

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию
для студентов направления подготовки
12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.391.6
ББК 32.84
М54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «16» февраля 2023 г.,
протокол № 6

Составитель ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

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

В методических рекомендациях кратко изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения курсовой работы. Разработаны в соответствии с учебной программой по дисциплине «Методы анализа и обработки сигналов» для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения.

Учебное издание

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевнича

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 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 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Введение	4
1 Цель и задачи курсовой работы	5
2 Содержание курсовой работы и требования к ее оформлению	5
3 Методические указания к выполнению расчетов тракта обработки сигналов	6
Список литературы	19

Введение

Общение людей друг с другом, их взаимоотношения с внешним миром, их производственная, научная и общественная деятельность тесно связаны с информационными процессами – процессами восприятия, передачи, обработки, поиска, хранения и отображения информации. Без обмена информацией невозможно управление различными объектами, организация производственной, научной и общественной жизни человека.

Целью изучения дисциплины «Методы анализа и обработки сигналов» является формирование у студентов четких представлений о целях, задачах и методах обработки сигналов и измерительной информации в неразрушающем контроле.

В результате обработки измерительная информация об объекте контроля представляется в форме, удобной для восприятия, хранения и дальнейшего преобразования. Для этого необходимо осуществить выделение информативного сигнала и подавление шумов и помех, преобразование и передачу сигнала по каналу связи от датчика к приемному устройству, оцифровать сигнал и обработать цифровую информацию в микропроцессоре, вывести численную информацию или цифровое изображение на экран устройства отображения информации.

1 Цель и задачи курсовой работы

Цель курсовой работы заключается в практическом освоении и закреплении студентами знаний, полученных в ходе прослушанных лекций, их углублении, а также в развитии навыков самостоятельной работы расчетного характера. Курсовая работа посвящена разработке и анализу тракта обработки сигнала при неразрушающем контроле.

Выполнение курсовой работы ставит следующие задачи:

- подготовить студентов к самостоятельному решению задач, связанных с синтезом и расчетом систем обработки сигналов;
- закрепить и расширить знание теоретических основ обработки сигналов и знание методик расчета элементов системы обработки информации;
- приобрести умение пользоваться технической литературой;
- закрепить знание правил оформления документации в соответствии с ЕСКД и другими стандартами.

2 Содержание курсовой работы и требования к ее оформлению

Работа выполняется в соответствии с техническим заданием, которое включает назначение и возможную область применения разрабатываемой системы обработки сигнала, ее основные технические данные, условия эксплуатации, состав графической и расчетной части работы, а также этапы выполнения.

Техническое задание выполняется на специальном бланке, подписывается руководителем курсовой работы. Студент расписывается в принятии технического задания к исполнению.

Курсовая работа должна включать расчетно-пояснительную записку и графическую часть. Расчетно-пояснительная записка должна быть выполнена чисто и аккуратно на листах писчей нелинованной бумаги в соответствии с требованиями действующих стандартов.

Расчетно-пояснительная записка включает титульный лист, задание на курсовую работу, содержание, вводную часть, описание принципа действия рассчитываемой системы обработки сигнала, расчетную часть и список использованных источников.

В вводной части расчетно-пояснительной записки должны быть приведены анализ исходных данных и основные предпосылки для выбора принципиальной схемы тракта обработки сигналов.

Описание принципа действия системы обработки выполняется по чертежу принципиальной схемы. Здесь необходимо пояснить назначение каждого узла устройства, связи узлов между собой, взаимодействие каждого узла с другими, а также всего прибора в целом.

Расчетная часть должна включать:

- структурную схему устройства неразрушающего контроля;

- структурную схему устройства преобразования сигналов с указанием источников шумов;
- расчет частотных коэффициентов каждого узла системы обработки сигналов и общего частотного коэффициента передачи;
- расчет спектра входного сигнала и его энергии, расчет АЧХ и ФЧХ на одном периоде сигнала;
- расчет спектра на выходе устройства обработки сигналов и его энергии;
- расчет значений действующих шумов в тракте обработки сигналов;
- расчет необходимого значения сигнал/шум и порогового уровня принятия решения по заданным параметрам обнаружения дефектов;
- расчет основных параметров устройства обработки сигналов по требуемому отношению сигнал/шум;
- расчет пороговой чувствительности;
- расчет информационного содержания сигнала на выходе устройства.

При этом полученные результаты расчетов должны сопровождаться графическим представлением рассчитанных величин в частотной области.

Изложение пояснительной записки должно быть четким, логически последовательным и полностью раскрывающим существо рассматриваемых вопросов. При выполнении курсовой работы необходимо пользоваться общепринятой терминологией, сокращениями и обозначениями, определенными соответствующими стандартами. Расчетные соотношения обязательно поясняются текстовой частью.

В состав графической части, которая в зависимости от насыщенности выполняется на форматах А2 или А3, включаются схема прибора, графики, полученные в ходе расчета, и т. д. Все рисунки и чертежи выполняются в строгом соответствии с требованиями стандартов.

В списке литературы указываются источники, которые были использованы при расчете устройства обработки сигналов. При этом в тексте расчета пояснительной записки в соответствующих местах приводятся ссылки на порядковый номер литературы.

Общий объем пояснительной записки составляет 25–30 страниц.

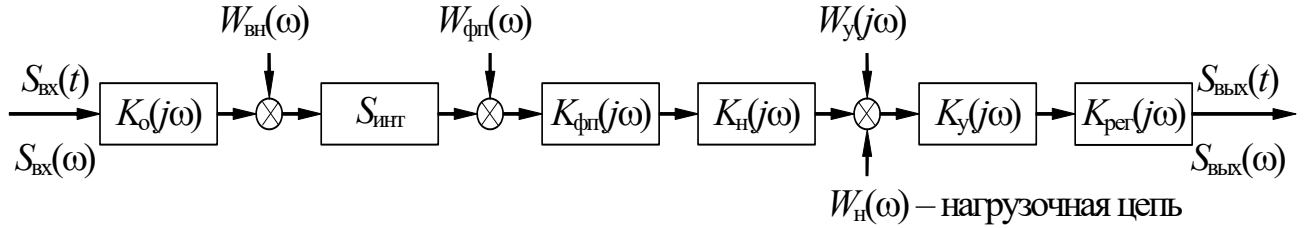
3 Методические указания к выполнению расчетов тракта обработки сигналов

3.1 Структурная схема устройства преобразования сигналов с указанием точек действия шумов

При составлении структурной схемы преобразования сигналов следует представить каждый узел устройства в виде линейной цепи, указать связи между этими узлами и точки приложения шумов: внешних, фотоприемника, усилителя, нагрузочной цепи и др. [1].

Пусть на прибор действуют входной сигнал $x_{\text{вх}}(t)$, имеющий спектр $S_{\text{вх}}(\omega)$,

и совокупность помех и шумов (внешние помехи, шумы фотоприемника, нагрузочной цепи и усилителя электронного тракта), а приемник излучения обладает интегральной вольтовой чувствительностью $S_{\text{инт}}$. В этом случае структурную схему такого прибора можно представить, как показано на рисунке 3.1.



$K_o(j\omega)$ – частотный коэффициент передачи оптической системы; $K_{\text{фп}}(j\omega)$ – частотный коэффициент передачи фотоприемника; $K_{\text{н}}(j\omega)$ – частотный коэффициент передачи нагрузочной цепи; $K_y(j\omega)$ – частотный коэффициент передачи усилителя; $K_{\text{рег}}(j\omega)$ – частотный коэффициент передачи регистрирующего прибора

Рисунок 3.1 – Структурная схема преобразования сигналов

3.2 Частотные коэффициенты передачи основных звеньев приборов

Для информационных и измерительных приборов связь между спектрами входного и выходного сигналов определяется выражениями [1]

$$S_{\text{вых}}(\omega) = K_{\text{п}}(j\omega) \cdot S_{\text{вх}}(\omega); \quad (3.1)$$

$$W_{\text{вых}}(\omega) = [K_{\text{п}}(j\omega)]^2 \cdot W_{\text{вх}}(\omega), \quad (3.2)$$

где значение $K_{\text{п}}(j\omega)$ определяется следующим образом:

$$K_{\text{п}}(j\omega) = K_o(j\omega) \cdot S_{\text{инт}} \cdot K_{\text{фп}}(j\omega) \cdot K_{\text{н}}(j\omega) \cdot K_y(j\omega) \cdot K_{\text{рег}}(j\omega). \quad (3.3)$$

Спектральные плотности шумов на выходе схемы зависят от места их приложения и определяются частотным коэффициентом передачи участка цепи между точкой приложения и выходом. Например,

$$W_{y \text{ вых}}(j\omega) = |K_y(j\omega) \cdot K_{\text{рег}}(j\omega)|^2 \cdot W_y(j\omega). \quad (3.4)$$

Если шумы независимы между собой, то на выходе их спектр мощности суммируется, т. е.

$$W_{\Sigma \text{ вых}}(\omega) = W_{y \text{ вых}}(\omega) + W_{\text{н вых}}(\omega) + W_{\text{вн вых}}(\omega) + W_{\text{фп вых}}(\omega). \quad (3.5)$$

Расчет частотных коэффициентов каждого узла системы обработки сигналов производится по формулам, которые учитывают принцип работы оптической системы разрабатываемого прибора, тип фотоприемника и его инерционные свойства, тип нагрузочной цепи, а также вид электронного тракта обработки и усиления сигналов.

Расчет общего частотного коэффициента передачи производится путем перемножения полученных функций. При этом необходимо, дискретно изменяя значение частоты, построить график полученной функции.

3.2.1 Оптическая система. С достаточной степенью точности полагают, что

$$K_o(j\omega) = K_o, \quad (3.6)$$

где K_o – частотный коэффициентом передачи оптической системы.

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

$$\Phi = A_{\text{вх}} \cdot E_{\text{вх}} \cdot \tau_0, \quad (3.7)$$

где $A_{\text{вх}}$ – площадь входного зрачка;

$E_{\text{вх}}$ – освещенность на входном зрачке;

τ_0 – коэффициент пропускания.

Тогда частотный коэффициент передачи оптической системы

$$K_o = \frac{\partial \Phi}{\partial E_{\text{вх}}} = A_{\text{вх}} \tau_0. \quad (3.8)$$

Для протяженного источника излучения

$$\Phi = A_{\text{вх}} \cdot \Delta\Omega \cdot \tau_0 \cdot L_c, \quad (3.9)$$

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

L_c – яркость источника излучения.

Тогда

$$K_o = \frac{\partial \Phi}{\partial L_c} = A_{\text{вх}} \cdot \Delta\Omega \cdot \tau_0. \quad (3.10)$$

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

$$K_o = \frac{\partial \Phi}{A_{\text{вх}}} = E_{\text{вх}} \cdot \tau_0. \quad (3.11)$$

При расчете значения коэффициента τ_0 следует учитывать прохождение сигнала через оптические элементы. Источник излучения и приемник излучения должны быть спектрально согласованы [2].

3.2.2 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

$$K_{\text{фп}}(j\omega) = \frac{S_{\text{инт}}}{[1 + j\omega T_{\text{фп}}]}, \quad (3.12)$$

где $T_{\text{фп}}$ – 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

$$K(j\omega) = \frac{S_{\text{инт}} \cdot e^{j\omega t_d}}{[1 + j\omega T_{\text{фп}}]}, \quad (3.13)$$

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

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

$$K_n(j\omega) = \frac{n}{2}, \quad (3.14)$$

где n – отношение числа витков первичной ω_1 и вторичной ω_2 обмоток трансформатора, $n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$.

3.2.4 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.

В усилительном тракте приборов контроля можно выделить несколько

устройств, которые присутствуют практически во всех приборах НК.

Прежде всего это оптимальный фильтр, функции которого обычно выполняет один или несколько каскадов усилителя.

С точностью до постоянной

$$K(j\omega) = \frac{S^*(\omega)e^{-j\omega t_0}}{W_n(\omega)}, \quad (3.15)$$

где $S^*(\omega)$ – комплексно-сопряженная спектральная плотность полезного сигнала на входе в первый каскад усиления;

$W_n(\omega)$ – спектральная плотность мощности помехи на входе в первый 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.

$$K(j\omega) = \frac{K_y}{1 + j(\omega - \omega_0)T_y}, \quad (3.16)$$

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.

Постоянная времени T_y связана с эффективной полосой пропускания соотношением

$$\Delta\omega_{\text{эф}} = \frac{2}{T_y}. \quad (3.17)$$

В данной полосе частот

$$K(j\omega) > \frac{K_y}{\sqrt{2}}. \quad (3.18)$$

Постоянную времени T_y подбирают в соответствии с полосой частоты пропускания.

Усилители мощности чаще всего имеют передаточный коэффициент

$$K_y(j\omega) = \frac{k_y}{1 + j\omega T_y}, \quad (3.19)$$

где T_y – постоянная времени усилителя.

3.3 Расчет спектра сигнала на входе и выходе прибора

Спектр сигнала на входе можно найти, предварительно получив модель входного сигнала во временной области. Если используется периодический сигнал, то для определения его спектра можно использовать ряд Фурье [3–5]:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) + b_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) \right]; \quad (3.20)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) dt; \quad (3.21)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) dt; \quad (3.22)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) dt, \quad (3.23)$$

где n – номер гармоники;

T – период следования импульсов.

Так же для определения спектра сигнала можно воспользоваться и прямым преобразованием Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (3.24)$$

При расчете спектра пачки импульсов, следующих на объект контроля, можно воспользоваться свойствами преобразований Фурье [3, 4], а потом свернуть полученное выражение по формуле суммы членов геометрической прогрессии.

Для определения числа импульсов N , падающих на объект, следует задаться временем контроля t_k , принимая во внимание характеристики производительности контроля.

Расчет спектра сигнала на выходе устройства необходимо производить в соответствии с методикой расчета сигналов при прохождении ими линейных цепей. При этом следует обращать внимание на характер сигнала, проходящего через эту цепь.

Для входного и выходного сигналов построить график спектральной плотности (спектра мощности) можно путем расчета ее значения на фиксированной частоте и последующем ее изменении с повторением расчета.

Энергия сигнала

$$E_s = \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t) dt.$$

С помощью формулы Парсеваля энергию сигнала можно выразить через его спектральную характеристику:

$$E_s = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega. \quad (3.25)$$

3.4 Определение спектра мощности действующих шумов

При расчете значений действующих шумов в первую очередь необходимо определить доминирующие шумы. В соответствии с видом шума записать 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 [1].

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 составит

$$S_{\text{вх}, \phi}(\omega) = S_{\text{вх}}(\omega) \cdot K_o(j\omega) \cdot S_{\text{инт}} \cdot W_{\text{фп}}(j\omega) \cdot K_n(j\omega) \cdot K_y(j\omega). \quad (3.26)$$

Спектральная плотность входного сигнала $S_{\text{вх}}(\omega)$ 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 $W_{\text{вх}, \phi}(\omega)$ на входе в оптимальный фильтр с параметрами оптической системы.

Внешние помехи обычно зависят от параметров оптической 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:

$$W_{\text{вн}, \phi}(\omega) = \left(K_{\text{фп}}(j\omega) \cdot K_{\text{н}}(j\omega) \cdot K_{\text{у}}(j\omega) \right)^2 \cdot W_{\text{б.ш}}(\omega) \cdot S_{\text{инт}}. \quad (3.27)$$

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:

$$W_{\text{др}}(\omega) = k_{\text{др}} \cdot e \cdot \langle i \rangle; \quad (3.28)$$

$$W_{\text{ток}}(\omega) = k_{\text{ток}} \frac{(\langle i \rangle)^\alpha}{\omega^\beta}; \quad (3.29)$$

$$W_{\text{г-р}}(\omega) = \frac{K_{\text{г-р}}(\langle i \rangle)^2}{1 + \omega^2 T_{\text{н}}^2}; \quad (3.30)$$

$$W_{\text{т}}(\omega) = \frac{2kT}{R_{\text{фп}}}, \quad (3.31)$$

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;

$T_{\text{н}}$ – среднее время жизни носителей заряда в полупроводниковых фотоприемниках;

$R_{\text{фп}}$ – внутреннее сопротивление теплового фотоприемника, Ом;

$\alpha = 2$;

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

$k_{\text{др}}$, $k_{\text{ток}}$, $k_{\text{г-р}}$ – коэффициенты, зависящие от конкретных образцов фотоприемников, которые, как правило, определяются экспериментально.

Спектральная плотность мощности шумов фотоприемника, приведенная ко входу оптимального фильтра, составляет

$$W_{\text{фп}, \phi}(\omega) = \left| W_{\text{фп}}(j\omega) \cdot K_{\text{н}}(j\omega) \cdot K_{\text{у}}(j\omega) \right|^2 \cdot W_{\text{фп}}, \quad (3.32)$$

где $W_{\text{фп}} = W_{\text{др}} + W_{\text{ток}} + W_{\text{г-р}} + W_{\text{т}}$.

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 следующем виде:

$$W_{\Sigma\text{ш}}(\omega) = 2kTR_{\Sigma}, \quad (3.33)$$

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,

$$W_{\Sigma, \phi}(\omega) = |K_y(j\omega)|^2 W_{\Sigma\text{ш}}(\omega). \quad (3.34)$$

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

$$W_{\text{вх}}(\omega) = W_{\text{вн}, \phi}(\omega) + W_{\text{фп}, \phi}(\omega) + W_{\Sigma, \phi}(\omega). \quad (3.35)$$

3.5 Расчет необходимого соотношения сигнал/шум и порогового уровня принятия решения

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 или вероятности появления хотя бы одной ложной тревоги за определенное время наблюдения. При этом будет найден пороговый уровень принятия решения о наличии дефекта. Увеличивать вероятность правильного обнаружения дефекта можно за счет выбора значения соотношения сигнал/шум большего, чем пороговое значение. В этом случае необходимо рассчитать вероятность правильного обнаружения, пользуясь таблицей интеграла вероятности.

Допустимые параметры ложных тревог могут быть заданы тремя способами:

1) допустимым значением вероятности ложной тревоги $P_{\text{л.т}}$;

2) средней частотой $\bar{N}_{\text{л.т}}$ или средним периодом $T_{\text{л.т}} = \frac{1}{\bar{N}_{\text{л.т}}}$ появления лож-

ной тревоги;

3) 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 необходимо рассчитать величину

$$\Phi\left(\frac{x_0}{\sigma}\right) = 1 - 2 \cdot P_{л.т.}, \quad (3.36)$$

где x_0 – пороговое значение сигнала;

σ^2 – дисперсия действующего шума.

По таблицам интеграла вероятности [6] $\Phi(\rho) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\rho e^{-\frac{\rho^2}{2}} dt$ находится от-
носительный порог $\rho_n = \frac{x_0}{\sigma}$, который и устанавливает необходимое значение
сигнал/шум на выходе устройства обнаружения. Он называется параметром об-
наружения.

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

Вероятность правильного обнаружения в случае, когда отношение сиг-
нал/шум на выходе фильтра превышает величину параметра обнаружения, мо-
жет быть найдена по формуле

$$P(A_1^* A_1) = 0,5(1 + \Phi(\rho - \rho_n)). \quad (3.37)$$

Если задана средняя частота появления ложных тревог, то для расчета тре-
буемого порогового отношения сигнал/шум пользуются формулой

$$\bar{N}_{л.т.} = \frac{\omega_n}{2\pi} e^{-\frac{\rho_n^2}{2}}, \quad (3.38)$$

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:

$$\omega_n^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \left[\omega^2 \frac{|S_{вх}(\omega)|^2}{W_n(\omega)} \right] d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|S_{вх}(\omega)|^2}{W_n(\omega)} d\omega}, \quad (3.39)$$

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

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

В тех случаях, когда перед пороговым устройством установлен фильтр нижних частот с частотным коэффициентом передачи, показанным на рисунке 3.2, величина ω_n рассчитывается так:

$$\omega_n^2 = \frac{\int_0^{\omega_m} \omega^2 d\omega}{\int_0^{\omega_m} d\omega} = \frac{\omega_m^2}{3}. \quad (3.40)$$

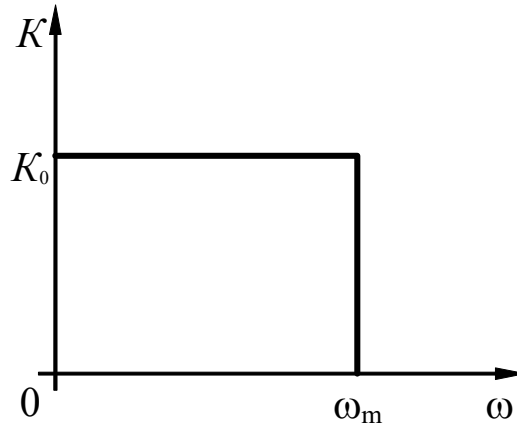


Рисунок 3.2 – Передаточная характеристика фильтра низких частот

Для полосового и избирательного фильтров, передаточные характеристики которых показаны на рисунках 3.3 и 3.4 соответственно, эта величина с достаточной степенью точности определяется так:

$$\omega_n^2 = \omega_0^2 \left(1 + \frac{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}{12} \right), \quad (3.41)$$

где ω_0 – середина полосы пропускания.

Из формулы (3.38) следует, что

$$\rho_n = \left[2 \ln \frac{\omega_n}{2\pi \bar{N}_{л.т}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.42)$$

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

$$\rho_{\pi} = \left[2 \ln \frac{\omega_{\pi} T_{\pi}}{-2\pi \ln [1 - P_{\pi.T} (K \geq 1)]} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.43)$$

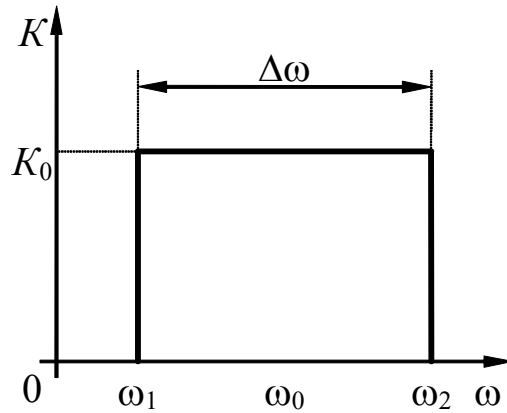


Рисунок 3.3 – Передаточная характеристика полосового фильтра

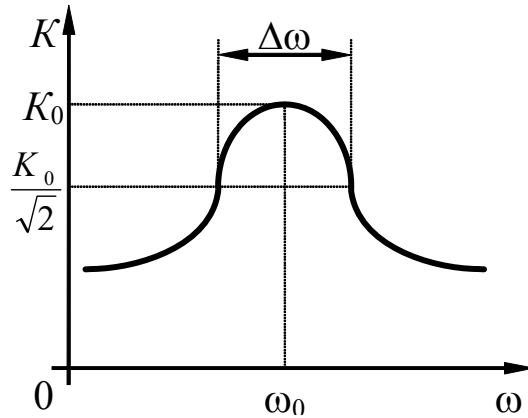


Рисунок 3.4 – Передаточная характеристика избирательного усилителя

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

Основное энергетическое уравнение имеет вид

$$\rho_{\pi} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|S(\omega)|^2}{W(\omega)} d\omega. \quad (3.44)$$

Часто полезным является применение теоремы Парсеваля, которая следует из формулы Рэля. Она определяет равенство энергий сигналов при их представлении в частотной и временной областях.

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 d\omega = \int_0^{t_k} i^2(t) dt = N\tau_{\text{и}}, \quad (3.45)$$

где t_k – время контроля;

N – число импульсов;

$\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса.

В этом случае предполагается, что зондирующие импульсы имеют единичную амплитуду.

3.6 Расчет информационного содержания сигнала

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

$$I = H(X; Y) = H(X) - H(Y / X), \quad (3.46)$$

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

$H(Y)$ – условная энтропия.

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

$$H(X) = -p \log p - (1-p) \log(1-p), \quad (3.47)$$

где p – вероятность правильного обнаружения сигнала.

Список литературы

- 1 **Порфирьев, Л. Ф.** Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах: учебное пособие / Л. Ф. Порфирьев. – Ленинград: Машиностроение, 1989. – 387 с.
- 2 **Нефёдов, С. В.** Преобразование измерительных сигналов: учебник / С. В. Нефёдов, А. П. Тарасенко, В. М. Чернова. – Москва: КУРС; ИНФРА-М, 2018. – 224 с.
- 3 **Левшина, Е. С.** Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи: учебное пособие / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.: ил.
- 4 **Баскаков, С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – 4-е изд. – Москва: Высшая школа, 2003. – 462 с.
- 5 **Щепетов, А. Г.** Преобразование измерительных сигналов: учебник и практикум для академ. бакалавриата / А. Г. Щепетов, Ю. Н. Дьяченко; под ред. А. Г. Щепетова. – Москва: Юрайт, 2018. – 270 с.
- 6 **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учебное пособие / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 608 с.: ил.