

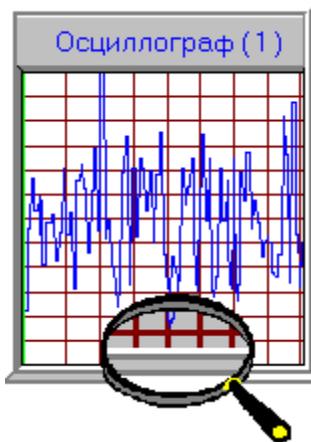
ФГБОУ ВПО

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиотехники

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения лабораторных работ по дисциплине  
«Обнаружение сигналов» для студентов направления 210400.62  
«Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи,  
приема и обработки сигналов») заочной формы обучения



Воронеж 2014

Составитель д-р техн. наук А. Б. Токарев

УДК 621.391

Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Обнаружение сигналов» для студентов направления 210400.62 «Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») заочной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. Б. Токарев. Воронеж, 2014. 29 с.

В издании рассматриваются вопросы обнаружения и оптимальной фильтрации случайных процессов, описана программа моделирования, позволяющая наблюдать различные квазислучайные и случайные процессы, также содержатся индивидуальные задания и методические указания по выполнению лабораторных работ.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS Word 2003 и содержатся в файле Токарев\_ЛАБ\_Обнаружение сигналов.pdf.

Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент: канд. техн. наук, доц. В.П. Литвиненко

Ответственный за выпуск: зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. Б.В. Матвеев

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2014

# **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ**

## **Предварительные сведения**

В настоящее руководство вошли лабораторные работы по дисциплине «Обнаружение сигналов», в которых исследуются вопросы обнаружения сигналов известной формы и фильтрации сигналов неизвестной формы. Работы выполняются путем моделирования случайных процессов на ПЭВМ. Разработанное для проведения лабораторных работ программное обеспечение (ПО) позволяет моделировать набор детерминированных сигналов, а также ряд стационарных случайных процессов с различными видами спектральной плотности мощности. Для контроля параметров и характеристик случайных процессов в ПО моделируется ряд измерительных приборов, таких как осциллограф, спектроанализатор, коррелометр и т.п. С их помощью пользователь имеет возможность оценить влияние формы и параметров сигналов (случайных процессов) на качество обнаружения (фильтрации) сигналов.

## **Порядок выполнения лабораторных работ**

Перед практическим выполнением работ каждый студент должен ознакомиться с общими правилами техники безопасности в учебной лаборатории, получить дополнительный специальный инструктаж от преподавателя и расписаться о том в соответствующем журнале.

Подготовку к работе следует начинать не менее чем за неделю до ее выполнения. В ходе подготовки необходимо изучить содержание работы, методику исследований, выполнить необходимые расчеты по домашним заданиям, продумать ответы на контрольные вопросы. Для допуска к выполнению работы бригада студентов должна предъявить преподавателю письменно оформленные результаты расчета домашнего задания и получить подтверждение их правильности.

По завершении работы полученные результаты должны быть внесены в отчет и дополнены выводами, отражающими сущность выявленных зависимостей. Допустимо оформлять один отчет на бригаду, однако защита полученных результатов производится каждым студентом индивидуально. В ходе защиты оценивается знание студентом теоретических основ исследуемой области (по контрольным вопросам из данного руководства), понимание им сути проведенных исследований, а также способность прогнозировать изменения, которые будут возникать при изменении условий проведения экспериментов.

Время, необходимое для выполнения максимального объема заданий по одной работе с учетом оформления отчета и его защиты, не превышает четырех учебных часов. Затраты на домашнюю самостоятельную подготовку ориентировочно составляют 3 часа на одну работу.

## **Рекомендации к написанию отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- наименование работы, все материалы домашней подготовки (расчеты, таблицы, графики);
- результаты экспериментальных исследований в виде таблиц, графиков и осциллограмм с их физическим толкованием;
- выводы по работе с сопоставлением расчетных теоретических и экспериментальных данных.

Текст в целом должен быть написан кратким и ясным языком; не следует переписывать в отчет рассуждения общетеоретического характера, не имеющие прямого отношения к поставленной задаче и ее решению. Вместе с тем, основные результаты работы желательно прокомментировать, обратив особое внимание на расхождения между теоретическими положениями и результатами исследований и указывая, по возможности, причины выявленных отличий.

Особое внимание следует уделять оформлению рисунков и графиков. Они должны:

- иметь название, указываемое в верхней части рисунка;
- располагаться сразу же за ссылкой на них по тексту или в крайнем случае на следующей странице;
- иметь на каждой оси координат масштабную сетку, символ отображаемой переменной и (через запятую) ее размерность;
- содержать пометки о значениях параметров, которым соответствует построенный график.

Работы, выполненные с нарушениями ГОСТ, даже при корректных результатах не могут претендовать на отличную оценку.

### **Порядок защиты лабораторных работ**

Защита работы предполагает проверку:

- теоретической подготовленности студента по соответствующему разделу курса в объеме, определяемом контрольными вопросами, приведенным в конце описания каждой работы;
- его способности объяснить методику выполнения исследований, а также физическую сущность полученных результатов и их возможное изменение при вариации условий эксперимента.

Защита завершается выставлением оценки и сдачей отчета по работе на кафедру.

# 1. ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ С НЕЙ

Программа моделирования состоит из 3 основных модулей, обеспечивающих управление:

- 1) совокупностью анализируемых источников сигналов и цепей обработки;
- 2) параметрами моделируемых устройств;
- 3) блоком анализа характеристик.

Начинать работу с программой необходимо с определения совокупности исходных сигналов и используемых для их обработки радиотехнических блоков. Для осуществления указанных действий служит окно "Источники сигналов и блоки обработки", показанное на рис. 1.1.

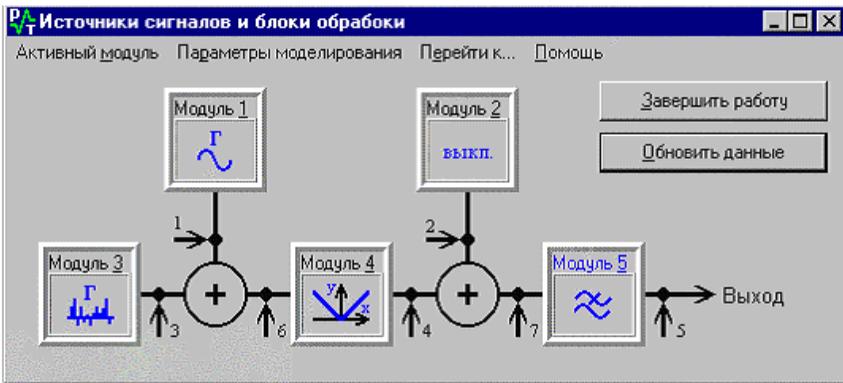


Рис. 1.1. Окно управления исследуемыми сигналами и блоками обработки

Пять прямоугольников с надписями "Модуль1"... "Модуль5" предназначены для схематичного отображения совокупности моделируемых источников случайных процессов, цепей, используемых для их обработки, и способа их объединения. При этом модули № 1...3 предназначены для моделирования сигналов и лишь блоки № 4...5 применяются

для выбора устройства обработки. Конечно, в реальности преобразование случайных процессов может быть гораздо более сложным и многоступенчатым, чем предусматривает данная схема, но даже подобная структура моделирующей установки позволяет наблюдать и анализировать обширную совокупность различных случайных процессов и для учебных целей вполне достаточна.

Изменить назначение любого из модулей весьма просто. Для этого следует:

- С помощью щелчка "мышью" или нажатия комбинации клавиш <Alt>+<номер модуля> сделать нужный модуль активным. Например, после нажатия <Alt>+<5> активным станет модуль №5 и его заголовок выделится синим цветом (см. рис. 1.1);
- С помощью пункта меню "Активный модуль" → "Изменить тип" выбрать подходящий вариант из предлагаемого подменю; Так, при выборе варианта, показанного на рис. 1.2, модуль №5 будет представлять собой уже не идеальный ФНЧ, а реальную интегрирующую RC-цепочку;
- Активировать пункт меню "Активный модуль" → "Изменить параметры модуля" и изменить свойства моделируемого устройства, пользуясь описанным в следующем подразделе окном "Параметры модулей".

Для контроля и изменения параметров моделируемых устройств служит окно "Параметры модулей", показанное на рис. 1.3 (при старом варианте функционирования модуля №5).

В показанном на рис. 1.3 виде блоки управления параметрами предназначены для непосредственного ввода значений величин с клавиатуры. Для быстрой (хотя и менее точной) вариации параметра пользователем предназначена вкладка, показанная на рис. 1.4, используя которую значение параметра легко изменять, просто перемещая движок регулятора мышью.

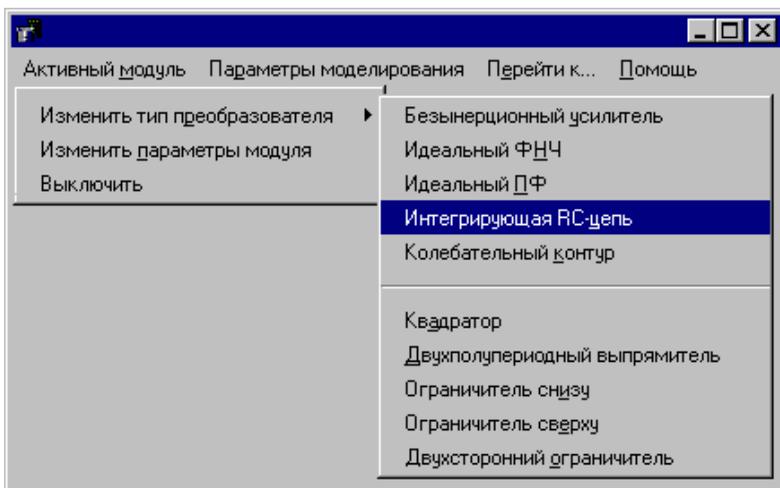


Рис. 1.2. Меню управления типом преобразователей

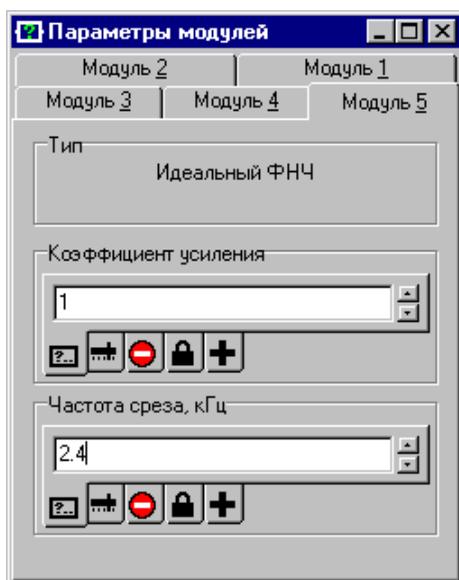


Рис. 1.3. Окно управления параметрами моделируемых устройств

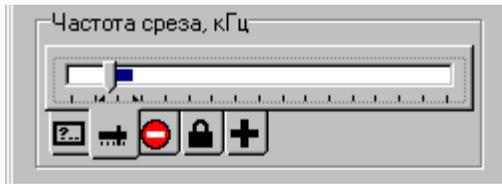


Рис. 1.4. Вкладка ускоренной регулировки параметра

Последующие вкладки являются служебными и при выполнении лабораторных работ не используются.

Для выполнения оценки параметров наблюдаемых случайных процессов предназначен блок анализаторов. Визуально блок анализаторов отображается как окно, содержащее один или два измерительных блока, подключенных к какому-либо из контрольных точек №1...7, показанным на рис. 1.1. Один из возможных вариантов внешнего вида блока анализаторов представлен на рис. 1.5.

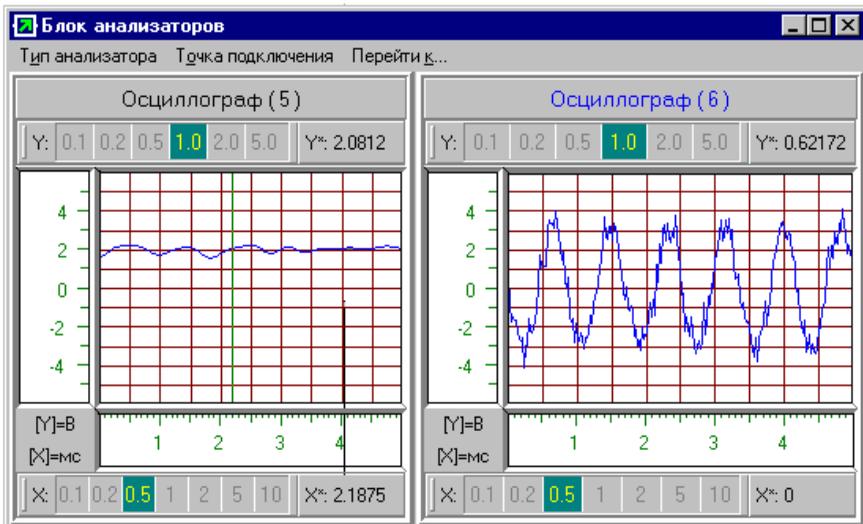


Рис. 1.5. Окно подсистемы измерения характеристик случайных процессов

Метки "(5)" и "(6)", отображаемые в верхней части каждого анализатора, показывают к какой именно контрольной точке схемы подключен измерительный прибор. Так на рис. 1.5 правый осциллограф показывает случайный процесс, формируемый как аддитивная смесь гармонического сигнала и шума, а левый прибор подключен к контрольной точке №5 ("Выход") и отображает результат детектирования этой смеси выпрямителем и идеальным ФНЧ (блоки №4 и №5 на рис. 1.1).

Каждый измерительный прибор снабжен регуляторами вертикального и горизонтального масштабирования изображения, расположенными сверху и снизу от окна отображения результатов измерения. Для корректировки масштаба достаточно лишь щелкнуть "мышью" по соответствующему сектору переключателя. Выделенные на рис. 1.5 секторы переключателя показывают, например, что при отображении информации на экране осциллографа вертикальный масштаб составляет 1 В/дел, а горизонтальный - 0,5 мс/дел. Изменять масштаб можно и при помощи клавиш дополнительной клавиатуры:

- </> - Увеличить масштаб изображения по вертикали;
- <\*> - Уменьшить масштаб изображения по вертикали;
- <-> - Увеличить масштаб изображения по горизонтали;
- <+> - Уменьшить масштаб изображения по горизонтали.

Для более точного измерения каких-либо точек или фрагментов диаграмм предназначены вертикальные маркеры. Они легко управляются как с клавиатуры, так и при помощи "мыши", а их текущие горизонтальные и вертикальные координаты отображаются справа от соответствующих переключателей масштаба. Так, например, на левом приборе, изображенном на рис. 1.5, маркер расположен по оси времени на расстоянии 2,1875 мс от момента начала отсчета и, судя по индикатору в верхней правой части анализатора, наблюдаемое в данном временном сечении значение напряжения составляет 2.0812 В.

Для изменения состава и/или точек подключения контрольно-измерительных приборов служит главное меню окна "Блок анализаторов". Разберем использование данного меню

на примере замены осциллографа, показанного на рис. 1.5 справа, спектроанализатором, подключенным к выходу схемы. Для этого выполним следующие шаги:

1) Щелчком мышью по надписи "Осциллограф (6)" делаем данный измерительный прибор активным (на рис. 1.5 это уже выполнено);

2) При помощи меню "Тип анализатора" заменяем осциллограф спектроанализатором;

3) При помощи меню "Точка подключения" изменяем контрольную точку схемы на № 5 (см. рис. 1.1).

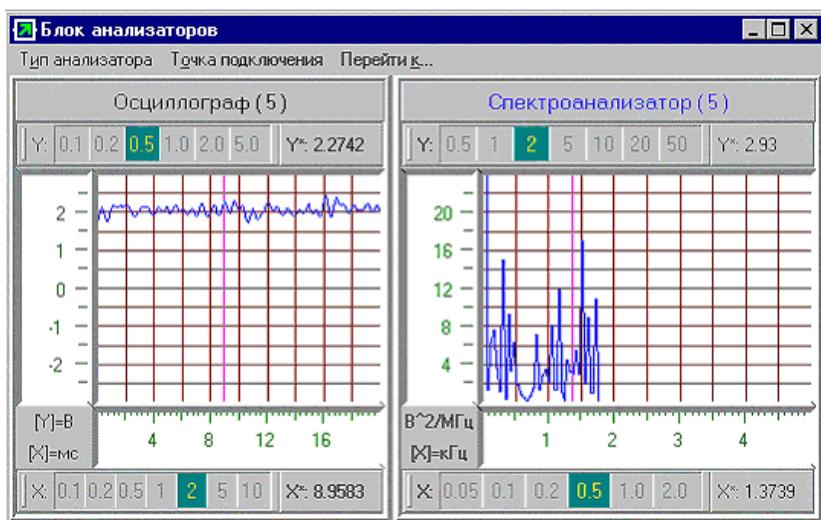


Рис. 1.6. Результат временного и спектрального анализа процесса на выходе схемы

Из важных для выполнения работ возможностей моделирующей программы следует отметить лишь возможность изменять объем выборки при помощи пункт меню "Параметры моделирования" → "Объем выборки". Остальные настройки программы изменять не рекомендуется.

## 2. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ ИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ

### (Лабораторная работа № 1)

**Цель работы** – экспериментальное исследование процедуры обработки смеси сигнала и шума согласованным фильтром.

В работе изучаются основные свойства согласованных фильтров, производится оценка числовых характеристик случайных процессов, наблюдаемых на выходе согласованного фильтра в ответ на приход «своего» сигнала, «чужого» сигнала и широкополосного шума.

### 2.1. Краткое теоретическое введение

2.1.1. Подробную информацию о согласованной фильтрации сигналов можно найти в учебной литературе [1, с.196-202; 3, с.131-139].

2.1.2. В рамках данной работы обнаружение сигналов производится лишь на фоне широкополосного нормального шума, являющегося эквивалентом белого шума, поэтому оптимальным обработчиком смеси сигнала и шума может служить согласованный фильтр.

2.1.3. Согласованный фильтр – это линейное аналоговое устройство с импульсной характеристикой

$$g_{\text{сф}}(t) = \alpha \cdot u(t_0 - t), \quad (2.1)$$

где  $u(t)$  - обнаруживаемый сигнал;  $t_0$  - момент времени, в который обеспечивается максимум отношения сигнал/шум (должен совпадать с моментом окончания сигнала или выбираться позже него);  $\alpha$  - произвольная константа (свойства фильтра не зависят от  $\alpha$ , так как изменение этого коэффициента одинаково увеличивает как интенсивность полезного сигнала, так и среднеквадратическое значение шума на выходе фильтра).

Комплексный коэффициент передачи согласованного фильтра может быть рассчитан по формуле

$$\dot{K}_{сф}(\omega) = A \cdot G_u^*(\omega) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t_0}, \quad (2.2)$$

где  $G_u^*(\omega)$  - величина, комплексно-сопряженная спектральной плотности обнаруживаемого сигнала.

2.1.4. Обеспечиваемое согласованным фильтром отношение сигнал-шум не зависит от формы обнаруживаемого сигнала, а определяется лишь его энергией и спектральной плотностью мощности помехи. Квадрат отношения сигнал/шум (отношение сигнал/шум по мощности) на выходе согласованного фильтра в момент времени  $t_0$  равен

$$q_{сф}^2 = \mathfrak{E}_u / N_0, \quad (2.3)$$

где  $N_0$  – двухсторонняя спектральная плотность мощности шума, а  $\mathfrak{E}_u$  - энергия полезного сигнала определяемая соотношением

$$\mathfrak{E}_u = \int_{-\infty}^{+\infty} u^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{G}_u(\omega)|^2 d\omega. \quad (2.4)$$

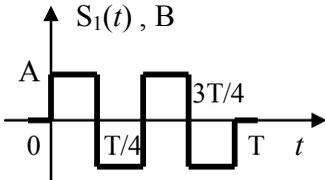
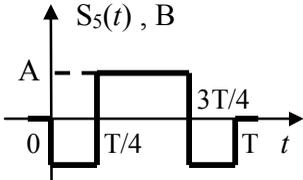
2.1.5. Для оценки спектральной плотности мощности (СПМ) шума в обрабатываемой полосе частот следует учесть, что при цифровой обработке мощность шума распределяется на полосу частот, равную используемой частоте дискретизации  $F_s$ , т.е. значение СПМ шума может быть рассчитано как

$$N_0 = \frac{\sigma_\xi^2}{F_s}. \quad (2.5)$$

2.1.6. Совокупность используемых разными бригадами сигналов, подлежащих обнаружению, приведена в табл. 2.1. Все сигналы имеют конечную протяженность  $\tau$  и подаются на вход устройства обработки в момент времени  $t_{нач} = 2$  мс.

Таблица 2.1

## Набор обнаруживаемых сигналов

Номер бригады	Аналитическое выражение или рисунок, определяющие сигнал
1	$s_1(t) = A \cdot t / \tau$
2	$s_2(t) = A \cdot (1 - t / \tau)$
3	$s_3(t) = A \cdot \sin^2(\pi t / \tau)$
4	
5	
6	$s_6(t) = A \cdot (t / \tau)^2$
7	$s_7(t) = A \cdot \{1 - (t / \tau)^2\}$
8	$s_8(t) = A \cdot (1 - t / \tau)^2$

## 2.2. Домашнее задание к лабораторной работе

2.2.1. Ознакомьтесь с разделом 1 данного руководства, а также с учебной литературой, указанной в п. 2.1.1.

2.2.2. Согласуйте с преподавателем номер бригады, определяющий индивидуальный вариант лабораторных исследований.

2.2.3. Для своего индивидуального варианта рассчитайте СПМ шума, на фоне которого будет производиться обнару-

жение сигналов, энергию полезного сигнала и ожидаемое отношение сигнал-шум на выходе согласованного фильтра. Варианты индивидуальных заданий для бригад заданы в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Номер бригады	Амплитуда сигнала, В	Длительность сигнала, мс	Эффективное значение шума $\sigma_{ш}$ , В	Частота дискретизации, кГц
1	0,6	1	0,8	20
2	0,4	2	1,2	48
3	0,6	1	0,8	20
4	0,3	2	1,6	48
5	0,3	5	1,2	20
6	0,4	2	0,8	48
7	1,0	1	1,0	20
8	0,2	5	1,2	48

2.2.4. Определите импульсную характеристику фильтра, согласованного с сигналом Вашего индивидуального варианта задания, и сохраните её в текстовом файле с расширением «*ini*», следующего формата:

Строка заголовка: «[DataList]»

Строки данных:  $t1=value1$

$t2=value2$

...

Имя файла должно состоять из одной цифры, совпадающей с номером Вашей бригады. Моменты времени  $t1$ ,  $t2...$  задают координаты точек излома импульсной характеристики в миллисекундах, а  $value1$ ,  $value2$  – её значения в этих точках.

Пример:

Для формирования импульсной характеристики, представленной на рис. 2.1, текстовый «ini»-файл должен содержать строки:

```
[DataList]
0.0 = 0.0
0.00001 = 12.0
3.0 = 12.0
3.00001 = -8.0
4.0 = -8.0
4.00001 = 0.0
```

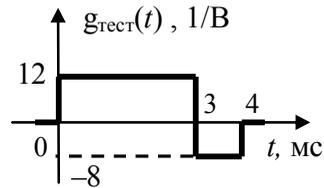


Рис. 2.1. Возможная импульсная характеристика фильтра

2.2.5. Для какого-либо сигнала другой бригады, характеризующегося совпадающей с вашим сигналом по длительности, рассчитайте амплитуду  $A_э$ , гарантирующего совпадение энергии «чужого» сигнала с энергией сигнала из Вашего индивидуального варианта задания. Эта амплитуда будет необходима для проведения завершающего, третьего этапа исследований.

## 2.3. Выполнение лабораторных исследований

### Этап 1. Отклик согласованного фильтра на «свой» сигнал

Рекомендации по выполнению:

2.3.1. Установить частоту дискретизации в соответствии с требованиями табл. 2.2. Установить объем формируемой выборки  $N = 4096$  отсчетов.

2.3.2. Установить тип и параметры модуля № 1 схемы моделирования случайных процессов в соответствии с требованиями табл. 2.2; остальные модули перевести (при необходимости) в выключенное состояние. В блоке анализаторов установить левый анализатор в состояние осциллографа, настроить его на контрольную точку № 6 и убедиться в формировании сигнала нужной формы.

Оба анализатора настроить на контрольную точку № 4, установить правый анализатор в состояние оценки числовых характеристик СП.

2.3.3. Установить модуль № 4 в состояние «Согласованный КИХ-фильтр» и в окне «Параметры модулей» выставить номер сигнала и протяженность импульсной характеристики фильтра из индивидуального варианта задания. Например, для бригады

№ 3 при необходимости использования фильтра с длительностью импульсной характеристики в 4 мс, настройки параметров фильтра показаны на рис. 2.2.

(При указанных настройках модуль № 4 будет автоматически настроен на согласованную обработку сигнала № 3)

Убедиться, что в момент окончания сигнала  $t_0$  наблюдается максимум отклика фильтра на воздействие полезного сигнала. Зафиксировать величину максимума отклика согласованного фильтра  $u_{\text{вых}}(t_0)$ .

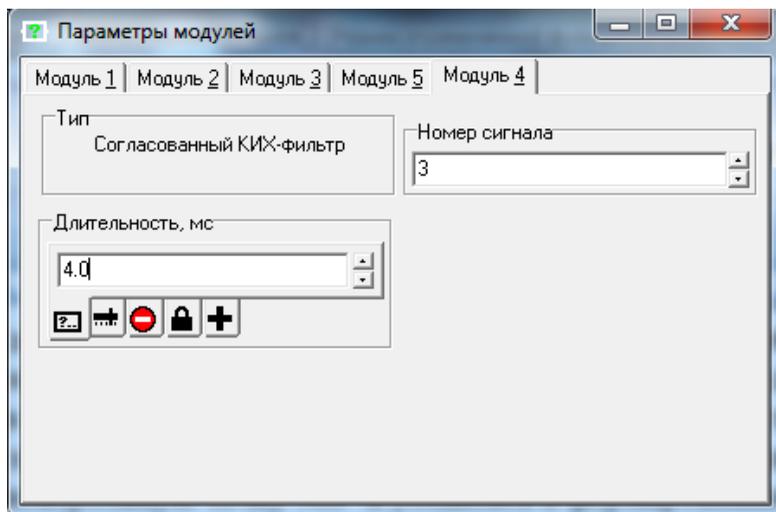


Рис. 2.2. Возможные настройки КИХ-фильтра, согласованного с сигналом № 3 длительностью 4 миллисекунды

2.3.4. Установить нулевую амплитуду полезного сигнала на модуле № 1. Настроить модуль № 3 моделирующей программы на излучение широкополосного шума с эффективным значением из табл. 2.2.

2.3.5. По правому анализатору зафиксировать эффективное значение шума, наблюдаемого на выходе согласованного фильтра в отсутствие сигнала  $\sigma_{\text{ш вых}}$ .

2.3.6. Переключить правый анализатор в режим отображения гистограммы плотности вероятности наблюдаемого процесса  $W_{\xi}^*(\tilde{x})$  и зафиксировать в отчет гистограмму шумового распределения.

2.3.7. Перерисовать в отчете гистограмму, полученную в п. 2.3.6, со смещением вправо на величину  $u_{\text{вых}}(t_0)$  из п. 2.3.3. Визуально оценить степень перекрытия гистограмм и соответствующие ей вероятности ошибок при обнаружения сигнала.

Рассчитать реально наблюдаемое на выходе фильтра отношение сигнал-шум

$$q = \frac{u_{\text{ш}}(t_0)}{\sigma_{\text{ш}}}$$
 (2.6)

и сравнить его с рассчитанным в п. 2.2.3.

2.3.8. Восстановить в модуле №1 амплитуду сигнала, соответствующую индивидуальному варианту задания из табл. 2.2. Провести 25...50 опытов (щелкая по кнопке «Обновить данные») и приближенно оценить частоту возникновения ошибок при обнаружении «своего» сигнала. Сопоставить частоту ошибок с значением, предсказанным в п. 2.3.7.

2.3.9. Если наблюдаемая частота возникновения ошибок пренебрежимо мала – оценить, сколь сильно можно уменьшить амплитуду сигнала в модуле № 1, чтобы повысить вероятность ошибок до 5..10%.

Если же ошибки исходно возникают довольно часто, то определить, при какой амплитуде сигнала вероятность ошибок снижается до пренебрежимо малых величин.

2.3.10. Проанализировать влияние на отношение сигнал-шум и на вероятность возникновения ошибок увеличения (уменьшения) длительности полезного сигнала, формируемого модулем № 1 (без корректировки параметров модуля № 4).

### Этап 2. Оценка работоспособности фильтра с расчетной импульсной характеристикой

Рекомендации по выполнению:

2.3.11. Для модулей №1,3 восстановить настройки, соответствующие индивидуальному варианту задания.

2.3.12. Установить модуль № 4 в состояние «Загружаемый КИХ-фильтр» и настроить его на считывание импульсной характеристики из «*ini*»-файла, указав в окне «Параметры модулей» номер файла, подлежащего загрузке.

2.3.13. Повторно выполнить п.2.3.4-2.3.8 (см. этап 1). Убедиться, что использование фильтра с расчетной импульсной характеристикой обеспечивает соотношение сигнал-шум (2.6), близкое к наблюдавшемуся при выполнении этапа 1.

### Этап 3. Исследование способности согласованного фильтра обнаруживать присутствие «чужих» сигналов

Рекомендации по выполнению:

2.3.14. Настроить модуль № 1 на формирование «чужого» сигнала из п. 2.2.4 домашнего задания; установить его амплитуду равной расчётному значению  $A_э$ .

2.3.15. Вновь установить модуль № 4 в состояние «Согласованный КИХ-фильтр» и в окне «Параметры модулей» выставить номер сигнала и протяженность импульсной характеристики фильтра из своего индивидуального варианта задания.

2.3.16. Временно установив нулевое эффективное значение шума, определить отклик согласованного фильтра на «чужой» сигнал  $s_{\text{вых}}(t_0)$ , соответствующий моменту оконча-

ния сигнала. Рассчитать отношение сигнал-шум (2.6), возникающее при попытке обнаружения «чужого» сигнала.

2.3.17. За счет проведения 25...50 опытов оценить изменение частоты возникновения ошибок при попытках обнаруживать «чужой» сигнал в шуме.

## **2.4. Контрольные вопросы для защиты работы**

1. Разъясните суть отличий при оптимальной линейной фильтрации сигналов в цифровых и аналоговых системах передачи информации.

2. Что такое отношение-сигнал шум на выходе устройства обработки. Чему это отношение равно для согласованного фильтра?

3. Может ли отклик на «чужой» сигнал на выходе согласованного фильтра превышать отклик на «свой» сигнал? Если «да», то при каких условиях?

4. Можно ли снизить вероятность ошибок при обнаружении сигналов за счет увеличения (или уменьшения) их длительности; за счет изменения интенсивности сигналов?

5. Какими характеристиками обладает согласованный фильтр? Разъясните физические причины оптимальности обработки, обеспечиваемой согласованным фильтром.

6. Всегда ли согласованный фильтр является оптимальным устройством для обнаружения сигналов известной формы?

7. Как можно (теоретически и экспериментально) оценить вероятность возникновения ошибок при обнаружении сигнала известной формы? Какие параметры сигнала и фильтра влияют на вероятность возникновения ошибок?

8. Как на вероятность возникновения ошибок влияет коэффициент усиления приёмного тракта? Почему?

### 3. ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ НЕИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ (Лабораторная работа № 2)

*Цель работы* – экспериментальное исследование процедуры обработки смеси случайного полезного сигнала и шума фильтром Колмогорова-Винера.

В работе изучаются основные свойства фильтра Колмогорова-Винера, производится оценка дисперсии сигнала ошибки на выходе фильтра, анализируется возрастание погрешности при использовании для обработки фильтров с характеристиками, отличающимися от оптимальных.

#### 3.1. Краткое теоретическое введение

3.1.1. Подробную информацию о фильтрации случайных сигналов на фоне шума найти в учебной литературе [1, с. 206-211, 3, с. 199-201].

3.1.2. При приёме случайного стационарного полезного сигнала на фоне аддитивного стационарного шума минимальную среднеквадратическую погрешность фильтрации обеспечивает фильтр Колмогорова-Винера - линейное аналоговое устройство с комплексным коэффициентом передачи

$$\dot{K}_{opt}(f) = \frac{S(f)}{S(f) + N(f)}, \quad (3.1)$$

где  $S(f)$  – спектральная плотность мощности полезного сигнала,  $N(f)$  – спектральная плотность мощности аддитивного шума.

3.1.3. При использовании фильтра Колмогорова-Винера средняя мощность сигнала ошибки составляет

$$P_{ош} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(f) \cdot N(f)}{S(f) + N(f)} df = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(\omega) \cdot N(\omega)}{S(\omega) + N(\omega)} d\omega. \quad (3.2)$$

3.1.4. Лабораторная работа предполагает цифровую обработку сигналов с частотой дискретизации  $F_s = 48$  кГц, что позволяет осуществлять обработку сигналов с частотами до 24 кГц. В подобных условиях, учитывая дополнительно четный характер подынтегрального выражения в (3.2), для расчета средней мощности ошибки фильтрации можно рекомендовать выражение

$$P_{ош} \approx 2 \cdot \int_0^{F_s/2} \frac{S(f) \cdot N(f)}{S(f) + N(f)} df. \quad (3.3)$$

## 3.2. Сведения об энергетических характеристиках случайных процессов, используемых в работе

Применительно к задаче фильтрации сигналов неизвестной формы и полезные сигналы, и шумовые процессы имеют схожую природу. В данной лабораторной работе они представляют собой нормальные случайные процессы, отличающиеся друг от друга лишь формой спектральной плотности мощности, формируемые в соответствии с рекомендациями из монографии [6, с. 100-112]. Для облегчения поиска информации в текущем подразделе приведены сведения из [6] об основных характеристиках СП, а также рекомендации по формированию этих процессов в ходе лабораторного моделирования.

3.2.1. **Процессом типа 1** далее в настоящей работе называется низкочастотный СП с корреляционной функцией вида

$$B_1(\tau) = \sigma_\xi^2 \cdot \exp\{-|\tau|/\tau_\sigma\} \quad (3.4)$$

и спектральной плотностью мощности

$$S_1(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_\xi(\tau) \cdot \exp\{-j\omega\tau\} d\tau = \sigma_\xi^2 \cdot \frac{2\tau_\sigma}{1 + (\omega\tau_\sigma)^2} \quad (3.5)$$

Сформировать реализации данного СП можно любым из модулей № 1...3 при выборе режима их функционирования «Нормальный шум (тип 1)».

3.2.2. Под **процессом типа 2** далее понимается узкополосный СП с корреляционной функцией вида

$$B_2(\tau) = \sigma_{\xi}^2 \cdot \exp\{-|\tau|/\tau_{\delta}\} \cdot \cos(\omega_0 \tau) \quad (3.6)$$

и спектральной плотностью мощности

$$S_2(\omega) = \sigma_{\xi}^2 \cdot \frac{2\tau_{\delta} (1 + (\omega\tau_{\delta})^2 + (\omega_0\tau_{\delta})^2)}{\{1 + ((\omega + \omega_0)\tau_{\delta})^2\} \cdot \{1 + ((\omega - \omega_0)\tau_{\delta})^2\}} \quad (3.7)$$

Сформировать реализации данного СП можно любым из модулей № 1...3 при выборе режима их функционирования «Нормальный шум (тип 2)» (Примечание: при этом вместо частоты  $\omega_0$  в радианах в секунду задаётся циклическая частота  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  (Гц)).

3.2.3. Перечисленные выше СП могут в разных ситуациях играть роль как шума, так и подлежащего фильтрации полезного сигнала. Следующим СП, который, очевидно, может выполнять лишь роль шума, является **широкополосный нормальный шум**. Спектральная плотность мощности этого шума зависит от используемой при моделировании частоты дискретизации и может быть рассчитана как

$$S_{\text{ш}}(\omega) = T \cdot \sigma_{\xi}^2, \quad (3.8)$$

где  $T = 1/Fs$  – интервал дискретизации.

3.2.4. **Процессом типа 3** условимся считать низкочастотный СП, получаемый при прохождении широкополосного нормального шума с эффективным значением  $\sigma_{\xi}$  через фильтр с прямоугольной АЧХ, подобный идеальному фильтру нижних частот – ИФНЧ. Спектральная плотность мощности этого СП равна

$$S_3(f) = \begin{cases} \sigma_\xi^2 \cdot T \cdot K_0^2, & |f| \leq F_c \\ 0, & |f| > F_c \end{cases} \quad (3.9)$$

Для формирования реализаций такого СП необходимо широкополосный нормальный шум (см. п. 4.2.3), формируемый модулями № 1 или № 3, пропустить через модуль № 4, установленный в режим «ИФНЧ» с частотой среза, равной  $F_c$ .

3.2.5. Под **процессом типа 4** далее понимается узкополосный СП, получаемый при прохождении широкополосного нормального шума через полосовой фильтр с прямоугольной АЧХ. Спектральная плотность мощности этого СП равна

$$S_3(f) = \begin{cases} \sigma_\xi^2 \cdot T \cdot K_0^2, & F_{c i \dot{\epsilon} \alpha} \leq |f| \leq F_{c \dot{\alpha} \dot{\alpha} \dot{\delta} \dot{\delta}} \\ 0, & \dot{i} \dot{\delta} \dot{\epsilon} \dot{i} \dot{\delta} \dot{\epsilon} \dot{\delta} \dot{\delta} \quad f \end{cases} \quad (3.10)$$

Для формирования реализаций СП необходимо пропустить широкополосный нормальный шум (см. п. 4.2.3), формируемый модулями № 1 или № 3, через модуль № 4, работающий в режиме «ИПФ» с частотами среза  $F_{c i \dot{\epsilon} \alpha}$  и  $F_{c \dot{\alpha} \dot{\alpha} \dot{\delta} \dot{\delta}}$ .

3.2.6. Наконец, **процесс типа 5** – это низкочастотный СП с корреляционной функцией вида

$$B_5(\tau) = \sigma_\xi^2 \cdot \left\{ 1 - |\tau|/\tau_\delta \right\}, \quad |\tau| \leq \tau_\delta \quad (3.11)$$

и спектральной плотностью мощности

$$S_5(\omega) = \sigma_\xi^2 \cdot 4\tau_\delta \cdot \text{sinc}^2(\omega\tau_\delta) \quad (3.12)$$

Для формирования реализаций СП необходимо пропустить широкополосный нормальный шум (см. п. 3.2.3), формируемый модулями № 1 или № 3, через модуль № 4, осуществляющий скользящее суммирование последних  $N_{av} = 1 + \text{int}(\tau_\delta/T)$  отсчетов.

### 3.3. Домашнее задание к лабораторной работе

3.3.1. Ознакомьтесь с разделом 1 данного руководства, а также с учебной литературой, указанной в п. 3.1.1.

3.3.2. Согласуйте с преподавателем номер бригады, определяющий индивидуальный вариант лабораторных исследований. Сведения о полезных сигналах и помехах, соответствующих заданиям разных бригад, приведены в табл. 3.1.

3.3.3. Для своего индивидуального варианта рассчитайте АЧХ фильтра, минимизирующего среднеквадратическую погрешность фильтрации полезного сигнала  $s(t)$  на фоне аддитивного шума  $n(t)$ , а также соответствующую оптимальной обработке среднюю мощность ошибки фильтрации.

Кусочно-линейную аппроксимацию рассчитанной АЧХ фильтра сохраните её в текстовом файле с расширением «*ini*», следующего формата:

Строка заголовка: «[DataList]»

Строки данных:  $f1=value1$

$f2=value2$

...

Имя файла должно состоять из одной цифры, совпадающей с номером Вашей бригады. Частоты  $f1, f2$  (в килогерцах) задают координаты точек излома АЧХ, а  $value1, value2$  – значения АЧХ в соответствующих точках.

Пример:

Для формирования приближенной копии АЧХ, представленной на рис. 3.1, текстовый «*ini*»-файл может содержать строки:

[DataList]

0.0 = 1.0

2.0 = 1.0

5.0 = 0.1

7.0 = 0.0

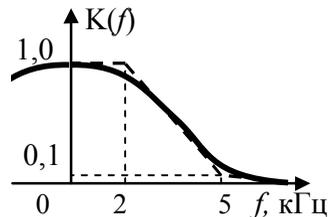


Рис. 3.1. Возможная АЧХ фильтра

Таблица 3.1

Номер бригады	Полезный сигнал $s(t)$			Аддитивный шум $n(t)$		
	Тип СП	$\sigma_{ш, В}$	Прочие параметры	Тип СП	$\sigma_{ш, В}$	Прочие параметры
1	1	$1,0^{2}$	$\tau_{\delta} = 1,0$ мс	4	1,0	$K_0 = 5,$ $F_{c i \dot{\epsilon} \alpha} = 1$ кГц, $F_{c \ddot{a} \ddot{o} \ddot{o}} = 5$ кГц
2	2	$1,0^{2}$	$f_0 = 2,5$ кГц $\tau_{\delta} = 2,0$ мс	3	2,5	$K_0 = 1$ $F_c = 8$ кГц
3	3	$1,0^{1}$	$K_0 = 1,$ $F_c = 4$ кГц	1	1,2	$\tau_{\delta} = 1,8$ мс
4	4	$1,0^{1}$	$K_0 = 3,$ $F_{c i \dot{\epsilon} \alpha} = 2$ кГц, $F_{c \ddot{a} \ddot{o} \ddot{o}} = 4$ кГц	БШ	2,0	–
5	1	$1,5^{1}$	$\tau_{\delta} = 0,8$ мс	БШ	0,5	–
6	3	$1,0^{1}$	$K_0 = 4,$ $F_c = 4$ кГц	БШ	1,5	–
7	4	$1,0^{1}$	$K_0 = 3,$ $F_{c i \dot{\epsilon} \alpha} = 2$ кГц, $F_{c \ddot{a} \ddot{o} \ddot{o}} = 4$ кГц	1	3,0	$\tau_{\delta} = 1,0$ мс
8	5	$2,0^{1}$	$K_y = 1 N_{av} = 20$	2	1,0	$f_0 = 2,0$ кГц $\tau_{\delta} = 2,0$ мс

Примечания: 1. «Расшифровка» типов СП приведена выше в подразделе 3.2

2. Пометки «1, 2» в колонке « $\sigma_{ш}$ » указывают номер модуля, рекомендуемый для формирования данного сигнала.

### 3.3. Выполнение лабораторных исследований

#### Этап 1. Исследование погрешности фильтрации сигналов при точной реализации фильтра Колмогорова-Винера

Рекомендации по выполнению:

3.3.1. Установить частоту дискретизации  $F_s = 48$  кГц, а объем формируемой выборки не менее  $N = 4096$  отсчетов.

3.3.2. Для бригад № 3-8 установить тип и параметры модулей № 1, 4 (бригады № 1, 2 используют в данном пункте модуль № 2) в соответствии с требованиями к полезному сигналу из табл. 3.1. Левый анализатор подключить к контрольной точке №4 (для бригад № 1,2 - к контрольной точке № 2) и по осциллографу и спектроанализатору убедиться в формировании сигнала нужной формы.

3.3.3. Установить для бригад № 3-8 тип и параметры модуля № 2 (бригады № 1,2 используют в данном пункте модули № 1, 4) в соответствии с требованиями к аддитивному шуму из табл. 3.1. Правый анализатор подключить к выходу модуля, формирующего шум, и с помощью осциллографа (спектроанализатора), что наблюдаемый процесс соответствует требованиям индивидуального задания.

3.3.4. Переключить правый анализатор на контрольную точку № 7, зафиксировать в отчете к лабораторной работе вид осциллограммы и спектральной плотности мощности аддитивной смеси сигнала и шума.

3.3.5. Переключить левый анализатор, подключенный к модулю, формирующему полезный сигнал, в состояние «Оценка с.к.ошибки»; в указанном состоянии анализатор рассчитывает среднеквадратическую погрешность между сигналами в точке, к которой он подключен, и выходом всей схемы моделирования – сигналом в контрольной точке № 5. Занести в отчет погрешность, соответствующую приёму полезного сигнала вместе с шумом без какой-либо обработки.

3.3.6. Установить модуль № 5 в состояние «Авто.фильтр Колмогорова-Винера» и в окне «Параметры модулей» указать для него источник полезного сигнала «2» для бригад № 3-8 и источник - «1» для бригад № 1,2.

3.3.7. Переключить правый анализатор на контрольную точку №5, зафиксировать в отчете к лабораторной работе вид осциллограммы и спектральной плотности мощности профильтрованной смеси сигнала и шума. Убедиться, что фильтрация приближает форму сигналов (в контрольной точке № 5) к форме исходного полезного сигнала.

3.3.8. По левому анализатору, подключенному к модулю формирования полезного сигнала, находящемуся в состоянии «Оценка с.к.ошибки» определить и занести в отчет средне-квадратическую погрешность фильтрации сигнала «автоматическим» фильтром Колмогорова-Винера. Сравнить полученное значение с результатами домашних расчетов из п. 3.3.3; в случае существенных расхождений проконтролировать правильность выполнения этапа 1 лабораторных исследований.

## Этап 2. Исследование влияние неточности реализации фильтра Колмогорова-Винера на погрешность фильтрации

Рекомендации по выполнению:

3.3.9. Переключить модуль № 5 в состояние «Фильтр с загружаемой АЧХ». В окне «Параметры модулей» указать для него «Номер файла» равный номеру Вашей бригады (номеру файла, подготовленного при выполнении п. 3.3.3).

3.3.10. По правому анализатору убедитесь, что профильтрованный сигнал, наблюдаемый на выходе № 5 и отображаемый правым анализатором, близок по форме к исходному полезному сигналу.

При существенных искажениях формы сигнала проверьте правильность данных в файле, определяющем форму АЧХ фильтра; для перепроверки может оказаться полезным срав-

нение спектральных характеристик сигналов, полученных при выполнении п. 3.3.7, со спектральными характеристиками, получаемыми при использовании фильтра с загружаемой АЧХ.

3.3.11. По данным левого анализатора, установленного в состояние «Оценка с.к.ошибки», определить и занести в отчет среднеквадратическую погрешность фильтрации сигнала, подготовленным при выполнении домашнего задания фильтром Колмогорова-Винера. Сравнить полученное значение с результатами домашних расчетов из п. 3.3.8.

### **3.4. Контрольные вопросы для защиты работы**

1. Чем отличаются задачи оптимальной линейной фильтрации сигналов в цифровых и аналоговых системах передачи информации?

2. Каким комплексным коэффициентом передачи обладает фильтр Колмогорова-Винера? Для решения какой задачи этот фильтр предназначен?

3. Чем определяется среднеквадратическая погрешность фильтрации при использовании фильтра Колмогорова-Винера?

4. Какие особенности амплитудно-частотной характеристики фильтра Колмогорова-Винера обеспечивают его оптимальность?

5. Какие особенности фазо-частотной характеристики фильтра Колмогорова-Винера обеспечивают его оптимальность? Как изменения ФЧХ могут повлиять на среднеквадратическую погрешность фильтрации сигналов?

6. Можно ли обеспечить нулевую среднеквадратическую погрешность фильтрации полезных сигналов? При каких условиях?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедько, Е.Г. Теоретические основы передачи информации. [Текст] / Е.Г. Лебедько. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. - 352 с.
2. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. [Текст] / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 2006. - 720 с.
3. Зюко, А.Г. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк – М., Радио и связь, 1980. – 288 с.
4. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов – М.: Радио и связь , 1982. - 678 с.
5. Филиппский, Ю.К. Вероятностные сигналы в радиотехнике [Текст] / Ю.К. Филиппский. – Киев, Вища школа, 1986. - 131 с.
6. Быков, В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике [Текст] / В.В. Быков – М.: Сов. радио, 1971. - 328 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....</b>	<b>1</b>
<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ.....</b>	<b>1</b>
Предварительные сведения.....	1
Порядок выполнения лабораторных работ.....	1
Рекомендации к написанию отчета.....	2
Порядок защиты лабораторных работ.....	3
<b>1. ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ С НЕЙ .....</b>	<b>4</b>
<b>2. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ ИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ (ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1).....</b>	<b>10</b>
2.1. Краткое теоретическое введение.....	10
2.2. Домашнее задание к лабораторной работе.....	12
2.3. Выполнение лабораторных исследований.....	14
2.4. Контрольные вопросы для защиты работы.....	18
<b>3. ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ НЕИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ (ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2).....</b>	<b>19</b>
3.1. Краткое теоретическое введение.....	19
3.2. Сведения об энергетических характеристиках случайных процессов, используемых в работе.....	20
3.3. Домашнее задание к лабораторной работе.....	23
3.3. Выполнение лабораторных исследований.....	25
3.4. Контрольные вопросы для защиты работы.....	27
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>28</b>

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

для выполнения лабораторных работ по дисциплине  
«Обнаружение сигналов» для студентов направления 210400.62  
«Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи,  
приема и обработки сигналов») заочной формы обучения

Составитель Токарев Антон Борисович

В авторской редакции

Подписано к изданию 20.11.2014

Уч.- изд. л. 1,8.

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