P_{л.м}(K \geq 1)$ хотя бы одной ложной тревоги за определенное время наблюдения T_n , то для расчета необходимого порогового соотношения сигнал/шум используют формулу

$$\rho_n = \left[2 \ln \frac{\omega_n T_n}{-2\pi \ln [1 - P_{л.м}(K \geq 1)]} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6.8)$$

6.2 Индивидуальное задание



Ознакомиться с основными теоретическими сведения о расчете необходимого значения сигнал-шум на выходе системы обработки информации. По заданию преподавателя рассчитать необходимое значение сигнал-шум на выходе системы для различных вариантов задания исходных данных, вида усилителей.



Контрольные вопросы

- 1 Что такое отношение сигнал-шум?
- 2 Как определяется это отношение? Каков его физический смысл?
- 3 Какие возможны варианты задания исходных данных для расчета?
- 4 Что такое вероятность правильного обнаружения?
- 5 Как определяется вероятность правильного обнаружения?
- 6 Что представляют собой ошибки первого и второго рода при обнаружении сигналов?
- 7 Влияет ли частота сигнала на пороговое отношение сигнал-шум?

7 Расчет основных параметров устройства по требуемому отношению сигнал/шум

7.1 Общие теоретические сведения

Для расчета параметров устройства обработки сигналов составляется основное энергетическое уравнение, которое затем решается относительно неизвестной величины. Если существенных параметров устройства два и более, то решением уравнения служит связь между этими параметрами. Задавая приемлемым значением одного или нескольких, находят остальные.

Основное энергетическое уравнение имеет следующий вид:

$$\rho_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|S(\omega)|^2}{W(\omega)} d\omega. \quad (7.1)$$

Часто при расчете основных параметров устройства обработки сигналов по требуемому отношению сигнал/шум полезным является применение теоремы Парсеваля, которая следует из формулы Рэлея. Она определяет равенство энергий сигналов при их представлении в частотной и временной областях.

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 d\omega = \int_0^{t_k} i^2(t) dt. \quad (7.2)$$

7.2 Индивидуальное задание

Ознакомится с методикой расчета основных параметров устройства обработки сигналов по требуемому отношению сигнал/шум. По заданию преподавателя провести расчет параметров устройства по требуемому отношению сигнал/шум.



Контрольные вопросы

- 1 Какие параметры устройства обработки информации следует учитывать при расчете отношения сигнал/шум?
- 2 Как проводится расчет отношения сигнал/шум?
- 3 Сформулируйте теорему Парсевалья.
- 4 В каком случае система обработки сигналов будет обеспечивать требуемое отношение сигнал/шум?

8 Расчет пороговой чувствительности. Расчет информационного содержания сигнала на выходе устройства. Расчет КПД системы обработки информации

8.1 Общие теоретические сведения

Минимальный поток, который вызывает на выходе приемника сигнал, равный среднеквадратичному значению шумов приемника, называется порогом чувствительности:

$$\rho_n = \frac{\sqrt{u_{ш}^2}}{S_U} \quad \text{или} \quad \rho_n = \frac{\sqrt{I_{ш}^2}}{S_I}.$$

Различают интегральную и спектральную пороговые чувствительности приемников.

Для систем обнаружения пороговая чувствительность обычно определяется как значение входного сигнала, обеспечивающего заданное отклонение сигнал/шум ρ_0 . Иными словами, входящий на входной зрачок световой поток $\Phi_{над}$ должен превышать порог чувствительности системы обнаружения дефектов в ρ_0 раз:

$$\Phi_{над} \geq \rho_0 \Phi_{прзл}. \quad (8.1)$$

Используя последнее выражение, можно записать

$$\Phi_{прзл} = \Phi_{над} / \rho_0. \quad (8.2)$$

Расчет информационного содержания непрерывного сигнала может быть произведен в предположении, что функция распределения плотности вероятностей соответствует нормальному закону распределения. При количественной оценке информационного содержания дискретных сигналов следует обращать внимание на количество уровней и число этих сигналов.

Если на устройство обработки информации поступает информационный



сигнал X вместе с помехой Y , то количество информации I , получаемое приемником в этих условиях можно определить по формуле

$$I = H(X; Y) = H(X) - H(Y / X), \quad (8.3)$$

где $H(X)$ – энтропия полезного сигнала;

$H(Y)$ – условная энтропия.

Поскольку решающее устройство фиксирует факт наличия или отсутствия сигнала, то имеем

$$H(X) = -p \log p - (1 - p) \log(1 - p), \quad (8.4)$$

где p – вероятность правильного обнаружения сигнала.

При расчете коэффициента полезного действия необходимо учесть потери сигнала в оптической системе, потери при модуляции, если она имеется, и потери из-за несогласованности характеристик тракта, а также коэффициент полезного действия электронного тракта усиления и обработки.

Коэффициент полезного действия (КПД) определяет, какая доля полезного сигнала, поступающего на вход прибора, используется для создания выходного сигнала. КПД зависит от ряда факторов. Важнейшими из них являются потери потока в оптической системе, потери при модуляции и обработке, потери из-за отсутствия надлежащего согласования параметров приемника с параметрами оптической и электронной систем. В результате можно записать

$$\eta_{\text{ОЭП}} = \eta_0 \cdot k_m \cdot \eta_{\text{сз}}, \quad (8.5)$$

где η_0 – часть потерь в оптической системе;

k_m – часть потерь при модуляции;

$\eta_{\text{сз}}$ – часть потерь из-за несогласованности характеристик.

Для пассивных систем

$$\eta_0 = K_\delta \frac{\Phi_{\text{пр}}}{\Phi_0}, \quad (8.6)$$

где $\Phi_{\text{пр}}$ – световой поток фотоприемника;

Φ_0 – световой поток, упавший на оптическую систему;

K_δ – коэффициент диафрагмирования.

Коэффициент K_m учитывает потери излучения при модуляции прерыванием и потери излучения за счет изменения спектра.

Для различного вида модуляции коэффициент K_m различен:

– для прямоугольных импульсов, промодулированных синусоидальной функцией, $K_m = 0,16$;

– для прямоугольных импульсов, промодулированных прямоугольной функцией, $K_m = 0,2$.



Коэффициент $\eta_{сз}$ учитывает возможные несоответствия между площадью чувствительного слоя ФП и площадью сечения пучка в месте установки этого слоя A_{ϕ} . При разработке систем обнаружения дефектов стремятся, чтобы размер площади чувствительного слоя был больше, чем площадь пучка излучения.

Другой составляющей является коэффициент $K_{ш}$, учитывающий соотношение между шумом электронной системы, приведенным к приемнику, и собственным шумом приемника:

$$K_{ш} = \sqrt{\frac{U_{ш,пр}^2}{\overline{U}_{ш,пр}^2 + \overline{U}_{шэ}^2}}, \quad (8.7)$$

где $U_{ш,пр}$ – шум приемника;

$U_{шэ}$ – шум электронной системы.

Коэффициент $\eta_{сз}$ учитывает и тот факт, что при выполнении модуляции на рабочей частоте уровень шума может отличаться от паспортного значения. Это получается за счет того, что модуляция производится на частоте, отличной от частоты паспортизации.

8.2 Индивидуальное задание

Ознакомиться с методиками расчета пороговой чувствительности, информационного содержания сигнала на выходе устройства, коэффициента полезного действия системы. По заданию преподавателя провести расчет данных параметров для различных вариантов систем обработки информации.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение пороговой чувствительности.
- 2 Как определяется пороговая чувствительность для систем обработки информации?
- 3 Как определяется информационное содержание сигнала на выходе системы обработки информации?
- 4 Что такое энтропия?
- 5 Что такое условная энтропия?
- 6 От каких параметров устройства зависит коэффициент полезного действия?



Список литературы

1 **Нефёдов, С. В.** Преобразование измерительных сигналов : учебник / С. В. Нефёдов, А. П. Тарасенко, В. М. Чернова. – Москва : КУРС ; ИНФРА-М, 2018. – 224 с.

2 **Гадзиковский, В. И.** Цифровая обработка сигналов : учебное пособие / В. И. Гадзиковский. – Москва : СОЛОН-Пр., 2014. – 766 с.

3 **Шахтарин, Б. И.** Обнаружение сигналов : учебное пособие для вузов / Б. И. Шахтарин, 3-е изд., стер. – Москва : Гор. линия-Телеком, 2015. – 464 с.

4 **Баскаков, С. И.** Радиотехнические цели и сигналы / С. И. Баскаков. – 4-е изд. – Москва : Высшая школа, 2003. – 462 с.

5 **Солонина, А. И.** Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций : учебное пособие / А. И. Солонина, Д. А. Улахович, С. М. Арбузов. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 768 с.

6 **Рангайян, Р. М.** Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход : пер. с англ. / Р. М. Рангайян ; под ред. А. П. Немирно. – Москва : ФИЗМАТЛИТ 2007. – 440 с.

