

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиотехники

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ШУМОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению лабораторных работ для магистров направления
11.04.01 «Радиотехника» очной формы обучения

Воронеж 2020

УДК 621.37
ББК 32.84

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

Обработка сигналов на фоне шумов: методические указания к проведению лабораторных работ для магистров направления 11.04.01 «Радиотехника» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А.Б. Токарев. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. 33 с.

Содержит необходимый теоретический минимум, описание домашнего задания, руководства по проведению экспериментов и контрольные вопросы для подготовки к защите лабораторных работ для магистрантов направления 11.04.01 «Радиотехника», направленности «Радиотехнические средства обработки и защиты информации в каналах связи» очной формы обучения, изучающих дисциплину «Обработка сигналов на фоне шумов».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «мРТ_ЛР_Обработка_сигналов.pdf»

Ил. 12. Табл. 4. Библиогр.: 4 назв.

УДК 621.37
ББК 32.84

Рецензент – Ю.Г. Пастернак, д-р техн. наук,
проф. кафедры радиоэлектронных устройств
и систем ВГТУ

*Издается по решению учебно-методического совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Умение обрабатывать полезные радиотехнические сигналы на фоне шумов является необходимым этапом становления любого специалиста радиотехнической направленности. Соответственно, подготовка магистрантов направления «Радиотехника» подразумевает выполнение цикла лабораторных работ, позволяющих получить практические навыки осуществления фильтрации сигналов при разной доступной априорной информации о свойствах сигналов и шумов.

Данный цикл продолжает и расширяет набор лабораторных работ, выполнявшихся студентами при обучении на бакалавриате, опирается на программное обеспечение, разработанное на кафедре радиотехники ВГТУ, и позволяет в деталях исследовать свойства согласованных фильтров, фильтров Калмана и Колмогорова-Винера. Подготовка домашнего задания, проведение экспериментов и защита каждой лабораторной работы при среднем уровне подготовленности магистра не должна потребовать более 4 часов. При необходимости, по согласованию с преподавателем, лабораторные работы выполнение и защита работ может производиться в дистанционной форме.

Для магистров, ранее не использовавших специализированное программное обеспечение для моделирования случайных процессов, разработанное на кафедре радиотехники ВГТУ, подготовку к выполнению заданий лабораторного цикла следует начинать с изучения приложения к настоящим методическим указаниям, в котором описываются возможности моделирующей программы, а также назначение и основные параметры модулей, используемых для формирования и обработки случайных процессов.

1. ОПТИМАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ НЕИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ

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.

1.1. Краткое теоретическое введение

Пусть на вход устройства обработки на фоне аддитивного шума поступает сигнал неизвестной формы несущий полезную информацию. Обработку смеси сигнала и шума, направленную на максимально точное восстановление формы этого полезного сигнала, называют оптимальной фильтрацией сигналов неизвестной формы. Ограничивая поиск классом линейных устройств, можно показать, что минимальную среднеквадратическую погрешность выделения полезного сигнала из смеси с аддитивным шумом обеспечивает фильтр с нулевой фазо-частотной характеристикой и АЧХ, определяемой выражением

$$|\dot{K}_{\text{опт}}(f)| = \frac{S(f)}{S(f) + N(f)} = \frac{1}{1 + N(f)/S(f)}, \quad (1.1)$$

где $S(f)$ – спектральная плотность мощности полезного сигнала; $N(f)$ – спектральная плотность мощности помехи, на фоне которой поступает полезный сигнал.

Обеспечиваемая оптимальным фильтром минимальная среднеквадратическая погрешность характеризуется средней мощностью сигнала ошибки, рассчитываемой по формуле

$$P_{\Delta \text{cp}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(f) \cdot N(f)}{S(f) + N(f)} df = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\frac{1}{N(f)} + \frac{1}{S(f)}} df. \quad (1.2)$$

1.2. Рекомендации по подготовке к лабораторным исследованиям

1.2.1. Ознакомьтесь с теорией фильтрации случайных сигналов на фоне шума по учебной литературе [1, с. 206-211, 3, с. 199-201]. Для выполнения лабораторной работы следует учесть взятые из монографии [2, с. 100-112] рекомендации по формированию стационарных случайных процессов с разнообразными спектральными свойствами, кратко изложенные ниже:

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

$$B_1(\tau) = \sigma_{\xi}^2 \cdot \exp\{-|\tau|/\tau_u\} \quad (1.3)$$

и спектральной плотностью мощности

$$S_1(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_{\xi}(\tau) \cdot \exp\{-j\omega\tau\} d\tau = \sigma_{\xi}^2 \cdot \frac{2\tau_u}{1 + (\omega\tau_u)^2} \quad (1.4)$$

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

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

$$B_2(\tau) = \sigma_{\xi}^2 \cdot \exp\{-|\tau|/\tau_u\} \cdot \cos(\omega_0\tau) \quad (1.5)$$

и спектральной плотностью мощности

$$S_2(\omega) = \sigma_{\xi}^2 \cdot \frac{2\tau_u \left(1 + (\omega\tau_u)^2 + (\omega_0\tau_u)^2\right)}{\left\{1 + ((\omega + \omega_0)\tau_u)^2\right\} \cdot \left\{1 + ((\omega - \omega_0)\tau_u)^2\right\}} \quad (1.6)$$

Сформировать реализации данного СП можно любым из модулей № 1...3 при выборе режима их функционирования «Нормальный шум (тип 2)» (Примечание: при этом вместо частоты ω_0 в радианах в секунду задаётся циклическая частота $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ (Гц)).

1.2.4. 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

$$S_{БШ}(\omega) = T \cdot \sigma_{\xi}^2, \quad (1.7)$$

где $T = 1/F_s$ – интервал дискретизации (Примечание: для всех бригад частота дискретизации составляет $F_s = 48$ кГц).

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

$$S_3(f) = \begin{cases} \sigma_{\xi}^2 \cdot T \cdot K_0^2, & |f| \leq F_c \\ 0, & |f| > F_c \end{cases} \quad (1.8)$$

Для формирования реализаций такого СП необходимо широкополосный нормальный шум (см. п. 5.4.4), формируемый модулями № 1 или № 3, пропустить через модуль № 4, установленный в режим «ИФНЧ» с частотой среза, равной F_c .

1.2.6. 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

$$S_3(f) = \begin{cases} \sigma_{\xi}^2 \cdot T \cdot K_0^2, & F_{с\,ниж} \leq |f| \leq F_{с\,верх} \\ 0, & \text{при прочих } f \end{cases} \quad (1.9)$$

Для формирования реализаций СП необходимо пропустить широкополосный нормальный шум (см. п. 1.2.4), формируемый модулями № 1 или № 3, через модуль № 4, работающий в режиме «ИПФ» с частотами среза $F_{с\,ниж}$ и $F_{с\,верх}$.

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

$$B_5(\tau) = \sigma_\xi^2 \cdot \left\{ 1 - |\tau|/\tau_u \right\}, \quad |\tau| \leq \tau_u \quad (1.10)$$

и спектральной плотностью мощности

$$S_5(\omega) = \sigma_\xi^2 \cdot 4\tau_u \cdot \text{sinc}^2(\omega\tau_u) \quad (1.11)$$

Для формирования реализаций СП необходимо пропустить широкополосный нормальный шум (см. п. 1.2.4), формируемый модулями № 1 или № 3, через модуль № 4, осуществляющий скользящее суммирование последних $N_{av} = 1 + \text{int}(\tau_u/T)$ отсчетов.

1.2.8. Учтите также, что 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 (1.2), для расчета средней мощности ошибки фильтрации можно рекомендовать выражение

$$P_{ош} \approx 2 \cdot \int_0^{F_s/2} \frac{S(f) \cdot N(f)}{S(f) + N(f)} df. \quad (1.12)$$

1.3. Домашнее задание к лабораторной работе

1.3.1. Согласуйте с преподавателем номер бригады, определяющий индивидуальный вариант лабораторных исследований. Сведения о полезных сигналах и помехах, соответствующих заданиям разных бригад, приведены в табл.1.

1.3.2. 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 по формулам (1.1) и (1.12).

Таблица 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	$1,0^{2}$	$\tau_y = 1,0$ мс	4	1,0	$K_0 = 5,$ $F_{с\text{ ниж}} = 1$ кГц, $F_{с\text{ верх}} = 5$ кГц
2	2	$1,0^{2}$	$f_0 = 2,5$ кГц $\tau_y = 2,0$ 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	$\tau_y = 1,8$ мс
4	4	$1,0^{1}$	$K_0 = 3,$ $F_{с\text{ ниж}} = 2$ кГц, $F_{с\text{ верх}} = 4$ кГц	БШ	2,0	—
5	1	$1,5^{1}$	$\tau_y = 0,8$ мс	БШ	0,5	—
6	3	$1,0^{1}$	$K_0 = 4,$ $F_c = 4$ кГц	БШ	1,5	—
7	4	$1,0^{1}$	$K_0 = 3,$ $F_{с\text{ ниж}} = 2$ кГц, $F_{с\text{ верх}} = 4$ кГц	1	3,0	$\tau_y = 1,0$ мс
8	5	$2,0^{1}$	$K_y=1$ $N_{av} = 20$	2	1,0	$f_0 = 2,0$ кГц $\tau_y = 2,0$ мс

Примечания: 1. «Расшифровка» типов СП приведена выше в подразделе 1.2

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

1.3.3. Осуществите приближенную кусочно-линейную аппроксимацию рассчитанной выше АЧХ фильтра (к точности аппроксимации здесь особых требований не предъявляется) и 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 кГц) задают координаты точек излома АЧХ, а $value1, value2$ – значения АЧХ в соответствующих точках.

Пример:

Для формирования приближенной копии АЧХ, представленной на рис. 1, текстовый «*ini*»-файл может содержать строки:

[DataList]

0.0 = 1.0

2.0 = 1.0

5.0 = 0.1

7.0 = 0.0

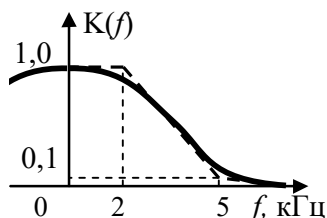


Рис. 1. Возможная АЧХ фильтра

При появлении проблем с использованием подготовленного «*ini*»-файла в ходе проведения моделирования обратите внимание на рекомендации, приведенные в прил. 2.

1.4. Выполнение лабораторных исследований

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

Рекомендации по выполнению:

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

1.4.2. 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. 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.

1.4.3. 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. 1. Правый анализатор подключить к выходу модуля, формирующего шум, и с помощью осциллографа (спектроанализатора) убедиться, что наблюдаемый процесс соответствует требованиям индивидуального задания.

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

1.4.5. 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.

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

1.4.7. 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.

1.4.8. По левому анализатору, подключенному к модулю формирования полезного сигнала, находящемуся в состоянии «Оценка с.к.ошибки» определить и занести в отчет среднеквадратическую погрешность фильтрации сигнала «автоматическим» фильтром Колмогорова-Винера. Сравнить полученное значение с результатами домашних расчетов из п. 1.3.2; 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:

1.4.9. 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. 1.3.3).

1.4.10. По правому анализатору убедиться, 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 сравнение спектральных характеристик сигналов, полученных при выполнении п. 1.4.7, со спектральными характеристиками, получаемыми при использовании фильтра с загружаемой АЧХ.

1.4.11. 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. 1.3.2.

1.5. 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?

2. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ ИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ НА ФОНЕ АДДИТИВНОГО БЕЛОГО ШУМА

Цель работы – экспериментальное исследование процедуры обработки смеси сигнала известной формы 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

При обнаружении сигналов известной формы на фоне помех оптимальным является фильтр, обеспечивающий на выходе фильтра при приходе обнаруживаемого сигнала наибольшее соотношение сигнал-шум в заранее выбранный момент времени. Применительно к белому шуму подобным оптимальным устройством является согласованный фильтр, представляющий собой линейное аналоговое устройство с импульсной характеристикой

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

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

Комплексный коэффициент передачи согласованного фильтра должен, очевидно, соответствовать (2.1) и может быть рассчитан по формуле

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

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

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

$$q_{\text{сф}}^2 = \mathcal{E}_s / N_0, \quad (2.3)$$

где N_0 - спектральная плотность мощности шума, а $\mathcal{E}_s$ - энергия полезного сигнала определяемая соотношением

$$\mathcal{E}_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \dot{G}_s(\omega) \right|^2 d\omega. \quad (2.4)$$

Если шум, на фоне которого производится обнаружение, не является белым, то согласованный фильтр уже не обеспечивает максимально возможного отношения сигнал-шум. Оптимальным для обнаружения сигналов в подобной ситуации оказывается фильтр с комплексным коэффициентом передачи

$$\dot{K}_{\text{онм}}(\omega) = \alpha \cdot \frac{G_s^*(\omega)}{S_{\xi}(\omega)} \cdot e^{-j\omega t_0}, \quad (2.5)$$

где $S_{\xi}(\omega)$ – спектральная плотность мощности помехи, на фоне которой выполняется обнаружение полезного сигнала.

Обеспечиваемое им отношение сигнал-шум составляет

$$q^2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left| \dot{G}_s(\omega) \right|^2}{S_{\xi}(\omega)} d\omega. \quad (2.6)$$

2.2. Рекомендации по подготовке к лабораторным исследованиям

2.2.1. В рамках данной работы обнаружение сигналов производится лишь на фоне широкополосного нормального шума, являющегося эквивалентом белого шума. Оптимальным обработчиком смеси сигнала и такого шума может служить согласованный фильтр, поэтому изучите вопросы согласован-

ной фильтрации сигналов по учебной литературе [1, с.196-202; 3, с.131-139].

2.2.2. 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 , поэтому значение СПМ шума может быть рассчитано как

$$N_0 = \frac{\sigma_\xi^2}{F_s}. \quad (2.7)$$

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

2.3. Домашнее задание к лабораторной работе

2.3.1. Согласуйте с преподавателем номер бригады, определяющий индивидуальный вариант исследований.

2.3.2. Для своего индивидуального варианта рассчитайте СПМ шума, на фоне которого будет производиться обнаружение сигналов, энергию полезного сигнала и ожидаемое отношение сигнал-шум на выходе согласованного фильтра. Примеры некоторых возможных сигналов показаны, например, на рис. 2-3, а варианты индивидуальных заданий для бригад заданы в табл. 3.

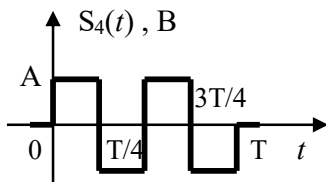


Рис. 2. Пример сигнала для бригады №4

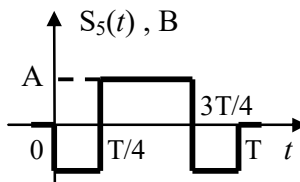


Рис. 3. Пример сигнала для бригады №5

Таблица 2

Набор обнаруживаемых сигналов

Номер бригады	Аналитическое выражение или рисунок, определяющие сигнал на интервале [0; τ]
1	$s_1(t) = A \cdot t / \tau$
2	$s_2(t) = A \cdot (1 - t / \tau)$
3	$s_1(t) = A \cdot \sin^2(\pi t / \tau)$
4	см. рис. 2
5	см. рис. 3
6	$s_6(t) = A \cdot (t / \tau)^2$
7	$s_7(t) = A \cdot \{ 1 - (t / \tau)^2 \}$
8	$s_8(t) = A \cdot (1 - t / \tau)^2$

Таблица 3

Номер бригады	Амплитуда сигнала, В	Длительность сигнала τ , 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

2.3.3. 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. 4, 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
```

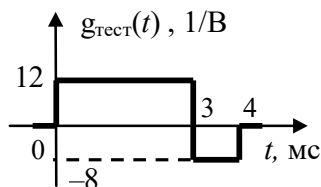


Рис. 4. Возможная импульсная характеристика фильтра

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

2.4. Выполнение лабораторных исследований

Этап 1. Отклик согласованного фильтра на «свой» сигнал

Рекомендации по выполнению:

2.4.1. Установить частоту дискретизации в соответствии с требованиями табл. 3. Установить объем формируемой выборки $N = 4096$ отсчетов.

2.4.2. Установить тип и параметры модуля № 1 схемы моделирования случайных процессов в соответствии с требованиями табл. 3; 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.

2.4.3. 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, если бригаде № 3 по какой-то причине потребуется вместо представленной в табл. 3 длительности потребуется использовать фильтр с длительностью импульсной характеристики в 4 мс, то настройки параметров фильтра для такого случая должны соответствовать рис. 5.

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

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

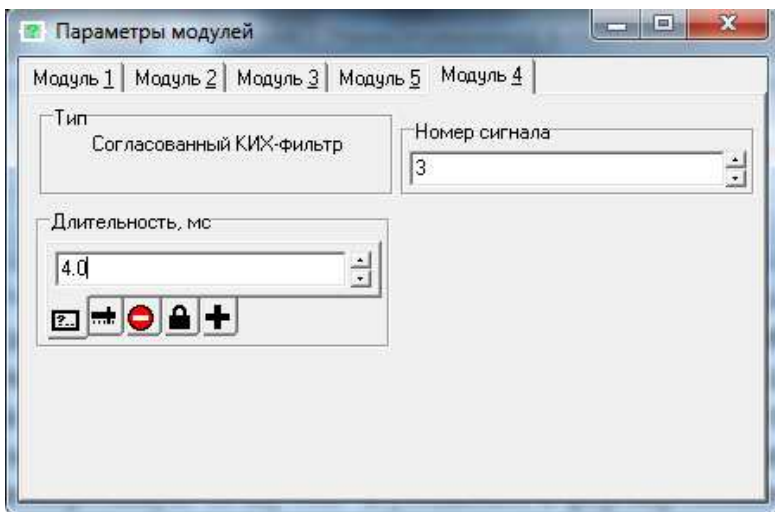


Рис. 5. Пример настроек КИХ-фильтра, согласованного с сигналом № 3, если его длительность увеличится до 4 миллисекунд

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

2.4.6. Переключить правый анализатор в режим отображения гистограммы плотности вероятности наблюдаемого процесса $W_{\xi}^*(\tilde{x})$ и зафиксировать в отчет гистограмму шумового распределения (с шириной колодцев не более 0,2 В).

2.4.7. Гистограмму, полученную в п. 2.4.6, перерисовать в отчет повторно но со смещением вправо на величину $u_{\text{вых}}(t_0)$ из п. 2.4.3; визуально оценить степень перекрытия гистограмм. Для минимизации ошибок при приёме сигналов выбрать пороговое напряжение

$$u_{\text{порог}} = u_{\text{вых}}(t_0) / 2. \quad (2.8)$$

По гистограммам оценить соответствующую порогу (2.8) вероятность пропуска полезного сигнала $P_{\text{пс гист}}$.

2.4.8. Рассчитать реально наблюдаемое на выходе фильтра отношение сигнал-шум

$$q = \frac{u_{\text{вых}}(t_0)}{\sigma_{\text{ш вых}}} \quad (2.9)$$

и сравнить его с рассчитанным в п. 2.3.2.

2.4.9. Восстановить в модуле №1 амплитуду сигнала, соответствующую индивидуальному варианту задания из табл. 3. Провести не менее 40 опытов (щелкая по кнопке «Обновить данные») и приближенно оценить частоту возникновения ошибок при обнаружении «своего» сигнала. Сопоставить частоту ошибок с значением, предсказанным в п. 2.4.7.

2.4.10. 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 с вероятностью более 10%, то определить, при какой амплитуде сигнала вероятность ошибок снижается до менее чем 5%.

2.4.11. 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:

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

2.4.13. 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.

2.4.14. Повторно выполнить п.2.4.4-2.4.9 (см. этап 1). Убедиться, что использование фильтра с расчетной импульсной характеристикой обеспечивает соотношение сигнал-шум, близкое к наблюдавшемуся при выполнении этапа 1 (см. (2.9)).

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

Рекомендации по выполнению:

2.4.14. Настроить модуль № 1 на формирование «чужого» сигнала из п. 2.3.4 домашнего задания; установить его амплитуду равной расчётному значению A_{Σ} .

2.4.15. 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.

2.4.16. Временно установив нулевое эффективное значение шума, определить отклик согласованного фильтра на «чужой» сигнал $s_{\text{вых}}(t_0)$, соответствующий моменту окончания сигнала. Рассчитать отношение сигнал-шум (2.9), возникающее при попытке обнаружения «чужого» сигнала.

2.4.17. За счет проведения не менее чем 40 опытов оценить изменение частоты возникновения ошибок при попытках обнаруживать «чужой» сигнал в шуме при условии использования порога $u_{\text{порог}}$ уже вычисленного ранее в п. 2.4.7.

2.5. 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. КАЛМАНОВСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СКАЛЯРНОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА

Цель работы – экспериментальное исследование особенностей функционирования фильтров Калмана.

3.1. Теоретические основы

При подготовке к лабораторной работе рекомендуется изучить теоретические основы разработки и функционирования фильтров Калмана, приведенные в [4, с. 109-118].

3.2. Рекомендации по подготовке к лабораторным исследованиям

3.2.1. В лабораторной работе объектом фильтрации является «полезное сообщение» - марковский случайный процесс $\lambda(t)$, отсчеты которого формируются в соответствии с уравнением авторегрессии первого порядка:

$$\lambda_i = r \cdot \lambda_{i-1} + v_i, \quad (3.1)$$

где r (const) – коэффициент корреляции отсчетов, v_i ($1 \leq i \leq N$) – отсчеты шума сообщения: независимые центрированные (т.е. с $M_v=0$) нормально распределенные СВ. Оно связано с с.к.о. сообщения σ_λ соотношением

$$\sigma_v = \sigma_\lambda \cdot \sqrt{1-r^2}. \quad (3.2)$$

Примечание: из независимости v_i действительно следует, что

$$D\{\lambda\} = r^2 \cdot \sigma_\lambda^2 + \left(\sigma_\lambda \cdot \sqrt{1-r^2}\right)^2 = \sigma_\lambda^2.$$

3.2.2. Наблюдению отсчеты сообщения $\lambda(t)$ доступны лишь в смеси с широкополосным нормальным шумом $n(t)$. Отсчеты y_i наблюдаемого СП в работе формируются по правилу:

$$x_i = \lambda_i + n_i, \quad (3.3)$$

где n_i — последовательность независимых центрированных нормально распределенные СВ с эффективным значением σ_n , определяемым индивидуальным вариантом исследований.

3.2.3. Правило фильтрации отсчетов процесса $y(t)$ для получения очищенных от шума отсчетов сообщения λ_i можно получить из соотношений (4.85), (4.86) [4, с. 118], если подставить в них коэффициенты $b_i = r$ и $h_i = 1$ (см. [4, с. 116]). Это правило имеет вид:

$$\hat{\lambda}_i = r \cdot \hat{\lambda}_{i-1} + \frac{\hat{\sigma}_{\lambda i}^2}{\sigma_n^2} \cdot (y_i - r \hat{\lambda}_{i-1}), \quad (3.4)$$

$$\hat{\sigma}_{\lambda i}^2 = \left(\frac{1}{r^2 \cdot \hat{\sigma}_{\lambda(i-1)}^2 + \sigma_v^2} + \frac{1}{\sigma_n^2} \right)^{-1}. \quad (3.5)$$

3.2.4. Особенность случая, анализируемого в лабораторной работе, состоит в стационарности всех наблюдаемых СП, из-за которой в (3.5) нет элементов, зависящих от i . Как следствие, и дисперсия оценки $\hat{\sigma}_{\lambda i}^2$ является реально константой $\hat{\sigma}_{\lambda}^2$, кото-

рую можно получить из уравнения $\frac{1}{\hat{\sigma}_{\lambda}^2} = \frac{1}{r^2 \cdot \hat{\sigma}_{\lambda}^2 + \sigma_v^2} + \frac{1}{\sigma_n^2}$

или $r^2 \cdot (\hat{\sigma}_{\lambda}^2)^2 + \hat{\sigma}_{\lambda}^2 \cdot (\sigma_v^2 + (1 - r^2) \cdot \sigma_n^2) - \sigma_v^2 \cdot \sigma_n^2 = 0$

Откуда

$$\hat{\sigma}_{\lambda}^2 = \frac{1}{2r^2} \left\{ \sqrt{(\sigma_v^2 + (1 - r^2) \cdot \sigma_n^2)^2 + 4 \cdot r^2 \cdot \sigma_v^2 \cdot \sigma_n^2} - (\sigma_v^2 + (1 - r^2) \cdot \sigma_n^2) \right\} \quad (3.6)$$

3.2.5. Итак, фильтр Калмана, оптимально «выфильтровывающий» сообщение (3.1) из смеси с аддитивным нормальным белым шумом, должен представлять собой рекурсивный фильтр первого порядка

$$\hat{\lambda}_i = a_0 \cdot y_i + b_1 \cdot \hat{\lambda}_{i-1} \quad (3.7)$$

с коэффициентами

$$a_0 = \frac{\hat{\sigma}_\lambda^2}{\sigma_{ni}^2}, \quad b_1 = r \cdot \left(1 - \frac{\hat{\sigma}_\lambda^2}{\sigma_{ni}^2} \right). \quad (3.8)$$

где $\hat{\sigma}_\lambda^2$ - дисперсия оценки, определяемая (3.6). По сравнению с прочими линейными оценками, опирающимися на те же наблюдаемые данные y и готовые к формированию непосредственно в момент получения отсчета y_i , эта дисперсия оказывается минимально возможной.

3.3. Домашнее задание к лабораторной работе

3.3.1 Согласуйте с преподавателем номер бригады, определяющий вариант лабораторных исследований.

3.3.2. Применительно к параметрам сообщения и добавляемого к нему шума из табл. 4 рассчитайте по формуле (3.6) ожидаемую при использовании фильтра Калмана дисперсию оценки $\hat{\sigma}_\lambda^2$.

Таблица 4

Номер бригады	Коэффициент корреляции r	С.к.о. сообщения σ_λ , В	С.к.о. шума наблюдения σ_n , В
1	0,80	0,7	1,0
2	0,87	0,7	1,5
3	0,955	0,8	3,0
4	0,955	0,8	1,8
5	0,96	0,7	3,0
6	0,72	0,7	2,0
7	0,88	0,9	2,5
8	0,945	0,9	3,0

3.3.3. Рассчитайте масштабирующие коэффициенты (3.8) и постройте АЧХ рекурсивного фильтра Калмана (3.7), комплексный коэффициент передачи которого определяется формулой

$$\dot{K}_{Calm}(\omega) = \frac{a_0}{1 - b_1 \cdot e^{-j\omega T_d}} = \frac{D_\lambda}{\sigma_n^2 - r \cdot (\sigma_n^2 - D_\lambda) \cdot e^{-j\omega T_d}}. \quad (3.9)$$

По графику оцените приближенно ширину полосы пропускания этого фильтра $Ш_f$.

3.4. Выполнение лабораторных исследований

Этап 1. Исследование погрешности фильтрации сигналов при использовании чебышевского цифрового ФНЧ

Рекомендации по выполнению:

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

3.4.2. Настроить модуль № 1 на формирование широкополосного шума $n(t)$ с эффективным значением σ_n из табл. 4. Подключить левый анализатор к контрольной точке №1 и по осциллографу убедиться в формировании процесса нужной формы.

3.4.3. Настроить модуль № 3 на формирование авторегрессионной последовательности (3.1) и, переключив левый анализатор на контрольную точку №3, убедиться в наличии низкочастотного шумоподобного сигнала.

3.4.4. Подключить правый анализатор к контрольной точке № 5 и по осциллографу убедиться, что полезное сообщение практически неразличимо на фоне аддитивного шума.

3.4.5. Настроить модуль №4 на фильтрацию сигналов с помощью низкочастотного фильтра Чебышева с полосой пропускания $Ш_f$, полученной при выполнении п. 3.4.3.

3.4.6. 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.

Варьируя параметры НЧ-фильтра Чебышева, подобрать их комбинацию, минимизирующую среднеквадратическую погрешность выделения полезного сообщения из шума. Зафиксировать в отчете зависимость от частоты среза фильтра наблюдаемой в экспериментах погрешности, её наименьшее значение, а также осциллограммы исходного и отфильтрованного от шума сообщений.

Этап 2. Исследование погрешности фильтрации сигналов при использовании фильтра Калмана

Рекомендации по выполнению:

3.4.7. Переключить модуль № 4 в состояние «Фильтр Калмана» и в окне «Параметры модулей» выставить характеристики формируемого полезного сообщения и шума.

3.4.8. С помощью правого анализатора, настроенного на расчет среднеквадратической погрешности фильтрации сигнала, сравнить реально наблюдаемую величину этой погрешности с результатами домашних расчетов (см. п. 3.5.2) и с результатом, полученным в п. 3.4.6. При значительных расхождениях с (3.6), либо если при использовании фильтра Калмана погрешность увеличилась сделать перепроверку и обсудить её результаты с преподавателем.

3.4.9. Зафиксировать в отчете значение погрешности, соответствующей использованию фильтра Калмана, и осциллограммы исходного и отфильтрованного от шума сообщений.

Этап 3. Исследование погрешности фильтрации сигналов при использовании ИФНЧ

Рекомендации по выполнению:

3.4.10. Переключить модуль № 4 в состояние «Идеальный ФНЧ» и, варьируя параметры ИФНЧ, по анализатору средне-квадратической ошибки подобрать частоту среза фильтра, минимизирующую среднеквадратическую погрешность выделения полезного сообщения из шума.

3.4.11. Зафиксировать в отчете зависимость от частоты среза фильтра наблюдаемой в экспериментах погрешности, её наименьшее значение, а также осциллограммы исходного и отфильтрованного от шума сообщений.

3.4.12. Обсудить с преподавателем причины, позволяющие идеальному ФНЧ обеспечивать погрешность выделения полезного сообщения из шума, меньшую чем у фильтра Калмана.

3.5. Контрольные вопросы для защиты работы

1. На решение каких задач нацелен фильтр Калмана? На основе каких априорных сведений осуществляется разработка этого фильтра? При каких предположениях относительно шума измерений и шума системы строится теория фильтра Калмана?

2. В чем состоит оптимальность функционирования фильтра Калмана?

3. Запишите и поясните уравнения фильтрации, описывающие функционирование фильтра Калмана.

4. При каких условиях в задаче фильтрации может наблюдаться установившийся режим? Сопоставьте работу фильтра Калмана и фильтра Колмогорова-Винера.

5. Запишите выражение для вычисления дисперсии ошибки оценивания сообщения. Как влияет величина дисперсии шума наблюдений на качество фильтрации сообщений?

6. Какие фильтры называются рекуррентными? Проанализируйте применимость подобных фильтров для решения задачи фильтрации сообщений.

7. Может ли какой-либо иной фильтр обеспечивать меньшую чем фильтр Калмана среднеквадратическую погрешность оценивания сообщения? Если «да», то при каких условиях и за счет чего может быть достигнуто подобное преимущество?

8. Можно ли применять фильтр Калмана для решения задач нелинейной фильтрации? Если «да», то каким образом?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедько, Е.Г. Теоретические основы передачи информации [Электронный ресурс] / Е.Г. Лебедько. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 352 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/1543/>

2. Быков, В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В.В. Быков - М.: Сов. радио, 1971. - 328 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. Радиотехнические системы: Учебник для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю.П. Гришин и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова – М., Высш. школа, 1990. – 496 с.

Приложение 1. Возможности моделирующей программы и рекомендации по работе с ней

Программа моделирования состоит из 3 основных модулей, обеспечивающих управление совокупностью анализируемых источников сигналов и цепей обработки, параметрами моделируемых устройств, блоком анализа характеристик.

Окно "Источники сигналов и блоки обработки"

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. 6.

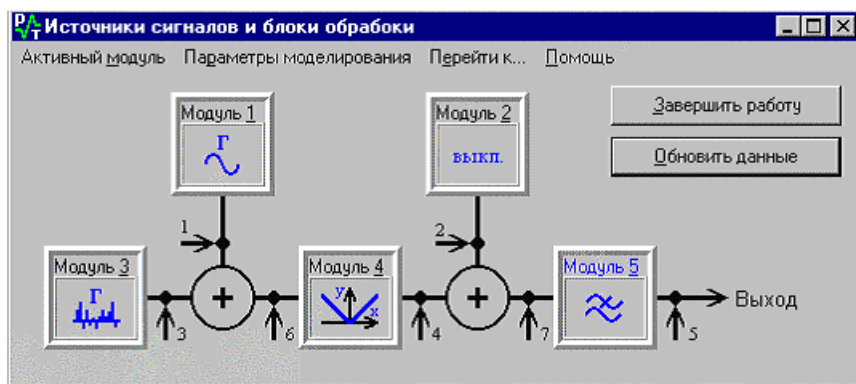


Рис. 6. Окно управления исследуемыми сигналами и блоками обработки

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 простая структура позволяет наблюдать и анализировать громадную совокупность различных случайных процессов и для учебных целей вполне достаточна.

Изменить назначение любого из модулей весьма просто. Для этого необходимо лишь:

- С помощью щелчка "мышью" или нажатия комбинации <Alt>+<номер модуля> сделать нужный модуль активным. Например, после нажатия <Alt>+<5> активным станет модуль №5 и его заголовок выделится синим цветом (см. рис. 6);
- Активировать пункт меню "Активный модуль" → "Изменить тип" и выбрать подходящий вариант из предлагаемого подменю; Так, при выборе варианта, показанного на рис. 7, 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".

Выбор параметров используемых модулей

Для контроля и изменения параметров моделируемых устройств служит окно "Параметры модулей", показанное на рис. 8 (при старом варианте функционирования модуля №5).

В показанном на рис. 8 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. 9, используя которую значение параметра легко изменять, просто перемещая движок регулятора мышью. Последующие вкладки являются служебными и при выполнении лабораторных работ не используются.

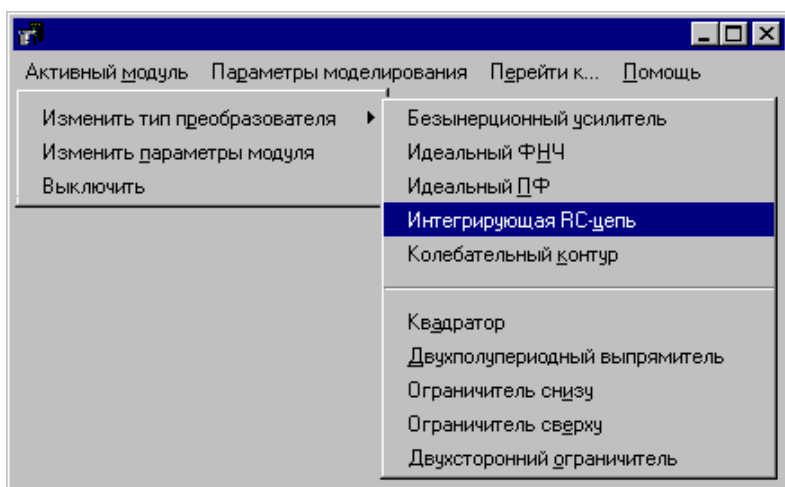


Рис. 7. Меню управления типом преобразователей

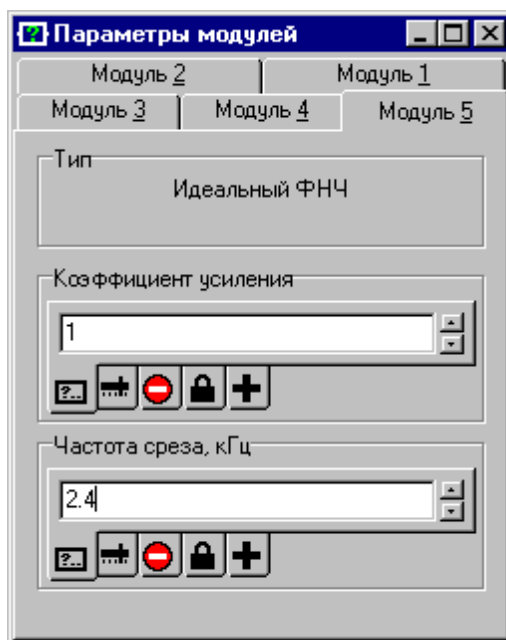


Рис. 8. Управление параметрами моделируемых устройств



Рис. 9. Вкладка ускоренной регулировки параметра

1.6.3. Общее представление об измерительной подсистеме

Для выполнения оценки параметров наблюдаемых случайных процессов предназначен блок анализаторов. Визуально блок анализаторов отображается как окно, содержащее один или два измерительных блока, подключенных к какой-либо из контрольных точек №1...7, показанных на рис. 6. Один из возможных вариантов внешнего вида блока анализаторов представлен на рис. 10.

Метки "(5)" и "(6)", отображаемые в верхней части каждого анализатора, показывают, к какой именно контрольной точке схемы подключен измерительный прибор. Так на рис. 10 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. 8).

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. 10 секторы переключателя показывают, например, что при отображении информации на экране осциллографа вертикальный масштаб составляет 1 В/дел,

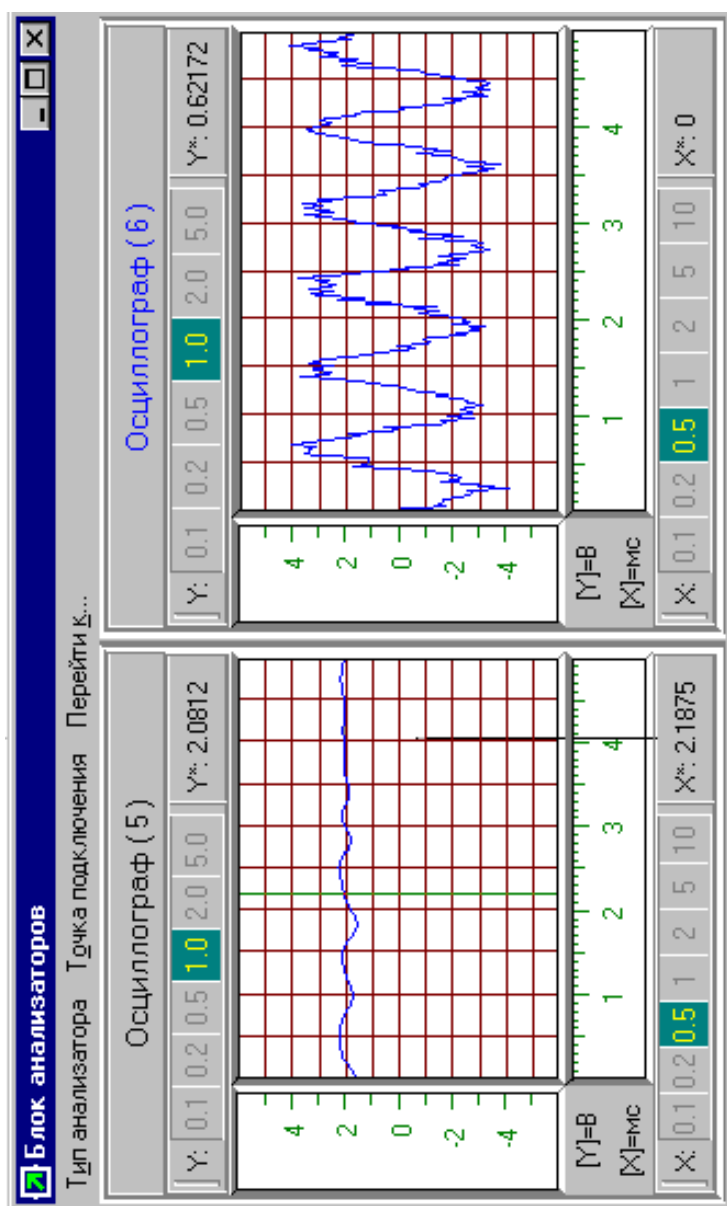


Рис. 10. Окно подсистемы измерения характеристик случайных процессов

а горизонтальный - 0,5 мс/дел. Изменять масштаб можно и при помощи клавиш "+", "-", "*", "/" дополнительной клавиатуры, а именно:

- </> - 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. 10, 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.

Выбор используемых измерительных приборов

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. 10 справа, спектроанализатором, подключенным к выходу схемы. Для этого выполним следующие шаги:

1) Щелчком мышью по надписи "Осциллограф (6)" сделаем данный измерительный прибор активным (на рис. 10 это уже выполнено);

2) При помощи меню "Тип анализатора" заменяем осциллограф спектроанализатором (рис. 11);

3) При помощи меню "Точка подключения" изменяем контрольную точку схемы на №5 (см. рис. 6).

В результате блок анализаторов приобретает вид, показанный на рис. 12.

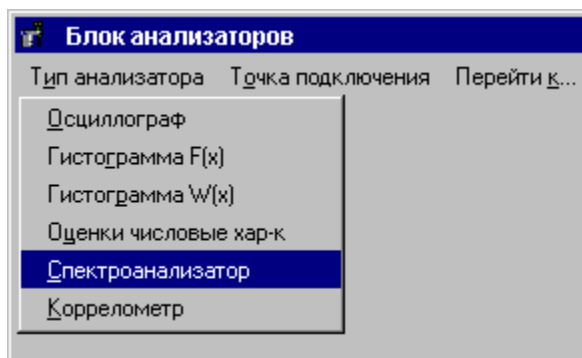


Рис. 11. Выбор типа используемого контрольно-измерительного прибора

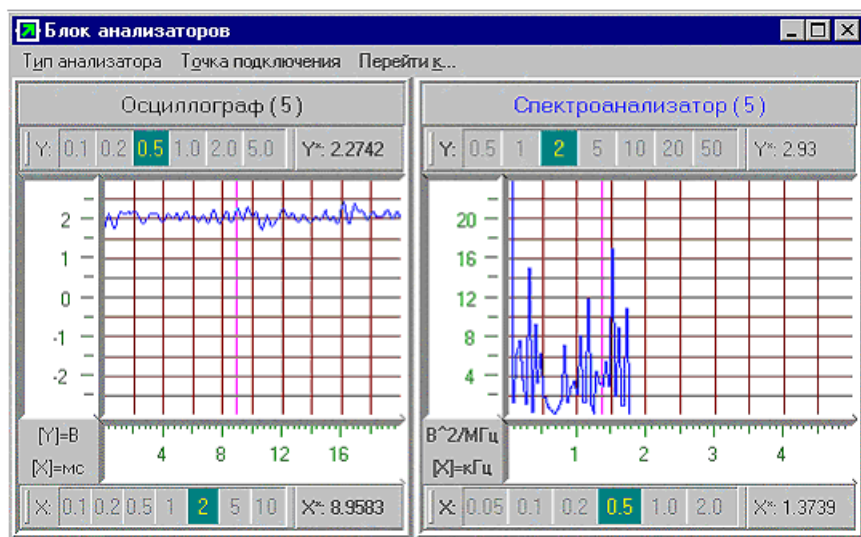


Рис. 12. Результат временного и спектрального анализа процесса на выходе схемы

Приложение 2. Устранение проблем, связанных с «ini»-файлами

Если до перехода на операционную систему Windows версии 7 проблем с формированием файлов конфигурации не возникало, то на последних версиях Windows появление файла с расширением «.ini» система может и не воспринять как появление файла конфигурации. В подобных ситуациях информация из «ini»-файла может оказаться недоступной из моделирующей программы. Что можно при этом порекомендовать?

1. Найдите у себя на диске любой «ini»-файл, который система отображает как файл конфигурации, и скопируйте его в каталог с моделирующей программой под именем «1.ini».

2. В текстовом редакторе измените содержимое этого «ini»-файла на нужное Вам. Скажем:

```
[DataList]
0.0=0
1.0=0
2.0=0.6989
3.0=0.6989
4.0=0.6989
8.0=0
```

3. Скопируйте (размножьте) созданный файл «1.ini» под именами «2.ini», «3.ini» и т.д., чтобы гарантировать отсутствие сообщений об ошибках при переключениях между сигналами разных бригад.

После этого сообщение о недоступности «ini»-файла при проведении моделирования больше появляться не должно.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОПТИМАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ НЕИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ	4
1.1. Краткое теоретическое введение	4
1.2. Рекомендации по подготовке к лабораторным исследованиям	5
1.3. Домашнее задание к лабораторной работе	7
1.4. Выполнение лабораторных исследований	9
1.5. Контрольные вопросы для защиты работы.....	12
2. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ ИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ НА ФОНЕ АДДИТИВНОГО БЕЛОГО ШУМА	13
2.1. Краткое теоретическое введение	13
2.2. Рекомендации по подготовке к лабораторным исследованиям	14
2.3. Домашнее задание к лабораторной работе	15
2.4. Выполнение лабораторных исследований	18
2.5. Контрольные вопросы для защиты работы.....	21
3. КАЛМАНОВСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СКАЛЯРНОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА	23
3.1. Теоретические основы	23
3.2. Рекомендации по подготовке к лабораторным исследованиям	23
3.3. Домашнее задание к лабораторной работе	25
3.4. Выполнение лабораторных исследований	26
3.5. Контрольные вопросы для защиты работы.....	28
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	30
Приложение 1. Возможности моделирующей программы и рекомендации по работе с ней.....	31
Приложение 2. Устранение проблем, связанных с «ini»- файлами.....	38

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ШУМОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению лабораторных работ для магистров направления
11.04.01 «Радиотехника» очной формы обучения

Составитель:

Токарев Антон Борисович

Компьютерный набор А. Б. Токарева

Редактор Е. А. Кусаинова

Подписано к изданию 21.12.2020 г.

Объем данных 500 Кб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский проспект, 14