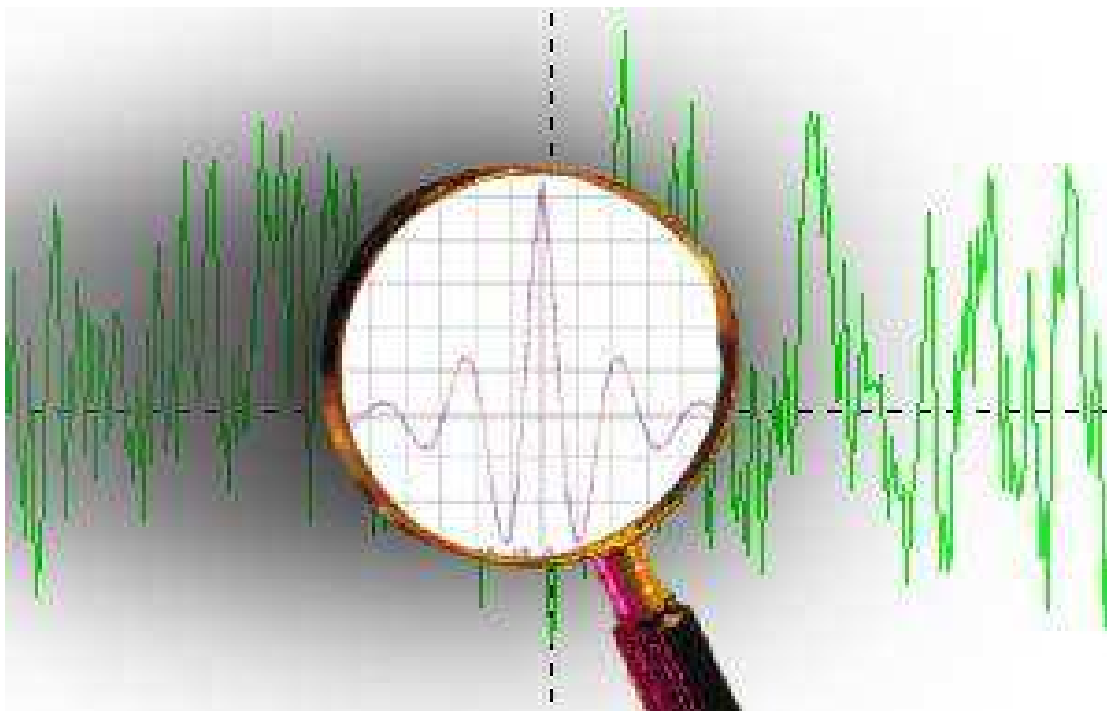


С.А. Прохоров, А.В. Иващенко, А.В. Графкин

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНОГО
АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**



Самара 2003 г.

Об авторах



Прохоров Сергей Антонович – доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, член-корреспондент Российской академии естественных наук, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, декан факультета информатики, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва, директор Самарского филиала Российского НИИ информационных систем.

В качестве председателя Головного Совета Минвуза России по автоматизации научных исследований в период 1988-1996 г.г. руководил разработкой и выполнением шести научно-исследовательских программ и подпрограмм АН СССР, Минэлектронпрома СССР, Минвуза России.

Результаты его работы нашли отражение в 199 научных трудах, в том числе, 12 монографиях, 40 авторских свидетельствах, 6 работах, опубликованных за рубежом, выступлениях более чем на 60 международных, всесоюзных и республиканских конференциях и симпозиумах.

Иващенко Антон Владимирович – студент-дипломник кафедры информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва.

Результаты его работы нашли отражение в 5 научных трудах, выступлениях на 2 конференциях.



Графкин Алексей Викторович – студент-дипломник кафедры информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва.

Результаты его работы нашли отражение в 2 научных трудах, выступлении на 1 конференции.

УДК 681.518.3, 514:681.323/043.3/

ББК 32.965я73

П 53

Рецензенты:

Заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор

Сойфер В.А.;

д.ф.-м.н., профессор Жданов А.И.

П 53 Прохоров С.А., Иващенко А.В., Графкин А.В.; Под ред. Прохорова С.А.

Автоматизированная система корреляционно-спектрального анализа случайных процессов/ СНЦ РАН, 2002. 286 с., ил.

ISBN 5-93424-085-4

Рассматриваются методы и алгоритмы генерирования временных рядов, включая неэквидистантные, с заданными корреляционно-спектральными характеристиками.

Анализируются методы, алгоритмы корреляционно-спектрального анализа, основанные на применении классического подхода, а также с использованием интервальной корреляционной функции.

Рассматриваются задачи вторичной обработки временных рядов, включающие: идентификацию случайных процессов по виду функциональной характеристики, аппроксимацию корреляционных функций и спектральных плотностей мощности параметрическими моделями, представляющими собой как функции заданного вида, так и ортогональные функции Лагерра.

Приводится описание разработанной автоматизированной информационной системы для аппроксимативного анализа корреляционно-спектральных характеристик и лабораторного практикума.

Предназначена для преподавателей, научных сотрудников, инженеров, аспирантов и студентов как руководство по моделированию и аппроксимативному корреляционно-спектральному анализу случайных процессов.

ББК 32.965я73

Печатается по решению издательского совета Самарского научного центра Российской академии наук.

П $\frac{2402000000}{00(05) - 01}$

© С.А. Прохоров, А.В. Иващенко, А.В. Графкин, 2003

ISBN 5-93424-085-4

СОДЕРЖАНИЕ	3
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	7
ПРЕДИСЛОВИЕ	10
ВВЕДЕНИЕ	12
ЧАСТЬ 1. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АППРОКСИМАТИВНОГО АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	30
1. ГЕНЕРИРОВАНИЕ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ	30
1.1. Генерирование временных рядов с заданным видом корреляционной функции	30
1.2. Интерфейс первой подсистемы	35
1.3. Генерирование 2-х временных рядов с заданным видом корреляционной и взаимной корреляционной функций	37
1.4. Генерирование неэквидистантных временных рядов	38
1.5. Интерфейс второй подсистемы	41
2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ	44
2.1. Основные понятия и определения	44
2.2. Метод и алгоритмы корреляционного анализа неэквидистантных временных рядов с использованием интервальной корреляционной функции	45
2.3. Идентификация корреляционных функций	48
2.4. Интерфейс третьей подсистемы	52
3. АППРОКСИМАЦИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ФУНКЦИЕЙ ЗАДАННОГО ВИДА	54
3.1. Алгоритмы аппроксимации	54
3.2. Оценка обобщенных корреляционных характеристик	59
3.3. Интерфейс пятой подсистемы	63
4. АППРОКСИМАЦИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ЛАГЕРРА	65
4.1. Алгоритмы аппроксимации	65
4.2. Интерфейс четвертой подсистемы	72
5. АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ МОЩНОСТИ	74
5.1. Аппроксимация спектральных плотностей мощности функцией заданного вида	74
5.2. Аппроксимация спектральных плотностей мощности ортогональными функциями Лагерра	86
5.3. Оценка обобщенных спектральных характеристик	89
5.4. Интерфейс шестой подсистемы	91
6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ	92
7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА ВВОДА/ВЫВОДА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ	111
7.1. Особенности ввода/вывода аналоговых сигналов	111
7.2. Структура автоматизированной системы, моделирующей измерительно-вычислительный канал	112
7.3. Модельные представления языка UML	116
7.3.1. Диаграмма вариантов использования (use case diagram)	116

7.3.2.	Диаграмма классов (class diagram)	121
7.4.	Взаимодействие приемника с передатчиком	123
7.4.1.	Схемы подключения	123
7.4.2.	Режимы взаимодействия приемника с передатчиком	124
7.5.	Многофункциональное устройство NVL08	127
7.5.1.	Функции устройства	127
7.5.2.	Описание структурной схемы устройства	128
7.5.3.	Описание контактов разъема устройства NVL08	129
7.5.4.	Программирование устройства NVL08	129
7.5.5.	Программирование цифрового ввода/вывода	130
7.5.6.	Программирование аналогового выхода	130
7.5.7.	Программирование АЦП	130
7.5.8.	Калибровка устройства	131
7.5.9.	Установка переключателей на устройстве NVL08	132
7.6.	Подготовка измерительно-вычислительного канала	132
7.6.1.	Программная реализация	132
7.6.2.	Настройка системы	136
7.7.	Прием-передача аналогового сигнала с использованием под- системы ввода/вывода	141
7.7.1.	Прием данных в аналоговой форме от объекта исследования	141
7.7.2.	Моделирование объекта исследования	150
7.7.3.	Прием-передача аналоговых сигналов	154
	ЧАСТЬ 2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	155
1.	ВЗАИМНЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ	155
1.1.	Содержание лабораторной работы	155
1.2.	Задание на самостоятельную работу	160
1.3.	Содержание отчета	160
1.4.	Контрольные вопросы	160
2.	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ НЕ- ЭКВИДИСТАНТНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ	161
2.1.	Содержание лабораторной работы	161
2.2.	Задание на самостоятельную работу	163
2.3.	Содержание отчета	164
2.4.	Контрольные вопросы	164
3.	АППРОКСИМАЦИЯ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ЛАГЕРРА	165
3.1.	Содержание лабораторной работы	165
3.2.	Задание на самостоятельную работу	170
3.3.	Содержание отчета	172
3.4.	Контрольные вопросы	172
4.	АППРОКСИМАЦИЯ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ФУНКЦИЯМИ ЗАДАННОГО ВИДА	173
4.1.	Содержание лабораторной работы	173
4.2.	Задание на самостоятельную работу	177
4.3.	Содержание отчета	179
4.4.	Контрольные вопросы	179
5.	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРИ ОТСЧЕТОВ НА КАЧЕСТВО АППРОКСИМАЦИИ	180

5.1.	Содержание лабораторной работы	180
5.2.	Задание на самостоятельную работу	186
5.3.	Содержание отчета	186
5.4.	Контрольные вопросы	186
6.	ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ПАР СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ	187
6.1.	Содержание лабораторной работы	187
6.2.	Задание на самостоятельную работу	192
6.3.	Содержание отчета	192
6.4.	Контрольные вопросы	192
7.	АППРОКСИМАЦИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ЛАГЕРРА	193
7.1.	Содержание лабораторной работы	193
7.2.	Задание на самостоятельную работу	196
7.3.	Содержание отчета	196
7.4.	Контрольные вопросы	196
8.	ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПАР ПРОЦЕССОВ С НЕКОТОРЫМ ВИДОМ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ И ЗАКОНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ОТЛИЧНЫМ ОТ НОРМАЛЬНОГО	197
8.1.	Содержание лабораторной работы	197
8.2.	Задание на самостоятельную работу	207
8.3.	Содержание отчета	207
8.4.	Контрольные вопросы	207
9.	АППРОКСИМАТИВНЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	208
9.1.	Содержание лабораторной работы	208
9.2.	Задание на самостоятельную работу	214
9.3.	Содержание отчета	214
9.4.	Контрольные вопросы	214
10.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КАНАЛА	215
10.1.	Содержание лабораторной работы	215
10.2.	Задание на самостоятельную работу	220
10.3.	Содержание отчета	221
10.4.	Контрольные вопросы	221
11.	ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КВАНТОВАНИЯ НА ОШИБКУ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕННОГО РЯДА	222
11.1.	Содержание лабораторной работы	222
11.2.	Задание на самостоятельную работу	227
11.3.	Содержание отчета	228
11.4.	Контрольные вопросы	228
12.	ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ОШИБКУ ПРИЁМА ВРЕМЕННОГО РЯДА	229
12.1.	Содержание лабораторной работы	229
12.2.	Задание на самостоятельную работу	235
12.3.	Содержание отчета	236
12.4.	Контрольные вопросы	236
13.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА	237

13.1.	Содержание лабораторной работы	237
13.2.	Задание на самостоятельную работу	245
13.3.	Содержание отчета	245
13.4.	Контрольные вопросы	246
14.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА	247
14.1.	Содержание лабораторной работы	247
14.2.	Задание на самостоятельную работу	252
14.3.	Содержание отчета	252
14.4.	Контрольные вопросы	252
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	253
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	255
	ПРИЛОЖЕНИЯ	258
П.1.	Диаграммы вариантов использования подсистем аппроксима- тивного анализа	258
П.2.	Импульсные характеристики формирующих фильтров	262
П.3.	Графики взаимных корреляционных функций	269
П.4.	Параметрические модели корреляционных функций	278
П.5.	Ортогональные функции Лагерра	281
П.6.	Обобщенные спектральные характеристики	282
П.7.	Формат файлов настройки подсистемы ввода/вывода аналого- вых сигналов	284
П.8.	Формат вводимых и выводимых файлов	286

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АСНИ – автоматизированная система научных исследований;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
ВКФ – взаимная корреляционная функция;
ВНКФ – взаимная нормированная корреляционная функция;
ВР – временной ряд;
ЗР – закон распределения;
ИВК – измерительно-вычислительный комплекс;
ИВС – измерительно-вычислительная система;
ИП – измерительный преобразователь (датчик);
ИИС – информационно-измерительная система;
К – коммутатор;
КФ – корреляционная функция;
НКФ – нормированная корреляционная функция;
М – количество дифференциальных коридоров;
МУ – масштабирующее устройство;
МФУ NVL08 – многофункциональное устройство NVL08;
НКФ – нормированная корреляционная функция;
ПО – процессор обработки;
ПРИС – процессорно-измерительное средство;
СП – случайный процесс;
СУБД – система управления базой данных;
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
ЭВМ – электронная вычислительная машина;
 $A_{\Theta} \{ \hat{x}(t_k) \}$ – алгоритм оценки вероятностной характеристики Θ ;
 $A_s \{ \hat{x}(t_k) \}$ – алгоритм оценки сигнала;
 $C_x(J)$ – интервальная корреляционная функция;
 d – параметр усреднения (время T , совокупность реализаций N или время и совокупность реализаций TN);
 \hat{D}_x – оценка дисперсии;
 $ent[]$ – операция взятия целой части числа;
 $F\{ \}$ – функциональное преобразование полученных оценок вероятностных характеристик;
 $F_x(x)$ – функция распределения вероятностей;
 $f_x(x)$ – плотность распределения вероятностей;
 $g[]$ – оператор, представляющий собой преобразования, лежащие в основе определения вероятностной характеристики Θ ;
 $K_a(\tau)$ – аппроксимирующее выражение корреляционной функции;
 $K_{axy}(\tau)$ – аппроксимирующее выражение взаимной корреляционной функции;
 k_a – коэффициент асимметрии;
 k_e – коэффициент эксцесса;
 k_{ϕ} – коэффициент формы;
 $K_x(\tau)$ – корреляционная функция стационарного случайного процесса;
 $K_x(t, t')$ – корреляционная функция случайного процесса;

$K_{xy}(\tau)$ – взаимная корреляционная функция;
 k_{xy} – корреляционный момент;
 $L_k(\tau, \alpha)$ – ортогональная функция Лагерра k -го порядка;
 $M[\]$ – оператор математического ожидания;
 Me – медиана;
 Mo – мода;
 \hat{m}_x – оценка математического ожидания;
 ODBC (Open Database Connectivity) – открытое соединение баз данных;
 S_d – оператор усреднения;
 $Sign$ – знаковая функция;
 $S_{axy}(\omega)$ – аппроксимирующее выражение взаимной спектральной плотности мощности;
 $S_x(\omega)$ – спектральная плотность мощности процесса $\overset{\circ}{x}(t)$;
 $S_{xn}(\omega)$ – нормированная спектральная плотность мощности процесса $\overset{\circ}{x}(t)$;
 $S_{xy}(\omega)$ – взаимная спектральная плотность мощности;
 SQL (Structured Query Language) – структурированный язык запросов;
 UML (Unified Modeling Language) – унифицированный язык моделирования;
 $W_k(j\omega)$ – частотная характеристика фильтра Лагерра k -го порядка;
 $x_j(t)$ – j -ая реализация случайного процесса;
 $\bar{x}(\vec{\Theta}, t)$ – реализация случайного процесса;
 $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ – параметры аппроксимирующего выражения;
 α_k – начальный момент k -го порядка;
 β_k – коэффициент разложения ортогонального ряда;
 b_k – коэффициент разложения ортогонального ряда;
 c_k – коэффициент разложения ортогонального ряда;
 χ – коэффициент вариации;
 Δ – погрешность аппроксимации;
 Δu – шаг квантования по уровню;
 δ – погрешность аппроксимации;
 δ_{ji} – индикатор состояния;
 $\delta(t)$ – δ -функция Дирака;
 Δt_{ji} – интервал дискретизации;
 $\Delta \omega_\phi$ – полоса пропускания фильтра;
 $\Delta \omega_c$ – эквивалентная ширина спектра мощности сигнала;
 Δx – ширина дифференциального коридора;
 γ_{cm} – погрешность от смещенности оценки;
 $\gamma_{cm\ доп}, \gamma_{m\ доп}$ – допустимые значения погрешностей оценки;
 γ_m – методическая статистическая погрешность;
 η – пикфактор;
 μ – показатель колебательности;

μ_k – центральный момент k-го порядка;

$\hat{\Theta}_j[X(t)]$ – j-текущая оценка вероятностной характеристики;

$\Theta[X(t)], \Theta$ – измеряемая вероятностная характеристика;

$\bar{\Theta}$ – вектор информативных параметров случайного процесса;

$\hat{\Theta}_{cp}[X(t)]$ – средняя оценка вероятностной характеристики;

$\hat{\Theta}[X(t)]$ – оценка измеряемой вероятностной характеристики;

$\hat{\Theta}_t[X(t)]$ – t-текущая оценка вероятностной характеристики;

$\rho_a(\tau, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ – аппроксимирующее выражение нормированной корреляционной функции;

$\rho_x(\tau)$ – нормированная корреляционная функция стационарного случайного процесса;

$\rho_x(t, t')$ – нормированная корреляционная функция случайного процесса;

$\rho_{xy}(\tau)$ – взаимная нормированная корреляционная функция;

r_{xy} – коэффициент корреляции;

$\tau_k^{(i)}$ – интервал корреляции;

$\tau_{k \max}$ – максимальный интервал корреляции;

$\bar{\Omega}$ – вектор информативных параметров объекта исследований.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая Вашему вниманию монография подготовлена для преподавателей, научных сотрудников, инженеров, аспирантов и студентов как руководство по моделированию и аппроксимативному корреляционно-спектральному анализу случайных процессов и дополняет следующие монографии и методические пособия:

1. Прохоров С.А. Математическое описание и моделирование случайных процессов/Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Уральск, 2001. 209 с.: ил.
2. Прохоров С.А. Прикладной анализ неэквидистантных временных рядов/Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Уральск, 2001. 375 с.: ил.
3. Прохоров С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов/Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Уральск, 2001. 329 с.: ил.
4. Прохоров С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов. – 2-е изд., перераб. и доп./СНЦ РАН, 2001. 380 с., ил.
5. Прохоров С.А. Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум./Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Уральск, 2001. 191 с.: ил.
6. Прохоров С.А. Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум. – 2-е изд., перераб. и доп./СНЦ РАН, 2001. 380 с., ил.

Материалы, представленные в монографии, получены в результате выполнения научно-исследовательских работ на кафедрах «Информационно-измерительная техника», «Информационная техника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ), «Информационные системы и технологии» Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ), Самарском филиале Российского НИИ информационных систем, математическом факультете Загребского университета и «Центре исследования моря» института «Руджер Бошкович» (г. Загреб, Хорватия).

Отдельные разделы монографии использовались при чтении лекций по ряду дисциплин при подготовке студентов по специальностям «Информационно-измерительная техника», «Автоматизированные системы обработки информации и управления» в СамГТУ, СГАУ, а также для научных сотрудников и аспирантов в «Центре исследования моря» института «Руджер Бошкович» (г. Загреб, Хорватия), на математическом факультете Загребского университета, международном университете подготовки аспирантов (г. Дубровник, Хорватия), Пекинском техническом университете.

Монография состоит из двух частей. **Первая**, содержащая семь разделов, - посвящена описанию разработанной автоматизированной системы корреляционно-спектрального анализа, **вторая** – описанию лабораторного практикума, поставленного на базе системы. При проектировании системы использовались CASE-технологии, в частности **Rational Rose 2000e**, которая базируется на унифицированном языке моделирования **UML**.

В первом разделе рассматриваются вопросы генерирования временных рядов с заданными корреляционно-спектральными характеристиками.

Во втором разделе рассмотрены вопросы корреляционного анализа временных рядов, включая неэквидистантные, идентификации корреляционных функций по фазовым портретам.

Вопросы аппроксимации корреляционных функций функциями заданного вида рассматриваются **в третьем разделе**, а ортогональными функциями Лагерра - **в четвертом**.

Пятый раздел посвящен особенностям аппроксимации параметрическими моделями спектральных плотностей мощности и обобщенных спектральных характеристик.

В шестом разделе приводятся описание баз данных, используемых для хранения и обработки результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования алгоритмов корреляционно-спектрального анализа.

В каждом разделе приводится описание **интерфейса соответствующей подсистемы** автоматизированной системы корреляционно-спектрального анализа.

В седьмом разделе описывается подсистема ввода/вывода аналоговых сигналов, осуществляющая связь между компьютером и объектом исследования.

Лабораторный практикум, представленный **во второй части**, целиком поставлен на разработанной системе. В нём учтены замечания преподавателей, аспирантов и студентов, отмеченные в ходе выполнения лабораторных работ предыдущего лабораторного практикума [5,6] на кафедре информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета, приведены описания модернизированных и новых лабораторных работ.

Особое внимание уделяется циклу лабораторных работ, выполняемому с использованием аналогового канала ввода/вывода и соответствующей подсистемы.

Все это, на наш взгляд, способствует улучшению наглядности при изучении базовых дисциплин, связанных с моделированием и статистической обработкой случайных процессов.

Авторы выражают благодарность своим учителям, всем сотрудникам, аспирантам и студентам кафедры информационных систем и технологий СГАУ за обсуждение материалов монографии, лабораторного практикума, критические замечания которых по мере возможности были учтены, особенно профессору Коварцеву А.Н., доцентам Дерябкину В.П. и Иоффе В.Г.

Авторы считают своим долгом выразить глубокую признательность ректору СГАУ член-корреспонденту РАН, д.т.н., профессору Сойферу В.А. за постоянную поддержку, рецензию и неоценимую помощь при издании монографии, а также рецензенту д.ф.-м.н., профессору Жданову А.И. за ценные замечания.

Неоценимую помощь в редактировании практикума оказала инженер кафедры ИСТ СГАУ Муравьева Е.В., которой авторы выражают свою благодарность.

Большую благодарность авторы выражают руководству СИЦ РАН: академику РАН Шорину В.П., д.т.н. Санчугову В.И., д.т.н., профессору Лазареву Ю.Н., - а также директору Западно-Казахстанского филиала ОАО «Национальный центр экспертизы и сертификации» (г. Уральск) Графкину В.Н. за дружескую поддержку и издание монографии в Казахстане.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу:

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва, факультет информатики, кафедра «Информационные системы и технологии», декану факультета информатики, заведующему кафедрой Прохорову С.А.

E-mail: INTERNET: sp@smr.ru

ВВЕДЕНИЕ

На пути создания образцов новой техники, технологических процессов научные исследования являются первым шагом, в процессе которого исследователь открывает новые законы, закономерности, совершает научные открытия.

Научные исследования представляют собой сложный, итерационный процесс, представляющий собой сочетание теоретических, включая методы моделирования, и экспериментальных методов [1, 27].

Не умаляя достоинств теоретических методов исследования, значение экспериментальных методов трудно переоценить. Только с помощью эксперимента возможно получение достоверной информации об исследуемом объекте в реальном масштабе времени, после обработки которой возможно построение её модели. Открыв новый эффект, новое явление экспериментальным путем, которые невозможно объяснить на базе существующих теорий, экспериментатор стимулирует развитие фундаментальной науки. В то же время, получив новый теоретический научный результат, исследователь, с целью подтверждения основных положений новой теории, нуждается в его экспериментальной проверке.

При проведении экспериментальных научных исследований исследователь:

1. ставит задачу исследований в терминах предметной области;
2. строит модель исследуемого объекта и определяет вектор информативных параметров $\vec{\Omega}$, адекватно описывающий ее в рамках поставленной задачи;
3. с помощью технических средств осуществляет измерение, регистрацию и обработку мгновенных значений наблюдаемых процессов $\vec{X}(\vec{\Theta}, t)$, с целью определения вектора информативных параметров $\vec{\Theta}$, описывающих модель процесса;
4. по результатам обработки информации устанавливает взаимно однозначное соответствие между векторами $\vec{\Omega}$ и $\vec{\Theta}$:

$$\vec{\Omega} = \Phi(\vec{\Theta}),$$

используемое для построения искомой модели объекта;

5. анализирует полученные результаты;
6. если результаты его устраивают - эксперимент окончен, в противном случае необходимо повторить пункты 3, 4 (точность полученных результатов неудовлетворительна), или пункты 2-4 (вектор параметров $\vec{\Omega}$ не полно описывает поведение объекта), а иногда и пункты 1-4 (ставится другая задача).

Следует отметить, что задачи 1, 2 и 4, 5, как правило, решает специалист данной предметной области, формулируя и интерпретируя ее в терминах предметной области, а 3 задачу - специалисты в области измерения и обработки измерительной информации.

Такое разделение функций между исследователем и специалистом в области измерения и обработки измерительной информации позволяет последнему абстрагироваться от конкретных физических объектов и вектора физических параметров $\vec{\Omega}$ и непосредственно перейти:

1. к математическому описанию исследуемых процессов и определению вектора параметров $\vec{\Theta}$, достаточных для решения поставленной задачи;
2. сбору информации с помощью первичных преобразователей;
3. оценке вектора параметров $\vec{\Theta}$ с помощью технических средств;
4. анализу точности полученных результатов;

5. аппроксимации полученных функциональных зависимостей с помощью параметрических моделей.

Каждая из перечисленных задач имеет свои специфические особенности, а эффективность решения четвертой и пятой – зависит от применяемых технических средств, построенных, как правило, на базе современных средств информационно-измерительной и вычислительной техники.

При этом возможны два подхода к решению задачи оценки $\vec{\Theta}$:

- в режиме экспресс-анализа с помощью алгоритма A_{Θ} оценивают вектор неизвестных параметров $\vec{\Theta} = A_{\Theta} \{ \hat{x}(t_k) \}$;

- в режиме контроля и регистрации с помощью алгоритма A_s получают оценку сигнала $\hat{x}(t, \vec{\Theta}) = A_s \{ \hat{x}(t_k) \}$, записывают его на какой-либо промежуточный носитель, а затем обрабатывают. При этом происходит задержка в обработке информации и, следовательно, в получении результата.

С целью повышения эффективности научных исследований, особенно при исследовании новых объектов, возникает необходимость в разработке и исследовании **новых алгоритмов** оценки вектора неизвестных параметров – $\vec{\Theta} = A_{\Theta} \{ \hat{x}(t_k) \}$.

Решая разнообразные задачи научных исследований, исследователь на основании физических представлений и задачи исследований определяет составляющие вектора параметров случайного процесса $\vec{\Theta}$, дающие его исчерпывающее описание.

Все вероятностные характеристики, определяемые во временной области, можно условно разделить на характеристики положения и формы кривой распределения вероятностей случайного процесса и характеристики взаимосвязи (см. рис. В.1).

При этом наиболее часто определяются (в порядке возрастания материальных и вычислительных затрат):

- числовые характеристики случайного процесса;
- авто и взаимные корреляционные функции;
- спектральные плотности мощности;
- законы распределения.

На основании общей теории статистических измерений [43] измеряемая вероятностная характеристика определяется как предел выборочного среднего функционально преобразованного случайного процесса:

$$\Theta[X(t)] = \lim_{d \rightarrow \infty} S_d g[x_j(t)], \quad (\text{В.1})$$

где Θ – измеряемая вероятностная характеристика;

S_d – оператор идеального усреднения;

d – параметр усреднения (время T , совокупность реализаций N или время и совокупность реализаций TN);

g – оператор, представляющий собой преобразования, лежащие в основе определения вероятностной характеристики Θ ;

$x_j(t)$ – j -ая реализация случайного процесса.

В зависимости от вида усреднения получаем следующие вероятностные характеристики:

1. При усреднении по совокупности:

$$\Theta[X(t)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g[x_j(t)]. \quad (\text{В.2})$$



Рисунок В.1. Классификация вероятностных характеристик случайных процессов

2. При усреднении по времени:

$$\Theta[X(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T g[x_j(t)] dt. \quad (B.3)$$

3. При усреднении по времени и совокупности:

$$\Theta[X(t)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{NT} \sum_{j=1}^N \int_0^T g[x_j(t)] dt. \quad (B.4)$$

На практике исследователь имеет дело с ограниченной совокупностью выборочных данных (результатов измерения). Результат определения значения вероятностной характеристики по ограниченной совокупности выборочных данных носит название **оценки**:

$$\hat{\Theta}[X(t)] = S_d g[x_j(t)] (j = 1, 2 \dots N). \quad (B.5)$$

К основным свойствам оценок относятся **несмещенность, состоятельность и эффективность**.

Оценка называется **несмещенной**, если ее математическое ожидание равно истинному значению оцениваемой характеристики:

$$M[\hat{\Theta}[X(t)]] = \Theta[X(t)]. \quad (B.6)$$

При невыполнении равенства оценка будет смещенной.

Оценка называется **состоятельной**, если при бесконечном увеличении объема выборочных данных она сходится по вероятности к истинному значению оцениваемой характеристики:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} P(|\hat{\Theta}[X(t)] - \Theta[X(t)]| < \varepsilon) = 1 \quad (B.7)$$

при любом ε .

При невыполнении этого условия оценка будет несостоятельной.

Эффективными называются оценки, дисперсия которых минимальна.

Следует подчеркнуть, что свойства оценок, которые описываются несмещенностью, состоятельностью и эффективностью, тесно связаны с характером ошибок, которые определяются методами математической статистики [5].

Таким образом, при ограниченном наборе выборочных данных выражения (В.2)-(В.4) при анализе случайных процессов примут вид:

- при усреднении по совокупности

$$\hat{\Theta}_t[X(t)] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g[x_j(t)]; \quad (\text{В.8})$$

- при усреднении по времени

$$\hat{\Theta}_j[X(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T g[x_j(t)] dt; \quad (\text{В.9})$$

- при усреднении по времени и совокупности

$$\hat{\Theta}_{cp}[X(t)] = \frac{1}{NT} \sum_{j=1}^N \int_0^T g[x_j(t)] dt. \quad (\text{В.10})$$

Следует отметить, что этими соотношениями определяются разные вероятностные характеристики. При усреднении только по совокупности реализаций (при фиксированном моменте времени) вероятностная характеристика $\Theta[X(t)]$ будет зависеть от текущего времени и называется t-текущей характеристикой $\hat{\Theta}_t$ [43]. При усреднении только по времени, когда выборочные значения относятся к одной реализации j, вероятностная характеристика $\Theta[X(t)]$ будет зависеть от номера реализации и называется j-текущей характеристикой $\hat{\Theta}_j$. При усреднении и по времени и совокупности значение $\Theta[X(t)]$ не зависит ни от текущего времени, ни от номера реализации и называется средней характеристикой – $\hat{\Theta}_{cp}$.

Наличие или отсутствие зависимости значений вероятностных характеристик от времени или номера реализации определяет такие фундаментальные свойства процесса, как **стационарность** и **эргодичность**.

Стационарным называется процесс, вероятностные характеристики которого не зависят от времени. **Эргодическим** называется процесс, вероятностные характеристики которого не зависят от номера реализации.

В теории случайных процессов различают стационарность в узком и широком смыслах. Данное выше определение относится к случайным процессам, стационарным в узком смысле. Для этих процессов равенство $\Theta_j = const$ выполняется для любой вероятностной характеристики. Когда от времени не зависят только одно- и двумерные вероятностные характеристики, случайный процесс считается стационарным в широком смысле. Если условие стационарности не выполняется хотя бы для одной вероятностной характеристики, процесс называется **нестационарным** по этой характеристике.

По аналогии, процесс считается эргодическим в узком смысле, если $\Theta_j = const$, где j - номер реализации, для любой вероятностной характеристики, и в широком смысле, если независимость значений вероятностных характеристик от номера реализации имеет место лишь для характеристик первых двух порядков. Если условие эргодичности не выполняется, процесс называется **неэргодическим**.

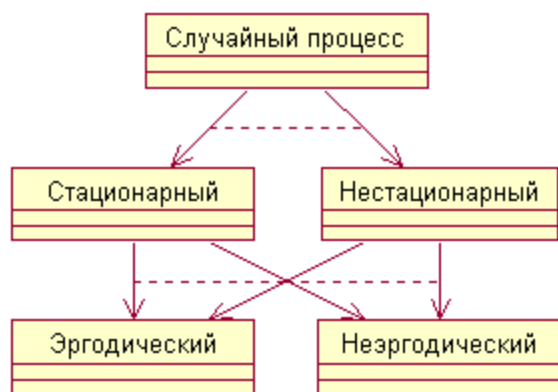


Рисунок В.2. Классификация случайных процессов

Различные комбинации этих процессов совместно с детерминированными дают возможность построить более сложные модели, используемые как при исследованиях с целью определения их характеристик, так и при генерировании процессов с заданными свойствами, используемых при имитационном моделировании средств измерения и обработки с целью определения их метрологических характеристик.

Ответ на вопрос, какие характеристики определять: Θ_t , Θ_j , Θ_{cp} , – во многом определяется свойствами исследуемого процесса и способом формирования выборочных данных.

Таким образом, прежде чем выбрать тип вероятностной характеристики (вид оператора усреднения), необходимо решить вопрос о стационарности и эргодичности случайного процесса. Этот вопрос самостоятельный и выходит за рамки монографии.

В [43] показано, что для стационарного эргодического случайного процесса $\Theta_t = \Theta_j = \Theta_{cp}$, для стационарного неэргодического процесса $\Theta_t = \Theta_{cp}$, для нестационарного эргодического – $\Theta_j = \Theta_{cp}$, а для нестационарного неэргодического процесса все виды вероятностных характеристик различны.

При фиксированном типе S_d вопросы организации эксперимента и принципы организации массивов выборочных данных о мгновенных значениях исследуемого случайного процесса подробно рассмотрены в [43]. Результаты измерений могут формироваться с использованием:

- различных временных интервалов одной и той же совокупности реализаций;
- одних и тех же временных интервалов различных совокупностей реализаций;
- различных временных интервалов различных совокупностей реализаций.

Причем, от эксперимента к эксперименту возможно изменение N , M и T , т.е. объема выборочных данных.

Выделим три метода статистических измерений: прямые, косвенные и совокупные.

Прямым методом статистических измерений будем называть метод получения оценки вероятностной характеристики в соответствии с выражением (В.1).

Косвенным методом статистических измерений будем называть метод получения оценки вероятностной характеристики с использованием функционального

Таким образом, случайные процессы на основе свойств стационарности и эргодичности можно представить в виде четырех классов (см. рис. В.2):

- стационарные эргодические;
- стационарные неэргодические;
- нестационарные эргодические;
- нестационарные неэргодические.

Каждый из перечисленных классов имеет своё характерное описание - **математическую модель**, параметры которой подлежат определению как с помощью теоретических, так и экспериментальных методов исследования.

преобразования оценок других вероятностных характеристик, полученных с помощью прямых методов статистических измерений:

$$\hat{\Theta}[z(t)] = F\left\{S_{d1}g_x[x_j(t_i^{(x)})], S_{d2}g_y[y_l(t_i^{(y)})], \dots\right\}, \quad (\text{B.11})$$

где $F\{\}$ представляет собой функциональное преобразование полученных оценок $\hat{\Theta}[x(t)]$ и $\hat{\Theta}[y(t)]$ и т.д. с целью получения оценки $\hat{\Theta}[z(t)]$.

Под **совокупными статистическими измерениями** будем понимать метод получения оценок в результате решения системы уравнений, содержащей оценки других вероятностных характеристик, полученных с помощью прямых, косвенных методов статистических измерений или их комбинацией:

$$\Xi_i\left\{S_{d1}g^{(1)}[x_j^{(1)}(t_i^{(1)})], \dots, S_{dm}g^{(m)}[x_j^{(m)}(t_i^{(m)})]\right\} = 0; \quad (\text{B.12})$$

$$\Xi_i\left\{F^{(1)}\left\{S_{d1}g^{(1)}[x_j^{(1)}(t_i^{(1)})]\right\}, \dots, F^{(m)}\left\{S_{dm}g[x_j^{(m)}(t_i^{(m)})]\right\}\right\} = 0. \quad (\text{B.13})$$

Автоматизированные системы научных исследований дают возможность обрабатывать **временные последовательности случайных процессов – временные ряды**.

В этом случае выражения (B.2)-(B.4) при представлении случайного процесса $X(t)$ ансамблем последовательностей примут вид:

$$\Theta[X(t)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g[x_j(t_i)]; \quad (\text{B.14})$$

$$\Theta[X(t)] = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g[x_j(t_i)]; \quad (\text{B.15})$$

$$\Theta[X(t)] = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ M \rightarrow \infty}} \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M g[x_j(t_i)], \quad (\text{B.16})$$

где t_i - i -ый отсчёт j -ой реализации случайного процесса.

При ограниченном наборе данных при анализе последовательностей выражение (B.5) примет вид:

$$\hat{\Theta}[X(t)] = S_d g[x_j(t_i)] (j = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, M). \quad (\text{B.17})$$

Выражения (B.8)-(B.10) для оценки вероятностных характеристик при анализе последовательностей (временных рядов) запишем в виде:

- при усреднении по совокупности

$$\hat{\Theta}_i[X(t)] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g[x_j(t_i)]; \quad (\text{B.18})$$

- при усреднении по времени

$$\hat{\Theta}_j[X(t)] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g[x_j(t_i)]; \quad (\text{B.19})$$

- при усреднении по времени и совокупности

$$\hat{\Theta}_{cp}[X(t)] = \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M g[x_j(t_i)]. \quad (\text{B.20})$$

Выделяют первичную и вторичную статистическую обработку. Под **первичной** статистической обработкой будем понимать оценку вероятностных характеристик по ограниченному набору данных, под **вторичной** - построение аналитических моделей исследуемых процессов и их характеристик [29].

Если не принимать во внимание фактор реального времени или задержку в обработке информации, то с точки зрения получения оценки по одному и тому же объему данных два подхода с методической точки зрения не отличаются друг от друга. Существенное отличие заключается в том, что работа в реальном масштабе времени накладывает жесткие ограничения на быстродействие технических средств. Это заставляет, в свою очередь, при статистических измерениях применять упрощенные алгоритмы оценивания интересующих параметров, обладающих значительным быстродействием. Кроме того, работа в реальном масштабе времени не дает возможности получить требуемые оценки, воспользовавшись другими алгоритмами, так как данную реализацию повторить нельзя – она **случайна**. Требуемую оценку необходимо получить за время, отводимое на эксперимент. Реализация же, записанная на промежуточный носитель или в память, становится **детерминированной**, и с ней можно экспериментировать сколь угодно долго. Это важное преимущество статистической обработки позволяет:

- с целью повышения точности оценивания осуществить оценку одного параметра с помощью различных алгоритмов обработки информации;
- выбрать оптимальный алгоритм оценивания, соответствующий выбранному критерию;
- с целью построения новой или уточнённой модели осуществить оценку других параметров, описывающих эту модель.

При исследовании сложных объектов проводят, как правило, большое число испытаний. При этом происходит и накопление большого числа массивов числовых и функциональных характеристик, что в значительной степени затрудняет хранение, анализ и интерпретацию полученных результатов.

Один из возможных способов решения этой проблемы заключается в применении аппроксимативных методов (от латинского слова **approximo** - приближаюсь), суть которых заключается в нахождении подходящего аналитического выражения $\varphi(x(t), \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ с неизвестными параметрами $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$, удовлетворяющими заданному критерию оптимальности, которое бы описывало найденные экспериментальные результаты. Аппроксимативный подход оказывается эффективным и при обработке результатов имитационного моделирования (вычислительного эксперимента).

Предположим, что в результате опыта мы получили ряд экспериментальных точек и построили график зависимости $\hat{y}_i = f(\hat{x}_i)$. Желательно обработать экспериментальные данные таким образом, чтобы по возможности точно отразить общую тенденцию зависимости y от x и вместе с тем сгладить случайные отклонения, вызванные погрешностями самого эксперимента.

Наиболее эффективным методом решения этой задачи является метод наименьших квадратов [5].

Пусть задан некоторый класс функций $\varphi_j(x(t), \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ с одинаковым числом неизвестных параметров. Тогда наилучшей будет та функция, для которой сумма квадратов

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^M [\hat{y}_i - \varphi_j(\hat{x}_i, \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n)]^2 = \min. \quad (\text{B.21})$$

Если в сравнении участвуют функции с различным числом неизвестных параметров, это приводит к увеличению числа связей и к уменьшению числа степеней свободы $m-l$, что, в свою очередь, может ухудшить дисперсию [5].

$$D_j = \frac{\Delta_j}{m-r}. \quad (\text{B.22})$$

Под числом связей r понимают число неопределенных выражений, входящих в аналитическое выражение.

Так как Δ_j является функцией $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ то, как известно [5], необходимыми условиями минимума дифференцируемой функции многих переменных является система нормальных уравнений:

$$\frac{\partial S(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n)}{\partial \alpha_k} = 0, k = 0, 1, \dots, n, \quad (\text{B.23})$$

решив которую с помощью того или иного численного метода, найдем искомые параметры $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$.

Классификация методов аппроксимации функциональных характеристик случайных процессов и последовательностей представлена на рис. В.3.

Основными преимуществами аппроксимативного подхода являются:

- наглядность и компактность полученного аналитического выражения, легкость визуализации;
- возможность использования аналитического выражения для дальнейших аналитических исследований и преобразований, с целью получения обобщенных вероятностных характеристик;
- сокращение объёма хранимых данных.

К недостаткам метода следует отнести наличие методической погрешности, возникающей при замене полученных экспериментальных данных или другой функции более простым аналитическим выражением. В общем случае, для реализации аппроксимативного подхода необходимо выполнить следующие этапы:

1. на основании анализа решаемой задачи определить требования к реализации входного процесса (последовательности): длине реализации (объёму выборки), интервалу дискретизации, числу уровней квантования и т.д. с целью получения оценок вероятностных характеристик для последующей аппроксимации с допустимыми погрешностями;

2. по измеренным значениям входного процесса (последовательности) оценить значения функциональной характеристики в заданных точках;

3. проанализировать полученный результат и выбрать подходящее аналитическое выражение, по возможности, с минимальным количеством неизвестных параметров, подлежащих определению, так как количество параметров в значительной мере определяет сложность аппаратуры или вычислений, его сходимости и устойчивость;

4. выбрать и обосновать критерий приближения;

5. составить и решить систему уравнений относительно неизвестных параметров аналитического выражения и определить погрешность приближения;

6. разработать структурную схему аппаратуры (программы) и рассчитать её параметры;

7. изготовить и отладить аппаратуру (написать и отладить программное обеспечение);

8. провести экспериментальные исследования (обработать полученные экспериментальные данные);

9. аналитически определить все интересующие обобщённые вероятностные характеристики.

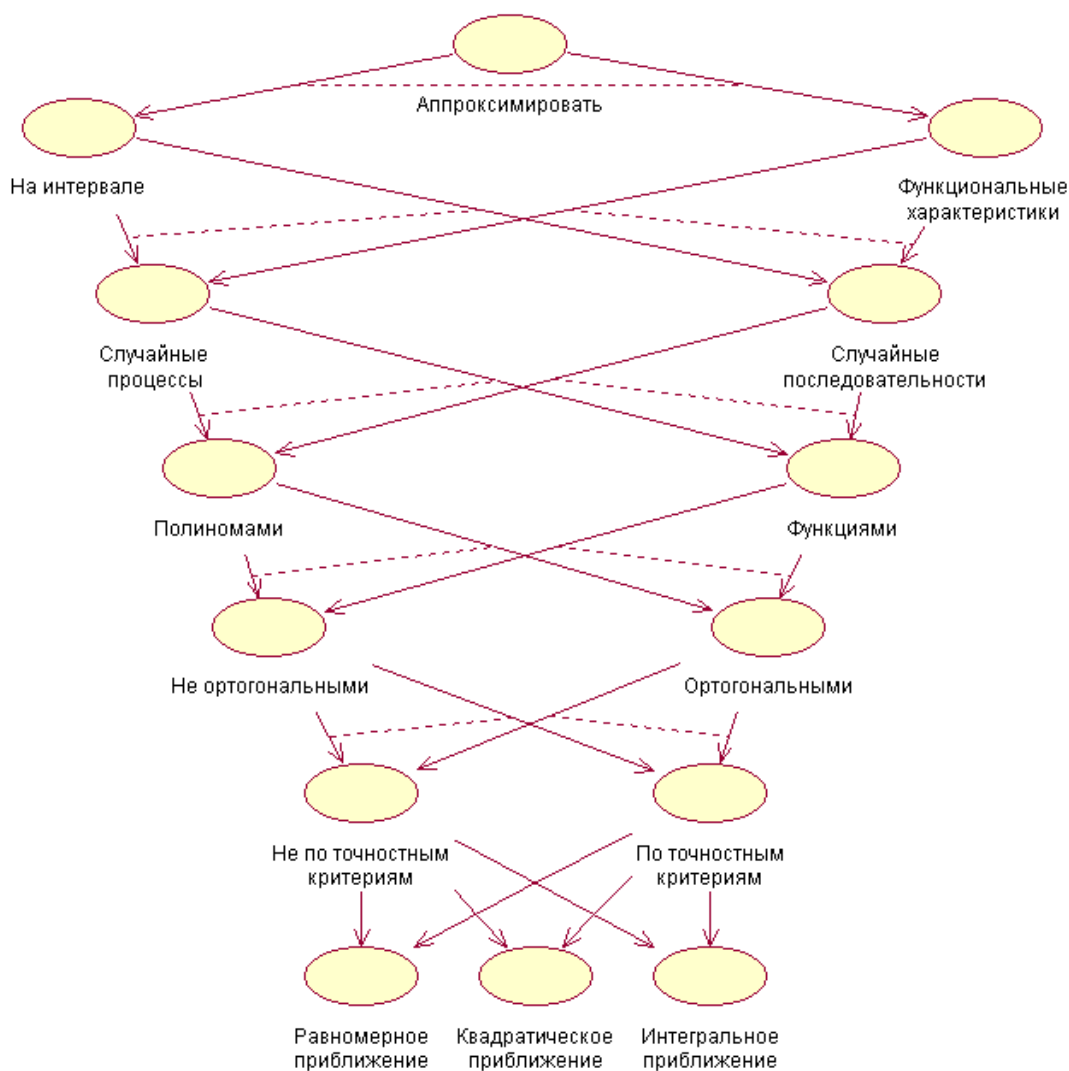


Рисунок В.3. Классификация методов аппроксимации случайных процессов

Следует отметить, что определять аналитические выражения возможно как при анализе стационарных, так и нестационарных процессов. В первом случае анализируются функциональные характеристики, во втором - и моментные, являющиеся функциями времени.

Определять параметры аналитических выражений возможно как с помощью **статистических измерений**, так и в результате **статистической обработки**.

Под **статистическими измерениями с аппроксимацией** будем понимать измерение (оценку) параметров аппроксимирующего выражения вероятностной функциональной характеристики случайных процессов с помощью специальных технических средств, работающих в реальном масштабе времени. Самыми популярными среди таких технических средств являются **коррелометры** и **спектроанализаторы** с аппроксимацией параметрическими моделями. В литературе их часто называют **статистическими анализаторами**. Статистические анализаторы, как правило, специализированные аппаратно-программные средства, определяющие **параметры реального процесса** (см. рис. В.4).

Под **статистической обработкой с аппроксимацией** будем понимать оценку параметров аппроксимирующего выражения вероятностной функциональной характеристики случайных процессов с помощью ЭВМ, записанных на промежуточный

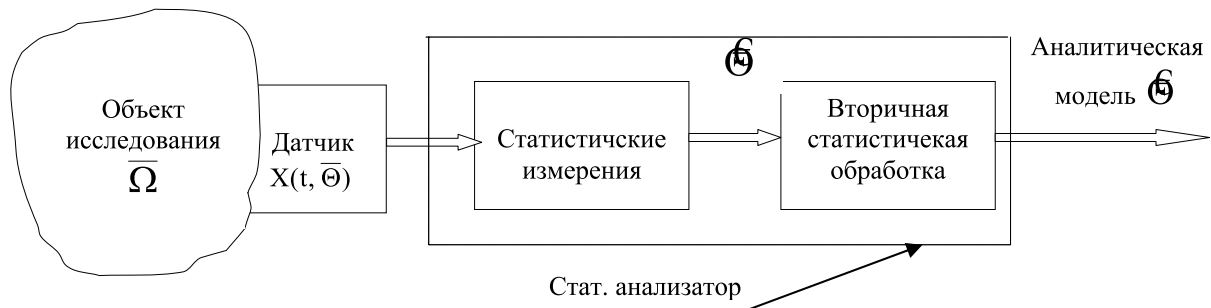


Рисунок В.4. Аппаратно-программные средства статистических измерений и обработки информации

носитель или память. При этом происходит временная задержка в обработке информации.

Аппроксимативные методы, основанные на применении ЭВМ, можно отнести к методам **вторичной обработки** информации.

Важной частью статистического анализа является корреляционный анализ. Знание корреляционных функций позволяет решать задачи идентификации динамических систем, выбирать оптимальный интервал дискретизации исследуемого процесса, оценивать погрешности средств измерений, определять скорость проката, строить корреляционные приёмники и т.д. [13, 21, 24, 25, 39]. Для экспериментального определения корреляционных функций применяются как специализированные вычислительные средства - коррелометры, так и универсальные вычислительные машины.

Корреляционная функция представляет собой корреляционный момент её значений при двух значениях аргумента t, t' , рассматриваемый как функция t, t' [37]:

$$K_x(t, t') = M \left[\overset{\circ}{x}(t) \overset{\circ}{x}(t') \right], \quad (\text{В.24})$$

где $\overset{\circ}{x}(t) = x(t) - m_x(t)$ а $m_x(t)$ – математическое ожидание случайного процесса в сечении t .

Корреляционная функция характеризует степень **линейной связи** между сечениями процесса.

Часто вместо корреляционной функции для характеристики связи между сечениями процесса используют нормированную корреляционную функцию, которая представляет собой коэффициент корреляции значений процесса при двух значениях аргумента:

$$\rho_x(t, t') = \frac{K_x(t, t')}{\sqrt{D_x(t)} \sqrt{D_x(t')}}. \quad (\text{В.25})$$

Для стационарных случайных процессов корреляционная функция зависит лишь от разности аргументов и является четной функцией $\tau = t - t'$ [37]:

$$K_x(\tau) = K_x(-\tau). \quad (\text{В.26})$$

Это свойство позволяет определять корреляционную функцию только во временном интервале $[0, \infty)$.

Нормированная корреляционная функция, в соответствии с выражением (В.25), равна:

$$\rho_x(\tau) = \frac{K_x(\tau)}{K_x(0)}. \quad (\text{В.27})$$

Отсюда видно, что

$$|\rho_x(\tau)| \leq 1. \quad (\text{B.28})$$

Взаимной корреляционной функцией двух случайных функций $x(t)$ и $y(t)$ называется неслучайная функция двух аргументов t и t' , которая при каждой паре значений t и t' равна корреляционному моменту соответствующих сечений случайной функции $x(t)$ и случайной функции $y(t)$:

$$K_{xy}(t, t') = M \left[\overset{\circ}{x}(t) \overset{\circ}{y}(t') \right]. \quad (\text{B.29})$$

Если взаимная корреляционная функция не тождественно равна нулю, случайные процессы называются коррелированными, в противном случае они называются некоррелированными.

Вместо корреляционной функции часто пользуются нормированной корреляционной функцией

$$\rho_{xy}(t, t') = \frac{K_{xy}(t, t')}{\sigma_x(t) \sigma_y(t')}. \quad (\text{B.30})$$

Два случайных процесса называются стационарно связанными, если их взаимная корреляционная функция является функцией разности аргументов:

$$K_{xy}(t, t') = K_{xy}(\tau), \quad (\text{B.31})$$

где $\tau = t - t'$.

Из свойств взаимной корреляционной функции следует, что

$$K_{xy}(\tau) = K_{yx}(-\tau). \quad (\text{B.32})$$

Нормированная взаимная корреляционная функция для стационарно связанных процессов примет вид:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{K_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (\text{B.33})$$

Другими важными характеристиками, широко применяемыми в приложениях, являются спектральные характеристики. Знание спектральных характеристик позволяет решать задачи идентификации динамических систем, выделять сигналы на фоне шумов, оценивать погрешности средств измерений и т.д. [14, 16, 17, 19]. К ним относятся базовые: авто и взаимные спектры мощности, – и обобщенные спектральные характеристики. Базовые характеристики определяются преобразованием Фурье соответствующих корреляционных функций [14]:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau; \quad (\text{B.34})$$

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (\text{B.35})$$

Следует отметить, что в работе они определяются с помощью аппроксимативного подхода – функционального преобразования аналитической модели корреляционных функций [28, 29].

Для решения задач определения корреляционных функций, аппроксимации их ортогональными рядами Лагерра, параметрическими моделями, аппроксимации спектральных характеристик, получения различных пар коррелированных процессов, включая неэквидистантные временные ряды, предлагается автоматизированная система, содержащая следующие подсистемы:

- генерации временных рядов с заданными свойствами и аппроксимативного анализа корреляционно-спектральных характеристик;
- ввода/вывода аналоговых сигналов.

Структурная схема первой подсистемы приведена на рис. В.5, а второй – на рис. 7.1.

Функционально первая подсистема в свою очередь разбита на подсистемы, выполняющие ограниченный круг функций и предоставляющие пользователю разнообразные сервисы. Каждой подсистеме в программе выделена отдельная страница, содержащая необходимый набор компонентов, обеспечивающих интерфейс с пользователем.

Первая часть подсистемы обеспечивает генерирование случайных процессов, объединение их в пары и оценку взаимных корреляционных функций пар процессов. Целью работы с этой частью является имитационное моделирование случайных процессов с равномерной дискретизацией и неэквилибриальных временных рядов [30].

Возможна генерация исходного процесса с заданным количеством отсчетов и интервалом дискретизации (белого шума или процесса с известной автокорреляционной функцией и нормальным законом распределения), подача его на вход двух формирующих фильтров с возможностью задания задержки на определенное время, и изменения дискретизации каждого из двух получаемых процессов [35, 36].

В случае, когда пара процессов получается при подаче на вход двух формирующих фильтров одной генерации белого шума, возможно определение теоретической взаимной корреляционной функции. Таким образом, предусмотрен анализ ошибки оценивания ВКФ с использованием интервальной корреляционной функции [48, 49].

Далее производится оценка взаимной корреляционной функции с возможностью получения фазового портрета. В системе предусмотрено два варианта решения задачи аппроксимации ВКФ: с помощью параметрических моделей и с использованием ортогональных функций Лагерра [28, 29]. Первый способ предусматривает наличие априорной информации о виде корреляционной функции и может быть решен с использованием аналитического, конечно-разностного методов взятия производных и с использованием метода Нелдера-Мида.

Аппроксимация предусматривает подбор оптимальных параметров выражений исходя из известных приближенных значений при минимуме среднеквадратической погрешности аппроксимации. В подсистемах аппроксимации предоставляется возможность занесения полученных выражений в базу данных. Значения параметров аппроксимирующих выражений поступают на вход подсистемы расчета взаимной спектральной плотности мощности.

Завершающая подсистема предоставляет пользователю доступ к базе данных аппроксимирующих выражений. Они отображаются отдельно для каждой созданной системы в виде таблиц. Предусмотрена возможность построения графиков по аппроксимирующим выражениям с наложением их друг на друга.

Работа может производиться как последовательно по схеме, описанной выше, так и непосредственно в каждой конкретной подсистеме, с использованием информации из файлов.

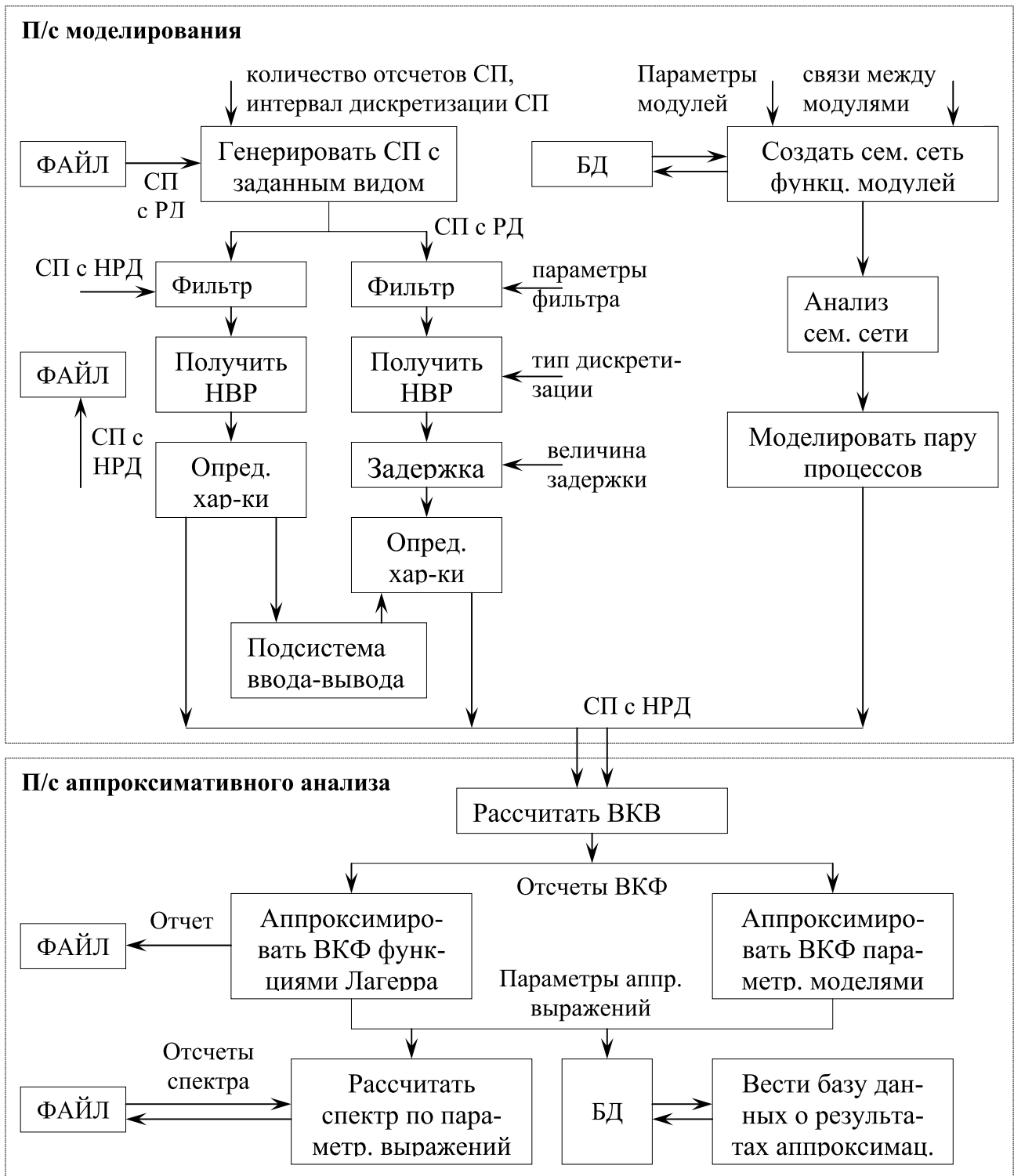


Рисунок В.5. Структурная схема АС аппроксимативного анализа ВКФ

Согласно структурной схеме (см. В.5) форма, появляющаяся на экране, состоит из восьми страниц – по числу подсистем. Переход с одной страницы на другую осуществляется выбором вкладки сверху экрана или через меню «Файл». В верхнем левом углу некоторых страниц расположены функциональные кнопки. На них изображены пиктограммы, кнопки сопровождаются исчезающими подсказками. При нажатии на кнопки происходят действия, сопровождающиеся пересчетом некоторых параметров и построением графиков.

Графики требуют пояснений. При перемещении мыши в верхнем правом углу отображаются ее координаты в системе координат графика. Для увеличения некоторой области необходимо нажать правую кнопку мыши и, удерживая ее, растянуть прямоугольник на область. К возвращению к исходному графику приведут клик мыши, повторное растяжение прямоугольника, переход на другую страницу и, в общем, любое событие, приводящее к перерисовке экрана. Размеры графиков в ряде случаев могут меняться перемещением границ графиков.

В системе предусмотрена справка, которая вызывается нажатием «F1» с любой страницы системы.

При проектировании системы использовались CASE-технологии, в частности **Rational Rose 2000e** [22], которая базируется на унифицированном языке моделирования UML. В рамках этого языка все представления о модели сложной системы фиксируются в виде специальных графических конструкций – диаграмм. При этом совокупность построенных диаграмм является самодостаточной в том смысле, что в них содержится вся информация, которая необходима для реализации проекта сложной системы.

Диаграммы, разработанные при проектировании подсистем, приводятся по мере необходимости и призваны облегчить понимание их функционирования.

Диаграмма вариантов использования (**use case diagram**) является исходной концептуальной моделью системы в процессе ее проектирования и разработки. Определяются общие границы и контекст моделируемой предметной области, формулируются общие требования к функциональному поведению проектируемой системы, разрабатывается исходная концептуальная модель системы для её последующей детализации в форме логических и физических моделей, а также подготавливается документация для взаимодействия разработчиков системы с заказчиками и пользователями.

При построении диаграммы вариантов использования выделяется множество актеров и интерфейсов, взаимодействующих с системой с помощью вариантов использования.

Актером называется любая внешняя по отношению к проектируемой системе сущность, которая взаимодействует с системой и использует ее функциональные возможности для достижения определенных целей или решения частных задач.

Варианты использования применяют для спецификации общих особенностей поведения системы или любой другой сущности предметной области без рассмотрения внутренней структуры этой сущности. Каждый вариант использования определяет последовательность действий, которые должны быть выполнены проектируемой системой при взаимодействии её с соответствующим актером.

Диаграмма классов служит для представления статической структуры модели системы в терминологии классов объектно-ориентированного программирования. Диаграмма классов отражает, в частности, различные взаимосвязи между отдельными сущностями предметной области, такими как объекты и подсистемы, а также описывает их внутреннюю структуру и типы отношений. На данной диаграмме не указывается информация о временных аспектах функционирования системы. С этой точки зрения диаграмма классов является дальнейшим развитием концептуальной модели проектируемой системы.

Диаграмма классов представляет собой некоторый граф, вершинами которого являются элементы типа «**классификатор**», которые связаны различными типами структурных отношений. Следует заметить, что диаграмма классов может также со-

держат интерфейсы, пакеты, отношения и даже отдельные экземпляры, такие как объекты и связи. Когда говорят о данной диаграмме, имеют в виду структурную статическую модель проектируемой системы. Поэтому диаграмму классов принято считать графическим представлением таких структурных взаимосвязей логической модели системы, которые не зависят или инвариантны от времени.

Диаграмма классов состоит из множества элементов, которые в совокупности отражают декларативные знания о предметной области. Эти знания интерпретируются в базовых понятиях языка UML, таких как классы, интерфейсы и отношения между ними и их составляющими компонентами.

Класс в языке UML служит для обозначения множества объектов, которые обладают одинаковой структурой, поведением и отношениями с объектами из других классов. Обязательным элементом обозначения класса является его имя. Оно должно быть уникальным. По мере проработки отдельных компонентов диаграммы, описания классов дополняются атрибутами (свойствами) и операциями (сервисами).

Кроме внутреннего устройства или структуры классов, на соответствующей диаграмме указываются различные отношения между классами. Базовыми отношениями или связями в языке UML являются:

- **Отношение зависимости** – в общем случае указывает некоторое семантическое отношение между двумя элементами модели или двумя множествами таких элементов, которое не является отношением ассоциации, обобщения или реализации. Отношение зависимости используется в такой ситуации, когда некоторое изменение одного элемента модели может потребовать изменения другого зависимого от него элемента модели.

- **Отношение ассоциации** – соответствует наличию некоторого отношения между классами. Частным случаем отношения ассоциации является отношение агрегации (когда один из классов представляет собой некоторую сущность, включающую в себя в качестве составных частей другие сущности), которое, в свою очередь, тоже имеет специальную форму – отношение композиции (служит для выделения специальной формы отношения «часть-целое», при которой составляющие части не могут выступать в отрыве от целого, т.е. с уничтожением целого уничтожаются и все его части).

- **Отношение обобщения** – отношение между более общим элементом (родителем или предком) и более частным и специальным элементом (дочерним или потомком).

Следует отметить, что исследование новых (разрабатываемых) алгоритмов возможно как аналитическими методами, так и методом имитационного моделирования на ЭВМ, суть которого заключается в анализе их метрологических характеристик с использованием псевдослучайных последовательностей, сгенерированных с помощью ЭВМ. Появилось большое количество интересных и важных монографий и статей, посвященных методологии, планированию, конструированию и выполнению моделирования (см. список использованных источников в [30]). Большинство из них описывает метод, который носит название метода Монте-Карло. Современное толкование этого термина базируется на работе Неймана и Улама, выполненной в конце сороковых годов, в которой они применили специальный математический метод для решения проблемы ядерной физики, экспериментальные исследования которых очень дороги, а аналитическое решение очень сложно.

Как правило, реализация этого метода включает следующие основные блоки:

- имитации входных процессов и внешних воздействий;

- реальных и идеальных моделей, а также их разности;
- формирования изменения параметров модели:
 - под воздействием внешних факторов;
 - в случае технологического разброса на множестве экземпляров;
 - в случае временной нестабильности;
- первичной статистической обработки для определения статистических характеристик наблюдаемых процессов при данных испытаниях;
- вторичной статистической обработки и управления машинным экспериментом:
 - совокупной обработки множества результатов экспериментов;
 - определения необходимого числа прогонов модели и принятия решений при последовательном планировании о продолжении или окончании эксперимента;
 - управления параметрами модели и значениями внешних факторов;
 - управления системным временем;
- датчик системного времени;
- управляющую программу, синхронизирующую процесс моделирования.

Функциональная схема системного моделирования, поясняющая взаимодействие отдельных блоков, представлена на рис. В.6.

Сложность имитационной модели и затраты машинного времени при ее исследовании во многом будут зависеть от принципа имитационного моделирования.

Учитывая, что основным принципом проектирования АСНИ, ИИС, процессорных средств измерения является агрегатное проектирование [27], наиболее целесообразно при конструировании модели использовать принцип блочного моделирования, суть которого сводится к следующему:

- на основании декомпозиции АСНИ, ИИС, ПРИС создается библиотека моделей стандартных блоков для моделирования входных воздействий, дестабилизирующих факторов, блоков реальных систем.
- на основании разработанных моделей блоков конструируется модель системы в соответствии с ее структурой, с возможностью контроля промежуточных последовательностей, соответствующих реальным физическим точкам системы.

Достоинствами блочных моделей являются:

- гибкость, простота изменения конфигурации модели системы, возможность прослеживания промежуточных результатов; соответствие математической модели;
- возможность унификации процедур моделирования путём создания библиотеки стандартных процедур;
- единообразию и простоте построения моделей разнообразных структур;
- возможность автоматизации процедуры построения моделей систем.

К недостаткам блочного моделирования следует отнести:

- увеличение времени моделирования;
- необходимость большого объёма памяти для хранения библиотеки моделей.

Следует подчеркнуть, что затраты на моделирование, достоверность полученных результатов во многом зависят от принятых решений на этапе планирования эксперимента, особенно при определении необходимого числа испытаний, выборе входных воздействий и т.д.

Согласно методике, изложенной в РТМ 25139-74 [23], в качестве метрологической характеристики может выбираться максимальное значение модуля погрешностей оценки Θ :

$$\Delta = \max\{\Delta_j | j = 1, \dots, N\}, \quad (\text{В.36})$$

где N – число испытаний, зависящее от доверительной информации P_d . Так, если $P_d=0,95$, то число испытаний равно 29 независимо от закона распределения погрешностей.

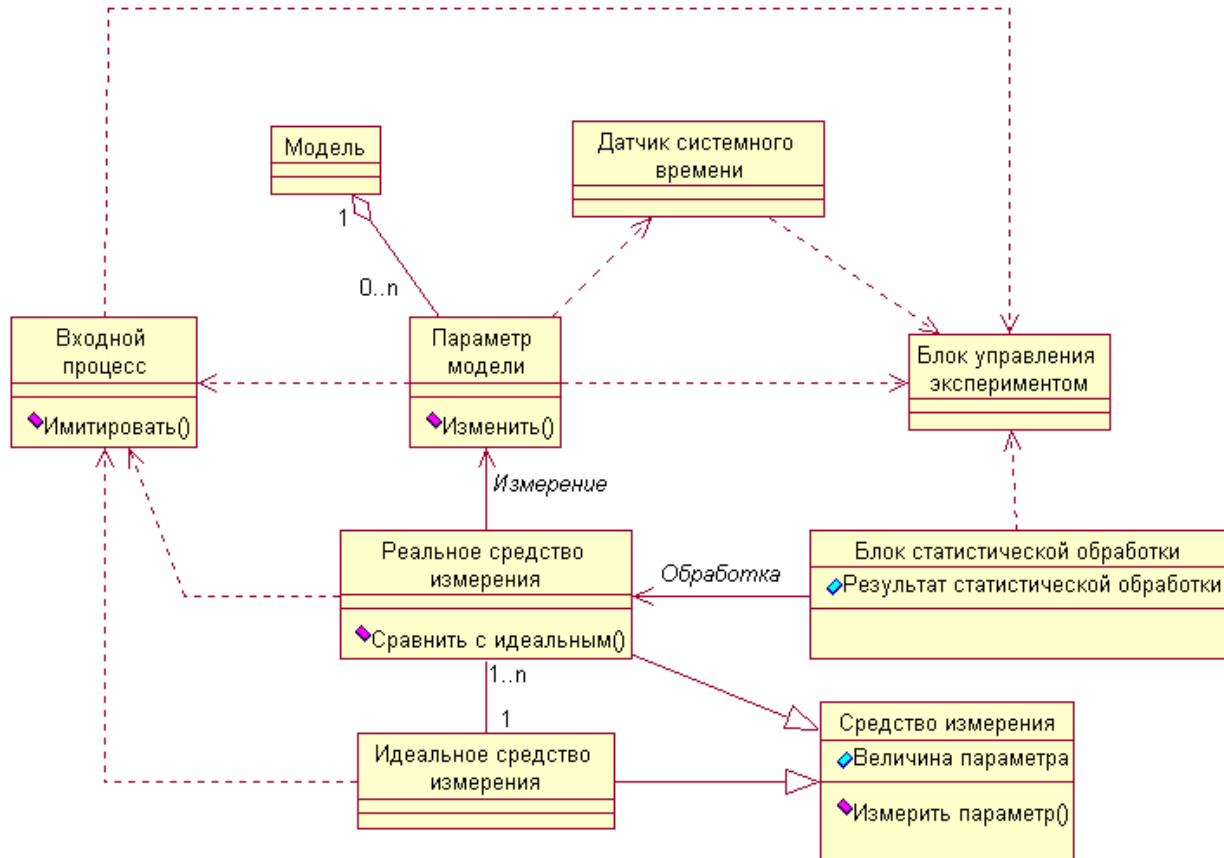


Рисунок В.6. Функциональная схема имитационного моделирования

Структура пакета прикладных программ имитационного моделирования алгоритмов оценивания вероятностных характеристик временных рядов, содержащего как обрабатывающие, так и управляющие программы, должна состоять из следующих основных блоков:

- задания входных воздействий с требуемыми характеристиками;
- первичной статистической обработки информации;
- вторичной статистической обработки информации;
- алгоритмов оценивания вероятностных характеристик;
- сервисных;
- определения методической погрешности и ее составляющих;
- определения инструментальных составляющих погрешности.

Одним из важных этапов имитационного моделирования является выбор, обоснование и моделирование сигналов, используемых в модельном эксперименте. Решение этой задачи определяется целевой функцией моделирования, назначением исследуемой системы и т.д. Так как при моделировании АСНИ, ИИС, ПРИС основной задачей является определение метрологических характеристик при определенных ограничениях на технико-экономические показатели, то существенным требованием, предъявляемым к образцовому (испытательному или тестовому) сигналу, является

возможность оценки с его помощью погрешности результата измерения данным средством на заданном классе входных воздействий (см. рис. В.7).

Учитывая большое разнообразие решаемых задач и соответствующих им средств измерения, однозначного ответа о виде образцового сигнала быть не может. Окончательное решение о выборе вида образцового сигнала для конкретных типов средств измерения должно приниматься по результатам лабораторных исследований.

В самом общем виде выбор образцового сигнала осуществляется:

- выбором наилучшего сигнала из множества возможных входных сигналов, для обеспечения гарантированной погрешности результата измерения;
- формированием набора типовых сигналов, то есть наиболее часто встречающихся входных сигналов или сигналов, наиболее интересующих исследователя;
- формированием набора типовых сигналов, включающих в себя наилучший сигнал.

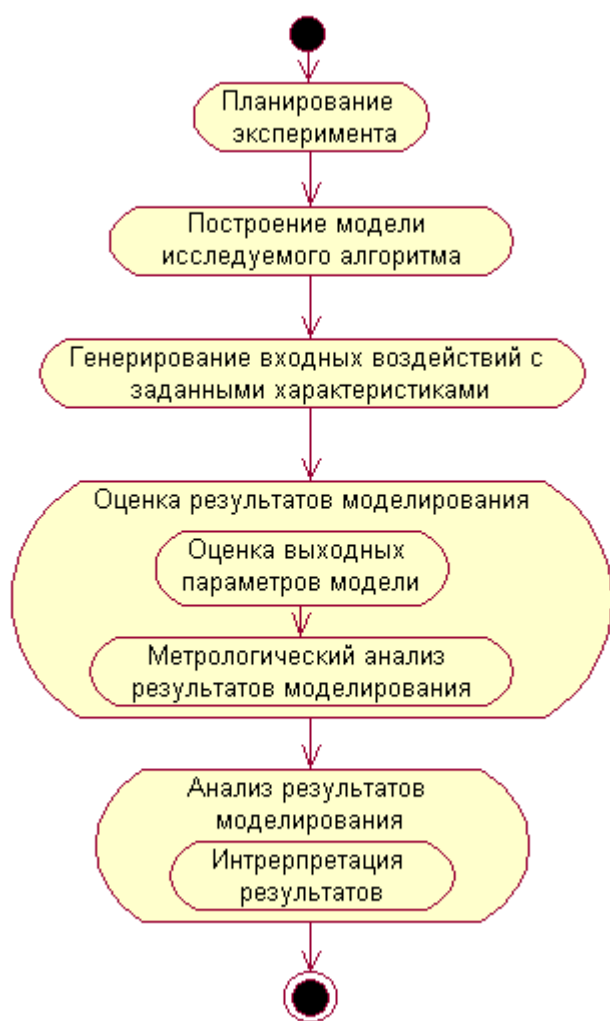


Рисунок В.7

Основными требованиями, предъявляемыми к образцовым сигналам, являются следующие:

- заданный вид вероятностных характеристик;
- принадлежность к классу входных сигналов, для которых предназначено данное средство;
- стабильность во времени;
- отклонение текущих характеристик от расчетных не должно быть более допустимого.

В некоторых случаях, кроме случайных сигналов, возникает необходимость в применении детерминированных образцовых сигналов.

Количество входных сигналов, одновременно обрабатываемых в модели системы, определяется сложностью системы, сложностью модели, количеством каналов и т.д. Т.е. в системе моделирования должна быть предусмотрена возможность генерирования N сигналов как с одинаковыми, так и различными характеристиками.

Отметим, что используемые в монографии термины «генерирование случайных процессов» и «моделирование случайных процессов» являются синонимами.

ЧАСТЬ 1. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АППРОКСИМАТИВНОГО АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

1. ГЕНЕРИРОВАНИЕ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

1.1. Генерирование временных рядов с заданным видом корреляционной функции

Часто при решении задач имитационного моделирования средств измерений, алгоритмов статистической обработки информации, их метрологическом анализе возникает необходимость в формировании процессов с заданным видом корреляционной функции. При этом не обращают внимание на закон распределения процесса. Теоретически эта задача решается методом фильтрации и сводится к определению характеристик формирующего фильтра при известных характеристиках входного и выходного сигналов [30] (см. рис. 1.1).

Известно, что спектральная плотность мощности выходного сигнала фильтра определяется в соответствии с выражением:

$$S_y(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (1.1)$$

Рисунок 1.1

где $S_x(\omega)$ - спектральная плотность мощности входного сигнала;

$|W(j\omega)|^2$ - квадрат модуля частотной характеристики формирующего фильтра.

Учитывая, что $S_x(\omega)$, $S_y(\omega)$ и $|W(j\omega)|^2$ - чётные функции, их можно представить в виде:

$$\begin{cases} S_x(\omega) = \varphi(j\omega)\varphi(-j\omega); \\ S_y(\omega) = \psi(j\omega)\psi(-j\omega); \\ |W(j\omega)|^2 = W(j\omega)W(-j\omega). \end{cases} \quad (1.2)$$

Отсюда

$$W(j\omega) = \frac{\psi(j\omega)}{\varphi(j\omega)}. \quad (1.3)$$

Сложность частотной характеристики формирующего фильтра $W(j\omega)$ во многом будет определяться видом $S_x(\omega)$. При использовании в качестве входного сигнала «белого» шума с $S_x(\omega) = S_0$, получим:

$$W(j\omega) = \frac{\psi(j\omega)}{\sqrt{S_0}}. \quad (1.4)$$

Для моделирования случайного процесса с помощью ЭВМ необходимо найти импульсную характеристику формирующего фильтра:

$$h(\tau) = \frac{1}{2\pi\sqrt{S_0}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (1.5)$$

Выходной сигнал формирующего фильтра может быть определен различными способами в зависимости от принятого способа преобразования аналогового фильтра в

цифровой. Один из самых простых, но не эффективных способов в смысле временных затрат заключается в следующем:

$$Y(j) = \Delta\tau \sum_{i=0}^{N1} x(j-i)h(i), \quad (1.6)$$

где $N1$ - число отсчётов импульсной характеристики, зависящее от вида корреляционной функции;

$\Delta\tau$ - интервал дискретизации исследуемого процесса;

$h(i) = h(i\Delta\tau)$ - значение импульсной переходной характеристики формирующего фильтра.

Значение интервала дискретизации зависит от вида корреляционной функции, значения её параметров, допустимой относительной погрешности вычисления корреляционной функции δ и способа интерполяции корреляционной функции между узлами. Как правило, интервалы дискретизации временных рядов выбираются равными интервалам дискретизации корреляционных функций. Интервалы дискретизации и минимальное количество требуемых ординат корреляционной функции при линейной интерполяции и различных погрешностях представлены в таблице 1.1 ($\mu = \frac{\omega_0}{\alpha}$ - показатель колебательности) [28].

Интервалы дискретизации и минимальное количество требуемых ординат корреляционной функции

Таблица 1.1

№	$\rho_x(\tau)$	$\Delta\tau$	Количество ординат			
			$\delta=0,02$	$\delta=0,05$	$\delta=0,1$	$\delta=0,2$
1	$e^{-\alpha|\tau|}$	$\frac{\sqrt{8\delta}}{\alpha}$	9	6	4	3
2	$e^{-\alpha|\tau|}(1 + \alpha|\tau|)$	$\frac{\sqrt{8\delta}}{\alpha}$	13	9	7	5
3	$e^{-\alpha|\tau|}(1 - \alpha|\tau|)$	$\frac{\sqrt{8\delta/3}}{\alpha}$	19	13	10	7
4	$e^{-\alpha|\tau|}\left(1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2\tau^2}{3}\right)$	$\frac{\sqrt{24\delta}}{\alpha}$	10	7	5	4
5	$e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0\tau$	$\frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{8\delta}{|\mu^2 - 1|}}$	$47 \frac{\mu}{2\pi}$	$30 \frac{\mu}{2\pi}$	$21 \frac{\mu}{2\pi}$	$15 \frac{\mu}{2\pi}$
6, 7	$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0\tau \pm \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0\tau \right)$	$\frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{8\delta}{|\mu^2 + 1|}}$				

В автоматизированной системе предусмотрено автоматическое определение интервала дискретизации на основе информации о виде корреляционной функции. Кроме того, интервал дискретизации можно также задать вручную.

Более быстродействующий алгоритм моделирования случайных процессов связан с использованием рекурсивной фильтрации

$$y_n = \sum_{i=0}^N a_i x_{n-i} - \sum_{i=1}^N b_i y_{n-i} \quad (1.7)$$

Параметры a_i и b_i для фильтров, используемых в системе, определяются следующим образом (см. таблицу 1.2):

Алгоритмы рекурсивной фильтрации

Таблица 1.2

Вид модели	Генерирующий алгоритм	Параметры алгоритма
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|}$	$y_n = a_0 x_n + b_1 y_{n-1}$	$\gamma = \alpha \cdot \Delta t;$ $p = e^{-\gamma};$ $a_0 = \sqrt{1 - p^2};$ $b_1 = p$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$	$y_n = a_0 x_n + a_1 x_{n-1} + b_1 y_{n-1} + b_2 y_{n-2}$	$\gamma = \alpha \cdot \Delta t; \quad p = e^{-\gamma};$ $\alpha_0 = p^3(1 + \gamma) - p(1 - \gamma);$ $\alpha_1 = 1 - 4p^2\gamma - p^4;$ $a_0 = \sqrt{\frac{\alpha_1^2 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0^2}}{2}};$ $a_1 = \frac{\alpha_1}{a_0}; \quad b_1 = 2p; \quad b_2 = -p^2;$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 - \alpha|\tau|)$	$y_n = a_0 x_n + a_1 x_{n-1} + b_1 y_{n-1} + b_2 y_{n-2}$	$\gamma = \alpha \cdot \Delta t; \quad p = e^{-\gamma};$ $\alpha_0 = p^3(1 - \gamma) - p(1 + \gamma);$ $\alpha_1 = 1 + 4p^2\gamma - p^4;$ $a_0 = \sqrt{\frac{\alpha_1^2 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0^2}}{2}};$ $a_1 = \frac{\alpha_0}{a_0}; \quad b_1 = 2p; \quad b_2 = -p^2$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left(1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2 \tau^2}{3}\right)$	$y_n = a_0 x_n + a_1 x_{n-1} + a_2 x_{n-2} + b_1 y_{n-1} + b_2 y_{n-2} + b_3 y_{n-3}$	$\gamma_1 = \alpha \cdot \Delta t; \quad \gamma_2 = \alpha \cdot \Delta t; \quad p = e^{-\gamma};$ $\alpha_0 = p^4 \left(\frac{\gamma^2}{3} + \gamma + 1\right) - p^2 \left(\frac{\gamma^2}{3} - \gamma + 1\right)$ $\alpha_1 = p^5 \left(\frac{\gamma^2}{3} - \gamma - 2\right) - 6p^3 - p \left(\frac{\gamma^2}{3} + \gamma - 2\right)$ $\alpha_2 = p^6 - p^4(2\gamma^2 - 6\gamma - 3) + p^2(2\gamma^2 + 6\gamma - 3) - 1$ $y_{12} = \frac{-\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0\alpha_2 + 8\alpha_0^2}}{2\alpha_0}$ $a_0 = \sqrt{-\alpha_0 \frac{(y_1 + \sqrt{y_1^2 - 4})(y_2 + \sqrt{y_2^2 - 4})}{2}};$

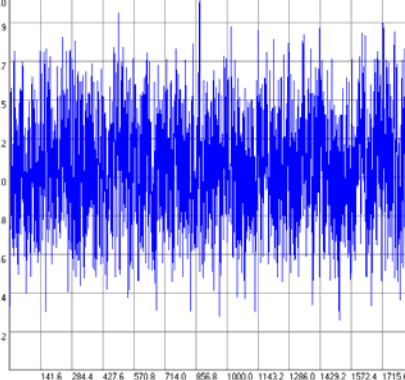

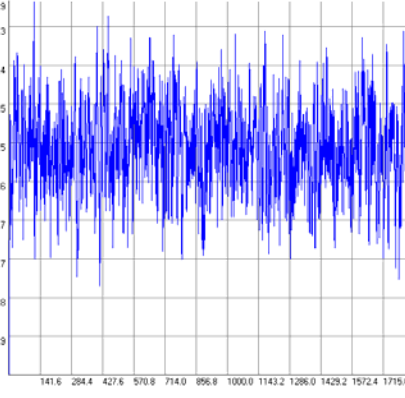
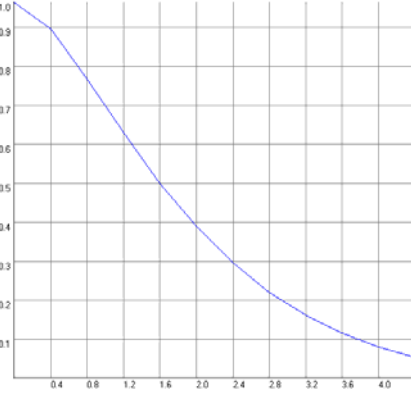
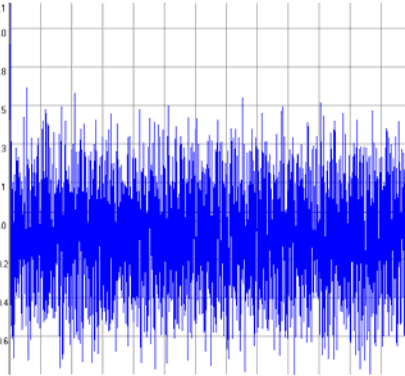
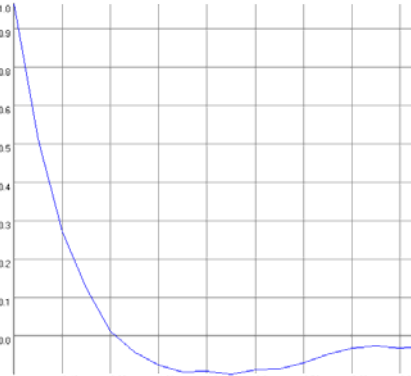
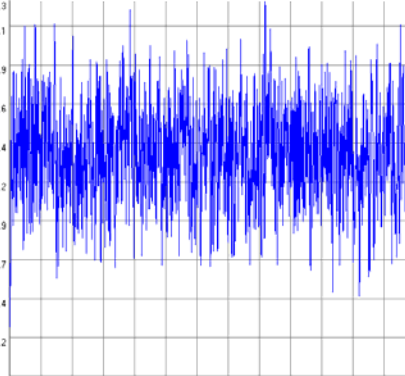
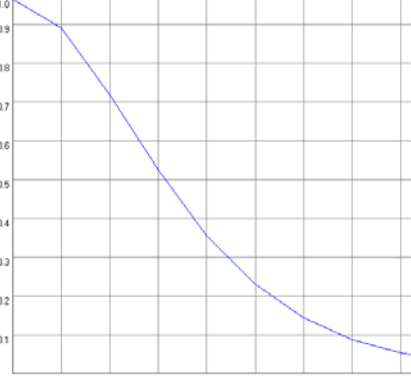
Вид модели	Генерирующий алгоритм	Параметры алгоритма
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( 1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2 \tau^2}{3} \right)$		$a_2 = \sqrt{-\alpha_0 \left((y_1 + \sqrt{y_1^2 - 4}) \cdot (y_2 + \sqrt{y_2^2 - 4}) \right)^2};$ $a_1 = -a_2 \left((y_1 + \sqrt{y_1^2 - 4}) + (y_2 + \sqrt{y_2^2 - 4}) \right)^2;$ $b_1 = -3p; \quad b_2 = 3p^2; \quad b_3 = -p^3$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$		$\gamma = \alpha \cdot \Delta t; \quad \gamma_0 = \omega_0 \cdot \Delta t; \quad p = e^{-\gamma};$ $\alpha_0 = p(p^2 - 1) \cos \gamma_0; \quad \alpha_1 = 1 - p^4;$ $a_0 = \sqrt{\frac{\alpha_1^2 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0^2}}{2}};$ $a_1 = \frac{\alpha_1}{a_0}; \quad b_1 = 2p \cos \gamma_0; \quad b_2 = -p^2$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$y_n = a_0 x_n +$ $a_1 x_{n-1} +$ $a_1 x_{n-2} +$ $b_1 y_{n-1} +$ $b_2 y_{n-2} +$ $b_2 y_{n-3}$	$\gamma = \alpha \cdot \Delta t; \quad \gamma_0 = \omega_0 \cdot \Delta t; \quad p = e^{-\gamma};$ $\alpha_0 = p(p^2 - 1) \cos \gamma_0 +$ $\frac{\alpha}{\omega_0} (1 + p^2) p \sin \gamma_0;$ $\alpha_1 = 1 - p^4 - 4p^2 \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \gamma_0 \cos \gamma_0;$ $a_0 = \sqrt{\frac{\alpha_1^2 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0^2}}{2}};$ $a_1 = \frac{\alpha_1}{a_0}; \quad b_1 = 2p \cos \gamma_0; \quad b_2 = -p^2$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$		$\gamma = \alpha \cdot \Delta t; \quad \gamma_0 = \omega_0 \cdot \Delta t; \quad p = e^{-\gamma};$ $\alpha_0 = p(p^2 - 1) \cos \gamma_0 -$ $\frac{\alpha}{\omega_0} (1 + p^2) p \sin \gamma_0;$ $\alpha_1 = 1 - p^4 + 4p^2 \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \gamma_0 \cos \gamma_0;$ $a_0 = \sqrt{\frac{\alpha_1^2 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0^2}}{2}};$ $a_1 = \frac{\alpha_1}{a_0}; \quad b_1 = 2p \cos \gamma_0; \quad b_2 = -p^2$

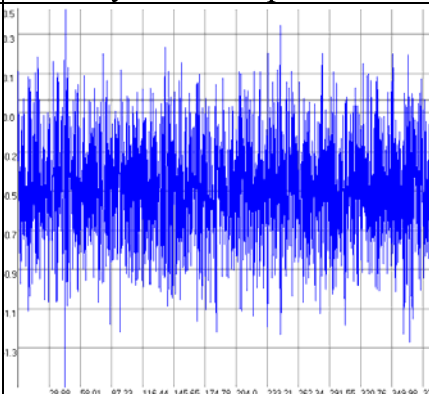
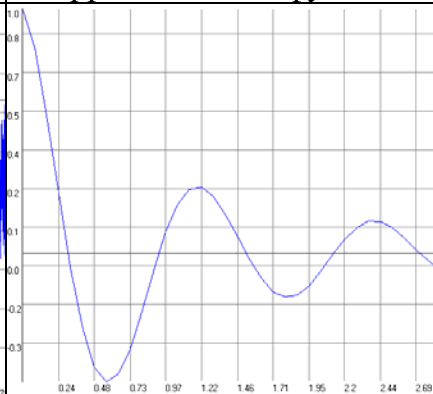
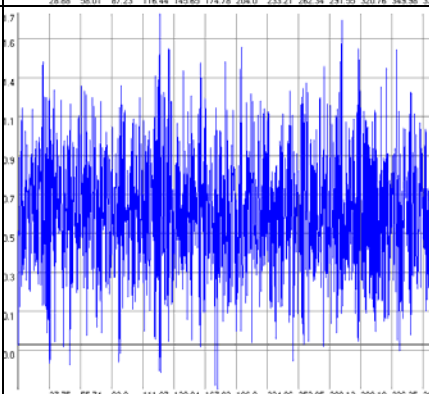
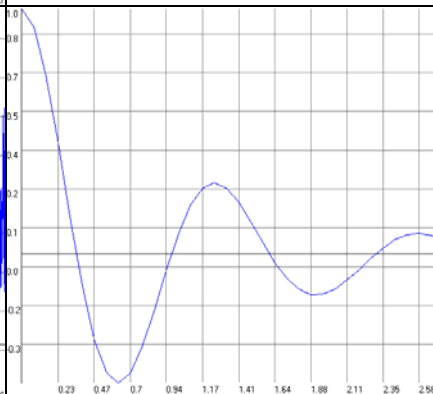
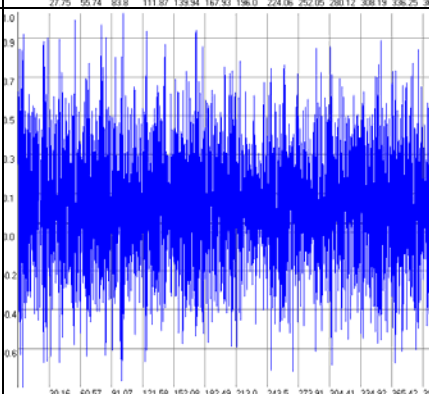
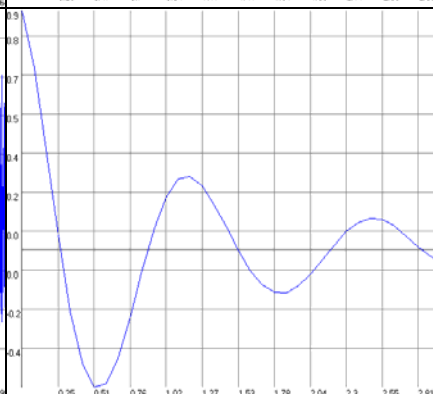
На первой странице автоматизированной системы осуществляется генерация случайного процесса с равномерной дискретизацией. При этом задается интервал дискретизации, количество отсчетов и вид корреляционной функции (может быть сгене-

рирован также «белый» шум). При генерации рассчитываются некоторые вероятностные характеристики процесса, а именно: математическое ожидание, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса и корреляционная функция. Типовые корреляционные функции, получаемые при анализе процессов, приведены в таблице 1.3.

Типовые корреляционные функции

Таблица 1.3

Вид функции	Случайный процесс	Корреляционная функция
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|}$		
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$		
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 - \alpha|\tau|)$		
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( 1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2 \tau^2}{3} \right)$		

Вид функции	Случайный процесс	Корреляционная функция
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$		
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$		
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$		

1.2. Интерфейс первой подсистемы

Первая страница приведена на рисунке 1.2.

На первой странице осуществляется генерирование исходного процесса. Для этого необходимо ввести:

- число отсчетов СП,
- шаг дискретизации,
- вид КФ,
- параметры КФ α , ω_0 ,
- погрешность моделирования,
- число отсчетов КФ.

В поле «Ед. врем.» задается длительность единичного интервала дискретизации в мкс. Указывать его необходимо при работе с подсистемой ввода-вывода, так при передаче случайного процесса интервал дискретизации должен быть не менее времени, необходимого для переключения канала, цифро-аналогового преобразования (при приеме сигнала) и т.д.

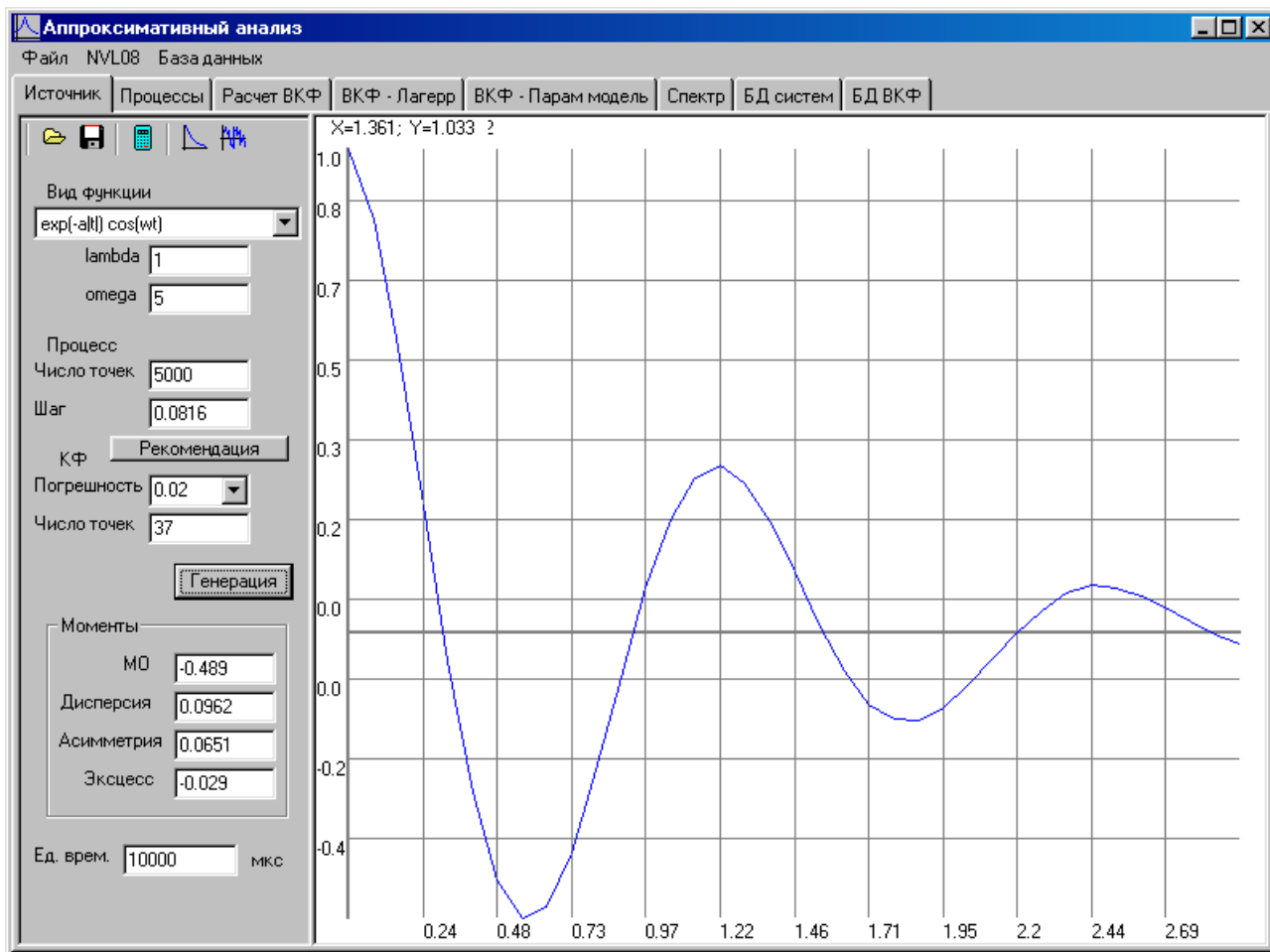







Рисунок 1.2. Генерирование исходного процесса

После нажатия на кнопку «Генерация» () СП будет смоделирован. Сразу же будут рассчитаны и отображены на панели математическое ожидание, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса и КФ процесса. Предусмотрена возможность отображения КФ и самого СП. Для этого нужно нажать на соответствующие кнопки   . Предусмотрена возможность открытия и сохранения СП в файле ( ). Форматы всех файлов приведены в приложении.

Для определения интервала дискретизации можно воспользоваться формой, вызываемой нажатием кнопки «рекомендация» и приведенной на рисунке 1.3.

Рисунок 1.3. Определение интервала дискретизации

Здесь необходимо выбрать вид функции и ее параметры и требуемую погрешность восстановления корреляционной функции. Вверху будут пересчитаны интервал дискретизации и число отсчетов корреляционной функции. В случае выбора интервала дискретизации для процесса, используемого для фильтрации несколькими фильтрами, нужно установить флажок «Второй фильтр». После нажатия «ОК» интервал дискретизации будет задан на первой странице.

1.3. Генерирование 2-х временных рядов с заданным видом корреляционной и взаимной корреляционной функций

При исследовании взаимных коррелометров, спектроанализаторов, анализаторов структурных функций возникает необходимость в генерировании временных рядов с заданным видом корреляционной и взаимной корреляционной функций.

Самый простой вариант решения этой задачи заключается в генерировании ПСП с заданным видом корреляционной функции и её задержке на заданный временной интервал [28]. Взаимная корреляционная функция в этом случае определяется выражением:

$$K_{xy}(\tau) = K_x(\tau - \tau_m), \quad (1.8)$$

где τ_m - требуемая величина задержки.

Эта задача также может быть решена и методом фильтрации с использованием единственного источника первичного сигнала (см. рис.1.4).

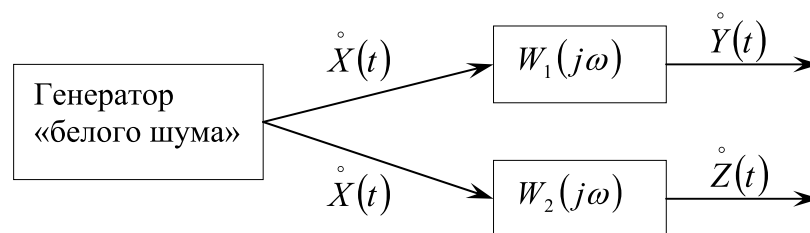


Рисунок 1.4. Генерирование пары коррелированных случайных процессов

Спектральные плотности мощностей сигналов $\dot{Y}(t)$ и $\dot{Z}(t)$ соответственно равны:

$$\begin{cases} S_x(\omega) = S_x(\omega)|W_1(j\omega)|^2; \\ S_z(\omega) = S_x(\omega)|W_2(j\omega)|^2; \\ S_{yz}(\omega) = S_x(\omega)W_1(j\omega)W_2(-j\omega); \\ S_{zy}(\omega) = S_x(\omega)W_1(-j\omega)W_2(j\omega), \end{cases} \quad (1.9)$$

где $W_1(j\omega)$, $W_2(j\omega)$ – частотные характеристики формирующих фильтров.

Причем, возможна последовательная комбинация любого числа формирующих фильтров, что позволяет генерировать разнообразные пары процессов. Полученная структура может быть дополнена также линиями задержки.

В приложении П.2 для примера приведены выражения для импульсных переходных характеристик формирующих фильтров, а в приложении П.3 - графики соответствующих им взаимных корреляционных функций.

Таким образом, для генерации двух процессов необходимо ПСП, сгенерированную на первой странице, передать на вход второй подсистемы, состоящей из двух модулей – по числу генерируемых случайных процессов. Первый модуль имеет в своем составе фильтр и блок дискретизации. Второй – фильтр, блок дискретизации и линию задержки. Задав параметры модулей, можно получить два процесса, взаимная корреляционная функция которых рассчитывается при дальнейшей работе с системой (см. рис. 1.5).

1.4. Генерирование неэквидистантных временных рядов

Генерирование пары неэквидистантных временных рядов осуществляется с помощью прореживания исходной пары временных рядов с учетом модели потока событий. При этом поток может генерироваться как независимо, так и с учетом особенностей регулярного временного ряда. Примерами первого являются периодическая дискретизация со случайными пропусками наблюдения, периодическая дискретизация с дрожанием, аддитивная случайная дискретизация; второго – адаптивная дискретизация [2, 3, 11, 33].

Поскольку алгоритм получения неэквидистантного временного ряда для каждого из пары генерируемых процессов один, рассмотрим его для процесса $\{x_{ji}(t_{ji})\}_{j=1, \dots, N}^{i=1, \dots, M_j}$, состоящего из массива мгновенных значений x_{ji} и соответ-

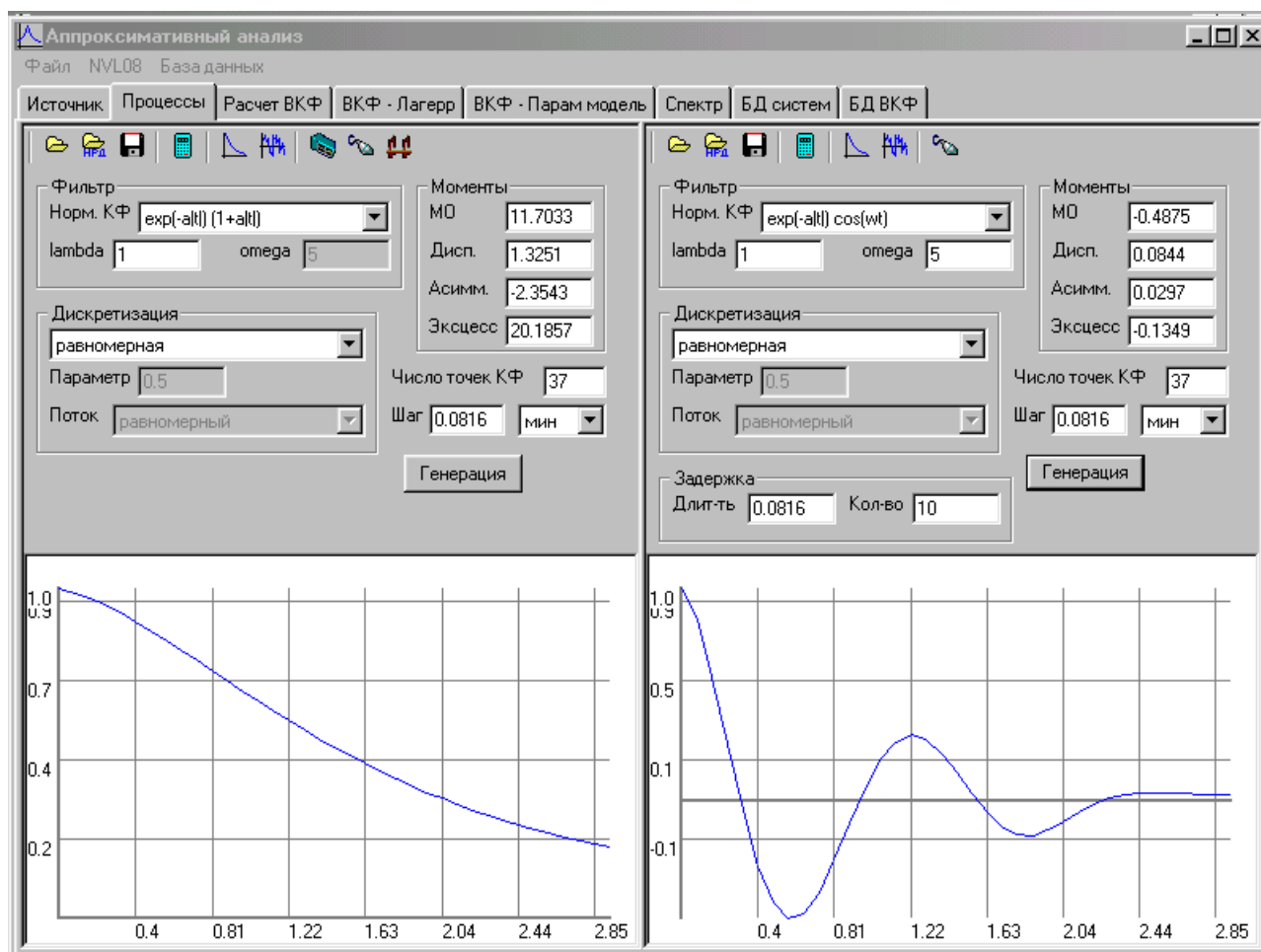


Рисунок 1.5. Генерирование пары процессов с заданными корреляционными функциями

вующих им меток времени t_{ji} . Такое представление позволяет для описания массива значений $\{x_{ji}\}$ использовать математический аппарат теории случайных процессов, а для описания временной последовательности $\{t_{ji}\}$ – математический аппарат теории потоков событий [3, 11, 33].

Независимо от особенностей математического описания $\{x_{ji}\}$ и $\{t_{ji}\}$ неэквидистантные временные ряды можно разбить на два класса:

- характеристики потока событий $\{t_{ji}\}$ не зависят от характеристик исследуемого случайного процесса;
- характеристики потока событий $\{t_{ji}\}$ полностью определяются характеристиками исследуемого случайного процесса.

К первому классу неэквидистантных временных рядов приводит непреднамеренная случайная дискретизация, не зависящая от желания исследователя, ко второму классу – преднамеренная нерегулярная дискретизация, например, адаптивно-

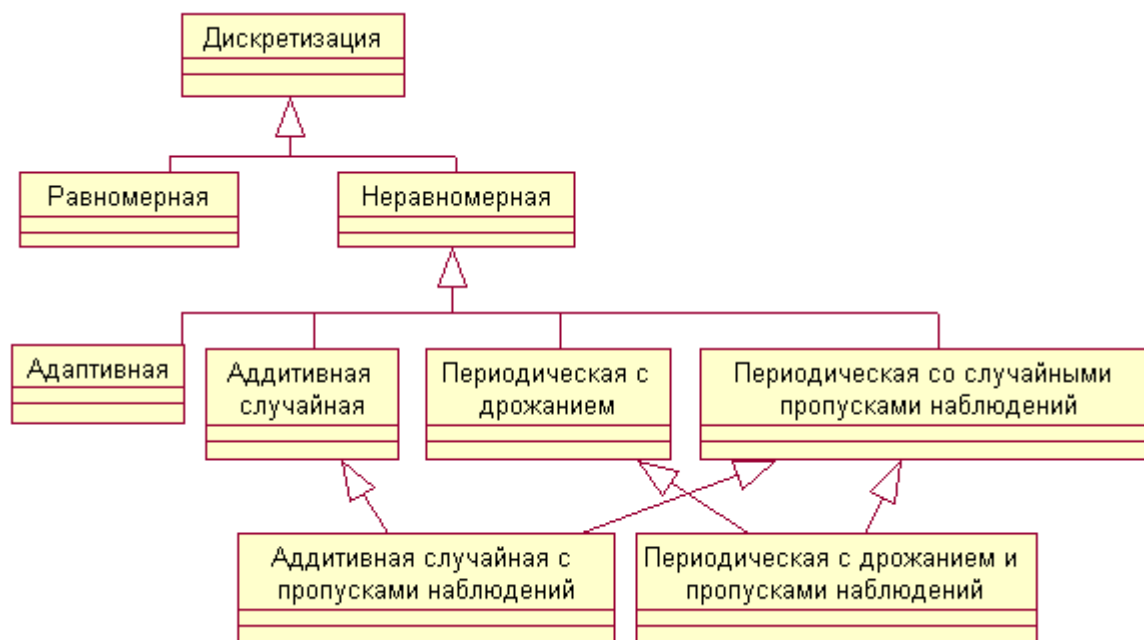


Рисунок 1.6. Типы дискретизации случайных процессов (Методология UML)

временная, вводимая по желанию пользователя.

В автоматизированной системе рассматриваются следующие типовые модели неэквидистантных временных рядов, широко применяемые на практике как при описании, так и при метрологическом анализе алгоритмов оценивания вероятностных характеристик неэквидистантных временных рядов, описанные с помощью моделей рекуррентных потоков Пальма [11]:

- периодической дискретизации со случайными пропусками наблюдений;
- периодической дискретизации «с дрожанием»;
- аддитивной случайной дискретизации (см. рис.1.6).

Для периодического потока со случайными пропусками наблюдений интервал дискретизации определяется следующим образом:

$$\Delta t_{ji} = Y_{ji} \Delta t_0, \quad (1.10)$$

где Y_{ji} – случайная величина, распределенная по сдвинутому на единицу закону Паскаля с параметром p [6]

$$P(Y = m) = pq^{m-1}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (1.11)$$

Мгновенное значение выборки случайного процесса и соответствующие ему метки времени равны

$$\begin{cases} t^*_{ji} = \Delta t_0 \sum_{k=1}^i Y_{jk}; \\ x^*_{ji} = x_{ji}(t^*_{ji}). \end{cases} \quad (1.12)$$

Для периодического потока с дрожанием

$$\begin{cases} t^*_{ji} = i\Delta t_0 + \xi_{ji}; \\ x^*_{ji} = x_{ji}(t^*_{ji}). \end{cases} \quad (1.13)$$

где ξ – независимые случайные величины с плотностью вероятности $f_\xi(\xi)$, каждая из которых расположена в диапазоне $\left(-\frac{\Delta t_0}{2}, \frac{\Delta t_0}{2}\right)$.

Для аддитивного случайного потока

$$\begin{cases} t^*_{ji} = t_{ji-1} + \xi_{ji}; \\ x^*_{ji} = x_{ji}(t^*_{ji}). \end{cases} \quad (1.14)$$

где ξ – независимые случайные величины с плотностью вероятности $f_\xi(\xi)$, каждая из которых расположена в диапазоне $(0, \infty)$.

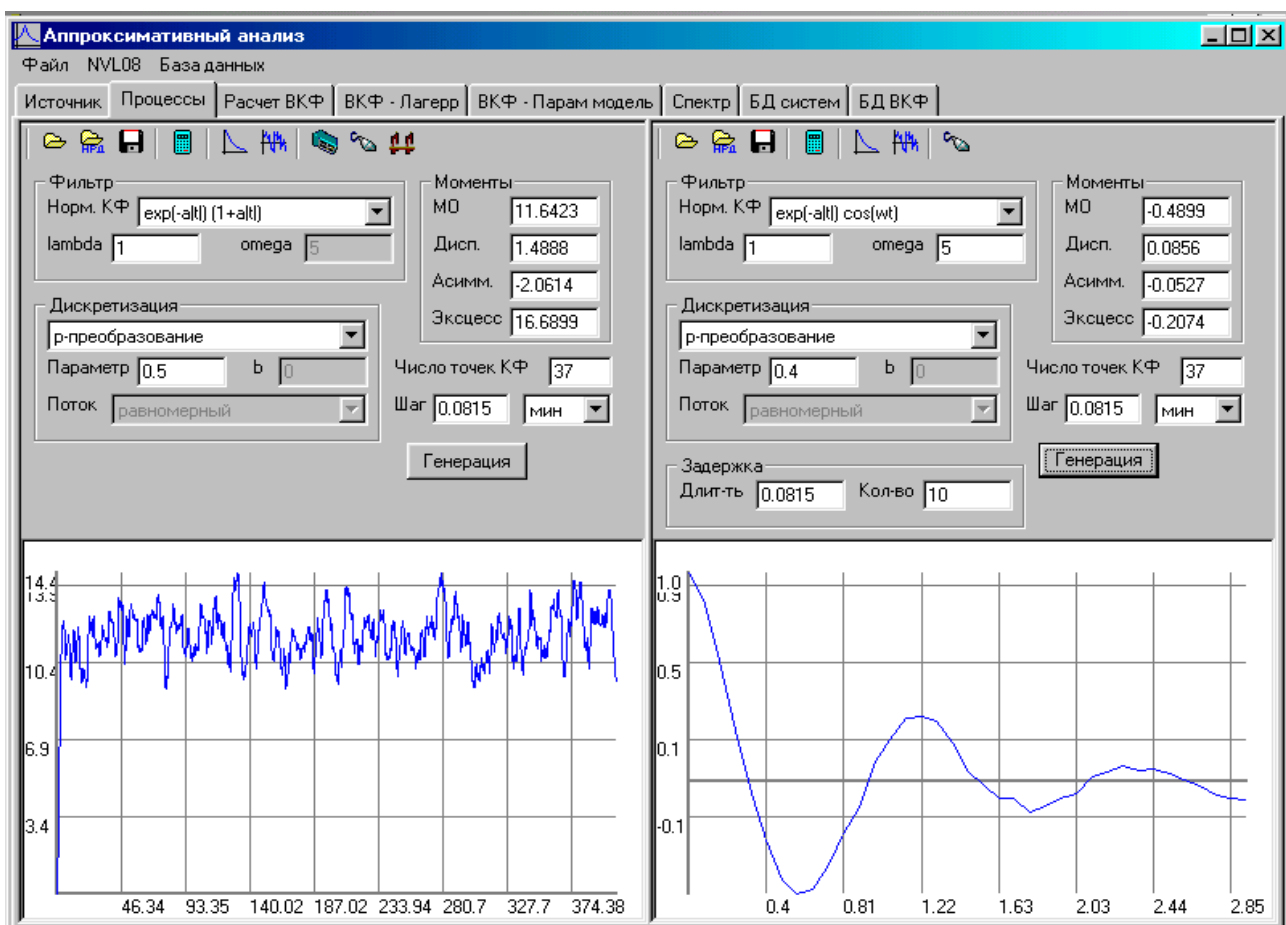


Рисунок 1.7. Генерирование пары неэквилидистантных временных рядов

Алгоритм адаптивно-временной дискретизации основан на том, что отбрасываются все элементы ряда, значения которых выходят за некоторое установленное отклонение ε , то есть:

$$\begin{cases} t_{j1}^* = t_{j1}; \\ t_{jk}^* = t_{ji} \delta_{jik}; \quad k, i = 2, 3, \dots, \\ x_{jk}^* = x_{ji}(t_{ji}^*); \end{cases} \quad (1.15)$$

где

$$\delta_{jik} = \sum_{n=k-1}^i \text{sign} \left(\left| x_{jk} - \frac{x_{ji}t_{jk} - x_{jk}t_{ji}}{t_{jk} - t_{ji}} t_n + \frac{x_{ji}t_{jk} - x_{jk}t_{ji}}{t_{jk} - t_{ji}} - x_n \right| - \varepsilon \right). \quad (1.16)$$

Проводя описанные преобразования над процессами с равномерной дискретизацией в результате можно получить пару неэквилидистантных временных рядов.

1.5. Интерфейс второй подсистемы

Вторая страница реализует интерфейс второй подсистемы. Она состоит из двух панелей, соответствующих двум процессам, получаемым после фильтрации, изменения типа дискретизации и задержки (для второго процесса).

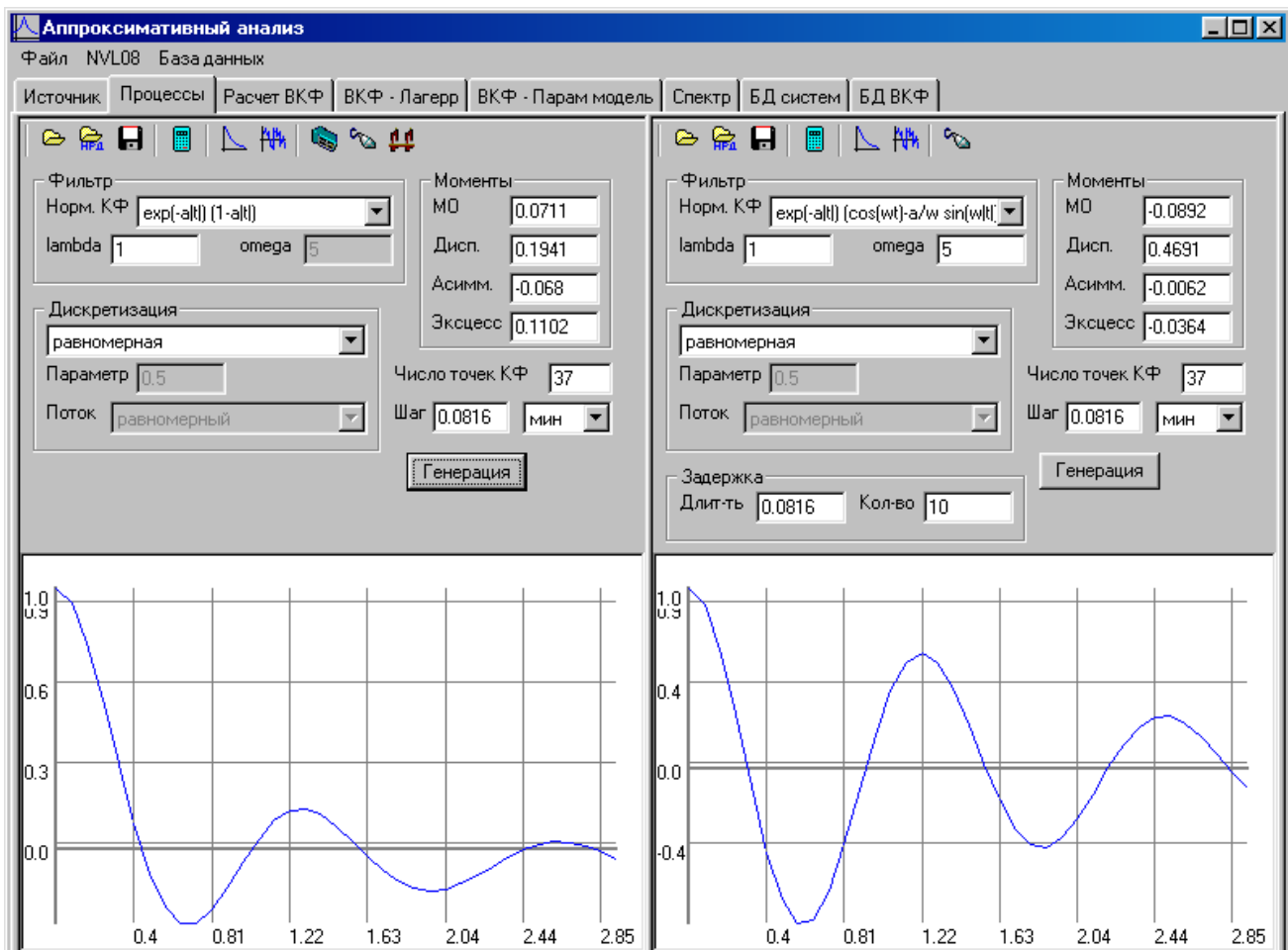


Рисунок 1.8. Страница генерации двух ПСП

Для генерации процессов необходимо задать параметры модулей. Для фильтра требуется указать вид фильтра и два параметра (λ и ω_0). Можно выбрать один из 5 типов дискретизации для каждого процесса (равномерная, с дрожанием, аддитивная, адаптивная и р-преобразование). Для р-преобразования и адаптивной дискретизации необходимо задать параметр (вероятность того, что отсчет останется в процессе и величину коридора соответственно). Для аддитивной дискретизации и дискретизации с дрожанием нужно задать поток (равномерный или нормальный).

Для второго процесса необходимо задать величину задержки и количество задержек. Если величина задержки равна интервалу дискретизации первого процесса, то количеством задержек можно задавать суммарную задержку, кратную интервалу дискретизации первого процесса.

Фильтра может и не быть (установить «нет» в окне «фильтр»). Задержка может равняться 0 (установить «кол-во» в 0).




Шаг КФ в первом и втором процессах автоматически определяется при генерации как минимальный шаг в процессе. Однако алгоритм его определения может быть изменен в соседнем окне. Предусмотрено определение шага КФ как среднего среди интервалов в процессе и задано вручную. Число отсчетов КФ определяется автоматически, но также может быть изменено при установке ручного режима.




Шаг КФ в первом процессе при генерации автоматически рекомендуется в качестве величины задержки во второй процесс.

При генерации пары процессов минимальный шаг из двух шагов КФ рекомендуется в качестве интервала дискретизации ВКФ на третью страницу.


При генерации осуществляется расчет моментов каждого процесса, расчет и отображение корреляционных функций внизу страницы.

Процесс, полученный на первой странице можно пропустить через фильтр, задержать, сохранить и результат опять открыть на первой странице. Таким образом, можно реализовать использование неограниченного числа фильтров для получения СП. Важное условие при этом: фильтрации подвергаются только процессы с равномерной дискретизацией. Аналогичным образом может быть достигнут смешанный тип дискретизации СП (например, р-преобразование с дрожанием).


При открытии процесса необходимо контролировать тип файла (он автоматически не проверяется) и нажимать нужную кнопку для равномерной () и неравномерной () дискретизации открываемых процессов. При сохранении () формат файла определяется автоматически.

Две правые кнопки с графиками   нужны для отображения КФ и СП соответственно. Также выбор отображаемого графика (КФ, СП, плотность распределения интервалов дискретизации) можно сделать, выбрав соответствующий пункт в контекстном меню, всплывающем по правому клику мыши на поле графика. Отметим, что пересчитать корреляционную функцию при изменении алгоритма определения интервала принудительной дискретизации при анализе НВР можно по кнопке , задав предварительно параметры алгоритма.

Для анализа интервалов дискретизации при получении НВР предусмотрена возможность сохранения их в файл. Для этого нужно выбрать пункт всплывающего меню «Сохранить t в файл».

Предусмотрена возможность передачи процесса, полученного на первой странице через ЦАП, и прием процесса на вторую страницу через АЦП. После нажатия на кнопку  производится переход в подсистему ввода-вывода. При этом в качестве

передаваемого процесса в подсистему ввода-вывода поступает процесс, полученный на правой панели страницы. При этом учитывается длительность интервала дискретизации, заданная на первой странице для процесса-источника и определяющая интервал дискретизации передаваемого процесса в мкс.

Процедура передачи процесса описана в разделе 7. Принятый процесс, поступающий из подсистемы ввода-вывода, становится вторым процессом в паре. Его характеристики рассчитываются и отображаются на правой панели страницы. Сравнение принятого и переданного процесса и определение погрешностей передачи можно после нажатия кнопки . Отметим, что дискретизация передаваемого процесса может быть как регулярной, так и нерегулярной, в то время как принимаемый процесс является чаще всего неэквидистантным.

2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

2.1. Основные понятия и определения

Часто исследователь имеет дело либо с **цифровыми данными**, полученными в ходе эксперимента с помощью информационно-измерительных систем, автоматизированных систем научных исследований, либо – в ходе **цифрового моделирования** того или иного процесса или явления [1, 27].

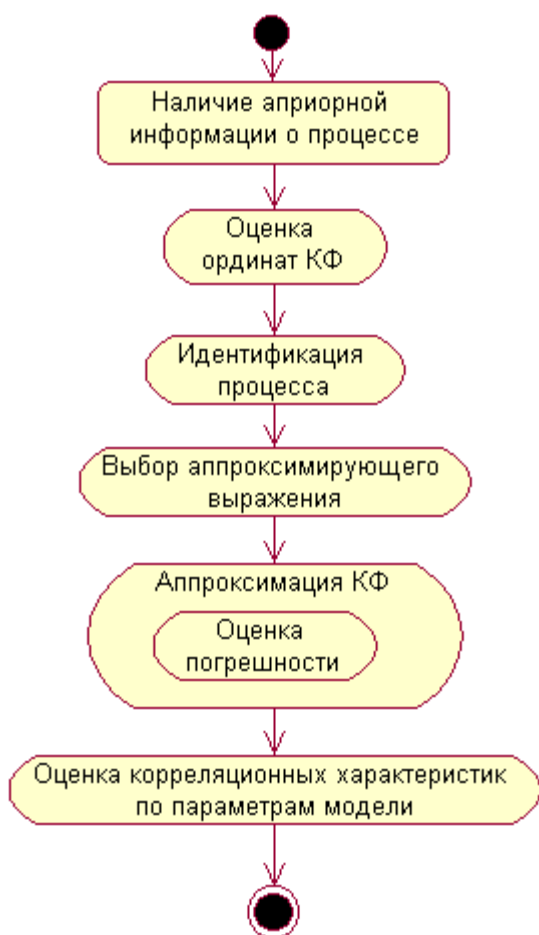


Рисунок 2.1. Алгоритм корреляционного анализа

Блок-схема алгоритма корреляционного анализа представлена на рис. 2.1.

В тех случаях, когда исследователь располагает только одной реализацией, при проведении корреляционного анализа, как правило, используется мультипликативный алгоритм, инвариантный к закону распределения случайного процесса.

При этом интервал дискретизации корреляционной функции, как правило, выбирают равным $\Delta\tau = \Delta t_0$.

Для получения достоверных оценок (статистическая погрешность 0,02-0,05), как показали исследования, количество отсчетов $M=5000-2000$ соответственно [24].

И в первом и во втором случае исследователь имеет дело со случайными последовательностями

$$\{x_{ji}, t_{ji} / \Delta t_{ji}\}_{i=1, \dots, M}^{j=1, \dots, N}, \quad (2.1)$$

где j – номер реализации; i – номер отсчета в j -ой реализации; t_{ji} – время отсчёта;

$$\Delta t_{ji} = t_{j,i+1} - t_{ji}. \quad (2.2)$$

При $\Delta t_{ji} = \Delta t_0 = const$ исследователь имеет дело с **регулярной** временной последовательностью – регулярным временным рядом.

Выражения (В.21)-(В.23) для оценки корреляционной функции при анализе последовательностей примут вид:

$$\begin{cases} \hat{K}_{xi}(J\Delta\tau) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji} x_{j,i+J}; \\ \hat{K}_{xj}(J\Delta\tau) = \frac{1}{M-J-1} \sum_{i=1}^{M-J} x_{ji} x_{j,i+J}; \\ \hat{K}_{xcp}(J\Delta\tau) = \frac{1}{N(M-J-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{M-J} x_{ji} x_{j,i+J}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Следует отметить, что при аппроксимации корреляционных функций с помощью ЭВМ не важно, какая характеристика аппроксимируется – t -текущая, j -текущая или средняя, – подход один и тот же [28].

2.2. Метод и алгоритмы корреляционного анализа неэквилидистантных временных рядов с использованием интервальной корреляционной функции

В соответствии с общей теорией статистических измерений выражение для оценки вероятностных характеристик неэквилидистантных временных рядов примет вид [33]:

$$\hat{\Theta}[X(t)] = S_d g \left\{ \left[x_{ji}(t_{ji}) \right]_{j=1,2,\dots,N}^{i=1,2,\dots,M_j} \right\}. \quad (2.4)$$

Отсюда видны основные отличия алгоритмов оценивания вероятностных характеристик неэквилидистантных временных рядов от классических алгоритмов:

1. x_{ji}, t_{ji} и M_j являются случайными величинами;
2. необходимо определить вид функционального преобразования $g[]$, учитывающий специфику представления входных данных x_{ji}, t_{ji} и M_j ;
3. необходимо определить вид оператора усреднения S_d .

При оценке корреляционных функций неэквилидистантных временных рядов, аргументом которых являются t, t' или τ , необходимо учитывать нерегулярность временного ряда, так как $\Delta t_{ji} = t_{j,i+1} - t_{ji} = random$. В этом случае применение классических алгоритмов корреляционного анализа без восстановления пропущенных отсчётов невозможно - получится неверный результат.

Предположим, что в результате эксперимента получена совокупность центрированных неэквилидистантных временных рядов (в противном случае ряды необходимо предварительно центрировать):

$$\left[\overset{\circ}{x}_{ji}(t_{ji}) \right]_{j=1,\dots,N}^{i=1,\dots,M_j}. \quad (2.5)$$

Отметим, что длительность j -реализации ряда

$$T_j = \sum_{i=1}^{M_j-1} \Delta t_{ji}. \quad (2.6)$$

Восстановив пропущенные отсчёты по какому-либо алгоритму восстановления (пока неважно по какому), получим регулярный временной ряд с интервалом дискретизации $\Delta\tau$ между отсчётами:

$$\left[\overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} \right]_{j=1,\dots,N}^{n=1,\dots,M^*j}, \quad (2.7)$$

где $\overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)}[(n-1)\Delta\tau]$ – модельное значение x регулярного временного ряда;

$$M_j^* = ent \left[\frac{T_j}{\Delta\tau} \right] - \text{объём выборки } j\text{-ой реализации восстановленного ряда.}$$

В каждом j -ом ряду случайным образом будут расположены и существенные, и модельные отсчеты, причём, в ряде случаев модельные и существенные значения будут совпадать – $\overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)}[(n-1)\Delta\tau] = \overset{\circ}{x}_{ji}(t_{ji})$.

Пусть требуется найти **j -текущую** оценку корреляционной функции стационарного неэквилидистантного временного ряда с учетом восстановления пропущенных отсчётов. В этом случае при оценке корреляционной функции возможны четыре варианта произведений существенных и модельных отсчётов. Для однозначности ве-

дем индикатор состояния $\delta_{jn,k}$, который в зависимости от выполнения некоторых условий принимает одно из двух значений: 0 или 1 [33]. Тогда

$$\widehat{K}_{x_j}(J) = M \left[\overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)} \right] = M \left[\overset{\circ}{x}_{jn} \overset{\circ}{x}_{j,n+J} \delta_{jn,1} + \overset{\circ}{x}_{jn} \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)} \delta_{jn,2} + \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} \overset{\circ}{x}_{j,n+J} \delta_{jn,3} + \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)} \delta_{jn,4} \right], \quad (2.8)$$

$$\text{где } \delta_{jn,1} = \begin{cases} 1, \text{ если } \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{jn} \cap \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{j,n+J}; \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases}$$

$$\delta_{jn,2} = \begin{cases} 1, \text{ если } \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{jn} \cap \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)}; \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases}$$

$$\delta_{jn,3} = \begin{cases} 1, \text{ если } \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} \cap \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{j,n+J}; \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases}$$

$$\delta_{jn,4} = \begin{cases} 1, \text{ если } \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{jn}^{(M)} \cap \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)} = \overset{\circ}{x}_{j,n+J}^{(M)}; \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

В том случае, когда восстановление пропущенных отсчётов невозможно или алгоритм восстановления неизвестен, необходимо обрабатывать только существенные отсчёты неэквидистантного временного ряда. Тогда $\delta_{jn,1} = 1$, а $\delta_{jn,2} = \delta_{jn,3} = \delta_{jn,4} = 0$, и корреляционная функция будет определяться выражением:

$$\widehat{K}_{x_j}(J) = M \left[\overset{\circ}{x}_{jn} \overset{\circ}{x}_{j,n+J} \right]. \quad (2.9)$$

Полученное выражение, из-за случайного характера расположения существенных отсчетов в восстановленном ряду, не позволяет синтезировать алгоритм для оценки корреляционной функции, так как значение индекса \mathbf{n} не определяет датирование отсчётов неэквидистантного временного ряда. Напомним, что в неэквидистантном временном ряду значение второго индекса \mathbf{i} не определяет время прихода существенного отсчёта, а определяет лишь его место в массивах данных, подлежащих обработке.

Заметим, что значение индикатора состояния $\delta_{jn,1} = 1$ только в том случае, когда на временном интервале $J\Delta\tau$ находятся два существенных отсчёта неэквидистантного временного ряда $\overset{\circ}{x}_{j_i}(t_{j_i}) = \overset{\circ}{x}_{jn}$ и $\overset{\circ}{x}_{j_{i+s}}(t_{j_{i+s}}) = \overset{\circ}{x}_{j,n+J}$, где s - целая случайная величина, характеризующая количество пропущенных существенных отсчётов. Значение случайной величины s при оценке корреляционной функции находится в диапазоне $(0, L \leq J_{max})$, при этом равенство соблюдается только для регулярного потока.

Таким образом, необходимо ввести новый индикатор состояния, который бы однозначно определял отсчёт $\overset{\circ}{x}_{j_{i+s}}(t_{j_{i+s}})$, отстоящий от отсчёта $\overset{\circ}{x}_{j_i}(t_{j_i})$ на временном интервале $J\Delta\tau$. Так как в общем случае t_{j_i} являются действительными, а не целыми числами, определим индикатор состояния с использованием оператора выделения целой части $ent[\]$ в виде:

$$\delta_{j,i+s} = \begin{cases} 1, \text{ent} \left[\frac{t_{j,i+s} - t_{ji}}{\Delta\tau} + 0,5 \right] = J; \\ 0, \text{иначе.} \end{cases} \quad (2.10)$$

Выражение для определения отсчёта ряда с учётом (2.10) и фильтрующего свойства индикатора состояния (аналогичного фильтрующему свойству δ -функции) примет вид:

$$\overset{\circ}{x}_{j,i}(t_{ji} + J\Delta\tau) = \sum_{s=0}^L \overset{\circ}{x}_{j,i+s} \delta_{j,i+s}. \quad (2.11)$$

С учётом (2.11) выражение (2.9) представим в виде:

$$\widehat{K}_{xj}(J) = M \left[\overset{\circ}{x}_{ji} \sum_{s=0}^L \overset{\circ}{x}_{j,i+s} \delta_{j,i+s} \right]. \quad (2.12)$$

Заметим, что количество произведений существенных отсчётов в выражении (2.12) будет равно сумме индикаторов состояния:

$$d = \sum_{i=1}^{Mj} \sum_{s=0}^L \delta_{j,i+s} \leq M_j \leq M_j^*. \quad (2.13)$$

Это значение d используется для усреднения при получении оценок корреляционных функций. С учетом выражения (2.13) выражение (2.12) запишется в виде:

$$\widehat{K}_{xj}(J) = \frac{\sum_{i=1}^{Mj} \overset{\circ}{x}_{ji} \sum_{s=0}^L \overset{\circ}{x}_{j,i+s} \delta_{j,i+s}}{\sum_{i=1}^{Mj} \sum_{s=0}^L \delta_{j,i+s}}. \quad (2.14)$$

Разделив числитель и знаменатель в (2.14) на M_j , окончательно получим:

$$\widehat{K}_{xj}(J) = \frac{\frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{Mj} \overset{\circ}{x}_{ji} \sum_{s=0}^L \overset{\circ}{x}_{j,i+s} \delta_{j,i+s}}{\frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{Mj} \sum_{s=0}^L \delta_{j,i+s}}. \quad (2.15)$$

Выражение

$$\widehat{C}_{xj}(J) = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{Mj} \sum_{s=0}^L \delta_{j,i+s}. \quad (2.16)$$

называется **j-текущей** оценкой **интервальной корреляционной функции** и характеризует распределение отсчётов в потоке, находящихся на временном интервале $J\Delta\tau$ [33].

Отсюда видно, что выражение (2.15) отличается от классического алгоритма **j-текущей** оценки корреляционной функции:

1. видом функционального преобразования $g \left[\overset{\circ}{x}_{ji} \sum_{s=0}^L \overset{\circ}{x}_{j,i+s} \delta_{j,i+s} \right]$, учитывающе-

го специфику представления входных данных $\overset{\circ}{x}_{ji}, t_{ji}, L$ и $\Delta\tau$;

2. видом оператора усреднения $S_d = \frac{\sum_{i=1}^{Mj}}{\sum_{i=1}^{Mj} \sum_{s=0}^L \delta_{j,i+s}}$ и значением d ;

3. переходом алгоритма в **новый класс – класс косвенных алгоритмов** оценивания корреляционных функций.

Таким образом, j -текущая оценка корреляционной функции зависит от интервальной корреляционной функции потока отсчётов неэквидистантного временного ряда. Назовем этот алгоритм **алгоритмом с использованием интервальной корреляционной функции (АИИКФ)**, а метод - **косвенным методом оценивания корреляционных функций неэквидистантных временных рядов с использованием интервальной корреляционной функции**.

Заметим, что для регулярного временного ряда с интервалом дискретизации $\Delta\tau$ $M_j = M$ и, как видно из выражения (2.10),

$$\delta_{j,i+s} = \begin{cases} 1, & \text{если } s = J; \\ 0, & \text{если } s \neq J. \end{cases} \quad (2.17)$$

Из выражения (2.13) следует, что $d = M - J$ и

$$\hat{C}_{xj}(J) = \frac{1}{M - J} \sum_{i=1}^{M-J} \sum_{s=0}^L \delta_{j,i+s} = 1. \quad (2.18)$$

Подставив выражение (2.17) в выражение (2.15), окончательно получим:

$$\hat{K}_{xj}(J) = \frac{1}{M - J} \sum_{i=1}^{M-J} x_{ji} \overset{\circ}{x}_{j,i+J}. \quad (2.19)$$

Отметим, что выражение (2.19) является **частным случаем** выражения (2.14) или (2.15) для регулярного временного ряда и представляет собой **классический мультипликативный алгоритм j -текущей оценки корреляционной функции**.

При синтезе аппаратных, аппаратно-программных средств j -текущей оценки корреляционной функции неэквидистантного временного ряда или интервальной корреляционной функции потока отсчётов целесообразно использовать выражение (2.14). При теоретических же исследованиях, особенно при анализе погрешностей оценивания, – выражение (2.15), так как оно в явном виде содержит интервальную корреляционную функцию, что позволяет использовать при решении ряда задач математический аппарат, разработанный для анализа результатов косвенных измерений [107].

На основе выражения (2.15) возможен синтез алгоритмов для оценивания различных корреляционно-структурных функций, в том числе, и взаимных корреляционных. Следует заметить, что необходимо оценивать две ветви взаимных корреляционных функций. При оценке правой ветви $\overset{\circ}{x}_{j,i+s} = \overset{\circ}{y}_{j,i+s}$, а левой – $\overset{\circ}{x}_{ji} = \overset{\circ}{y}_{ji}$

2.3. Идентификация корреляционных функций

Рассмотрим особенности идентификации корреляционных функций.

Следует отметить, что этой задаче всегда уделялось большое внимание [28, 29, 39, 44].

На практике задачу идентификации решают на основе анализа:

1. статистической корреляционной функции и её соответствия теоретической кривой (см. приложение П.4);
2. фазовых портретов.

При большом числе экспериментальных данных в ряде случаев по виду корреляционной функции можно высказать предположение о её виде. На рис. 2.2, в качестве примера, приведена статистическая корреляционная функция ($M=1000$), которую

можно отнести к $\rho_x(\tau) = e^{-\lambda|\tau|} \cos \omega_0 \tau$, $\mu \approx 5$ (пять пересечений корреляционной функции оси τ на интервале корреляции). Однако, при большом показателе колебательности возможны ошибки идентификации.

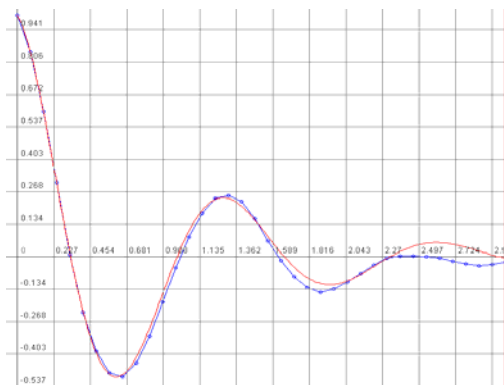


Рисунок 2.2

Поэтому, представляется более перспективным, как и в случае идентификации законов распределения, использование фазовых портретов. Под фазовым портретом будем понимать графическую зависимость, построенную в координатах: $\rho_x(\tau)$ и $\rho'_x(\tau)$ (см. рис. 2.3)

$$\rho'_x(\tau) = \Phi_x[\rho_x(\tau)]. \quad (2.20)$$

Следует отметить, что каждому типу корреляционных функций соответствует свой, уникальный фазовый портрет, зависящий от показателя колебательности. На практике при построении фазового портрета вместо значения производных корреляционных функций возможно определение её приращений на заданном интервале.

Для сравнения фазовых портретов определим квадратическую погрешность в виде:

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=0}^{J \max} [\Phi_m[\rho_x(\tau_i)] - \Phi_x[\rho(\tau_i)]]^2}{\sum_{i=0}^{J \max} \Phi_m^2[\rho_x(\tau_i)]}, \quad (2.21)$$

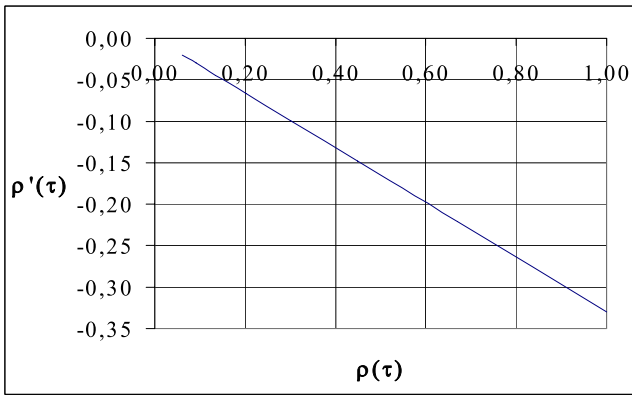
где $\Phi_m[\rho_x(\tau_i)]$ - эталонный фазовый портрет.

На рис. 2.3 приведены фазовые портреты широко применяемых однопараметрических и колебательных моделей. Следует отметить, что за исключением фазового портрета корреляционной функции $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}(1 - \alpha|\tau|)$, все фазовые портреты однопараметрических моделей расположены в четвертом квадранте и не пересекают ось абсцисс. Кроме этого, фазовые портреты второй и четвертой моделей очень близки по форме и отличаются лишь численными значениями, в частности, значениями минимума.

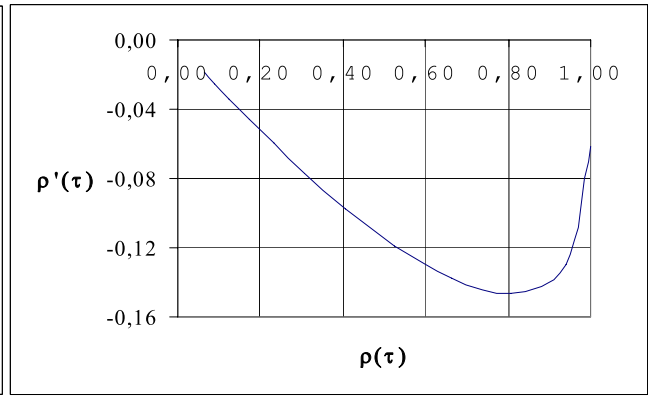
Фазовые портреты колебательных моделей расположены во всех квадрантах. Причем, количество пересечений оси абсцисс зависит не от вида корреляционной функции, а от численного значения показателя колебательности $\mu = \omega_0 / \alpha$.

Алгоритм идентификации КФ на основе анализа фазовых портретов заключается в выполнении следующих этапов:

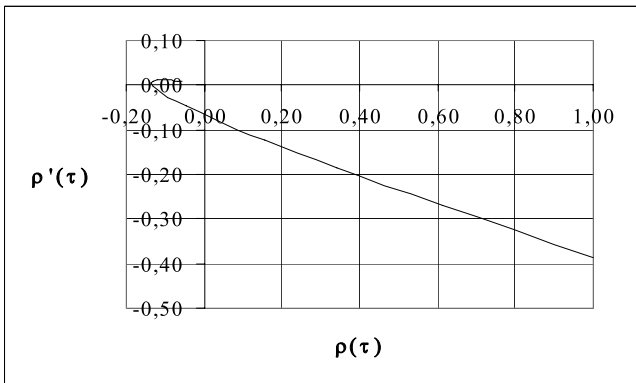
1. построение фазового портрета экспериментальной КФ;
2. выбор типа модели (экспоненциальная, колебательная); построение фазового портрета типовой КФ из выбранной группы и использование ее в качестве эталона;
3. сравнение портретов (вычисление квадратической погрешности);
4. в случае неудовлетворительного результата, следует:
 - повторить алгоритм с п.3, использовав при этом в качестве эталонной другую типовую функцию;
 - выбрать из всех имеющихся такую функцию, которая дает минимальное значение погрешности;
 - подобрать коэффициент колебательности эталонной модели таким образом, чтобы погрешность была минимальной.



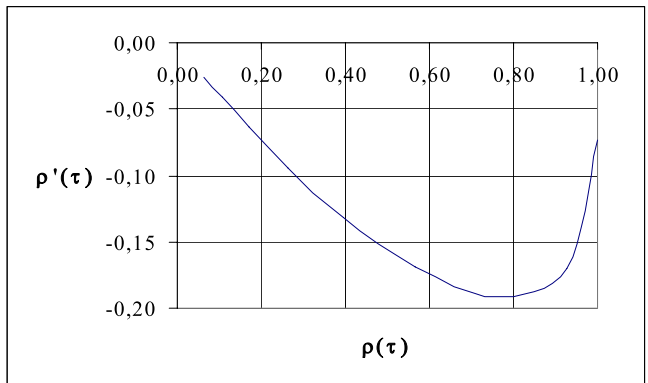
а) $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}$, $\Delta\tau = 0,4$



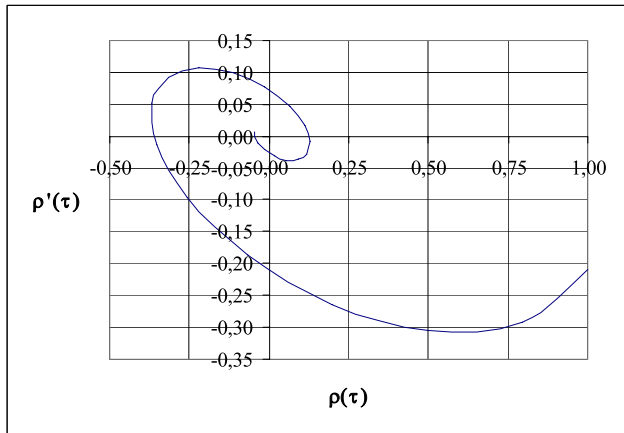
б) $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}(1 + \alpha|\tau|)$, $\Delta\tau = 0,4$



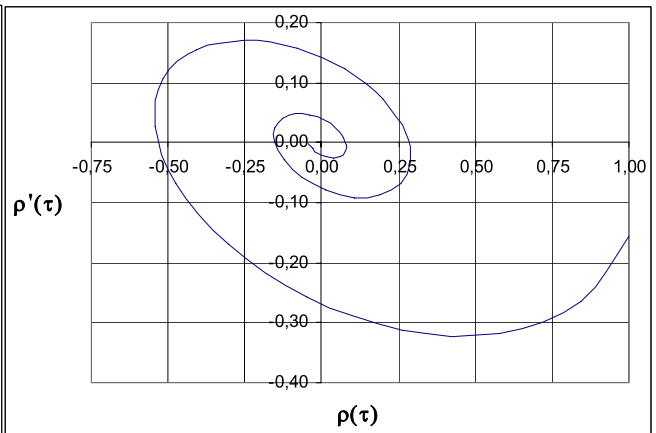
в) $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}(1 - \alpha|\tau|)$, $\Delta\tau = 0,23$



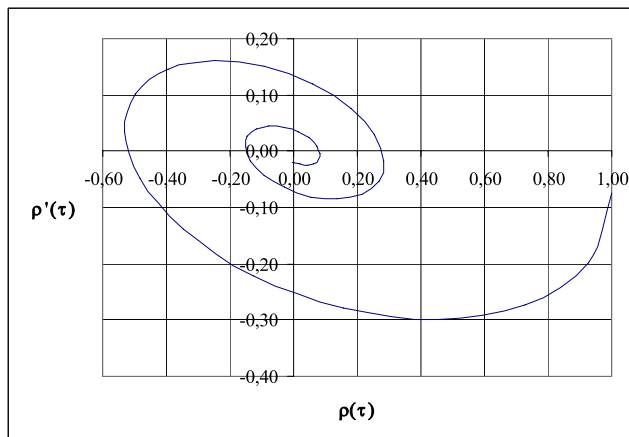
г) $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}(1 + \alpha|\tau| + \alpha^2\tau^2/3)$, $\Delta\tau = 0,693$



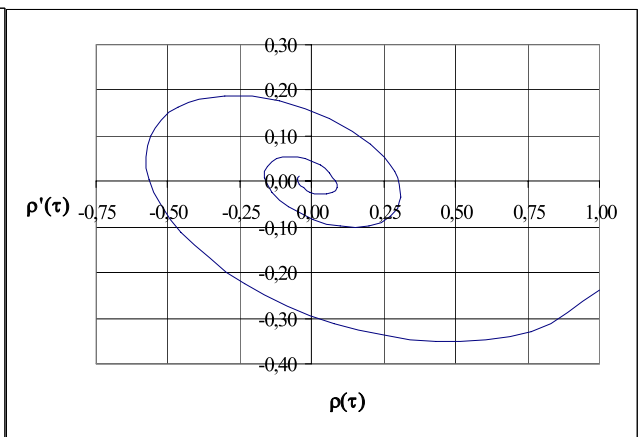
д) $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos\omega_0\tau$, $\mu = 3$



е) $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos\omega_0\tau$, $\mu = 5$



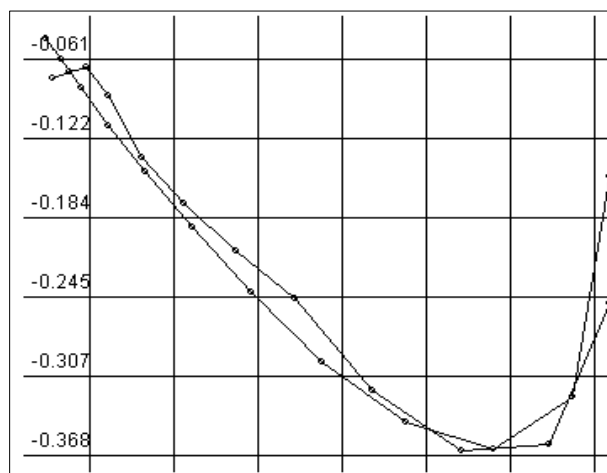
$\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}(\cos\omega_0\tau + \alpha/\omega_0 \sin\omega_0|\tau|)$, $\mu = 5$



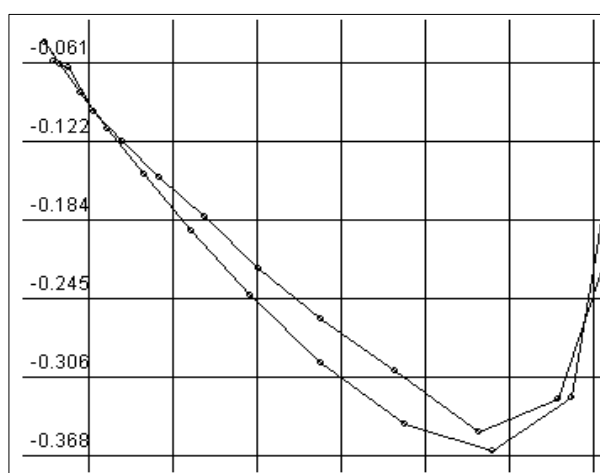
$\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}(\cos\omega_0\tau - \alpha/\omega_0 \sin\omega_0|\tau|)$, $\mu = 5$

Рисунок 2.3. Фазовые портреты моделей корреляционных функций

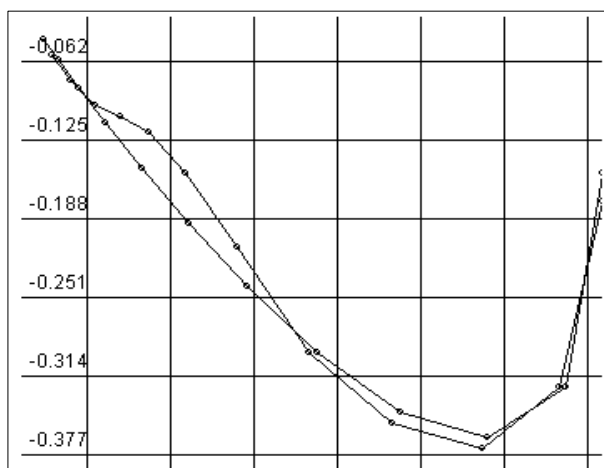
На рис 2.4 представлены результаты обработки псевдослучайных последовательностей с $\rho_{x_2}(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}(1 + \alpha|\tau|)$, а на рис. 2.5 – $\rho_{x_5}(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$ при различных объёмах выборки.



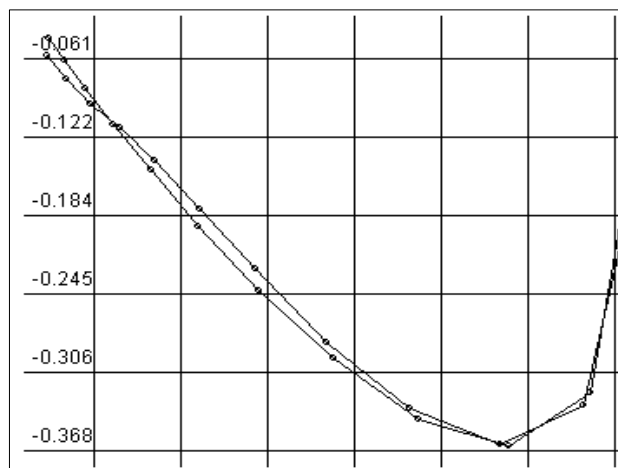
а) $M=100; \delta^2=0,0283$



б) $M=500; \delta^2=0,0165$



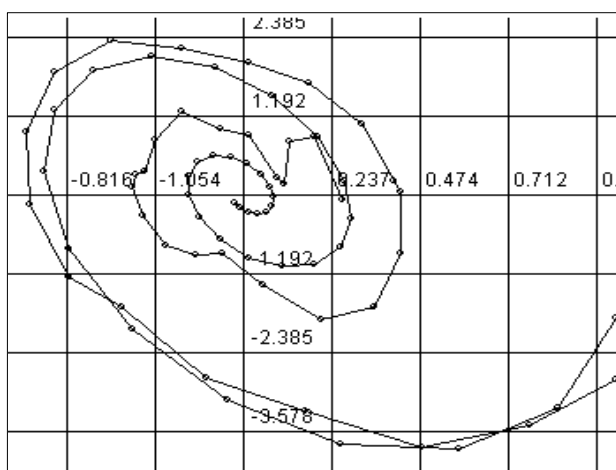
в) $M=1000; \delta^2=0,0122$



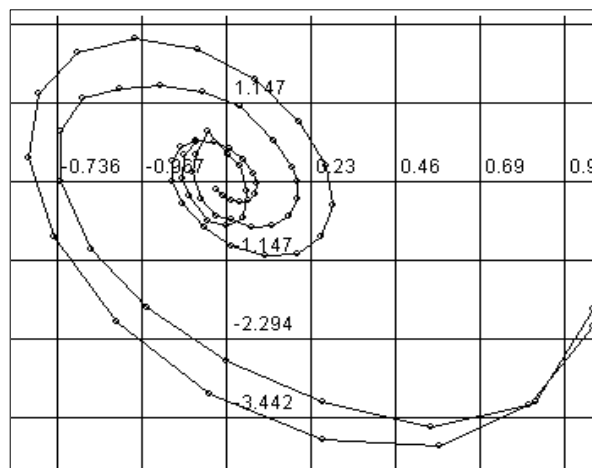
г) $M=2000; \delta^2=0,0043$

Рисунок 2.4. Влияние объёма выборки на результат идентификации монотонной корреляционной функции

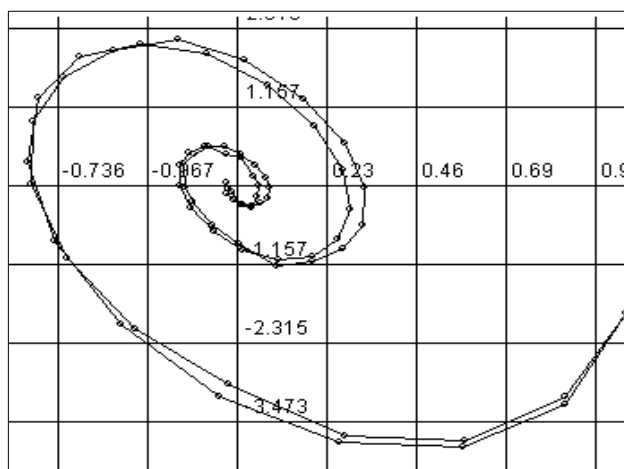
Как и следовало ожидать, погрешность идентификации по фазовым портретам уменьшается с увеличением объёма выборки. Однако, как показали исследования, фазовые портреты являются устойчивыми при отношении интервала наблюдения к интервалу корреляции ≥ 10 . Это, в свою очередь, позволяет при решении аппроксимативных задач уменьшить объём выборки при вычислении исходной корреляционной функции по сравнению с принятыми рекомендациями [104]. Кроме этого, фазовые портреты оказываются своеобразной «обратной связью» качества аппроксимации. Для этого необходимо после нахождения параметров аппроксимирующего выражения корреляционной функции построить новый фазовый портрет. Если задача решена правильно, расхождение между уточненным теоретическим и экспериментальным фазовыми портретами будет минимальным.



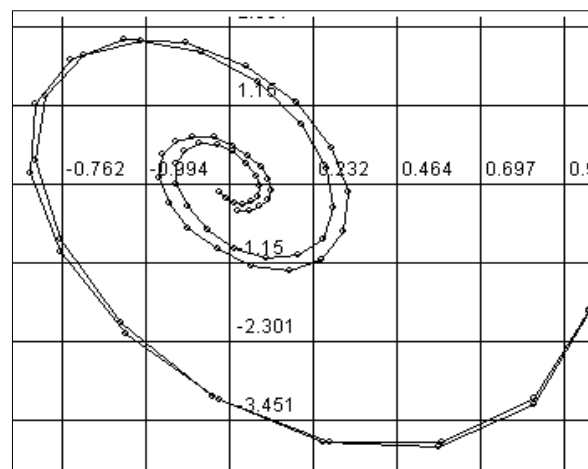
а) $M=100; \delta^2=0.5753$



б) $M=500; \delta^2=0.1213$



в) $M=1000; \delta^2=0.0289$



г) $M=2000; \delta^2=0.0083$



Рисунок 2.5. Влияние объёма выборки на результат идентификации колебательной корреляционной функции

Поскольку при увеличении показателя колебательности наибольшие различия наблюдаются вблизи «нуля» корреляционной функции, наиболее информативным у фазового портрета является «хвост».


Анализ рисунков показывает, что фазовые портреты дают уверенный ответ о принадлежности статистической корреляционной функции к определенному классу как для монотонных, так и колебательных моделей.



Аналогичным образом определяются фазовые портреты взаимных корреляционных функций, пример которой приведен на рис. 2.6.

2.4. Интерфейс третьей подсистемы

Расчет ВКФ и фазового портрета происходит на странице 3. На верхней панели нужно указать интервал дискретизации ВКФ и количество отсчетов левой и правой ветвей (окно для отсчетов левой ветви находится слева). Расчет производится после нажатия левой кнопки с графиком ВКФ . Расчет фазового портрета следует производить только после расчета ВКФ нажатием правой кнопки с изображением графика фазового портрета .

Предусмотрена возможность сохранения и чтения ВКФ (кнопки  ).

Возможны добавления и наложения любого числа графиков ВКФ. Эта опция доступна при снятом флажке «Чистить» и позволяет наглядно представить себе соотношение корреляционных функций. Принудительно очистить график можно нажав на кнопку .

Для случая, когда система состоит из двух фильтров и источника белого шума, определены аналитические выражения. ВКФ, полученная по ним, может быть добавлена путем нажатия на кнопку  («+Теор график»). При этом рассчитывается среднеквадратическое отклонение и максимальная погрешность, что позволяет определить методическую погрешность оценки взаимной корреляционной функции методом имитационного моделирования. С этой же целью предусмотрено занесение результатов в базу данных нажатием  («Добавить в БД»). Занесение самих отсчетов теоретической ВКФ не имеет смысла, потому что в базе данных имеется информация о фильтрах, составляющих систему, а, значит, и об алгоритме аналитического определения ВКФ. Оценка же ВКФ, то есть функция, полученная по экспериментальным данным, может быть полезна при анализе результатов аппроксимации, поэтому, установив флажок «Заносить отсчеты», пользователь может сохранить в БД отсчеты ВКФ. Эта возможность опциональна и возможен отказ от нее при анализе, например, погрешностей методом имитационного моделирования.

Страница 3 приведена на рисунке 2.6.

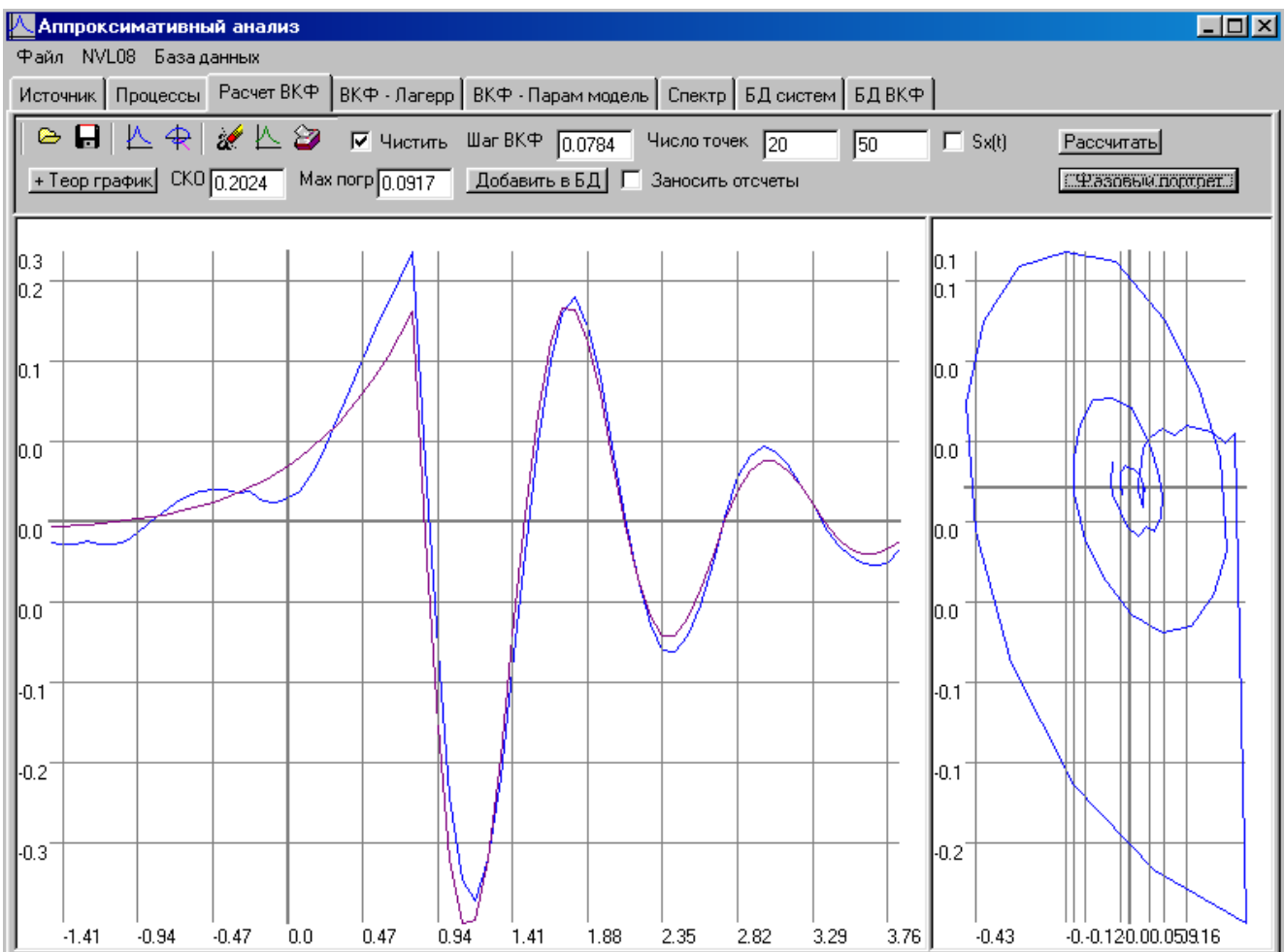


Рисунок 2.6. Расчёт взаимной корреляционной функции и построение её фазового портрета

3. АППРОКСИМАЦИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ФУНКЦИЯМИ ЗАДАННОГО ВИДА

3.1. Алгоритмы аппроксимации

При аппроксимации автокорреляционных функций, полученных экспериментально, параметрическими моделями стационарные случайные процессы разделяются на 4 класса:

С корреляционными функциями:

1. монотонно недифференцируемыми;
2. монотонно дифференцируемыми;
3. колебательными недифференцируемыми;
4. колебательными дифференцируемыми.

Полученные экспериментально корреляционные функции аппроксимируются аналитическими выражениями в соответствии с выбранным критерием приближения.

Знание аппроксимирующего выражения позволяет легко вычислить интервалы корреляции, спектральную плотность мощности и т.д. При этом существенно сокращается объем хранимой информации, так как отсчеты корреляционной функции заменяются на вид аппроксимирующего выражения и численные значения его параметров.

В качестве моделей корреляционных функций наиболее часто применяют линейную комбинацию конечного числа функций или бесконечный (конечный) ряд некоторой определенной системы функций. Если известен вид корреляционной функции, целесообразно выбирать конкретный вид модели с минимальным числом параметров.

При аппроксимации ВКФ необходимо, воспользовавшись понятием единичной функции, определить максимум ВКФ и осуществлять поиск аппроксимирующего выражения для каждой ветви в отдельности:

$$K_{axy} = K_{an}(\tau - \tau_m)1(\tau - \tau_m) + K_{al}(\tau_m - \tau)1(\tau_m - \tau), \quad (3.1)$$

где $1(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau \geq 0; \\ 0, & \tau < 0. \end{cases}$

Следует отметить, что при аппроксимации взаимных корреляционных функций пары процессов использование параметрических моделей оправдано в случае, когда процессы в паре идентичны (определение автокорреляционной функции), или когда второй процесс задержан относительно первого на некоторый интервал времени. При этом появляется возможность идентифицировать вид аппроксимирующей модели с помощью сравнения фазовых портретов и определить оптимальные значения неизвестных параметров, удовлетворяющих минимуму квадратической погрешности аппроксимации.

Итак, после идентификации вида корреляционной функции (ветви взаимной корреляционной функции) и выбора подходящей аппроксимирующей модели необходимо выполнить собственно процедуру аппроксимации, которая заключается в составлении и решении системы уравнений для определения неизвестных параметров.

Задача сводится к решению одного уравнения в случае, если система содержит один параметр

$$\frac{\partial \Delta(\alpha)}{\partial \alpha} = \sum_{i=0}^{J_{max}} [\rho_x(\tau_i) - \rho_a(\tau_i, \alpha)] \frac{\partial \rho_a(\tau_i, \alpha)}{\partial \alpha} = 0, \quad (3.2)$$

и системы из двух уравнений в случае двух параметров

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta(\alpha, \omega)}{\partial \alpha} = \sum_{i=0}^{J_{\max}} [\rho_x(\tau_i) - \rho_a(\tau_i, \alpha, \omega)] \frac{\partial \rho_a(\tau_i, \alpha, \omega)}{\partial \alpha} = 0; \\ \frac{\partial \Delta(\alpha, \omega)}{\partial \omega} = \sum_{i=0}^{J_{\max}} [\rho_x(\tau_i) - \rho_a(\tau_i, \alpha, \omega)] \frac{\partial \rho_a(\tau_i, \alpha, \omega)}{\partial \omega} = 0. \end{cases} \quad (3.3)$$

Для решения уравнения в первом случае и системы уравнений во втором можно использовать один из трех методов: метод Ньютона с аналитическим взятием производных, метод Ньютона с конечно-разностными производными и метод Нелдера-Мида [28, 29]. При аппроксимации методом Ньютона с аналитическим взятием производных алгоритмы вычисления параметров аппроксимирующих выражений приведены ниже.

Алгоритмы аппроксимации

Таблица 3.1

$e^{-\alpha|\tau|}$	$\alpha_{n+1} = \alpha_n - \frac{\sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i \tau_i e^{-\alpha_n \tau_i}}{\sum_{i=1}^{J_{\max}} [\tau_i^2 e^{-2\alpha_n \tau_i} - R_i \tau_i^2 e^{-\alpha_n \tau_i}]}$ $R_i = \hat{\rho}_x(\tau_i) - e^{-\alpha_n \tau_i}$
$e^{-\alpha|\tau|}(1 + \alpha|\tau|)$	$\alpha_{n+1} = \alpha_n - \frac{\sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i \alpha_n \tau_i^2 e^{-\alpha_n \tau_i}}{\sum_{i=1}^{J_{\max}} \tau_i^2 e^{-\alpha_n \tau_i} [R_i (\alpha_n \tau_i - 1) - \alpha_n^2 \tau_i^2]}$ $R_i = \hat{\rho}_x(\tau_i) - e^{-\alpha_n \tau_i} (1 + \alpha_n \tau_i)$
$e^{-\alpha|\tau|}(1 - \alpha|\tau|)$	$\alpha_{n+1} = \alpha_n - \frac{\sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i \tau_i e^{-\alpha_n \tau_i} (\alpha_n \tau_i - 1)}{\sum_{i=1}^{J_{\max}} [R_i \tau_i^2 e^{-\alpha_n \tau_i} (2 - \alpha_n \tau_i) - \tau_i^2 e^{-2\alpha_n \tau_i} (\alpha_n \tau_i - 1)]}$ $R_i = \hat{\rho}_x(\tau_i) - e^{-\alpha_n \tau_i} (1 - \alpha_n \tau_i)$
$e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$	$\alpha_{n+1} = \alpha_n - \frac{S_1 S_5 - S_2 S_4}{S_3 S_5 - S_4^2}; \quad \omega_{n+1} = \omega_n - \frac{S_2 S_3 - S_1 S_4}{S_3 S_5 - S_4^2}$ $A_1 = e^{-\alpha_n \tau_i}; \quad A_2 = A_1 \cos \omega_n \tau_i; \quad A_3 = A_1 \sin \omega_n \tau_i; \quad R_i = \hat{\rho}_x(\tau_i) - A_2$ $S_1 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i A_2 \tau_i; \quad S_2 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i A_3 \tau_i; \quad S_3 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \tau_i^2 A_2 (A_2 - R_i);$ $S_4 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \tau_i^2 A_3 (A_2 - R_i); \quad S_5 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \tau_i^2 (A_3^2 + R_i A_2)$
$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\alpha_{n+1} = \alpha_n - \frac{S_1 S_5 - S_2 S_4}{S_3 S_5 - S_4^2}; \quad \omega_{n+1} = \omega_n - \frac{S_2 S_3 - S_1 S_4}{S_3 S_5 - S_4^2}$ $A_1 = e^{-\alpha_n \tau_i}; \quad A_2 = A_1 \cos \omega_n \tau_i; \quad A_3 = A_1 \sin \omega_n \tau_i$ $R_i = \hat{\rho}_x(\tau_i) - A_2 - \frac{\alpha_n A_3}{\omega_n}$

$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$S_1 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i \left(A_2 \tau_i + A_3 \frac{\alpha_n \tau_i - 1}{\omega_n} \right);$ $S_2 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i \left(A_3 \left(\tau_i - \frac{\alpha_n}{\omega_n^2} \right) - A_2 \frac{\tau_i \alpha_n}{\omega_n} \right);$ $S_3 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \left[\left(A_2 \tau_i + A_3 \frac{\alpha_n \tau_i - 1}{\omega_n} \right)^2 - R_i \tau_i \left(A_3 \frac{\alpha_n \tau_i + 2}{\omega_n} + A_2 \tau_i \right) \right];$ $S_4 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \left[\left(A_2 \tau_i + A_3 \frac{\alpha_n \tau_i - 1}{\omega_n} \right) \left(A_3 \left(\tau_i - \frac{\alpha_n}{\omega_n^2} \right) - A_2 \frac{\tau_i \alpha_n}{\omega_n} \right) + \right. \\ \left. R_i \left(A_2 \tau_i \frac{\alpha_n \tau_i - 1}{\omega_n} - A_3 \left(\frac{\alpha_n \tau_i - 1}{\omega_n^2} + \tau_i^2 \right) \right) \right];$ $S_5 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \left[\left(A_3 \left(\tau_i - \frac{\alpha_n}{\omega_n^2} \right) - A_2 \frac{\tau_i \alpha_n}{\omega_n} \right)^2 + R_i \left(A_2 \tau_i^2 + A_3 \left(\frac{1}{\omega_n^2} + \tau_i^2 \right) \frac{\alpha_n}{\omega_n} \right) \right]$
$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\alpha_{n+1} = \alpha_n - \frac{S_1 S_5 - S_2 S_4}{S_3 S_5 - S_4^2}; \quad \omega_{n+1} = \omega_n - \frac{S_2 S_3 - S_1 S_4}{S_3 S_5 - S_4^2}$ $A_1 = e^{-\alpha_n \tau_i}; \quad A_2 = A_1 \cos \omega_n \tau_i; \quad A_3 = A_1 \sin \omega_n \tau_i$ $R_i = \hat{\rho}_x(\tau_i) - A_2 + \frac{\alpha_n A_3}{\omega_n}$ $S_1 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i \left(A_2 \tau_i + A_3 \frac{1 - \alpha_n \tau_i}{\omega_n} \right);$ $S_2 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} R_i \left(A_3 \left(\tau_i - \frac{\alpha_n}{\omega_n^2} \right) + A_2 \frac{\tau_i \alpha_n}{\omega_n} \right);$ $S_3 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \left[\left(A_2 \tau_i + A_3 \frac{1 - \alpha_n \tau_i}{\omega_n} \right)^2 - R_i \tau_i \left(A_3 \frac{2 - \alpha_n \tau_i}{\omega_n} + A_2 \tau_i \right) \right];$ $S_4 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \left[\left(A_2 \tau_i + A_3 \frac{1 - \alpha_n \tau_i}{\omega_n} \right) \left(A_3 \left(\tau_i - \frac{\alpha_n}{\omega_n^2} \right) + A_2 \frac{\tau_i \alpha_n}{\omega_n} \right) + \right. \\ \left. R_i \left(A_2 \tau_i \frac{1 - \alpha_n \tau_i}{\omega_n} - A_3 \left(\frac{1 - \alpha_n \tau_i}{\omega_n^2} + \tau_i^2 \right) \right) \right];$ $S_5 = \sum_{i=1}^{J_{\max}} \left[\left(A_3 \left(\tau_i - \frac{\alpha_n}{\omega_n^2} \right) + A_2 \frac{\tau_i \alpha_n}{\omega_n} \right)^2 + \right. \\ \left. R_i \left(A_2 \tau_i \left(\tau_i - \frac{2\alpha_n}{\omega_n^2} \right) + A_3 \left(\frac{1}{\omega_n^2} - \tau_i^2 \right) \frac{\alpha_n}{\omega_n} \right) \right]$

Процесс вычисления заканчивается, когда $|\alpha_{n+1} - \alpha_n| \leq \varepsilon$ для однопараметрической модели и $\begin{cases} |\alpha_{n+1} - \alpha_n| \leq \varepsilon; \\ |\omega_{n+1} - \omega_n| \leq \varepsilon \end{cases}$ для модели с двумя параметрами,

где ε – любое наперед заданное малое число.

Начальные значения α и ω_0 выбираются следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha_0 = \frac{3}{\tau_{k \max}}; \\ \omega_0 = \frac{\pi}{2\tau'}, \end{cases} \quad (3.4)$$

где τ' – интервал времени, соответствующий первому пересечению $\hat{\rho}_x(\tau)$ оси абсцисс; $\tau_{k \max}$ – максимальный интервал корреляции.

Максимальный интервал корреляции $\tau_k^{(1)} = \tau_{k \max}$ определяется в результате решения уравнения (см. таблицу 3.1) [40]:

$$|\rho(\tau \geq \tau_{k \max})| \leq \Delta \quad (3.5)$$

То есть под максимальным интервалом корреляции понимается временной интервал от начала координат до точки пересечения с линиями Δ и $-\Delta$, после которой нормированная корреляционная функция не выходит из коридора $[-\Delta, \Delta]$.

Максимальные интервалы корреляции типовых моделей корреляционных функций

Таблица 3.2

№	Наименование	$\Delta=0,01$	$\Delta=0,02$	$\Delta=0,05$
1	$e^{-\alpha|\tau|}$	$4,61/\alpha$	$3,92/\alpha$	$3/\alpha$
2	$e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$	$6,64/\alpha$	$5,84/\alpha$	$4,75/\alpha$
3	$e^{-\alpha|\tau|} (1 - \alpha|\tau|)$	$6,27/\alpha$	$5,40/\alpha$	$4,14/\alpha$
4	$e^{-\alpha|\tau|} \left( 1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2 \tau^2}{3} \right)$	$8,03/\alpha$	$7,14/\alpha$	$5,92/\alpha$
5	$e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$	$4,61/\alpha$	$3,92/\alpha$	$3/\alpha$
6	$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$4,61/\alpha$	$3,92/\alpha$	$3/\alpha$
7	$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$4,61/\alpha$	$3,92/\alpha$	$3/\alpha$

Одним из способов улучшения сходимости метода Ньютона и упрощения вида системы уравнений является использование конечно-разностного метода взятия производных [28].

При аппроксимации корреляционных функций параметрическими моделями может быть использован также метод деформированного многогранника Нелдера-Мида [29]. Этот метод отличается высокой эффективностью и помехозащищенностью. Он легко адаптируется к особенностям оптимизируемой функции, «не замеча-

ет» отдельные шероховатости функции (вызванные ошибками вычисления), а скорость сходимости алгоритма не слишком сильно зависит от регулярности целевой функции [28].

Поиск оптимальной точки ведется путем поворота и деформации многогранника (симплекса) на основе анализа вершин в соответствии с операциями отражения-проектирования, растяжения, сжатия и редукции симплекса (в случае двухпараметрической задачи симплекс – правильный треугольник). Алгоритм аппроксимации параметрическими моделями приведен на рисунке 3.1.

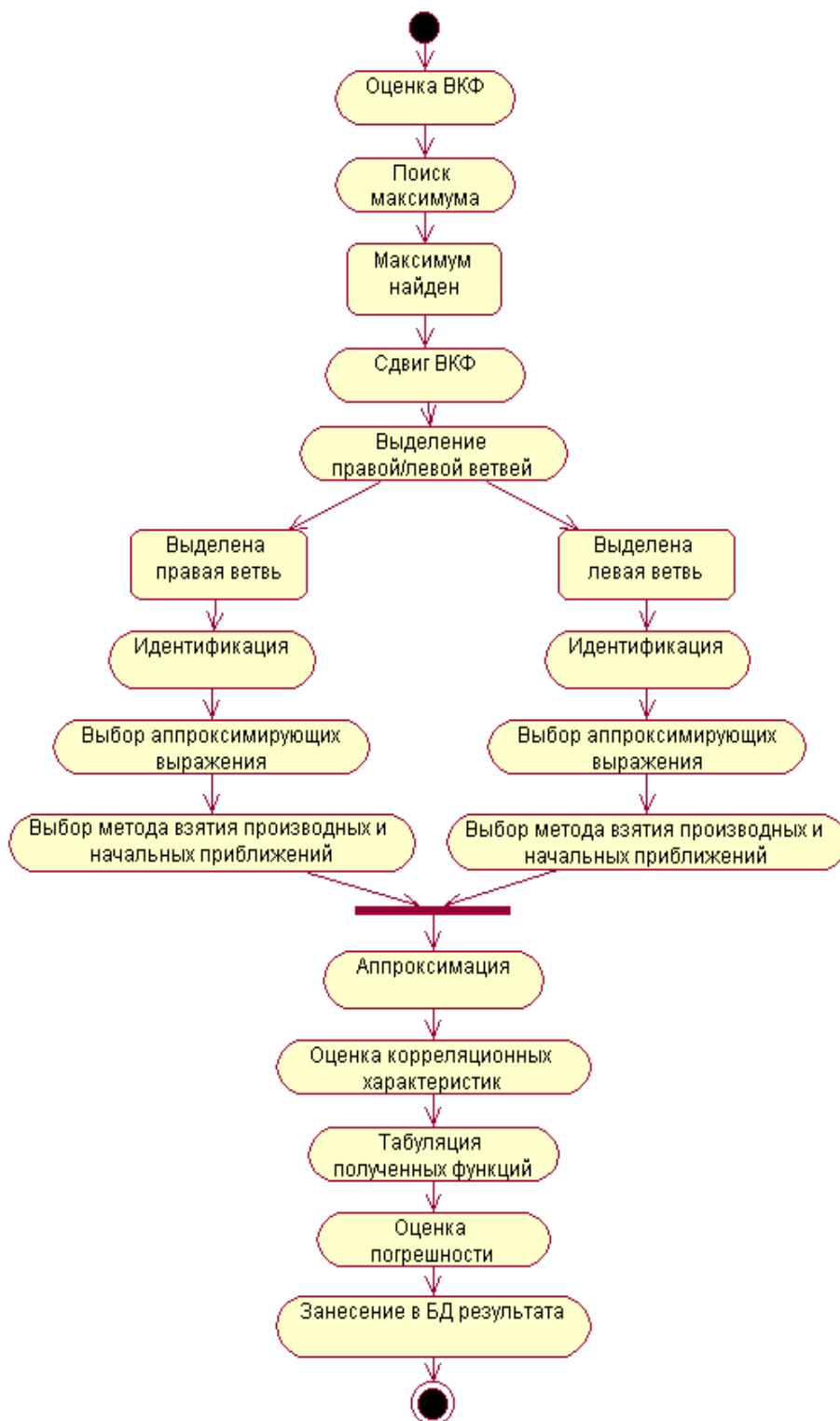


Рисунок 3.1. Диаграмма активностей (UML). Аппроксимация ВКФ параметрическими моделями

3.2. Оценка обобщенных корреляционных характеристик

По найденной корреляционной функции возможно определение обобщенных корреляционных характеристик. К ним относятся [24, 25, 28, 39]:

- показатель колебательности, равный числу пересечения «нуля» корреляционной функции и используемый при оценке интервала дискретизации случайного процесса, метрологическом анализе результатов оценивания вероятностных характеристик;
- интервалы корреляции, определяющие длительность существования корреляционной функции;
- корреляционные моменты, вводимые по аналогии с начальными моментами законов распределения и используемые, например, для идентификации процесса по виду корреляционной функции.

Обобщенные корреляционные характеристики широко применяются при решении разнообразных прикладных задач, связанных с:

- определением интервала дискретизации исследуемых процессов при цифровых методах анализа;
- идентификацией случайного процесса по виду корреляционной функции;
- метрологическим анализом результатов измерения вероятностных характеристик с целью получения оценок сверху, инвариантных к виду корреляционной функции исследуемого процесса.

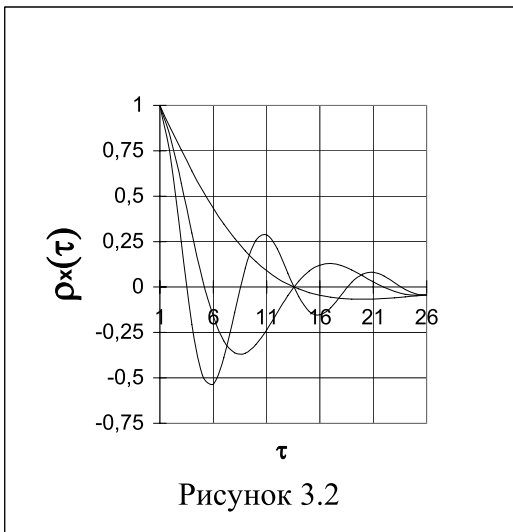


Рисунок 3.2

Рассмотрим колебательную модель корреляционной функции $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$.

Введем безразмерную величину $\mu = \omega_0 / \alpha$, равную отношению частоты колебания корреляционной функции к показателю затухания и характеризующую число пересечений корреляционной функцией «нуля». Эта характеристика называется **показателем колебательности** корреляционной функции. На рис. 3.2 представлены три нормированные корреляционные функции $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$, имеющие показатели колебательности 1, 3, 5 соответственно.

Введенный показатель колебательности оказывается очень полезной характеристикой и при исследовании других колебательных моделей корреляционных функций. Показатель колебательности, в общем случае, равен числу пересечения корреляционной функции оси τ на максимальном интервале корреляции. Учитывая, что «хвост» корреляционной функции оценивается с большей погрешностью, показатель колебательности целесообразнее определять по фазовым портретам. На рис. 3.3 приведен пример оценки показателя колебательности для колебательной модели корреляционной функции. Он равен числу пересечения фазового портрета оси τ . Заметим, что для стационарных эргодических процессов $\rho_x(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow \infty$. Следовательно, фазовый портрет заканчивается в точке с координатами (0,0).

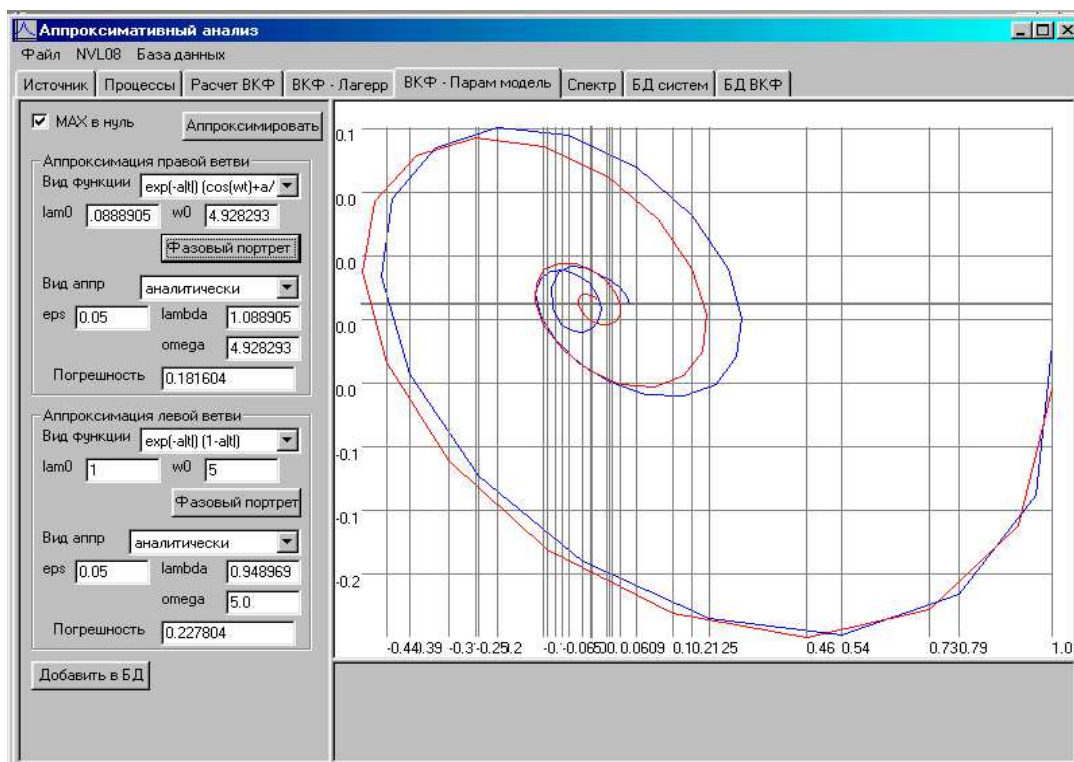


Рисунок 3.3. К определению показателя колебательности

Показатель колебательности входит в аналитические выражения для определения интервалов дискретизации случайных процессов (см. таблицу 1.1), используется при идентификации случайных процессов по виду корреляционной функции, анализе методических погрешностей оценивания вероятностных характеристик и т.д. [86].

Другой важной характеристикой является интервал корреляции. Существуют различные способы его определения, имеющие один и тот же физический смысл – **длительность существования корреляционной функции.**

Максимальный интервал корреляции $\tau_k^{(1)} = \tau_{k \max}$ определяется в результате решения уравнения (3.5) (см. таблицу 1.1) [39].

Часто под интервалом корреляции понимается основание прямоугольника с высотой, равной единице, площадь которого равновелика площади фигуры, определяемой нормированной корреляционной функцией [39]:

$$\tau_k^{(2)} = \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau. \quad (3.6)$$

Отметим, что для некоторого класса процессов $\tau_k^{(2)} = 0$, что свидетельствует об отсутствии корреляции между сечениями процесса. Однако это не так, корреляция есть, и это подтверждает $\tau_{k \max} > 0$.

Следовательно, при оценке длительности существования корреляционной функции $\tau_k^{(2)}$ целесообразно применять лишь при анализе случайных процессов с монотонными корреляционными функциями.

Для устранения отмеченного недостатка были предложены следующие определения интервалов корреляции:

$$\tau_k^{(3)} = \int_0^{\infty} |\rho_x(\tau)| d\tau; \quad (3.7)$$

$$\tau_k^{(4)} = \int_0^{\infty} \rho^2_x(\tau) d\tau. \quad (3.8)$$

Анализ выражений (3.5) и (3.7) показывает, что аналитическая оценка длительности существования корреляционной функции затруднена, особенно для колебательных моделей корреляционных функций. От этого недостатка свободно определение $\tau_k^{(4)}$. Поэтому, несмотря на то, что $\tau_k^{(4)}$ дает заниженные результаты, в технических приложениях он применяется значительно чаще, чем $\tau_k^{(3)}$. Значения интервалов корреляции $\tau_k^{(2)}$ и $\tau_k^{(4)}$ для типовых моделей корреляционных функций приведены в таблице 3.3.

Интервалы корреляции для типовых моделей корреляционных функций
Таблица 3.3

№	Наименование	$\tau_k^{(2)}$	$\tau_k^{(4)}$
1	$e^{-\alpha|\tau|}$	$1/\alpha$	$1/2\alpha$
2	$e^{-\alpha|\tau|}(1 + \alpha|\tau|)$	$2/\alpha$	$5/4\alpha$
3	$e^{-\alpha|\tau|}(1 - \alpha|\tau|)$	0	$1/4\alpha$
4	$e^{-\alpha|\tau|}\left(1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2\tau^2}{3}\right)$	$8/3\alpha$	$7/4\alpha$
5	$e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0\tau$	$\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega_0^2}$	$\frac{2\alpha^2 + \omega_0^2}{4\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}$
6	$e^{-\alpha|\tau|}\left(\cos \omega_0\tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0\tau\right)$	$\frac{2\alpha}{\alpha^2 + \omega_0^2}$	$\frac{5\alpha^2 + \omega_0^2}{4\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}$
7	$e^{-\alpha|\tau|}\left(\cos \omega_0\tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0\tau\right)$	0	$\frac{1}{4\alpha}$

В таблице 3.4 показано, во сколько раз $\tau_{k\max}$ больше $\tau_k^{(2)}$ и $\tau_k^{(4)}$ ($\Delta = 0,05$).

Таблица 3.4

№	Наименование	$\tau_{k\max} / \tau_k^{(2)}$	$\tau_{k\max} / \tau_k^{(4)}$
1	$e^{-\alpha|\tau|}$	3	6
2	$e^{-\alpha|\tau|}(1 + \alpha|\tau|)$	2,375	3,8
3	$e^{-\alpha|\tau|}(1 - \alpha|\tau)$	∞	16,56
4	$e^{-\alpha|\tau|}\left(1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2\tau^2}{3}\right)$	2,22	3,38
5	$e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0\tau$	$3(1 + \mu^2)$	$\frac{2(1 + \mu^2)}{2 + \mu^2}$
6	$e^{-\alpha|\tau|}\left(\cos \omega_0\tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0\tau\right)$	$1,5(1 + \mu^2)$	$\frac{12(1 + \mu^2)}{(5 + \mu^2)}$
7	$e^{-\alpha|\tau|}\left(\cos \omega_0\tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0\tau\right)$	∞	12

Отсюда видно, что $\tau_k^{(2)}$ и $\tau_k^{(4)}$ дают сильно заниженный результат по сравнению с $\tau_{k \max}$.

В качестве оценки интервалов корреляции можно использовать интервалы корреляции экспоненциальной функции $\rho_a(\tau, \alpha) = e^{-\alpha|\tau|}$, аппроксимирующей нормированную корреляционную функцию по минимуму квадратической погрешности аппроксимации [28].

Моменты корреляционных функций вводятся по аналогии с моментами законов распределения и используются при решении различных прикладных задач. Определим начальный момент k -го порядка в виде:

$$\mu_k = \int_0^{\infty} \tau^k \rho_x(\tau) d\tau. \quad (3.9)$$

Знание моментов позволяет решать задачи идентификации случайных процессов по виду корреляционной функции и ввести ещё одно определение длительности существования корреляционной функции [39]:

$$\tau_k^{(5)} = \mu_1 / \mu_0. \quad (3.10)$$

Значение моментов для типовых моделей корреляционных функций приведено в таблице 3.5.

Таблица 3.5

№	Наименование	μ_1	μ_2	μ_3
1	$e^{-\alpha|\tau|}$	$1/\alpha^2$	$2/\alpha^3$	$6/\alpha^4$
2	$e^{-\alpha|\tau|}(1 + \alpha|\tau|)$	$3/\alpha^2$	$8/\alpha^3$	$30/\alpha^4$
3	$e^{-\alpha|\tau|}(1 - \alpha|\tau|)$	$-1/\alpha^2$	$-4/\alpha^3$	$-18/\alpha^4$
4	$e^{-\alpha|\tau|}\left(1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2\tau^2}{3}\right)$	$5/\alpha^2$	$16/\alpha^3$	$70/\alpha^4$
5	$e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$	$\frac{\alpha^2 - \omega_0^2}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^2}$	$\frac{2(\alpha^3 - 3\alpha\omega_0^2)}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^3}$	$6 \frac{\alpha^4 - 6\alpha^2\omega_0^2 + \omega_0^4}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^4}$
6	$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\frac{3\alpha^2 - \omega_0^2}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^2}$	$\frac{8\alpha(\alpha^2 - \omega_0^2)}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^3}$	$6 \frac{5\alpha^4 - 10\alpha^2\omega_0^2 + \omega_0^4}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^4}$
7	$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\frac{1}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^2}$	$-\frac{4\alpha}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^2}$	$-6 \frac{3\alpha^4 + 2\alpha^2\omega_0^2 - \omega_0^4}{(\alpha^2 + \omega_0^2)^4}$

По аналогии с обобщенными характеристиками для автокорреляционных функций введем обобщенные характеристики для взаимных корреляционных характеристик, широко применяемых в практических приложениях:

- максимального интервала корреляции $\tau_{kxy}^{(1)} = \tau_{k \max xy}$; (3.11)

- интервала корреляции $\tau_{kxy}^{(2)} = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{xy}(\tau) d\tau$; (3.12)

- интервала корреляции $\tau_{kxy}^{(3)} = \int_{-\infty}^{\infty} |\rho_{xy}(\tau)| d\tau$; (3.13)

- интервала корреляции $\tau_{kxy}^{(4)} = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{xy}^2(\tau) d\tau$; (3.14)

- моменты корреляционных функций $\mu_{kxy} = \int_{-\infty}^{\infty} \tau^k \rho_{xy}(\tau) d\tau$, (3.15)

используемые при решении различных прикладных задач, например, идентификации, метрологическом анализе результатов оценивания взаимных корреляционных характеристик и т.д.

Если в качестве модели взаимной корреляционной функции выбрать модель


$$K_{axy}(\tau) = \sigma_x^2 \rho_a(\tau - \tau_m), \quad (3.16)$$

где τ_m - значение аргумента корреляционной функции, соответствующее её максимуму, то значения интервалов корреляции равны удвоенному значению результатов, представленных в таблицах 3.2 – 3.3.

Если модель взаимной корреляционной функции представлена в виде (3.1), то интервалы корреляции и моменты корреляционных функций равны сумме соответствующих характеристик левой и правой ветвей взаимной корреляционной функции.

3.3. Интерфейс пятой подсистемы

Страница 5 предназначена для аппроксимации ВКФ параметрическими моделями. В случае выделения максимума при аппроксимации необходимо установить флажок «МАХ в ноль». Аппроксимация производится отдельно для правой и левой ветви. Нужно указать для каждой ветви вид аппроксимирующей функции в поле «Вид функции» и начальные приближения для параметра λ в поле « $\lambda m0$ » и параметра ω_0 в поле « $w0$ » при необходимости. Затем нужно задать один из методов аппроксимации (аналитически, численно, Нелдера-Мида или ввод параметров вручную) в поле «Вид аппр» для обеих ветвей.

После нажатия на кнопку  («Аппроксимировать») будут найдены значения λ и ω_0 в полях `lambda` и `omega` и построен график ВКФ (синим цветом) и график аппроксимирующего выражения (красным цветом).

Для каждой ветви предусмотрена возможность определения фазового портрета (по нажатию на кнопку «Фазовый портрет»). При этом произойдет расчет фазового портрета для выбранной ветви функции и наложение на него фазового портрета аппроксимирующей модели. Таким образом, возможно сравнение фазовых портретов, необходимое, например, при идентификации функции.

Занесение в базу данных производится после нажатия на кнопку .

Страница 5 приведена на рисунке 3.4.

Круг ВКФ, для которых аппроксимация параметрическими моделями удовлетворительна, достаточно ограничен. Однако этот вид аппроксимации позволяет сгладить погрешности, возникающие при анализе НВР за счет неравномерной дискретизации или потери отсчетов.

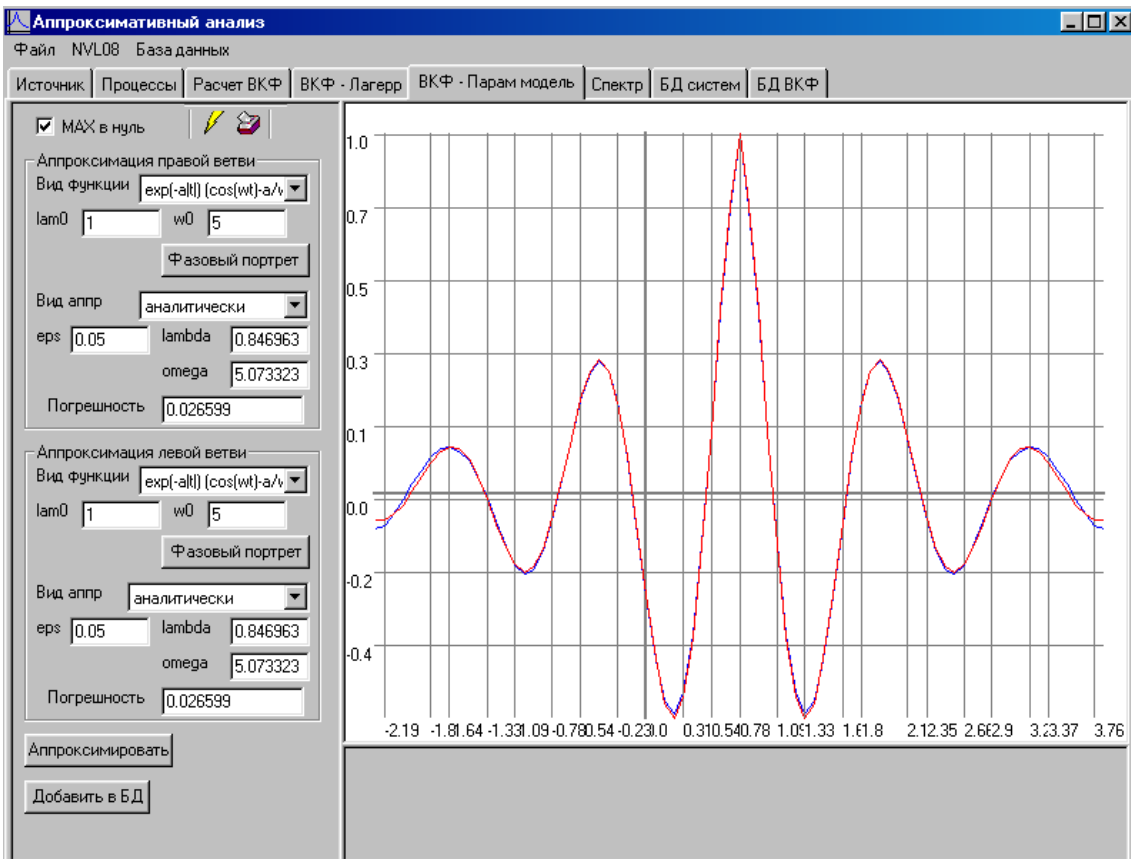


Рисунок 3.4. Аппроксимация ВКФ функциями заданного вида

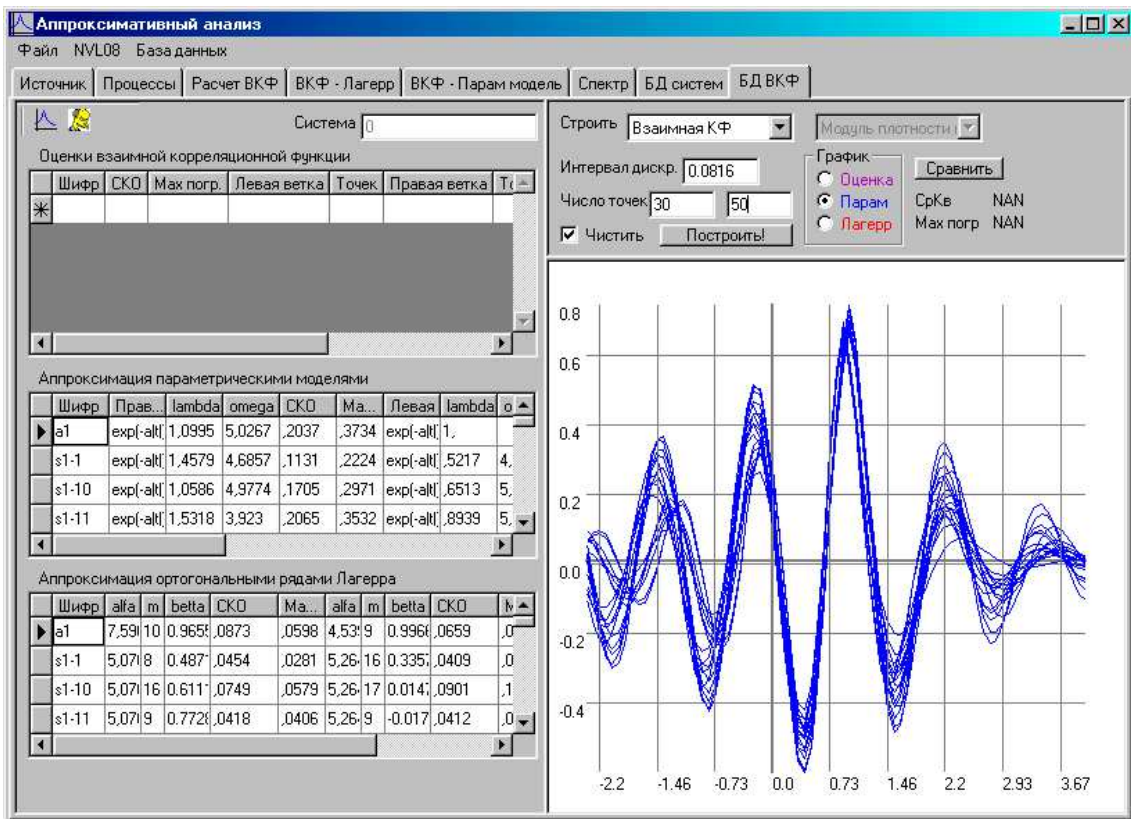


Рисунок 3.5. Аппроксимация ВКФ функциями заданного вида при объеме выборки 500

4. АППРОКСИМАЦИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ЛАГЕРРА

4.1. Алгоритмы аппроксимации

В качестве модели корреляционной функции при аппроксимации при отсутствии априорной информации о свойствах исследуемого процесса целесообразно применять разложение корреляционной функции в ряд по некоторой системе ортогональных функций. Впервые этот метод был предложен Д. Лампардом [46]. Математическим обоснованием этого метода является теорема Мерсера, согласно которой симметричная и положительно определенная функция, которой и является корреляционная функция, может быть разложена в равномерно и абсолютно сходящийся ряд вида:

$$K_x(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k \psi_k(\tau), \text{ где } \beta_k \text{ – коэффициенты преобразования Фурье; } \psi_k(\tau) \text{ –}$$

семейство базисных функций, ортонормированных в интервале $(0, \infty)$ с весом $\mu(\tau)$.

Это семейство характеризуется интегралом:

$$\int_0^{\infty} \mu(\tau) \psi_m(\tau) \psi_n(\tau) d\tau = \begin{cases} 0, & m \neq n; \\ 1, & m = n. \end{cases} \quad (4.1)$$

Так как ряд сходится на интервале $(0, \infty)$, то коэффициенты разложения β_k определяются выражением:

$$\beta_k = \int_0^{\infty} K_x(\tau) \psi_k(\tau) \mu(\tau) d\tau. \quad (4.2)$$

В качестве системы базисных функций могут быть применены, например, ортогональные функции Лагерра, широко применяемые в аппроксимативном корреляционном анализе. Они определяются выражением:

$$L_k(\tau, \alpha) = \sum_{s=0}^k \frac{k!}{(k-s)!} \cdot \frac{(-\alpha\tau)^s}{(s!)^2} e^{-\frac{\alpha\tau}{2}}. \quad (4.3)$$

Ортогональные функции Лагерра удовлетворяют следующему свойству:

$$\int_0^{\infty} L_k(\tau, \alpha) L_n(\tau, \alpha) d\tau = \begin{cases} 0, & k \neq n; \\ \frac{1}{\alpha}, & k = n. \end{cases} \quad (4.4)$$

Функции Лагерра могут быть также определены, как [26]

$$L_k^{(c)}(z) = \frac{z^{-c} e^z}{k!} \frac{d^k}{dz^k} (z^{k+c} e^{-z}). \quad (4.5)$$

Из этих обобщенных функций Лагерра получаются обыкновенные функции Лагерра, если положить $c=0$,

$$L_k^{(0)}(z) = \frac{e^z}{k!} \frac{d^k}{dz^k} (z^k e^{-z}). \quad (4.6)$$

Нормированными ортогональными функциями Лагерра являются

$$L_k(z) = e^{-\frac{z}{2}} L_k^{(0)}(z) = e^{-\frac{z}{2}} \cdot \frac{e^z}{k!} \frac{d^k}{dz^k} (z^k e^{-z}). \quad (4.7)$$

Для функций Лагерра, включая нормированные, существует рекуррентная формула

$$kL_k(z) - (2k-1-z)L_{k-1}(z) + (k-1)L_{k-2}(z) = 0. \quad (4.8)$$

Заменив $z = \alpha\tau$ и выделив

$$L_0(\alpha\tau) = e^{\frac{-\alpha\tau}{2}},$$

$$L_1(\alpha\tau) = e^{\frac{-\alpha\tau}{2}}(1 - \alpha\tau),$$

определим функцию Лагерра, в виде

$$L_k(\alpha\tau) = \frac{2k-1-\alpha\tau}{k} L_{k-1}(\alpha\tau) - \frac{k-1}{k} L_{k-2}(\alpha\tau). \quad (4.9)$$

В описываемой автоматизированной системе для определения функций Лагерра используется рекурсивный алгоритм (4.9). Он обладает лучшими временными характеристиками сравнительно с алгоритмом (4.3) и позволяет избежать ошибок, связанных с переполнением. Возникающее при этом накопление ошибок удается устранить посредством использования переменных двойной точности.

Так как на практике ограничиваются конечным числом ряда для модели корреляционной функции $K_x(\tau) = \sum_{k=0}^m \beta_k L_k(\tau, \alpha)$, имеющей ограниченное число параметров, коэффициенты разложения, обеспечивающие минимум квадратической погрешности аппроксимации

$$\Delta = \int_0^{\infty} \left[K_x(\tau) - \sum_{k=0}^m \beta_k L_k(\tau, \alpha) \right]^2 d\tau = \min, \quad (4.10)$$

определяются формулой:

$$\beta_k = \alpha \int_0^{\infty} K_x(\tau) L_k(\tau, \alpha) d\tau. \quad (4.11)$$

Погрешность аппроксимации при этом будет равна

$$\Delta = \int_0^{\infty} K_x^2(\tau) d\tau - \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^m \beta_k^2. \quad (4.12)$$

Минимум квадратической погрешности аппроксимации достигается при $\beta_{m+1} = 0$ [28]. Одной из особенностей аппроксимации корреляционных функций ортогональными рядами Лагерра является то, что при произвольном α и конечном m не выполняется основное свойство $K_x(0) = D_X = \sum_{k=0}^m \beta_k$. Для устранения этой отрицательной черты метода определяют коэффициенты разложения b_k корреляционной

$$\text{функции } K_x(\tau) = \sum_{k=0}^m b_k L_k(\tau, \alpha) \text{ как } b_k = \beta_k + \frac{D_X - \sum_{k=0}^m \beta_k}{m+1} \quad [28]. \quad (4.13)$$

Для аппроксимация взаимной корреляционной функции необходимо аппроксимировать как правую, так и левую ветви. Причем число членов аппроксимирующего ряда для каждой ветви будет свое:

$$K_{xy}(\tau) = \sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} l(\tau) L_k(\tau, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} l(-\tau) L_k(-\tau, \alpha_n), \quad (4.14)$$

где

$$1(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau > 0; \\ \frac{1}{2}, & \tau = 0; \\ 0, & \tau < 0 \end{cases}; \text{ и } 1(-\tau) = \begin{cases} 0, & \tau > 0; \\ \frac{1}{2}, & \tau = 0; \\ 1, & \tau < 0. \end{cases} \quad (4.15)$$

При этом квадратическая погрешность аппроксимации запишется в виде:

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} \left[K_{xy}(\tau) - \left(\sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} 1(\tau) L_k(\tau, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l} 1(-\tau) L_k(-\tau, \alpha_l) \right) \right]^2 d\tau. \quad (4.16)$$

Коэффициенты разложения определяются, исходя из требования к минимуму этой погрешности:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \beta_{n,n}} = \int_0^{\infty} \left[K_{xy}(\tau) - \sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} L_k(\tau, \alpha_n) \right] L_n(\tau, \alpha_n) d\tau = 0; \quad (4.17)$$

$$\int_0^{\infty} K_{xy}(\tau) L_n(\tau, \alpha_n) d\tau - \sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} \int_0^{\infty} L_k(\tau, \alpha_n) L_n(\tau, \alpha_n) d\tau = 0; \quad (4.18)$$

$$\beta_{k,n} = \alpha_n \int_0^{\infty} K_{xy}(\tau) L_n(\tau, \alpha_n) d\tau; \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \beta_{n,l}} = \int_0^{\infty} \left[K_{xy}(-\tau) - \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l} L_k(\tau, \alpha_l) \right] L_n(\tau, \alpha_l) d\tau = 0; \quad (4.20)$$

$$\int_0^{\infty} K_{xy}(-\tau) L_n(\tau, \alpha_l) d\tau - \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l} \int_0^{\infty} L_k(\tau, \alpha_l) L_n(\tau, \alpha_l) d\tau = 0; \quad (4.21)$$

$$\beta_{k,l} = \alpha_l \int_0^{\infty} K_{yx}(\tau) L_n(\tau, \alpha_l) d\tau. \quad (4.22)$$

При таком способе определения коэффициентов разложения погрешность аппроксимации запишется в виде:

$$\begin{aligned} \Delta = & \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}^2(\tau) d\tau - 2 \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}(\tau) \left(\sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} 1(\tau) L_k(\tau, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l} 1(-\tau) L_k(-\tau, \alpha_l) \right) d\tau + \\ & + \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} 1(\tau) L_k(\tau, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l} 1(-\tau) L_k(-\tau, \alpha_l) \right)^2 d\tau. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Исходя из свойств ортогональных функций:

$$\begin{aligned} \Delta = & \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}^2(\tau) d\tau - 2 \left(\sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} \int_0^{\infty} K_{xy}(\tau) L_k(\tau, \alpha_n) d\tau + \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l} \int_0^{\infty} K_{yx}(\tau) L_k(\tau, \alpha_l) d\tau \right) + \\ & + \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n}^2 1(\tau) L_k^2(\tau, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l}^2 1(-\tau) L_k^2(-\tau, \alpha_l) \right) d\tau. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Пользуясь определением коэффициентов разложения и свойством ортогональности,

$$\begin{aligned} \Delta = & \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}^2(\tau) d\tau - \left(\frac{2}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n}^2 + \frac{2}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l}^2 \right) + \left(\frac{1}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n}^2 + \frac{1}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l}^2 \right) \text{ или} \\ \Delta = & \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}^2(\tau) d\tau - \left(\frac{1}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n}^2 + \frac{1}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l}^2 \right). \end{aligned} \quad (4.25)$$

Сделав замену $K_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$, получим:

$$\beta_{k,n} = \alpha_n \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) \int_0^{\infty} L_k(\tau, \alpha_n) e^{j\omega\tau} d\tau d\omega; \quad (4.26)$$

$$\beta_{k,l} = \alpha_l \int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(\omega) \int_0^{\infty} L_k(\tau, \alpha_l) e^{j\omega\tau} d\tau d\omega; \quad (4.27)$$

$$\int_0^{\infty} L_k(\tau, \alpha_{n(l)}) e^{-j\omega\tau} d\tau = W_k(j\omega, \alpha_{n(l)}) = \frac{1}{j\omega + \frac{\alpha_{n(l)}}{2}} \left(\frac{j\omega - \frac{\alpha_{n(l)}}{2}}{j\omega + \frac{\alpha_{n(l)}}{2}} \right)^k. \quad (4.28)$$

Подставив это выражение в формулу для погрешности аппроксимации взаимокорреляционной функции, получим:

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}^2(\tau) d\tau - \left(\frac{1}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n}^2 + \frac{1}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l}^2 \right); \quad (4.29)$$

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}^2(\tau) d\tau - \left(\alpha_n \sum_{k=0}^{m_n} \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) W_k(\alpha_n, j\omega) d\omega \right)^2 + \alpha_l \sum_{k=0}^{m_l} \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(\omega) W_k(\alpha_l, j\omega) d\omega \right)^2 \right); \quad (4.30)$$

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}^2(\tau) d\tau - \alpha_n \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega_1) S_{xy}(\omega_2) \left[\sum_{k=0}^{m_n} W_k(\alpha_n, j\omega_1) W_k(\alpha_n, j\omega_2) \right] d\omega_1 d\omega_2 - \alpha_l \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(\omega_1) S_{yx}(\omega_2) \left[\sum_{k=0}^{m_l} W_k(\alpha_l, j\omega_1) W_k(\alpha_l, j\omega_2) \right] d\omega_1 d\omega_2; \quad (4.31)$$

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}^2(\tau) d\tau - \alpha_n \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega_1) S_{xy}(\omega_2) \frac{1 - \left(\frac{j\omega_1 - \alpha_n/2}{j\omega_1 + \alpha_n/2} \frac{j\omega_2 - \alpha_n/2}{j\omega_2 + \alpha_n/2} \right)^{m+1}}{j\omega_1 + j\omega_2} d\omega_1 d\omega_2 - \alpha_l \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(\omega_1) S_{yx}(\omega_2) \frac{1 - \left(\frac{j\omega_1 - \alpha_l/2}{j\omega_1 + \alpha_l/2} \frac{j\omega_2 - \alpha_l/2}{j\omega_2 + \alpha_l/2} \right)^{m+1}}{j\omega_1 + j\omega_2} d\omega_1 d\omega_2. \quad (4.32)$$

Условием минимума этой погрешности является уравнение

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} = 0 \quad (4.33)$$

при $\frac{\partial^2 \Delta}{\partial \alpha^2} > 0$.

Тогда:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} = -(m+1) \left[\left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) \frac{j\omega}{j\omega + \alpha_n/2} W_m(\alpha_n, j\omega) d\omega \right)^2 - \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) \frac{\alpha_n/2}{j\omega + \alpha_n/2} W_m(\alpha_n, j\omega) d\omega \right)^2 \right] +$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} = -(m+1) \left[\left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(\omega) \frac{j\omega}{j\omega + \alpha_n/2} W_m(\alpha_n, j\omega) d\omega \right)^2 - \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(\omega) \frac{\alpha_n/2}{j\omega + \alpha_n/2} W_m(\alpha_n, j\omega) d\omega \right)^2 \right] +$$

$$\left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(\omega) \frac{j\omega}{j\omega + \alpha_l/2} W_m(\alpha_l, j\omega) d\omega \right)^2 - \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{yx}(\omega) \frac{\alpha_l/2}{j\omega + \alpha_l/2} W_m(\alpha_l, j\omega) d\omega \right)^2$$

или, преобразовав, запишем:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} = -(m+1) \left(\frac{1}{\alpha_n^2} \beta_{m,n} \beta_{m+1,n} + \frac{1}{\alpha_l^2} \beta_{m,l} \beta_{m+1,l} \right). \quad (4.34)$$

Учитывая, что $\frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} = 0$, получим уравнение, в результате решения которого можно получить оптимальные значения α_n, α_l :

$$\frac{1}{\alpha_n^2} \beta_{m,n} \beta_{m+1,n} + \frac{1}{\alpha_l^2} \beta_{m,l} \beta_{m+1,l} = 0. \quad (4.35)$$

Данные результаты справедливы для аппроксимации правой и левой ветвей взаимной корреляционной функции. То есть рассматривается положительная и отрицательная полуплоскости относительно оси ординат. Однако результаты аппроксимации можно улучшить, произведя предварительное преобразование взаимной корреляционной функции.

Например, когда пара данных процессов представляют собой один и тот же процесс, только задержанный на разные интервалы времени (что получается в случае моделирование пары процессов с использованием только линии задержки без фильтров), взаимная корреляционная функция имеет резко выраженный максимум, причем в точке экстремума она равна единице. Таким образом, приведенные выше результаты, равно как и результаты, полученные при аппроксимации автокорреляционной функции, могут быть использованы и в данном случае.

При этом будут устранены такие недостатки приведенного выше алгоритма, как большое число параметров аппроксимирующего выражения (большое число членов разложения ряда для каждой ветви).

Для взаимной корреляционной функции не обязательно условие равенства ее максимального значения единице. Однако хорошие результаты, полученные при аппроксимации автокорреляционных функций с наложением такого условия, послужили причиной использования нормировки в случае взаимных корреляционных функций.

Итак, при определенном максимуме A_m в точке τ_m взаимная корреляционная функция может быть выражена, как

$$K_{xy}(\tau) = A_m \left(\sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} 1(\tau - \tau_m) L_k(\tau - \tau_m, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} \beta_{k,l} 1(\tau_m - \tau) L_k(\tau_m - \tau, \alpha_l) \right); \quad (4.36)$$

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} \left[K_{xy}(\tau) - A_m \left(\sum_{k=0}^{m_n} \beta_{k,n} 1(\tau - \tau_m) L_k(\tau - \tau_m, \alpha_n) + \right. \right.$$

$$+ \sum_{k=0}^{m_1} \beta_{k,l} 1(\tau_m - \tau) L_k(\tau_m - \tau, \alpha_l) \Big] d\tau. \quad (4.37)$$

Коэффициенты разложения запишутся в виде:

$$\beta_{k,n} = \alpha_n \int_0^{\infty} K_{xy}(\tau + \tau_m) L_k(\tau, \alpha_n) d\tau; \quad (4.38)$$

$$\beta_{k,l} = \alpha_l \int_0^{\infty} K_{xy}(\tau_m - \tau) L_k(\tau, \alpha_l) d\tau. \quad (4.39)$$

Для повышения точности рекомендуется вместо коэффициентов β_k использовать коэффициенты b_k , определяемые в виде [28]

$$b_k = \beta_k + \frac{1 - \sum_{k=0}^m \beta_k}{m+1}. \quad (4.40)$$

Тогда взаимная корреляционная функция будет выражена в виде

$$K_{xy}(\tau) = A_m \left(\sum_{k=0}^{m_n} b_{k,n} 1(\tau - \tau_m) L_k(\tau - \tau_m, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_1} b_{k,l} 1(\tau_m - \tau) L_k(\tau_m - \tau, \alpha_l) \right). \quad (4.41)$$

Отметим, что в некоторых случаях, например, при отрицательной определенности взаимной корреляционной функции, значение A_m может стать отрицательным.

Условие минимума квадратической погрешности аппроксимации, равно как и алгоритм поиска оптимальных α_n, α_l , останется аналогичным.

Ввиду представления отсчетов взаимной корреляционной функции в виде списка или массива при программной реализации алгоритма сдвиг функции на значение абсциссы максимума выполняется тривиально. Алгоритм аппроксимации ортогональными функциями Лагерра приведен на рисунке 4.1.

При аппроксимации взаимных корреляционных функций ортогональными функциями Лагерра моделью (4.41) выражения для определения интервала корреляции примут вид:

$$\tau_{kxy}^{(2)} \approx \frac{2}{\alpha_1} \sum_{k=0}^{m_n} (-1)^k b_{k,n} + \frac{2}{\alpha_2} \sum_{k=0}^{m_1} (-1)^k b_{k,l}, \quad (4.42)$$

$$\tau_{kxy}^{(4)} \approx \frac{1}{\alpha_1} \sum_{k=0}^{m_n} b_{k,n}^2 + \frac{1}{\alpha_2} \sum_{k=0}^{m_1} b_{k,l}^2, \quad (4.43)$$

а выражения для оценки моментов взаимных корреляционных функций -

$$\mu_{nxy} = \varphi_n(\alpha_1) \sum_{k=0}^{m_1} (-1)^k c_{nk} b_{k,n} + \varphi_n(\alpha_2) \sum_{k=0}^{m_2} (-1)^k c_{nk} b_{k,l}. \quad (4.44)$$

Выражения для первых четырех моментов представлены в таблице 4.1.

Параметры модели оценки моментов корреляционной функции

Таблица 4.1

μ_n	$\varphi_n(\alpha)$	c_{nk}
μ_0	$2/\alpha$	1
μ_1	$4/\alpha^2$	$1+2k$
μ_2	$16\alpha^3$	$1+2k+2k^2$
μ_3	$32/\alpha^4$	$3+8k+6k^2+4k^3$

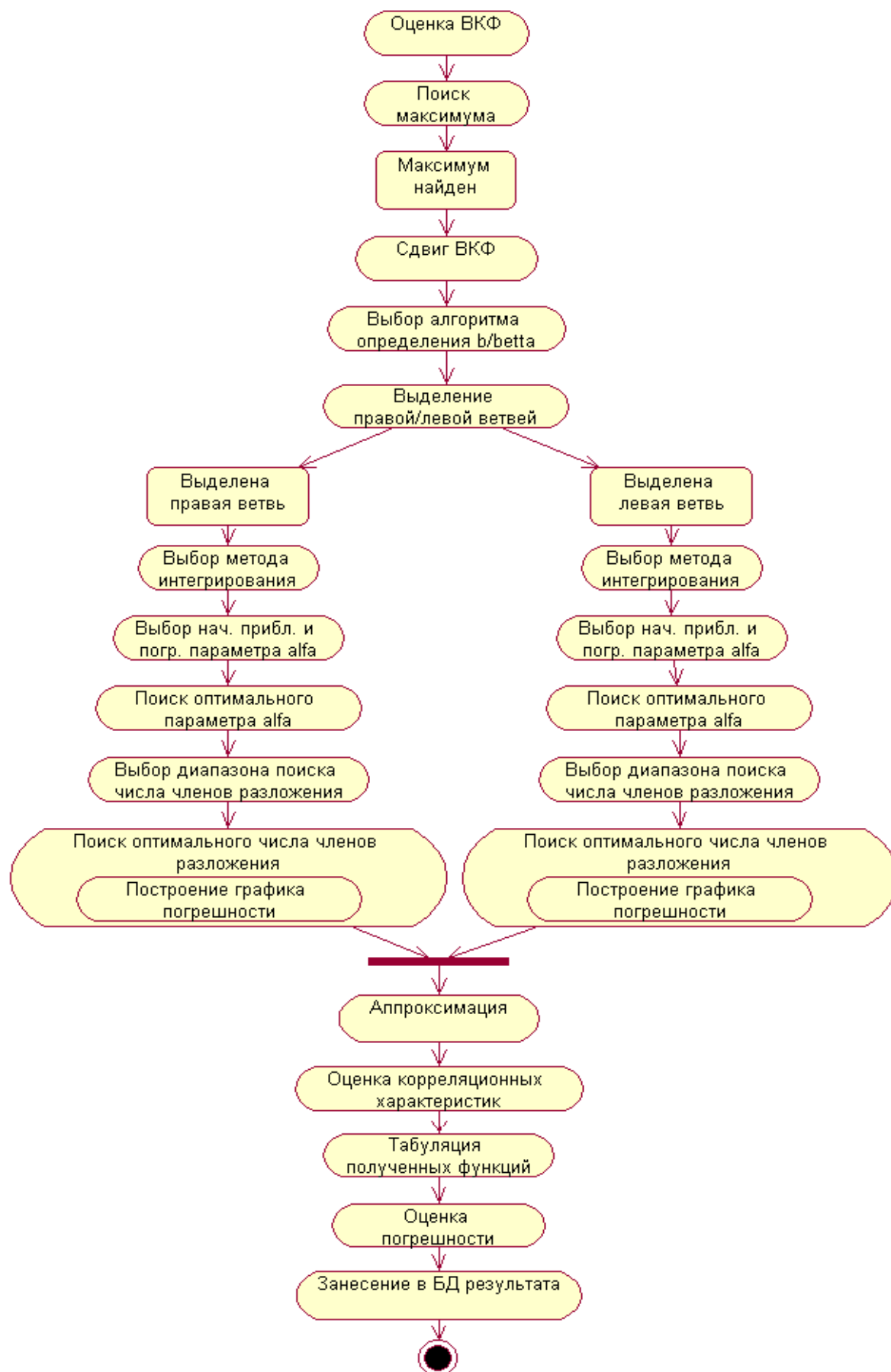


Рисунок 4.1. Диаграмма деятельности (UML). Аппроксимация ВКФ ортогональными функциями Лагерра

4.2. Интерфейс четвертой подсистемы

Аппроксимация ортогональными функциями Лагерра производится на странице 4, приведенной на рисунке 4.2.

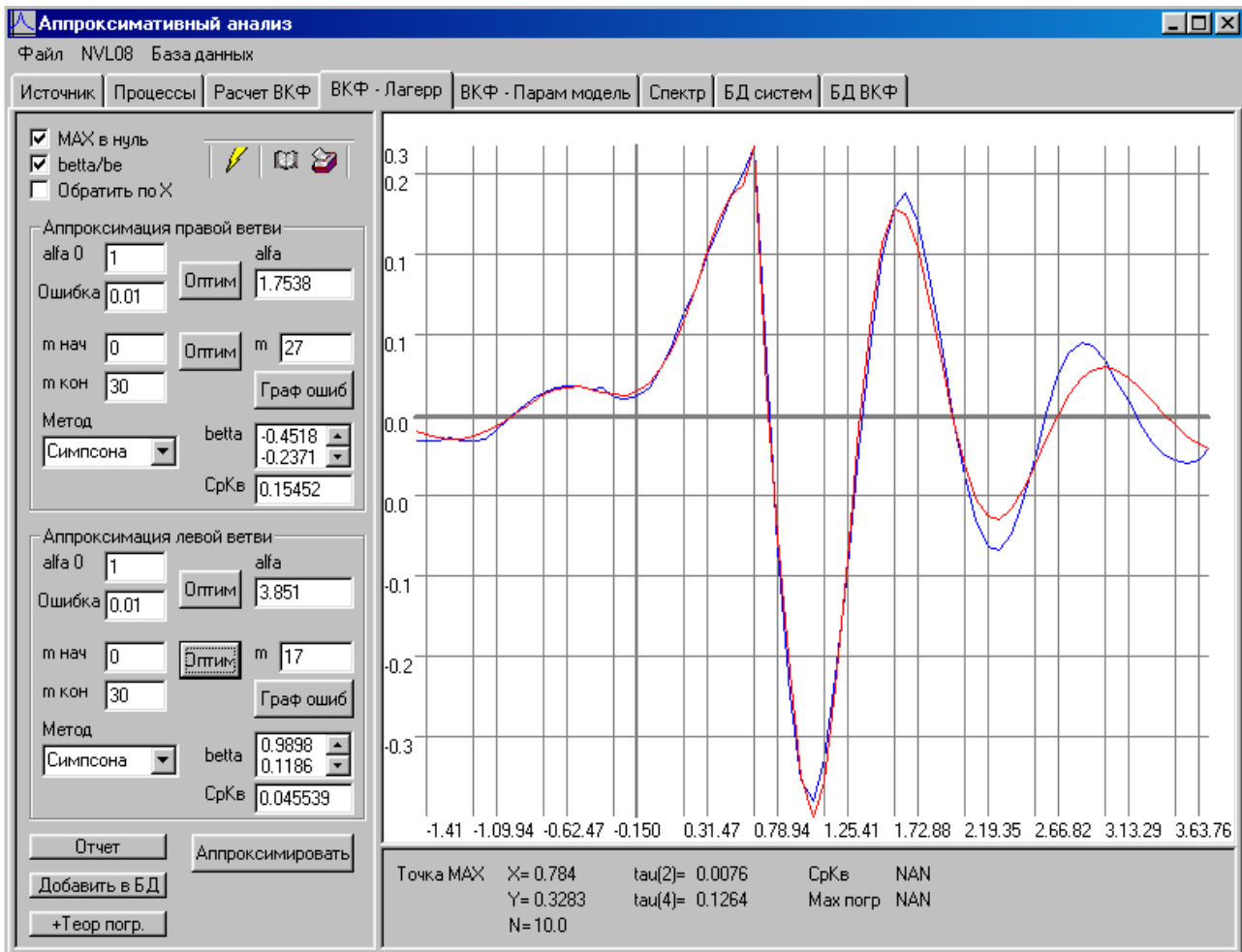


Рисунок 4.2. Страница аппроксимации ВКФ ортогональными функциями Лагерра

Сначала нужно установить флажки в верхнем левом углу страницы. Флажок «MAX в нуль» означает, что будет найден максимум на графике ВКФ (справа или слева от оси ординат), затем график сдвинется вдоль оси X на величину абсциссы точки максимума. Значение максимума будет приведено внизу страницы после аппроксимации. Таким образом, максимум графика будет в точке с абсциссой 0. Затем все ординаты графика будут разделены на ординату максимума. После аппроксимации рядами Лагерра ВКФ будет приведена в исходное состояние, а при вычислении ВКФ и спектра по параметрам аппроксимирующего выражения будут учтены проведенные изменения.

Флажок «beta/be» означает, что вместо параметров аппроксимирующего выражения β , будут использоваться исправленные b .

Флажок «Обратить по X» устанавливается, когда у графика есть ярко выраженный минимум в отрицательной области. Тогда график будет инвертирован относительно X и это будет учтено при построении аппроксимирующего выражения.

После установления флажков необходимо определить оптимальные значения параметров ряда Лагерра α и β_0, \dots, β_m для каждой ветви. Для этого надо

- выбрать метод численного интегрирования в поле «Метод»,


- указать начальное приближение α_0 в поле «alfa 0» и погрешность определения α в поле «Ошибка»,
- нажать на кнопку «Оптим» рядом с полем «alfa»,
- выбрать диапазон, в котором будет рассчитано число членов разложения m , в полях «m нач» и «m кон»,
- нажать на кнопку «Оптим» рядом с полем «m»,
- в случае необходимости построения зависимости погрешности аппроксимации от числа членов разложения, нажать на кнопку «Граф ошиб.»,
- определив α и число членов разложения для обеих ветвей, нажать на кнопку  («Аппроксимировать»).



Рисунок 4.3. График погрешности аппроксимации

После этого в поле «beta» появится массив членов разложения β , а в поле «СрКв» будет отображена среднеквадратическая ошибка аппроксимации. Будет также построен график исходной ВКФ (синим цветом) и аппроксимирующего выражения (красным цветом).


Параметр α и число членов разложения m могут быть введены вручную в полях «alfa» и «m» соответственно.

По параметрам аппроксимирующих выражений рассчитываются интервалы корреляции, отображаемые внизу страницы.

Для сохранения результатов аппроксимации в файл необходимо нажать на кнопку

«Отчет» в левом нижнем углу страницы.

Погрешности рассчитываются для каждой ветви отдельно. Пример графика погрешности приведен на рисунке 4.3.

Предусмотрена возможность занесения результатов аппроксимации в базу данных. Вместе с параметрами аппроксимирующих выражений заносится среднеквадратическое отклонение и максимальная погрешность аппроксимации для каждой ветви, что позволяет оценить методическую погрешность аппроксимации методом имитационного моделирования. Запоминание результатов производится после нажатия на кнопку  («Добавить в БД»). При этом нужно ввести шифр, идентифицирующий аппроксимирующее выражение внутри системы. Отметим, что аналогично запрос на ввод шифра возникает при занесении в БД информации об оценке ВКФ и о параметрической аппроксимации. В запросе указывается название системы, для которой заносятся результаты. Проверка на соответствие шифров не производится, поэтому требование о равенстве шифров для аппроксимирующих выражений и оценки ВКФ одной реализации пары процессов может быть только рекомендовано. В этом случае процесс сравнения результатов аппроксимации будет значительно облегчен.

5. АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ МОЩНОСТИ

5.1. Аппроксимация спектральных плотностей мощности функциями заданного вида

Спектральные функции представляют собой частотное распределение энергетических характеристик случайного процесса. Существуют различные способы их определения, например: преобразование Фурье процесса, преобразование Фурье корреляционной функции. Определим спектральную плотность мощности в виде [14, 18]:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (5.1)$$

Воспользовавшись обратным преобразованием Винера-Хинчина, можно установить связь между корреляционной функцией и спектральной плотностью мощности:

$$K_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (5.2)$$

С учетом четности функций $K_x(\tau)$ и $S_x(\omega)$, воспользовавшись формулой Эйлера, выражения (5.1), (5.2) приведем к виду:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K_x(\tau) \cos\omega\tau d\tau; \quad (5.3)$$

$$K_x(\tau) = \int_0^{\infty} S_x(\omega) \cos\omega\tau d\omega. \quad (5.4)$$

Аналитические выражения спектральной плотности мощности для типовых моделей корреляционных функций приведены в таблице 5.1.

Подставив в выражение (5.4) $\tau = 0$, получим

$$K_x(0) = \int_0^{\infty} S_x(\omega) d\omega - \quad (5.5)$$

условие нормировки для спектральной плотности мощности.

Подставив в выражение (5.3) $\omega = 0$, получим

$$S_x(0) = \frac{\sigma_x^2}{\pi} \tau_k^{(2)}. \quad (5.6)$$

При решении некоторых прикладных задач требуется знание аналитического выражения спектральной плотности мощности. Благодаря наличию аналитической связи между корреляционной функцией и спектральной плотностью мощности, вопросы их аппроксимации оказываются взаимосвязанными [28].

Запишем квадратическую погрешность аппроксимации спектральной плотности процесса $S_x(\omega)$ функцией заданного вида $S_a(\omega)$:

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} [S_x(\omega) - S_a(\omega)]^2 d\omega. \quad (5.7)$$

Раскрыв квадратные скобки в (5.7), получим:

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} S_x^2(\omega) d\omega - 2 \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) S_a(\omega) d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} S_a^2(\omega) d\omega. \quad (5.8)$$

$K_x(\tau)$	$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|}$	$\sigma_x^2 \frac{\alpha}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$	$\sigma_x^2 \frac{2\alpha^3}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)^2}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 - \alpha|\tau|)$	$\sigma_x^2 \frac{2\alpha\omega^2}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)^2}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( 1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2 \tau^2}{3} \right)$	$\sigma_x^2 \frac{8\alpha^5}{3\pi(\alpha^2 + \omega^2)^3}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$	$\sigma_x^2 \frac{\alpha}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2} + \frac{1}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right)$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sigma_x^2 \frac{2\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}{\pi(\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2)(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sigma_x^2 \frac{2\alpha\omega^2}{\pi(\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2)(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (\cos \omega_0 \tau + C \sin \omega_0 \tau)$	$\sigma_x^2 \frac{\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2 + \omega^2) + C\omega_0(\alpha^2 + \omega_0^2 - \omega^2)}{\pi(\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2)(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)}$

Подставим в (5.8) значения $S_x(\omega)$ и $S_a(\omega)$, полученные из корреляционной функции при помощи преобразования Винера-Хинчина [14]:

$$\begin{cases} S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau; \\ S_a(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_a(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \end{cases} \quad (5.9)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_x(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega d\tau - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_a(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega d\tau + \\ & + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_a(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} S_a(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega d\tau. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Применяя к внутренним интегралам обратное преобразование Винера-Хинчина и учитывая четность корреляционной функции, получим:

$$\Delta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [K_x(\tau) - K_a(\tau)]^2 d\tau. \quad (5.11)$$

Из выражения (5.11) видно, что задача аппроксимации спектральной плотности мощности функциями заданного вида сводится к задаче аппроксимации корреляционной функции функциями вида:

$$K_a(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_a(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (5.12)$$

Аналогичным образом, воспользовавшись преобразованием Винера-Хинчина, можно определить взаимную спектральную плотность мощности исследуемых процессов:

$$S_{xy}(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (5.13)$$

Отсюда

$$K_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (5.14)$$

Поскольку взаимная корреляционная функция не является четной, взаимная спектральная плотность мощности в общем случае является комплексной:

$$S_{xy}(j\omega) = \text{Re}S_{xy}(j\omega) - j\text{Im}S_{xy}(j\omega). \quad (5.15)$$

Отсюда очевидно, что

$$S_{yx}(j\omega) = \text{Re}S_{xy}(j\omega) + j\text{Im}S_{xy}(j\omega). \quad (5.16)$$

Воспользовавшись соотношениями (5.15)-(5.16), получим:

$$C_{xy}(\omega) = 2\text{Re}S(j\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [K_{xy}(\tau) + K_{yx}(\tau)] \cos \omega\tau d\tau, \quad (5.17)$$

$$Q_{xy}(\omega) = 2\text{Im}S_{xy}(j\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [K_{xy}(\tau) - K_{yx}(\tau)] \sin \omega\tau d\tau. \quad (5.18)$$

Функция $C_{xy}(\omega)$ является четной, а $Q_{xy}(\omega)$ - нечетной. Воспользовавшись обратным преобразованием Фурье, получим:

$$K_{xy}(\tau) + K_{yx}(\tau) = 2 \int_0^{\infty} C_{xy}(\omega) \cos \omega\tau d\omega; \quad (5.19)$$

$$K_{xy}(\tau) - K_{yx}(\tau) = 2 \int_0^{\infty} Q_{xy}(\omega) \sin \omega\tau d\omega. \quad (5.20)$$

Для стационарно связанных процессов часто вводят нормированную меру взаимной когерентности, являющуюся функцией частоты [18]:

$$\text{Coh}_{xy}(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_x(\omega)S_y(\omega)}. \quad (5.21)$$

Эта функция равна 0 для независимых процессов, 1 – для линейно связанных процессов и находится в пределах от 0 до 1 во всех прочих случаях.

Знание спектральной плотности мощности позволяет решать самые разные прикладные задачи в различных предметных областях:

- выделение полезного сигнала на фоне шумов;
- идентификации объектов и т.д.

Представив модель взаимной корреляционной функции в виде

$$K_{axy}(\tau) = K_{ax}(\tau - \tau_m), \quad (5.22)$$

определим взаимную спектральную плотность мощности

$$S_{axy}(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{ax}(\tau - \tau_m) e^{-j\omega\tau} d\tau = \exp(-j\omega\tau_m) S_x(\omega). \quad (5.23)$$

Воспользовавшись выражением (5.23) и результатами, представленными в таблице 5.1, можно определить аналитические выражения взаимной спектральной плотности мощности для типовых моделей корреляционных функций.

Из выражения (5.23) видно, что

$$\operatorname{Re} S_{axy}(j\omega) = \cos \omega\tau_m S_x(\omega), \quad (5.24)$$

$$\operatorname{Im} S_{axy}(j\omega) = -\sin \omega\tau_m S_x(\omega). \quad (5.25)$$

Из свойств взаимной корреляционной функции следует, что

$$K_{axy}(\tau) = -K_{ayx}(-\tau). \quad (5.26)$$

Воспользовавшись (5.13), получим:

$$S_{axy}(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} K_{axy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} K_{ayx}(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau. \quad (5.27)$$

$$\text{Обозначим } S_{axy}^0(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} K_{axy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \operatorname{Re} S_{axy}^0(j\omega) - j \operatorname{Im} S_{axy}^0(j\omega). \quad (5.28)$$

$$\text{Тогда } \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} K_{ayx}(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau = \operatorname{Re} S_{ayx}^0(j\omega) + j \operatorname{Im} S_{ayx}^0(j\omega). \quad (5.29)$$

А взаимная спектральная плотность мощности запишется, как:

$$S_{axy}(j\omega) = \operatorname{Re} S_{axy}^0(j\omega) + \operatorname{Re} S_{ayx}^0(j\omega) - j(\operatorname{Im} S_{axy}^0(j\omega) - \operatorname{Im} S_{ayx}^0(j\omega)). \quad (5.30)$$

Подставив зависимости, приведенные в таблице 5.2, и найденные параметры аппроксимирующих выражений в (5.30), можно определить спектральную плотность мощности.

Представим взаимную корреляционную функцию, как

$$K_{axy}^{(m)}(\tau) = A_m K_{axy}(\tau - \tau_m).$$

Тогда выражение для взаимной спектральной плотности мощности запишем:

$$S_{axy}(j\omega) = A_m \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{axy}(\tau - \tau_m) e^{-j\omega\tau} d\tau = A_m e^{-j\omega\tau_m} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{axy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (5.31)$$

В этом случае вещественная и мнимая части спектральной плотности мощности запишутся в виде

$$\operatorname{Re} S_{axy}(j\omega) = A_m \left[\cos \omega\tau_m (\operatorname{Re} S_{an}^0(j\omega) + \operatorname{Re} S_{al}^0(j\omega)) - \sin \omega\tau_m (\operatorname{Im} S_{an}^0(j\omega) - \operatorname{Im} S_{al}^0(j\omega)) \right] \quad (5.32)$$

$$\operatorname{Im} S_{axy}(j\omega) = -A_m \left[\sin \omega\tau_m (\operatorname{Re} S_{an}^0(j\omega) + \operatorname{Re} S_{al}^0(j\omega)) + \cos \omega\tau_m (\operatorname{Im} S_{an}^0(j\omega) - \operatorname{Im} S_{al}^0(j\omega)) \right] \quad (5.33)$$

$$\text{где } S_{an}^0(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} K_{an}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad S_{al}^0(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} K_{al}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (5.34)$$

а $K_{an}(\tau)$, $K_{al}(\tau)$ – аппроксимирующие функции правой и левой ветви.

Так как взаимная спектральная плотность мощности

$$S_{axy}(j\omega) = |S_{axy}(\omega)| \exp[j\phi(\omega)] \quad (5.35)$$

– величина комплексная, при анализе используют графики вещественной и мнимой частей, модуля взаимной спектральной плотности мощности:

$$|S_{axy}(\omega)| = \sqrt{(\operatorname{Re} S_{axy}(j\omega))^2 + (\operatorname{Im} S_{axy}(j\omega))^2} \quad (5.36)$$

и фазы:

$$\varphi_{axy}(\omega) = \operatorname{arctg} \left[-\frac{\operatorname{Im} S_{axy}(j\omega)}{\operatorname{Re} S_{axy}(j\omega)} \right]. \quad (5.37)$$

Преобразование Фурье корреляционных функций

Таблица 5.2

$K_{a,xy}(\tau)$	$S_{a,xy}^0(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} K_{a,xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$	
$e^{-\alpha|\tau|}$	$\operatorname{Re} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2}$
	$\operatorname{Im} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2}$
$e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$	$\operatorname{Re} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{2\alpha^3}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$
	$\operatorname{Im} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\omega(3\alpha^2 + \omega^2)}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$
$e^{-\alpha|\tau|} (1 - \alpha|\tau|)$	$\operatorname{Re} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{2\alpha\omega^2}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$
	$\operatorname{Im} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\omega(\omega^2 - \alpha^2)}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$
$e^{-\alpha|\tau|} \left( 1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2\tau^2}{3} \right)$	$\operatorname{Re} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{8\alpha^5}{3(\alpha^2 + \omega^2)^3}$
	$\operatorname{Im} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\omega(15\alpha^4 + 10\alpha^2\omega^2 + 3\omega^4)}{3(\alpha^2 + \omega^2)^3}$
$e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0\tau$	$\operatorname{Re} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\alpha}{2} \left(\frac{1}{\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2} + \frac{1}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right)$
	$\operatorname{Im} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{1}{2} \left(\frac{\omega + \omega_0}{\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2} + \frac{\omega - \omega_0}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right)$
$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0\tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0\tau \right)$	$\operatorname{Re} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{2\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}{(\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2)(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)}$
	$\operatorname{Im} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\omega(3\alpha^2 + \omega^2 - \omega_0^2)}{(\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2)(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)}$
$e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0\tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0\tau \right)$	$\operatorname{Re} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{2\alpha\omega^2}{(\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2)(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)}$
	$\operatorname{Im} S_{a,xy}^0(j\omega)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\omega(\omega^2 - \omega_0^2 - \alpha^2)}{(\alpha^2 + (\omega + \omega_0)^2)(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)}$

На рис. 5.1-5.5 приведены примеры аппроксимации спектральных плотностей мощности функциями заданного вида.

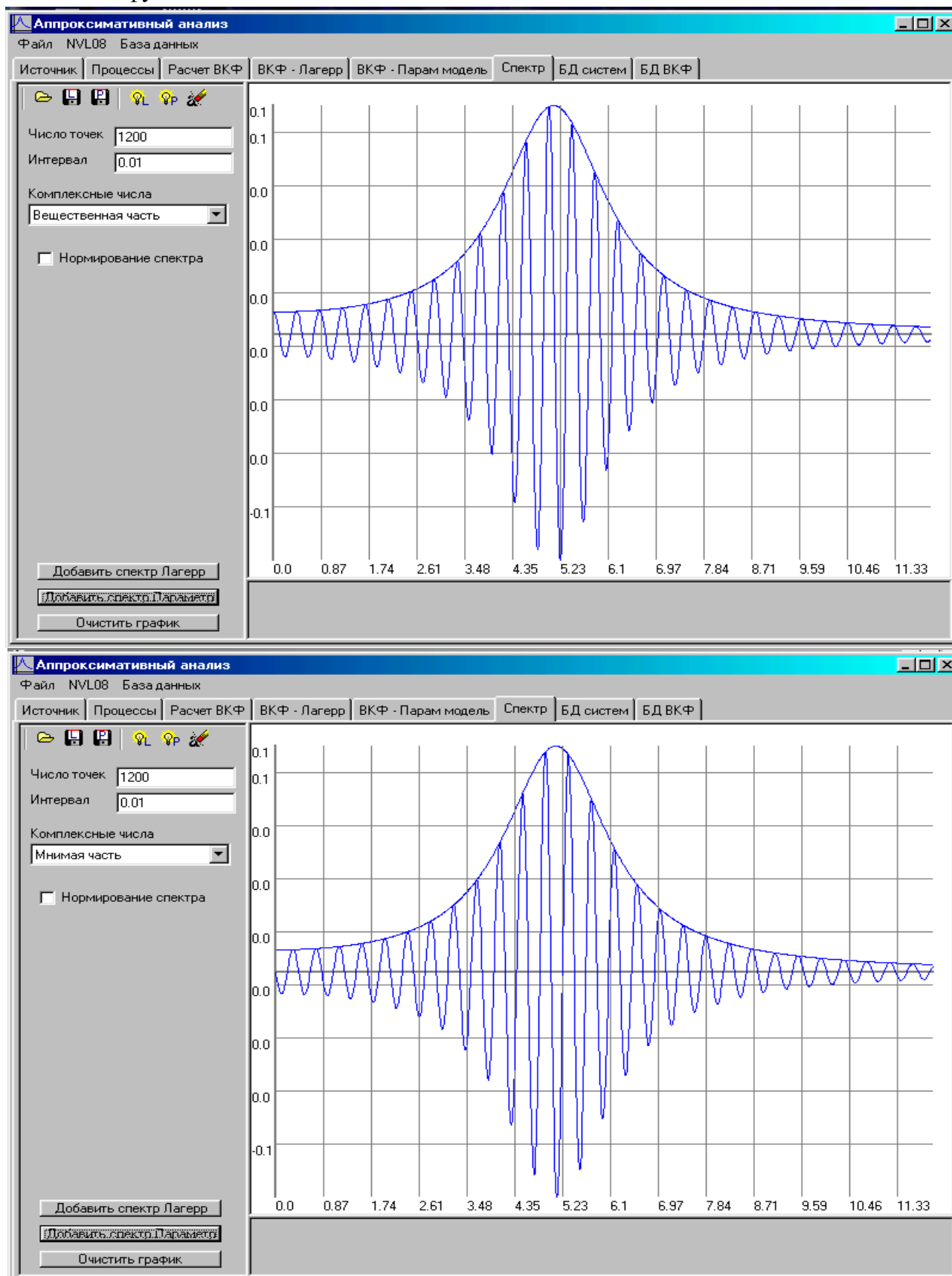


Рисунок 5.1. Модуль, вещественная и мнимая части взаимного спектра для $\rho_{xy}(\tau) = \exp(-|\tau - 10|)\cos 5(\tau - 10)$

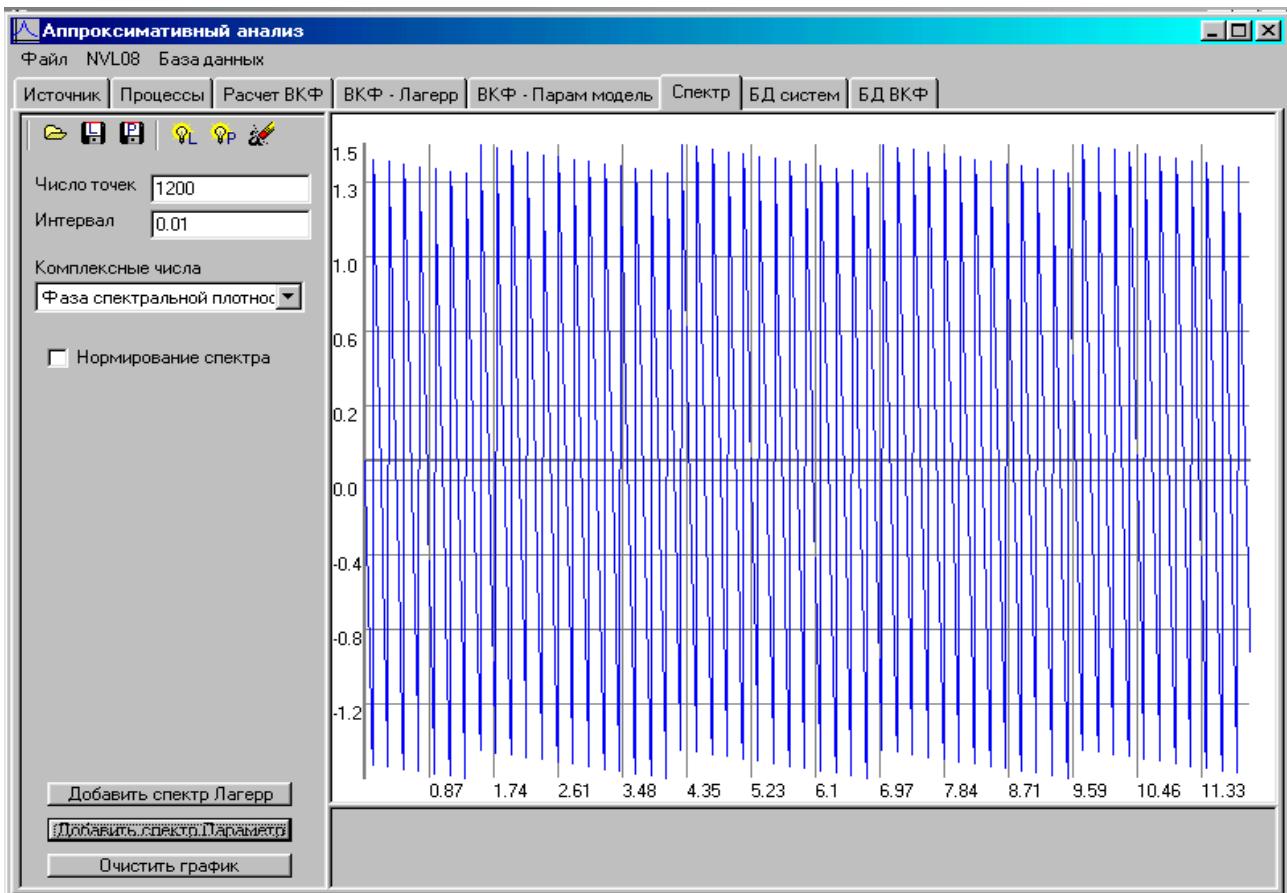


Рисунок 5.2. Фаза взаимного спектра для $\rho_{xy}(\tau) = \exp(-|\tau - 10|)\cos 5(\tau - 10)$

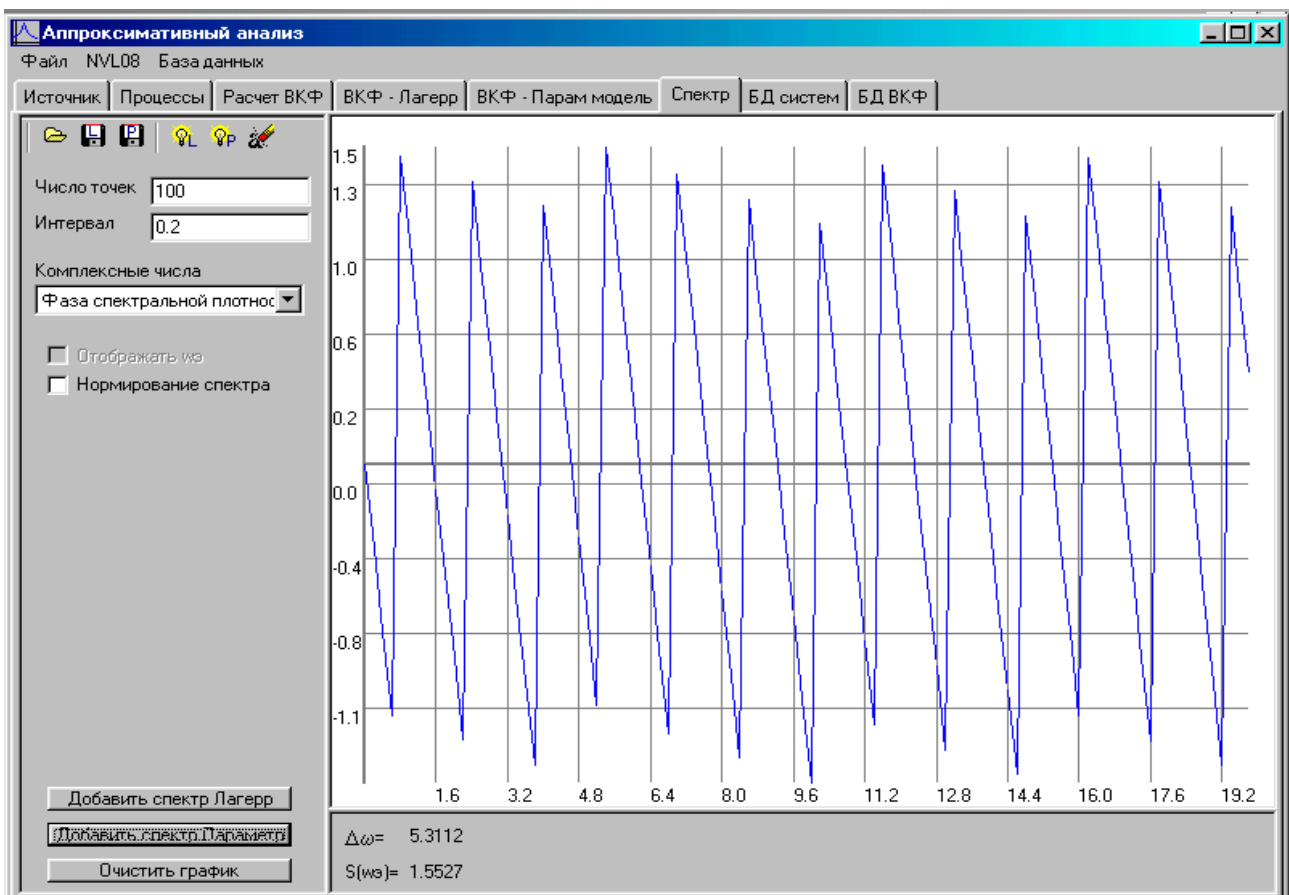


Рисунок 5.3. Фаза взаимного спектра для $\rho_{xy}(\tau) = \exp(-|\tau - 2|)\cos 5(\tau - 2)$

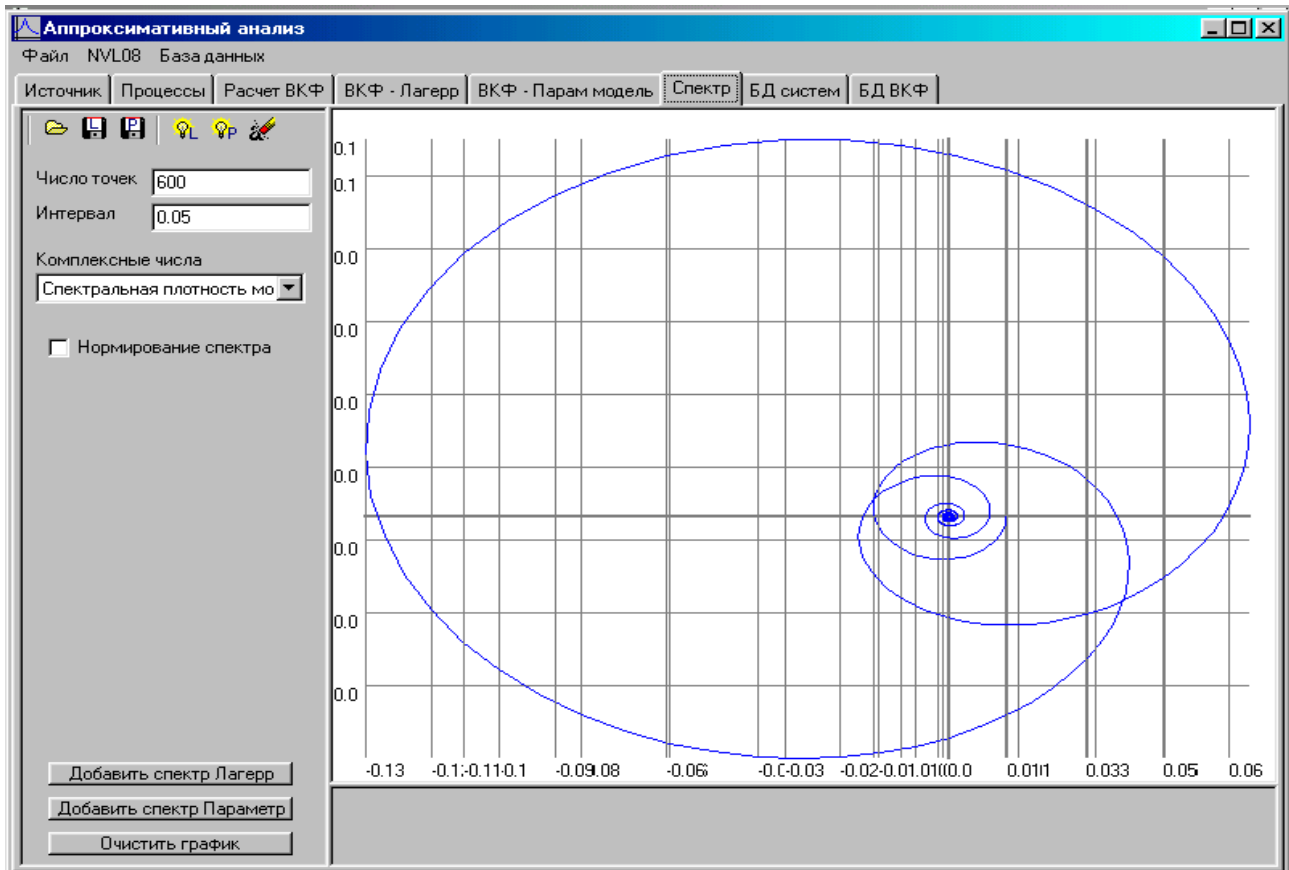


Рисунок 5.4. Взаимный спектр для $\rho_{xy}(\tau) = \exp(-|\tau - 2|)\cos 5(\tau - 2)$

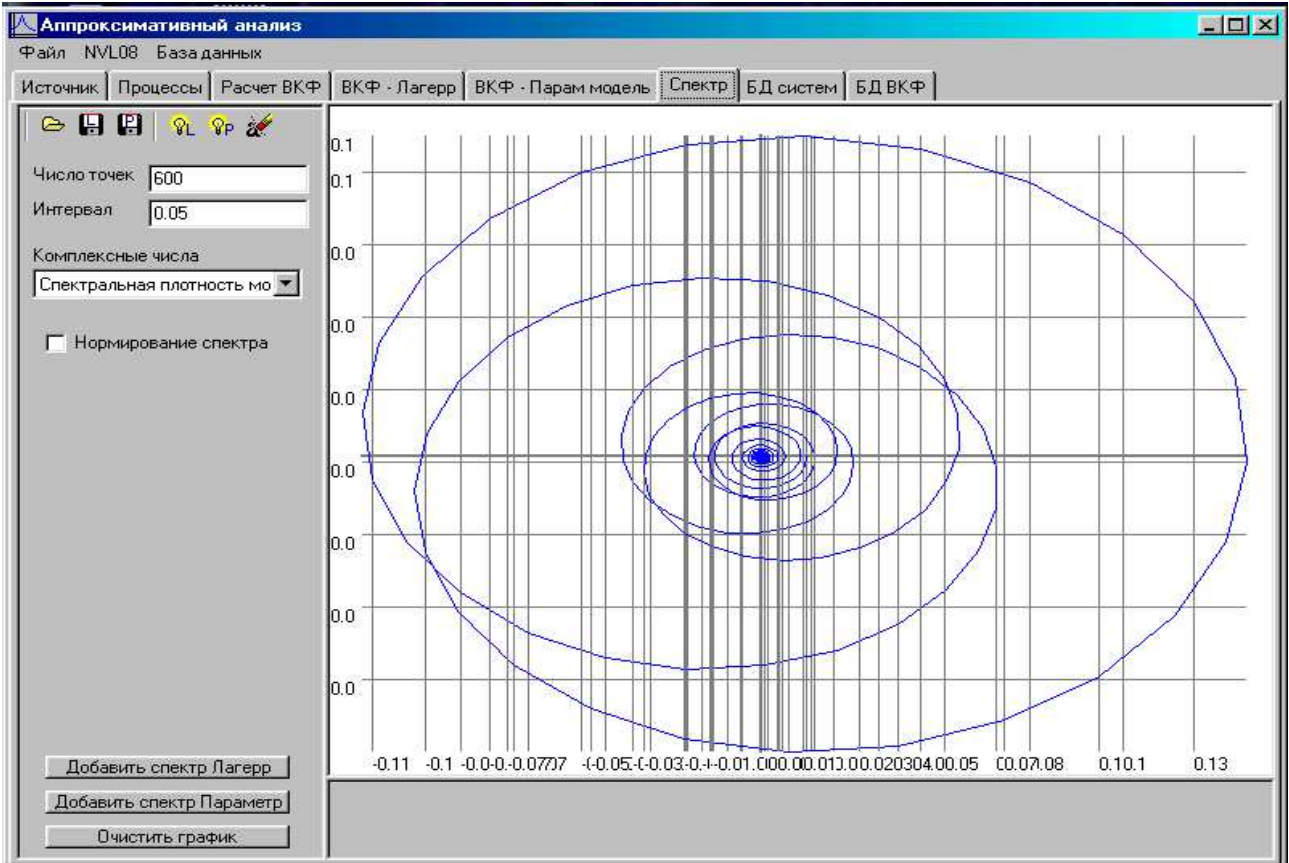


Рисунок 5.5. Взаимный спектр для $\rho_{xy}(\tau) = \exp(-|\tau - 5|)\cos 5(\tau - 5)$

При построении спектра с большим значением τ_m , необходимо правильно выбирать значение интервала дискретизации спектра $\Delta\omega$. В противном случае будет проявляться эффект наложения частот. Рекомендуемое значение интервала дискретизации, определяемое для восстановления $\cos \omega\tau_m$ (см. (5.24), (5.25)),

$$\Delta\omega \leq \frac{0,2 \div 0,4}{\tau_m}. \quad (5.38)$$

Рисунок 5.6 иллюстрирует эту ситуацию.

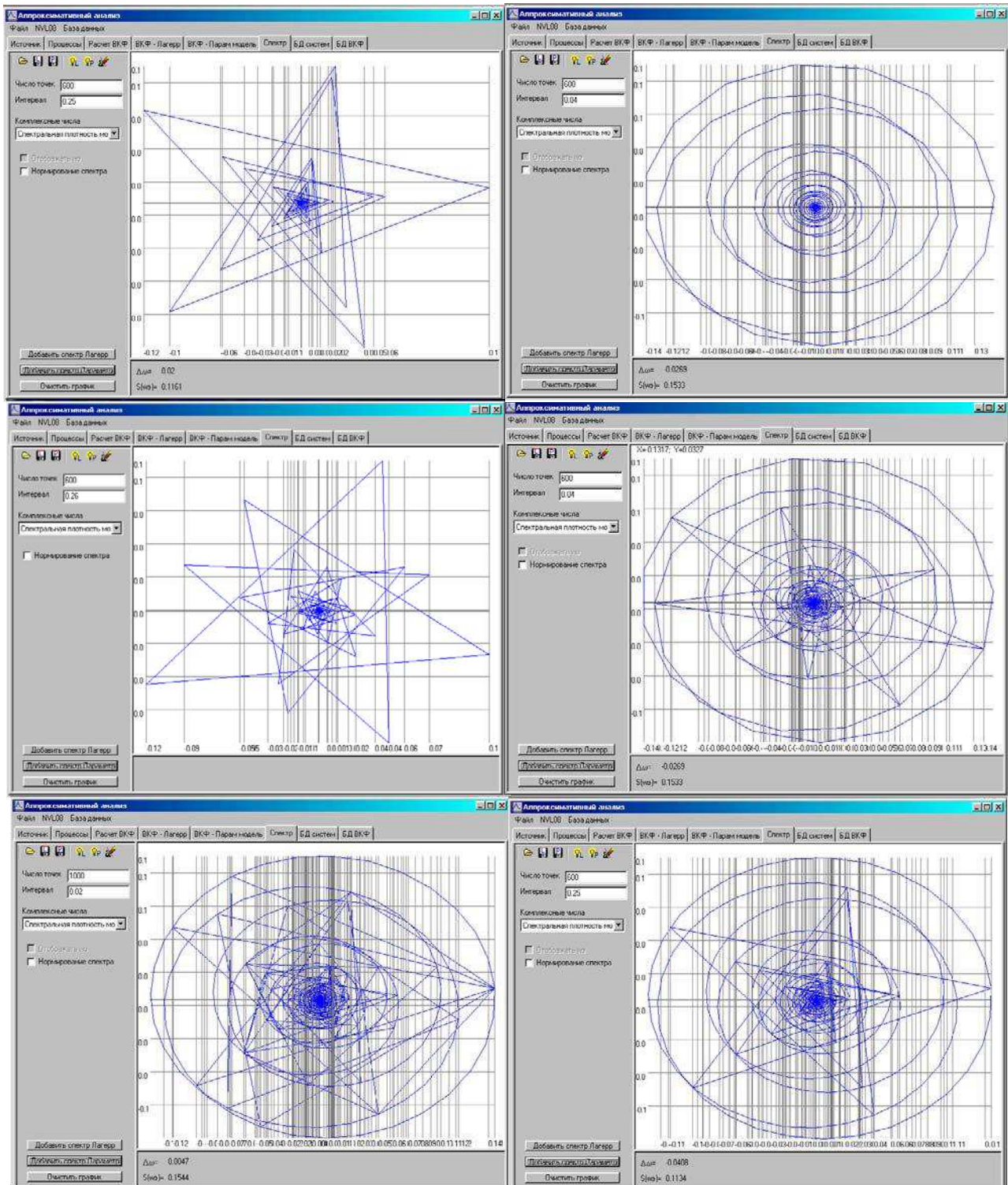
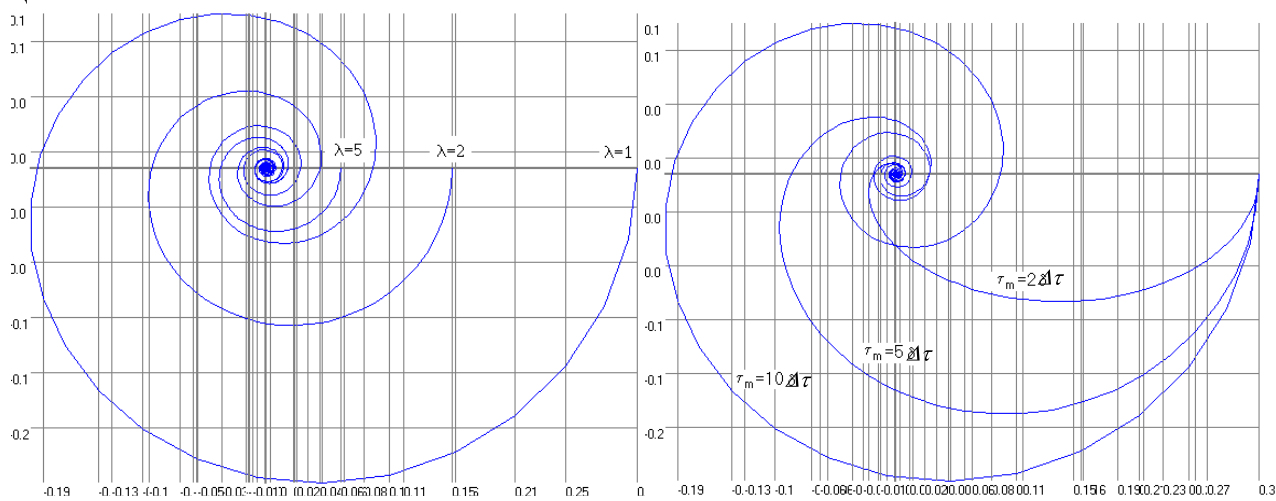
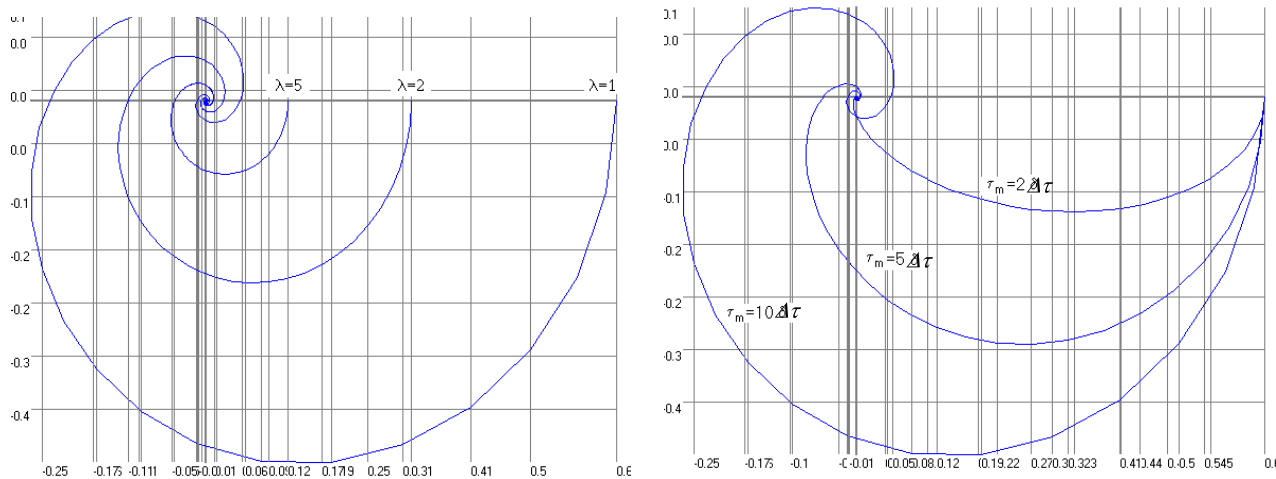


Рисунок 5.6. Взаимные спектральные плотности мощности при разных значениях интервала дискретизации для $\rho_{xy}(\tau) = \exp(-|\tau - 10|)\cos 5(\tau - 10)$

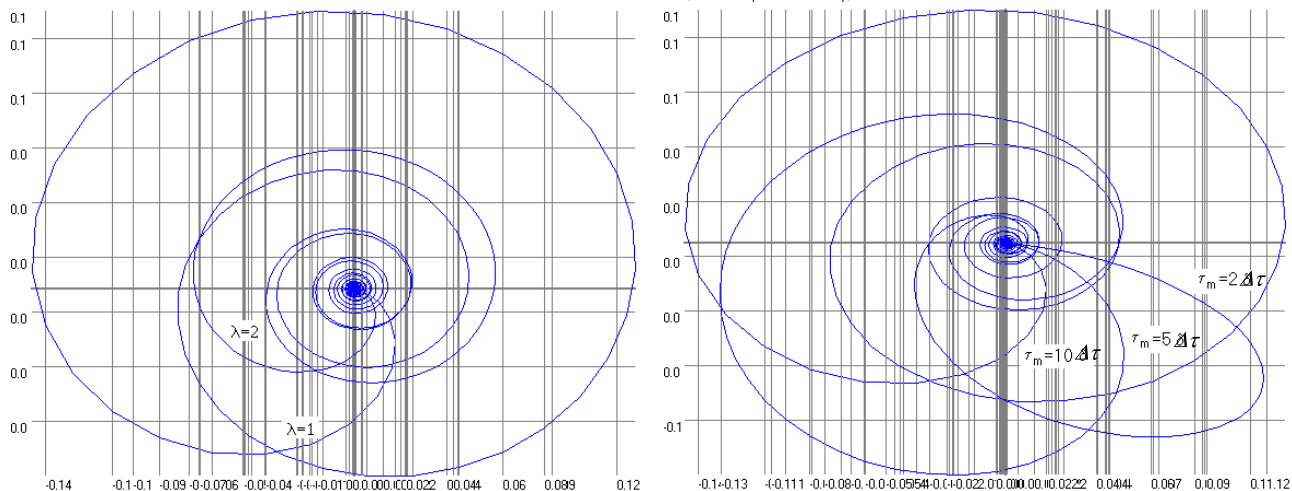
На рисунках 5.7 – 5.9 приведены спектральные плотности мощности, построенные с использованием аппроксимации взаимных корреляционных функций функциями заданного вида. Исходный процесс с параметрами λ для однопараметрических моделей и λ, ω_0 для колебательных был задержан на 2, 5, 10 интервалов дискретизации $\Delta\tau$.



а) Модель $e^{-\lambda|\tau-\tau_m|}$

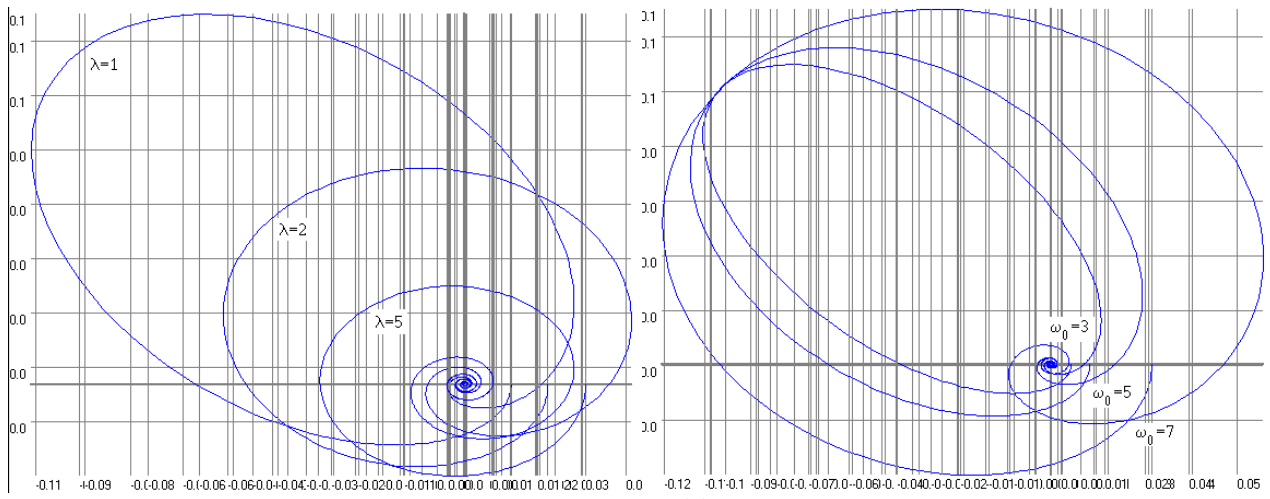


б) Модель $e^{-\lambda|\tau-\tau_m|}(1 + \lambda|\tau - \tau_m|)$

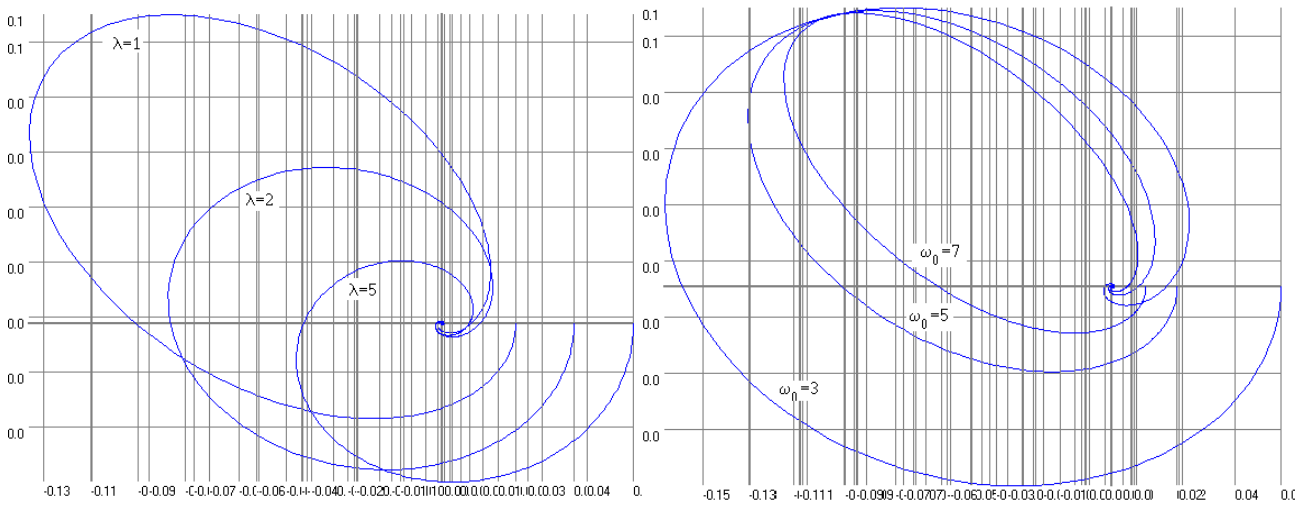


в) Модель $e^{-\lambda|\tau-\tau_m|}(1 - \lambda|\tau - \tau_m|)$

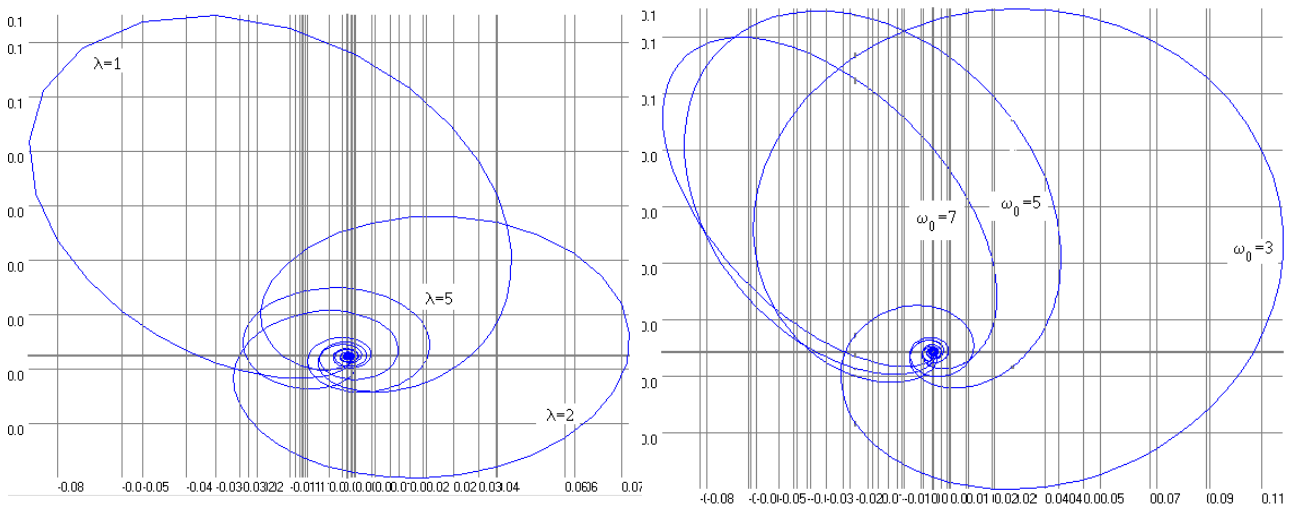
Рисунок 5.7. Спектральные плотности мощности при различных параметрах ($\lambda=1, 2, 5, \tau_m=10\Delta\tau$) и ($\lambda=1, \tau_m=2\Delta\tau, 5\Delta\tau, 10\Delta\tau$)



а) Модель $e^{-\lambda|\tau|} \cos \omega_0 \tau$



б) Модель $e^{-\lambda|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$



в) Модель $e^{-\lambda|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$

Рисунок 5.8. Спектральные плотности мощности при задержке $10 \Delta \tau$ при различных параметрах ($\lambda = 1, 2, 5, \omega_0 = 5$) и ($\lambda = 1, \omega_0 = 3, 5, 7$)

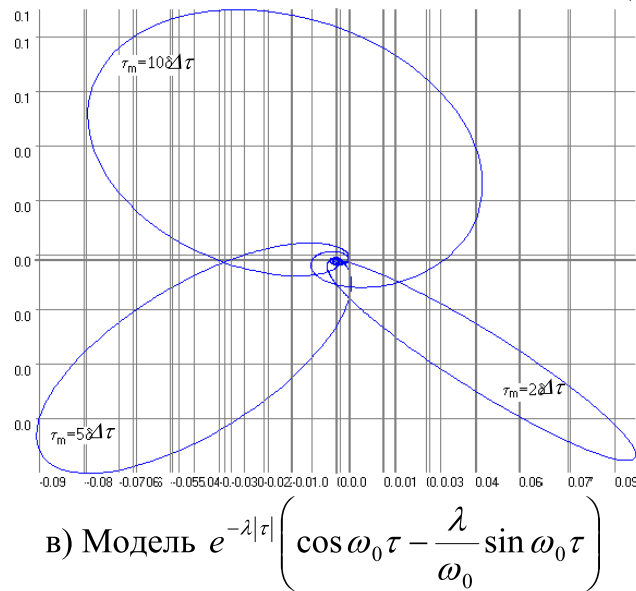
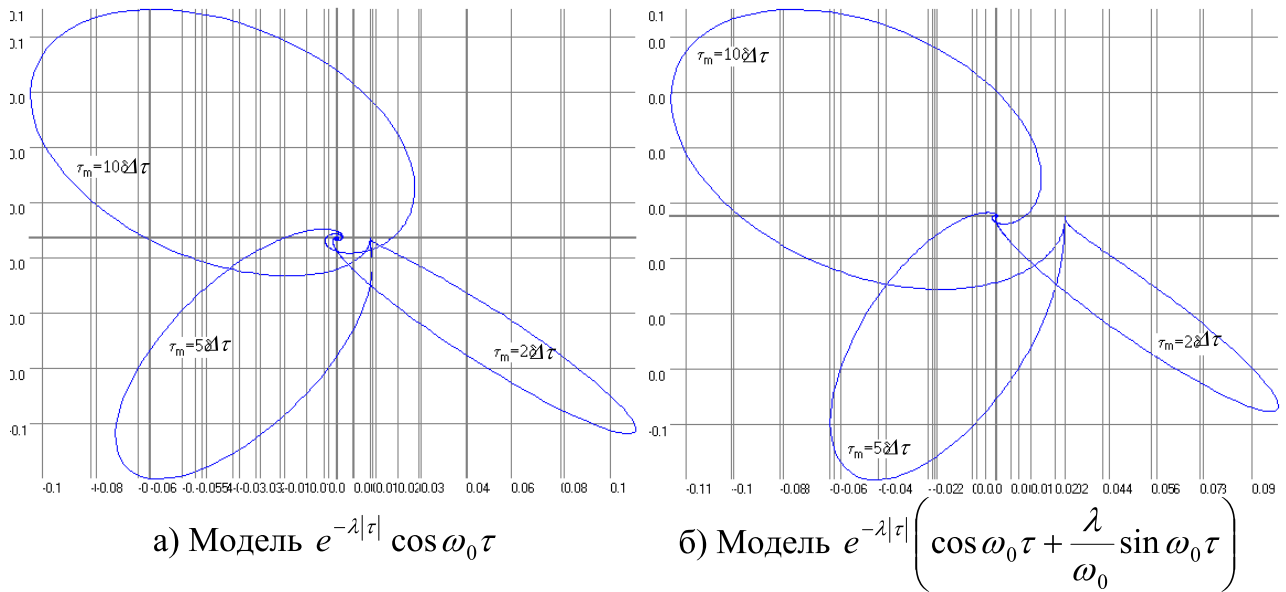


Рисунок 5.9. Спектральные плотности мощности при различных задержках ($\lambda = 1, \omega_0 = 5$)

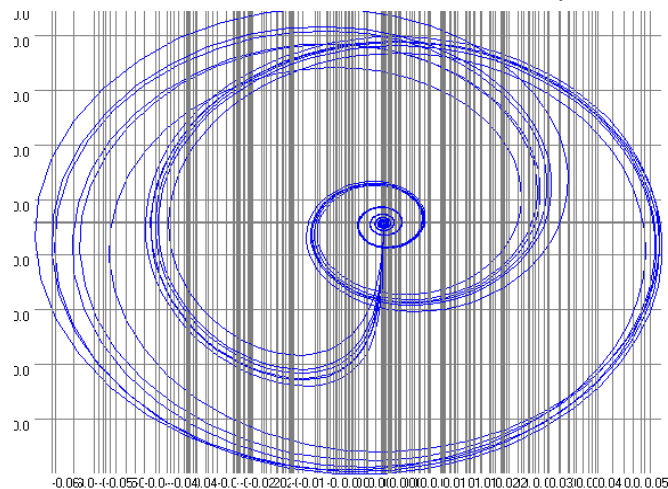


Рисунок 5.10. Оценки взаимной спектральной плотности мощности для различных реализаций временных рядов

5.2. Аппроксимация спектральных плотностей мощности ортогональными функциями Лагерра

Определив параметры модели корреляционной функции b_0, \dots, b_m, α

$$K_a(\tau) = \sum_{k=0}^m b_k L_k(\tau) l(\tau) + \sum_{k=0}^m b_k L_k(-\tau) l(-\tau), \quad (5.39)$$

оценим спектральную плотность мощности случайного процесса.

Для этого, подставив модель (5.39) в выражение для определения спектральной плотности мощности

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[\sum_{k=0}^m b_k L_k(\tau) l(\tau) + \sum_{k=0}^m b_k L_k(-\tau) l(-\tau) \right] e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (5.40)$$

с учётом определения ортогональных функций Лагерра (3.4), получим:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^m b_k \left[\frac{1}{\alpha/2 + j\omega} \left(\frac{j\omega - \alpha/2}{j\omega + \alpha/2} \right)^k + \frac{1}{\alpha/2 - j\omega} \left(\frac{j\omega + \alpha/2}{j\omega - \alpha/2} \right)^k \right]. \quad (5.41)$$

Введем обозначение $tg\varphi = \frac{2\omega}{\alpha}$. Тогда

$$S_x(\omega) = \frac{1}{\alpha\pi} \sum_{k=0}^m b_k \left[\frac{1}{1 + jtg\varphi} \left(\frac{jtg\varphi - 1}{jtg\varphi + 1} \right)^k + \frac{1}{1 - jtg\varphi} \left(\frac{jtg\varphi + 1}{jtg\varphi - 1} \right)^k \right]. \quad (5.42)$$

Или

$$S_x(\omega) = \frac{1}{\alpha\pi} \sum_{k=0}^m b_k \left[\frac{\cos\varphi}{\cos\varphi + j\sin\varphi} \left(\frac{j\sin\varphi - \cos\varphi}{j\sin\varphi + \cos\varphi} \right)^k + \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi - j\sin\varphi} \left(\frac{j\sin\varphi + \cos\varphi}{j\sin\varphi - \cos\varphi} \right)^k \right]. \quad (5.43)$$

Воспользовавшись формулами Эйлера, выражение (5.43) приведем к виду:

$$\begin{aligned} S_x(\omega) &= \frac{\cos\varphi}{\alpha\pi} \sum_{k=0}^m b_k \left[\frac{1}{e^{j\varphi}} \left(\frac{-e^{-j\varphi}}{e^{j\varphi}} \right)^k + \frac{1}{e^{-j\varphi}} \left(\frac{e^{j\varphi}}{-e^{-j\varphi}} \right)^k \right] = \\ &= \frac{\cos\varphi}{\alpha\pi} \sum_{k=0}^m b_k (-1)^k \left[e^{-(2k+1)\varphi} + e^{(2k+1)\varphi} \right] = \frac{2\cos\varphi}{\alpha\pi} \sum_{k=0}^m b_k (-1)^k \cos(2k+1)\varphi, \end{aligned} \quad (5.44)$$

где $\varphi = \arctg \frac{2\omega}{\alpha}$.

Если представить модель взаимной корреляционной функции в виде

$$K_{a_{xy}}(\tau) = A_m \left(\sum_{k=0}^{m_n} b_{k,n} l(\tau - \tau_m) L_k(\tau - \tau_m, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} b_{k,l} l(\tau_m - \tau) L_k(\tau_m - \tau, \alpha_l) \right), \quad (5.45)$$

то аналитическое выражение взаимной спектральной плотности мощности с учётом (5.13) и свойств ортогональных функций Лагерра примет вид:

$$\begin{aligned} S_{a_{xy}}(j\omega) &= A_m \frac{\exp(-j\omega\tau_m)}{\pi} \left[\frac{\cos\varphi_n}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} (-1)^k b_{k,n} \exp(-j(2k+1)\varphi_n) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cos\varphi_l}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} (-1)^k b_{k,l} \exp(-j(2k+1)\varphi_l) \right], \end{aligned} \quad (5.46)$$

где $\varphi_n = \arctg \frac{2\omega}{\alpha_n}$; $\varphi_l = \arctg \frac{2\omega}{\alpha_l}$.

С учётом (5.46), выражения для оценки действительной и мнимой частей взаимной спектральной плотности мощности примут вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} S_{a,xy}(j\omega) = & A_m \frac{\cos \omega \tau_m}{\pi} \left[\frac{\cos \varphi_n}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} (-1)^k b_{k,n} \cos(2k+1)\varphi_n + \right. \\ & \left. + \frac{\cos \varphi_l}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} (-1)^k b_{k,l} \cos(2k+1)\varphi_l \right] - A_m \frac{\sin \omega \tau_m}{\pi} \left[\frac{\cos \varphi_n}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} (-1)^k b_{k,n} \sin(2k+1)\varphi_n - \right. \\ & \left. - \frac{\cos \varphi_l}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} (-1)^k b_{k,l} \sin(2k+1)\varphi_l \right]; \end{aligned} \quad (5.47)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im} S_{a,xy}(j\omega) = & A_m \frac{\cos \omega \tau_m}{\pi} \left[\frac{\cos \varphi_l}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} (-1)^k b_{k,l} \cos(2k+1)\varphi_l - \right. \\ & \left. - \frac{\cos \varphi_n}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} (-1)^k b_{k,n} \cos(2k+1)\varphi_n \right] - A_m \frac{\sin \omega \tau_m}{\pi} \left[\frac{\cos \varphi_n}{\alpha_n} \sum_{k=0}^{m_n} (-1)^k b_{k,n} \cos(2k+1)\varphi_n + \right. \\ & \left. + \frac{\cos \varphi_l}{\alpha_l} \sum_{k=0}^{m_l} (-1)^k b_{k,l} \cos(2k+1)\varphi_l \right]. \end{aligned} \quad (5.48)$$

С целью упрощения модели взаимной корреляционной функции, представим её в виде:

$$K_{a,xy}(\tau) = A_m \left(\sum_{k=0}^m b_{k,n} 1(\tau - \tau_m) L_k(\tau - \tau_m, \alpha) + \sum_{k=0}^m b_{k,l} 1(\tau_m - \tau) L_k(\tau_m - \tau, \alpha) \right). \quad (5.49)$$

Тогда модель взаимной спектральной плотности мощности будет равна:

$$\begin{aligned} S_{axy}(j\omega) = & A_m \frac{\exp(-j\omega\tau_m)}{\pi} \left[\frac{\cos \varphi}{\alpha} \sum_{k=0}^m (-1)^k b_{k,n} \exp[-j(2k+1)\varphi] + \right. \\ & \left. + \frac{\cos \varphi_2}{\alpha} \sum_{k=0}^m (-1)^k b_{k,l} \exp[j(2k+1)\varphi] \right]. \end{aligned} \quad (5.50)$$

С учётом (5.47), (5.48) выражения для оценки вещественной и мнимой частей взаимной спектральной плотности мощности примут вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} S_{axy}(j\omega) = & A_m \frac{\cos \varphi}{\alpha \pi} \left[\cos \omega \tau_m \sum_{k=0}^m (-1)^k (b_{k,n} + b_{k,l}) \cos(2k+1)\varphi - \right. \\ & \left. - \sin \omega \tau_m \sum_{k=0}^m (-1)^k (b_{k,n} - b_{k,l}) \sin(2k+1)\varphi \right]; \end{aligned} \quad (5.51)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im} S_{axy}(j\omega) = & A_m \frac{\cos \varphi}{\alpha \pi} \left[\cos \omega \tau_m \sum_{k=0}^m (-1)^k (b_{k,l} - b_{k,n}) \cos(2k+1)\varphi - \right. \\ & \left. - \sin \omega \tau_m \sum_{k=0}^m (-1)^k (b_{k,n} - b_{k,l}) \sin(2k+1)\varphi \right]. \end{aligned} \quad (5.52)$$

На рисунках 5.11 – 5.12 приведены результаты построения взаимной спектральной плотности мощности с помощью аппроксимирующих выражений Лагерра в сравнении с результатами аппроксимации функциями заданного вида.

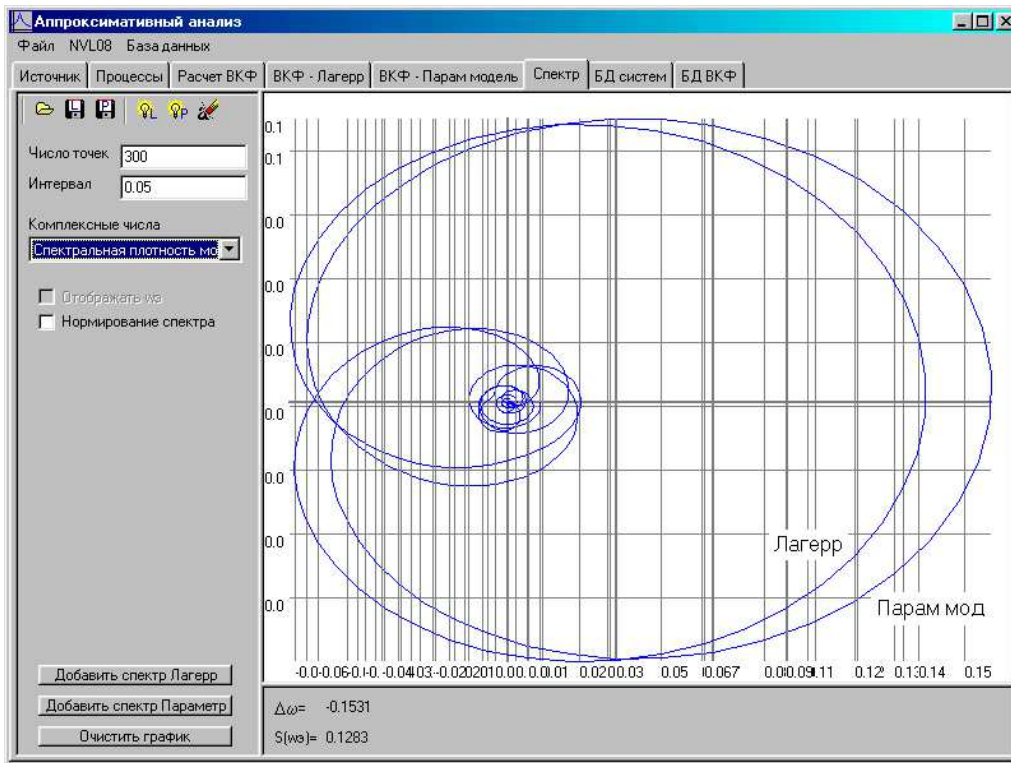


Рисунок 5.11. Спектральная плотность мощности

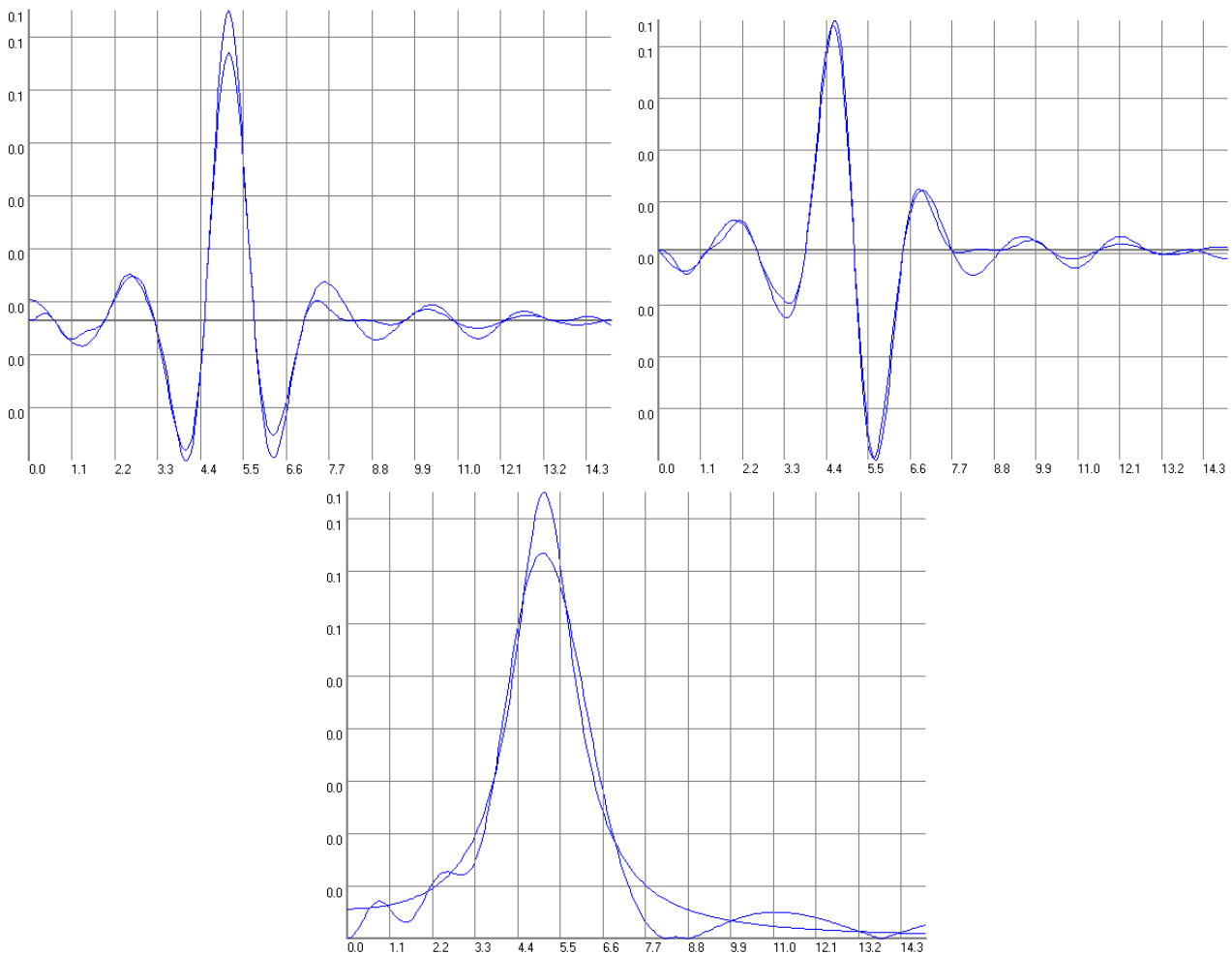


Рисунок 5.12. Вещественная, мнимая части и модуль спектральной плотности мощности

5.3. Оценка обобщенных спектральных характеристик

К обобщенным спектральным характеристикам, широко применяемым в приложениях, относятся: эквивалентная ширина спектра мощности, частота, соответствующая максимуму спектральной плотности мощности, значение максимума и т.д.

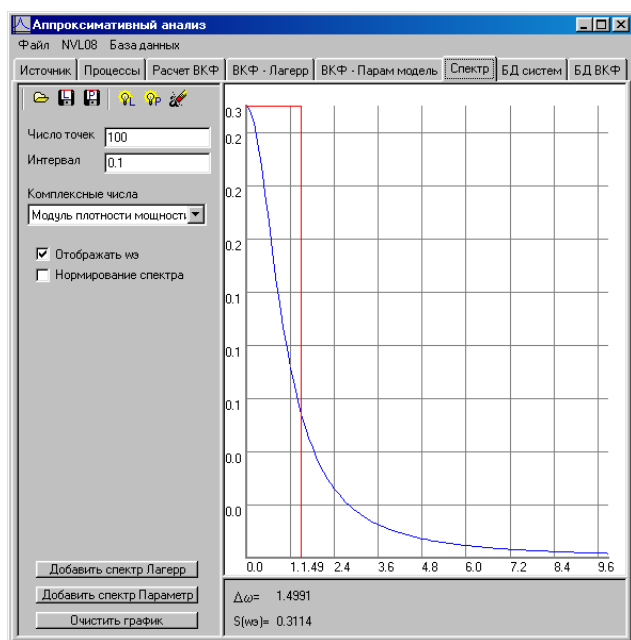


Рисунок 5.13. Эквивалентная ширина спектра широкополосного процесса

Если основная мощность процесса сосредоточена вблизи экстремальной частоты спектральной плотности мощности ω_0 (рис. 5.14), а не в нуле, выражение для оценки эквивалентной ширины примет вид:

$$\Delta\omega' = \omega_0 + \Delta\omega_0 / 2. \quad (5.54)$$

Частоту, соответствующую максимуму спектральной плотности мощности ω_0 , можно определить в результате решения уравнения:

$$S'_x(\omega) = 0. \quad (5.55)$$

Результаты решения этого уравнения, $S_x(\omega_0)$, выражения эквивалентной ширины спектра мощности случайных процессов для типовых моделей в виду громоздкости таблицы, представлены в приложении П.6.

Понятие эквивалентной ширины спектра мощности случайного процесса позволяет разбить случайные процессы на два класса: узкополосные и широкополосные.

Узкополосным случайным процессом называется процесс, основная мощность которого сосредоточена вблизи какой-либо частоты ω_0 . Условие узкополосности записывается в виде: $\Delta\omega_0 / 2 \ll \omega_0$.

Знание спектральной плотности мощности позволяет определить полосу частот, где сосредоточена основная мощность процесса. Эта характеристика называется **эквивалентной шириной спектра мощности случайного процесса** – $\Delta\omega_0$. Существуют различные способы определения $\Delta\omega_0$, приведенные, например, в [39].

Наиболее часто для процессов, у которых спектральная плотность мощности сосредоточена вблизи нулевой частоты (рис. 5.13), $\Delta\omega_0$ определяют в виде:

$$\Delta\omega_0 = \frac{\sigma_x^2}{2S_x(\omega)_{\max}}. \quad (5.53)$$

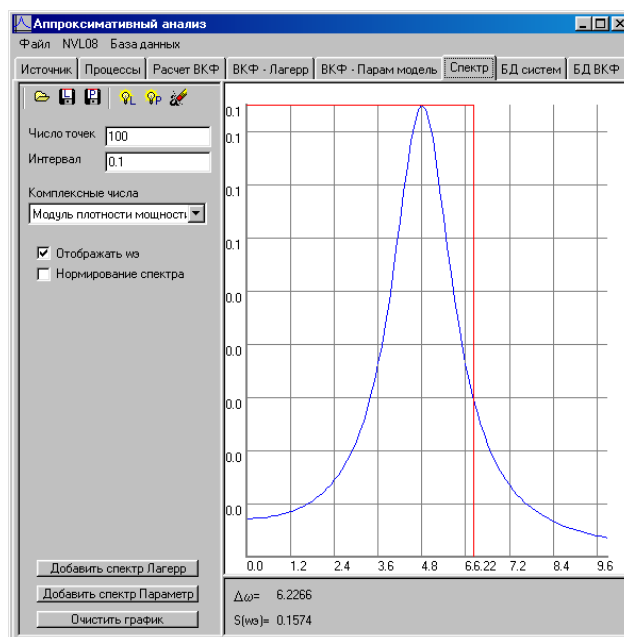


Рисунок 5.14. Эквивалентная ширина спектра узкополосного процесса

Процессы, не удовлетворяющие этому условию, называются **широкополосными**.

К узкополосным процессам относятся процессы, имеющие колебательную корреляционную функцию с показателем колебательности $\mu > 5$ (см. таблицу 1.1, модели 5, 6).

К широкополосным процессам относятся все модели, представленные в таблице 1.1, причем, для моделей 5, 6 $\mu < 5$.

Следует отметить, что формула (5.54) даёт завышенное значение эквивалентной ширины спектра мощности. Более точное значение даёт формула

$$\Delta\omega'_y = \omega_y + \int_{\omega}^{\infty} S_x(\omega) d\omega, \quad (5.56)$$

но она из-за сложности вычислений практически не применяется.

Для получения простого аналитического выражения для оценки эквивалентной ширины спектра мощности воспользуемся аппроксимацией спектральной плотности мощности ортогональными функциями Лагерра. Представив модель спектральной плотности в виде

$$S_d(\omega) = \sum_{k=0}^{m1} c_{k,n} 1(\omega - \omega_m) L_k(\omega - \omega_m, \lambda_1) + \sum_{k=0}^{m2} c_{k,l} 1(\omega_m - \omega) L_k(\omega_m - \omega, \lambda_2), \quad (5.57)$$

определим её параметры в соответствии с рекомендациями, изложенными в четвертом разделе. Тогда по смыслу эквивалентная ширина спектра мощности будет равна:

$$\Delta\omega_y \approx \omega_y + \frac{2}{\lambda_1} \sum_{k=0}^{m_n} (-1)^k c_{k,n}. \quad (5.58)$$

Т.е. она равна сумме экстремальной частоты и интервала существования правой ветви спектральной плотности мощности (см. рис. 5.15).

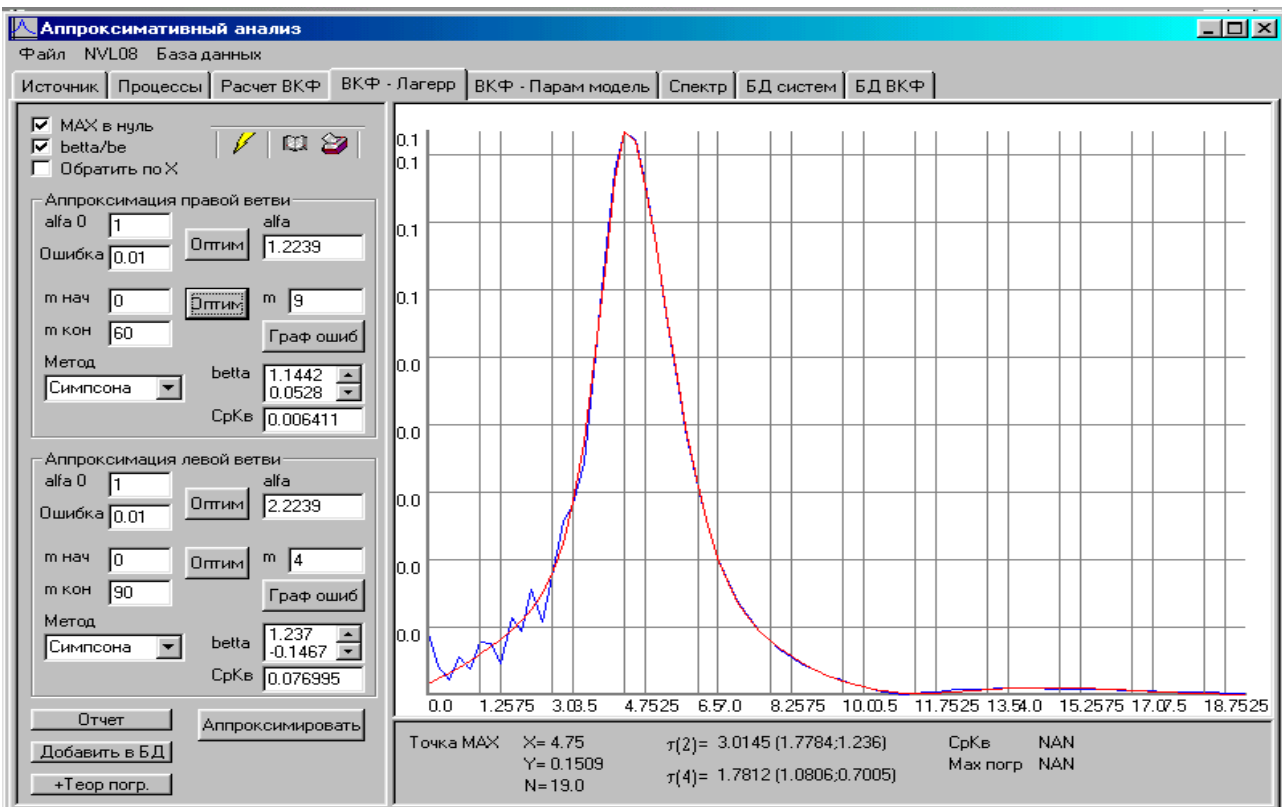


Рисунок 5.15. К определению эквивалентной ширины спектра мощности

Аналогичным образом можно определить эквивалентную ширину и для взаимного спектра. Отличие заключается в том, что необходимо аппроксимировать модуль взаимной спектральной плотности мощности.

Следует отметить, что, при аппроксимации корреляционных функций ортогональными функциями Лагерра, значение параметра $\alpha/2$, определенного в результате решения уравнения

$$\beta_0 = \sigma_x^2, \quad (5.59)$$

близко к значению экстремальной частоты ω_3 . Результаты представлены в таблице 5.3.

Значения параметра функций Лагерра и частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности мощности




Таблица 5.3




№	$\rho_x(\tau)$	$\alpha/2$	ω_3
1	$e^{-\lambda|\tau|} \cos \omega_0 \tau$	$\sqrt{\lambda^2 + \omega_0^2}$	$\sqrt{2\omega_0 \sqrt{\lambda^2 + \omega_0^2} - (\lambda^2 + \omega_0^2)}$
2	$e^{-\lambda|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right)$	$(\sqrt{2\lambda^2 + \omega_0^2} - \lambda)$	$\sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}$
3	$e^{-\lambda|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right)$	$(\sqrt{2\lambda^2 + \omega_0^2} + \lambda)$	$\sqrt{\omega_0^2 + \lambda^2}$

5.4. Интерфейс шестой подсистемы

Определению спектральной плотности мощности в автоматизированной системе посвящена страница 6. Следует установить значение интервала дискретизации спектральной плотности мощности и количества отсчетов спектра, исходя из требования к точности определения спектральной плотности мощности.

Поскольку спектральная плотность мощности – величина комплексная, кроме графика спектральной плотности мощности предусмотрено представление графиков модуля спектральной плотности, вещественной части, мнимой части и фазы. Вид графика устанавливается в поле «Комплексные числа».

После нажатия на кнопку  происходит вычисление спектра по параметрам аппроксимирующего ВКФ выражения Лагерра, полученным на странице 4, после нажатия на кнопку  происходит вычисление спектра по параметрам выражения, полученным на странице 5. При установленном флажке «Отображать w3» будет отображена эквивалентная ширина спектра мощности. Страница 6 приведена на рисунке 5.1. Очистить график можно, нажав на кнопку .

Предусмотрена возможность сохранения полученных спектров (нажатием кнопок  ) и открытия нескольких спектров из файлов (кнопка )

6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

При определении погрешностей результатов измерения и их характеристик объектом исследования становятся методы описания и количественного анализа методических погрешностей, а так же методы экспериментального определения погрешностей. Изучение составляющих погрешностей, вызванных той или иной причиной, позволяет определить пути их уменьшения. Как правило, аналитическое решение задач по оценке методической погрешности и ее составляющих возможно только для сравнительно простых вероятностных характеристик и лишь для нормальных процессов. В качестве общего подхода к оценке методических погрешностей можно предложить использование метода имитационного моделирования.

В этом случае исследование алгоритмов состоит в анализе их метрологических характеристик с использованием псевдослучайных последовательностей, сгенерированных с помощью ЭВМ. Этот метод позволяет не прибегать к аналитическим расчетам погрешностей, кроме того, он обладает известной наглядностью. Требуемая сложность имитационной модели зависит от выбранного принципа имитационного моделирования.

Сложность имитационной модели и затраты машинного времени на ее исследование являются существенными критериями при выборе метода и функциональной схемы имитационного моделирования.

Учитывая тот факт, что основным принципом проектирования АСНИ является агрегатное проектирование [27], наиболее целесообразно при конструировании использовать принцип блочного моделирования, суть которого сводится к декомпозиции АСНИ, созданию библиотеки моделей стандартных блоков, на основании которых конструируется модель системы в соответствии с ее структурой. Достоинствами блочной модели является гибкость, простота изменения конфигурации, возможность прослеживания промежуточных результатов, соответствие математической модели, возможность унификации процедур моделирования, единообразие и простота построения моделей различных структур, возможность автоматизации процедуры построения моделей систем, возможность использования сетевых алгоритмов при анализе системы и простота ведения базы данных созданных моделей и составляющих блоков. Недостатками блочного моделирования является увеличение времени моделирования и необходимость большого объема памяти для хранения библиотеки моделей. Следует отметить, что эти недостатки устранимы при использовании СУБД.

Задача синтеза системы является достаточно трудоемкой. В основе ее лежит выбор элементов-модулей с известными характеристиками из некоторого множества и их взаимная стыковка с целью получения необходимых характеристик всей системы в целом. При этом испытывается недостаток информации о влиянии различных комплектующих и их свойств на конечный результат.

При получении пары процессов с заданной взаимной корреляционной функцией возникает проблема классификации взаимных корреляционных функций и выбора модулей системы генерации. Пара процессов, полученная из единого источника первичного сигнала, например белого шума, с помощью системы фильтров с известными частотными характеристиками имеют известную взаимно корреляционную функцию. Однако при определении зависимости вида взаимно корреляционной функции пары процессов от импульсных характеристик формирующих фильтров возникает необхо-

димось в накоплении информации о сгенерированных процессах и использованных при этом фильтрах.

Таким образом, использование базы данных о фильтрах и полученных в результате генерации процессах позволяет решить ряд задач, а именно:

1. определение методических погрешностей аппроксимации методом имитационного моделирования;
2. накопление информации об алгоритмах получения пар процессов с заданными взаимными корреляционными функциями посредством синтеза системы формирующих фильтров с заданными переходными характеристиками;
3. облегчение идентификации взаимных корреляционных функций получаемых пар процессов;
4. решение задачи синтеза системы получения процессов с использованием экспертных алгоритмов.

При этом нет необходимости в хранении большого объема информации, а именно самих процессов и взаимных корреляционных функций. Достаточно вести базу данных об использованных фильтрах и хранить параметры аппроксимирующих выражений с указанием погрешностей аппроксимации.

Для выполнения приведенных выше функций информационной среды необходимо иметь средства, обеспечивающие ведение базы знаний по модулям, их параметрам и настройкам, а также синтезированным системам и алгоритм синтеза с использованием базы знаний. В качестве базы знаний целесообразно использовать семантическую сеть.

В качестве узлов сети будут выступать модули, составляющие системы, дугами, соединяющими узлы сети, будем обозначать связи между модулями, по которым передается информация. Дуги имеют направление, показывающее связь выхода предыдущего модуля с входом следующего.

При составлении семантической сети можно выделить следующие семантические группы: источник белого шума, фильтр, линия задержки, блок дискретизации, файл, АЦП, нелинейный преобразователь. Кроме этого, в любую систему вводится единственный обязательный модуль, обеспечивающий прием двух процессов для их последующего анализа. На связи модулей наложены следующие ограничения: источник белого шума, файл и АЦП могут служить лишь источниками информации, они не имеют входа; у модуля может быть только один источник и несколько приемников информации. Единицей передаваемой информации считается случайный процесс.

Алгоритм синтеза определяется как последовательность шагов по активации модулей системы, начиная с обязательного последнего. При этом активизируемый модуль вызывает активацию источника информации, в случае, если этот источник – генератор белого шума, происходит его генерация, файл – его открытие (чтение), АЦП – переход в подсистему ввода-вывода. Если активизируемый элемент уже активен и имеет случайный процесс на выходе, активизация его не производится, а случайный процесс используется в следующих модулях. Таким образом, реализуется возможность подключения нескольких модулей к единственному источнику случайного процесса для генерирования пар процессов с заданными взаимными корреляционными характеристиками.

База данных может быть реализована с помощью известных СУБД. Наиболее оптимальной в случае представления семантической сети можно считать сетевую модель базы данных. Однако, большинство распространенных коммерческих СУБД используют реляционную модель данных, которая с точки зрения представления дан-

ных равномошна сетевой модели. Преобразование одной модели в другую, тем не менее, необходимо ввиду использования алгоритма возбуждения на семантической сети. При реализации автоматизированной системы с помощью объектно-ориентированного языка в сочетании с реляционной СУБД использования сетевой модели базы данных можно избежать, заменив ее последовательным преобразованием реляционной базы данных (или ее фрагментов) в семантическую сеть объектов классов, соответствующих описанным семантическим группам. При этом возможны различные схемы преобразования. Это преобразование всех записей в базе данных с помощью СУБД в сеть объектов на этапе инициализации программы с возможностью изменения семантической сети и внесения изменений (частично или полностью) в базу данных при завершении работы с программой; это ведение базы данных одновременно с модификацией семантической сети; и, наконец, это создание семантической сети в начале выполнения алгоритмов с помощью СУБД по реляционной базе данных и разрушение сети при завершении синтеза. Все описанные подходы имеют свои достоинства и недостатки. Первый подход не позволяет использовать все преимущества реляционной модели и может приводить к ошибкам при работе нескольких пользователей с одной базой данных (клиент-серверная схема). Второй требует аккуратного обращения с базой данных и резко увеличивает объем работ по ее модификации, связанный с дублированием всех операций по удалению, добавлению или редактированию. Третий подход связан со значительными временными затратами при осуществлении синтеза системы. Кроме этого, следует обеспечить использование системы в случае отсутствия соединения с базой данных, когда нет необходимости в накоплении информации о модели или сервер СУБД недоступен.

Поэтому выбрана следующая схема взаимодействия с СУБД. При загрузке базы данных на основе информации о текущей системе создается семантическая сеть. Текущие изменения сети в базе данных не отражаются, они заносятся единовременно по желанию пользователя.

Результаты аппроксимации получаемых взаимных корреляционных функций параметрическими моделями и ортогональными функциями Лагерра заносятся в базу данных на этапах аппроксимации. При этом совокупности параметров аппроксимирующих выражений присваивается уникальный шифр, который обеспечивает идентификацию результатов аппроксимации внутри системы.

Контроль за соответствием модели системы и результатов аппроксимации взаимных корреляционных функций, получаемых на выходе, ведет пользователь. Рекомендовано может быть равенство шифров параметрических моделей и функций Лагерра, полученных для одной ВКФ.

В качестве СУБД выбрана Microsoft SQL Server [42]. Она обеспечивает один из наиболее распространенных методов, реализующих интерфейс пользователя с БД – это SQL (структурный язык запросов). Преимущество языка SQL в том, что он позволяет непосредственно работать с БД верхнего уровня. Кроме того, он предоставляет возможность в краткой форме описать достаточно сложные многокритериальные запросы. Сервисы автоматизированной системе предоставляются через механизм ODBC (Open DataBase Connectivity).

Следует особо отметить тот факт, что при реализации клиент-серверной схемы установки автоматизированной системы в качестве платформы сервера можно выбрать Windows NT/2000, а в качестве клиента Windows 98/Me. При установке системы на одном компьютере выбирается платформа Windows 98/Me.

Модель базы данных приведена на рисунке 6.1. Отметим, что данная база данных не находится, строго говоря, в первой нормальной форме, поскольку, при занесении информации о параметрах аппроксимирующих выражений Лагерра, не соблюдается требование атомарности для столбца *beta*. Однако дальнейшая нормализация приводит к существенному усложнению базы, введению дополнительной таблицы и организации быстрых методов поиска, что считаем более трудоемким, чем введение дополнительного алгоритма анализа данных в базе при восстановлении аппроксимирующей модели.

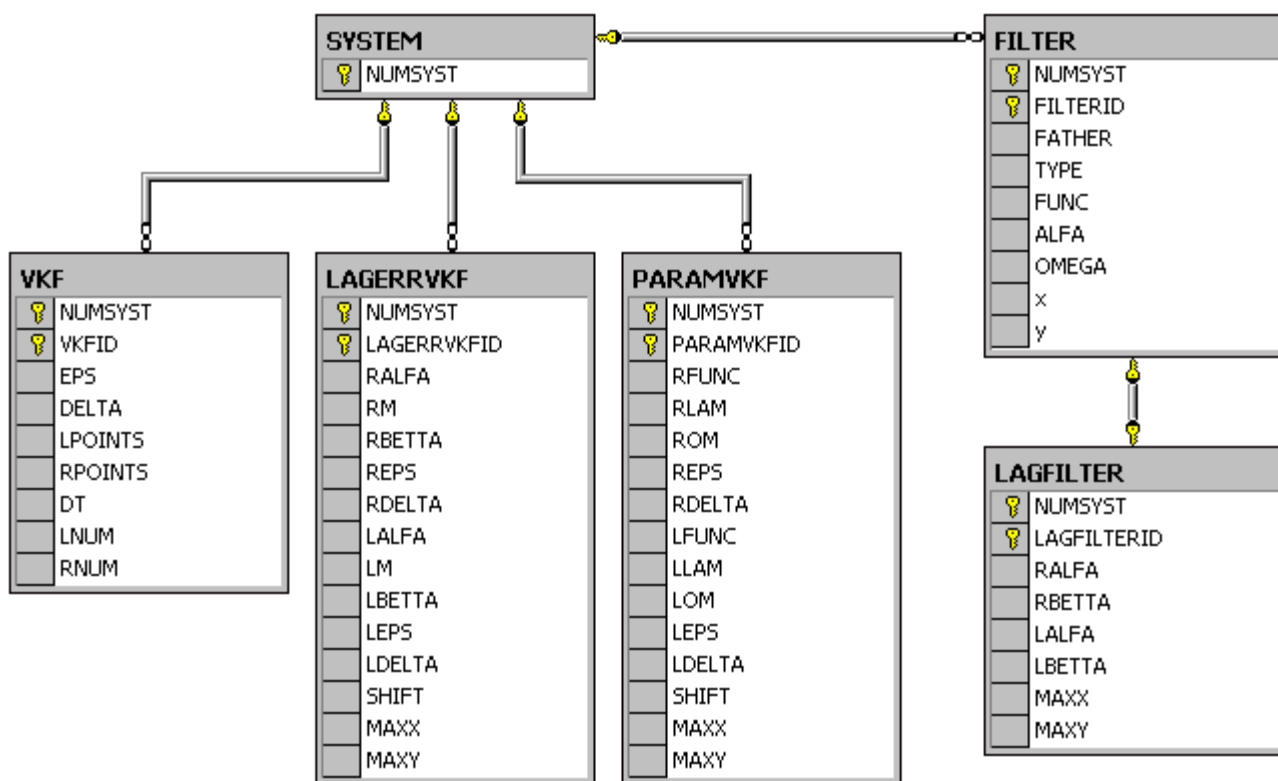


Рисунок 6.1. Модель базы данных

В таблице 6.1 приведены соответствия параметров таблицы фильтра элементам – модулям систем. Она используется при выборке информации из базы данных.

Интерпретация параметров таблицы «Фильтр»

Таблица 6.1

Вид модуля	FUNC	ALFA	OMEGA
Белый шум	–	Число точек	Интервал дискрет.
Фильтр	Вид функции	alpha	omega
Задержка	–	Интервал	Число задержек
Дискретизация	Тип дискр.	Параметр	Поток
Файл	Имя файла	–	–
АЦП	–	–	–
Фильтр Лагерра	Задан	Число точек	Интервал
Нелинейный преобр.	Задан	Функция	lambda

В автоматизированной системе проектирование системы происходит наглядно, путем добавления новых модулей, отображаемых на рабочей области экрана условными пиктограммами. На рабочей области экрана в этом случае формируется граф – семантическая сеть, в узлах которой находятся указанные выше модули. Между модулями устанавливаются связи, соответствующие каналам передачи случайных процессов от одного модуля к другому. Завершающим (обязательным и единственным в системе) является модуль корреляционного анализа пары случайных процессов. Получаемая в результате система может быть занесена в базу данных, в которой ведется учет построенных систем и полученных взаимных корреляционных функций.

Источниками сигнала при этом могут служить источник белого шума, файл или АЦП, а модулями, осуществляющими преобразование сигнала – фильтр, линия задержки, элемент, формирующий НВР, фильтр Лагерра или нелинейный преобразователь. Диаграмма классов получаемой семантической сети приведена на рисунке 6.2.

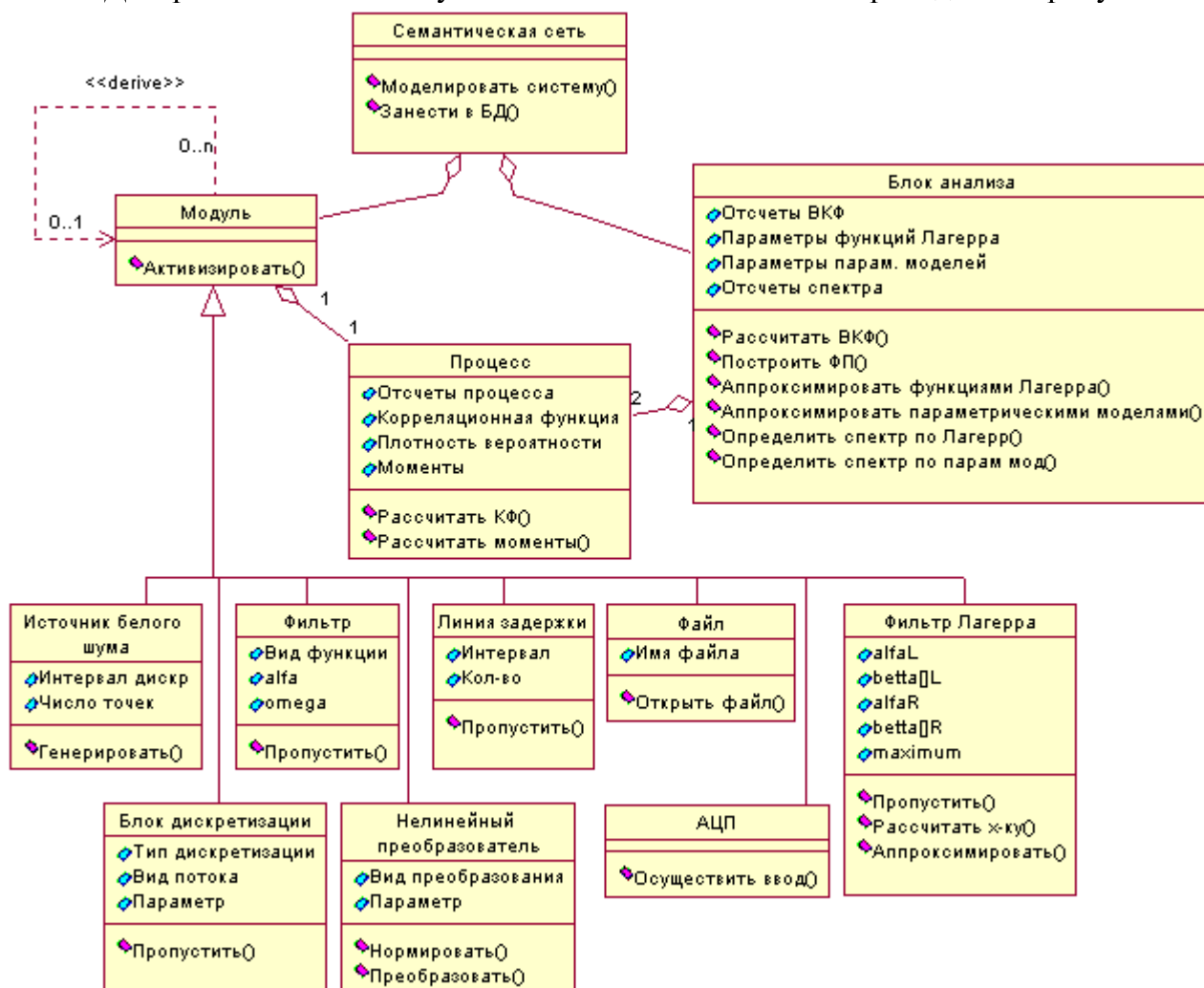


Рисунок 6.2. Диаграмма классов семантической сети (методология UML)

Для получения исследуемой в аппроксимативном корреляционно-спектральном анализе пары процессов предусмотрено использование фильтров с известной частотной характеристикой. Следует отметить, что важным этапом при имитационном моделировании пары процессов является выбор исходного интервала дискретизации, поскольку именно интервал дискретизации влияет на точность определения ВКФ.

Создание семантической сети, составленной из различных функциональных модулей, производится на странице 7 «БД систем» (см. рисунок 6.3).

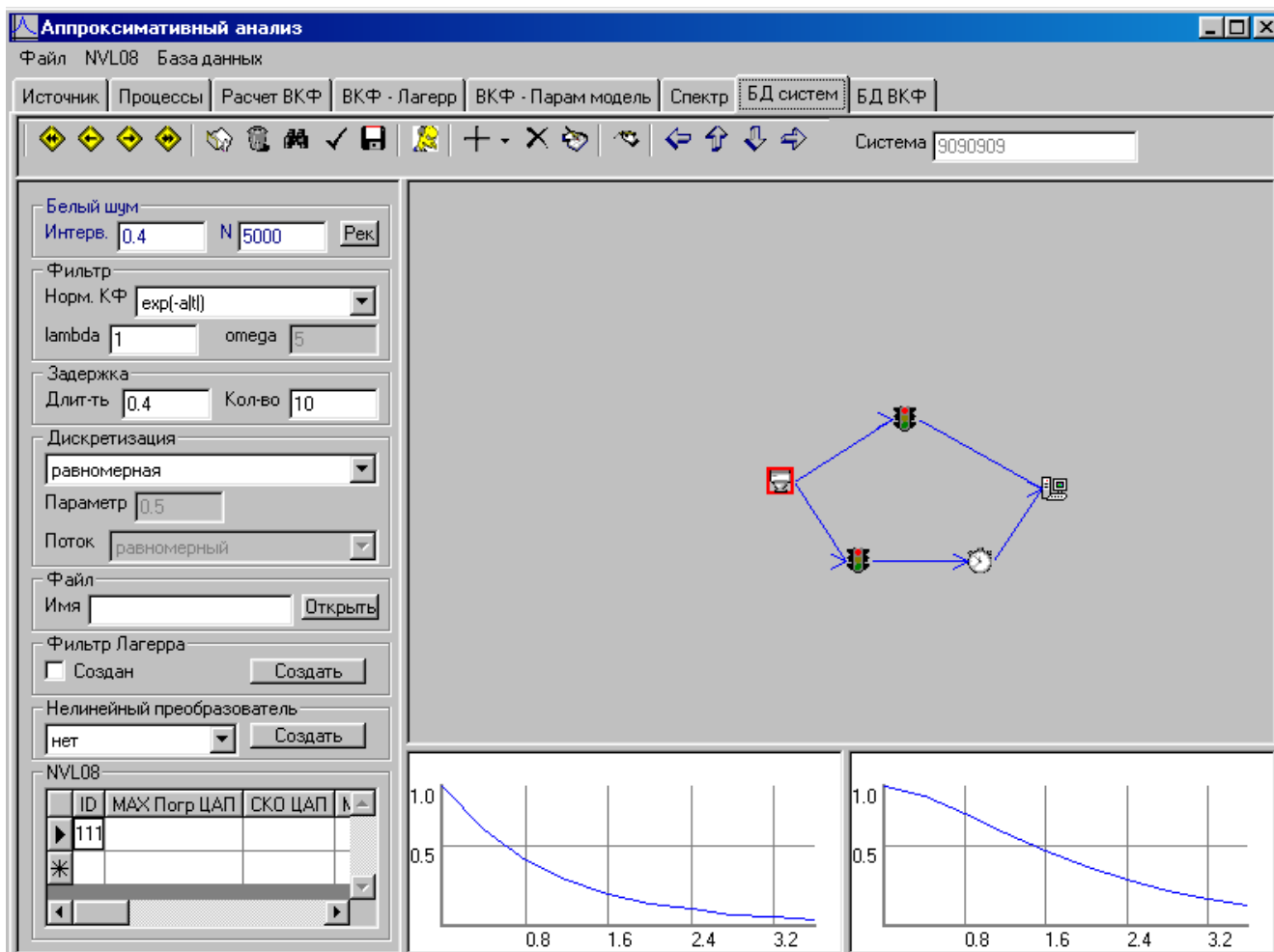


















Рисунок 6.3. БД систем


В правом верхнем углу приведено наименование системы, однозначно определяющее систему в базе данных. Система может быть спроектирована без занесения в базу данных, однако в этом случае при выходе из программы все данные будут утеряны.

Страница разбита на две части: на первой отображается информация о блоках, левая служит рабочим полем для составления семантической сети модулей. Функциональные кнопки передвижения по базе данных , а также кнопка поиска системы по наименованию , служат для выбора нужной системы для редактирования. Эти кнопки, а также кнопки создания и удаления системы  и сохранения системы , доступны только после подключения к базе данных.

Подключение осуществляется после выбора пункта меню «База данных/Соединение». При этом необходимо ввести «Имя базы данных», «Имя пользователя» и «Пароль».





Конструирование системы осуществляется посредством выбора функциональных модулей и установление связей между ними на рабочем поле. В любой системе всегда присутствует блок анализа пары процессов . Предварительно установив параметры модуля на левой части страницы, нажатием кнопки  можно добавить один из следующих модулей: источник белого шума , линию задержки , фильтр


, блок изменения дискретизации , файл , АЦП , фильтр Лагерра , нелинейный преобразователь . Выбранный модуль выделяется красным, а относящаяся к нему информация – синим цветом. Можно удалить выбранный модуль (нажав кнопку удаления ) и отредактировать, изменив выделенную синим информацию о блоке на левой половине страницы и нажав кнопку изменения . Модули перемещаются по рабочей области в помощью мыши.

Включив режим связывания модулей , с помощью мыши можно установить изображаемые стрелками линии передачи случайных процессов. Стрелка идет от источника случайного процесса к приемнику. Модули «файл», «источник белого шума» и «АЦП» могут быть только источниками процесса, записать информацию в файл и передать в ЦАП можно, используя первые две страницы. Повторное соединение мышью двух модулей приведет к удалению связи.

Возможен вариант установления двух связей между выходом одного модуля и входом блока анализа. Такая двойная связь будет отображаться жирной стрелкой и означать определение автокорреляционной функции процесса на выходе указанного модуля.

Для возвращения в режим, когда мышь используется для перемещения модулей по рабочей области, нужно повторно нажать кнопку связывания модулей.

Перемещение по рабочей области, лежащей за границами экрана, (для сдвига системы) используются кнопки    .

В случае если созданная система удовлетворительна с точки зрения связности и содержит достаточное количество генерирующих модулей, она может быть откомпилирована нажатием кнопки . При этом, внизу рабочей области отображаются автокорреляционные функции поступающих на модуль анализа процессов.

Для анализа и компиляции системы использован алгоритм передачи возбуждения по объектам семантической сети. В созданной семантической сети наименования семантических групп совпадают с наименованиями функциональных модулей. Возбуждение передается от модуля анализа, назад до модулей генерации. В случае если процесс в модуле генерации уже создан, а этот модуль был возбужден, повторная генерация не производится. Таким образом, один процесс, получаемый на выходе модуля, используется для всех, присоединенных к нему модулей.

Если компиляция прошла неудачно, и в системе были обнаружены ошибки, пользователю выдается соответствующее сообщение.

Пример правильной системы, с соответствующими ей ВКФ, приведен на рисунках 6.4.

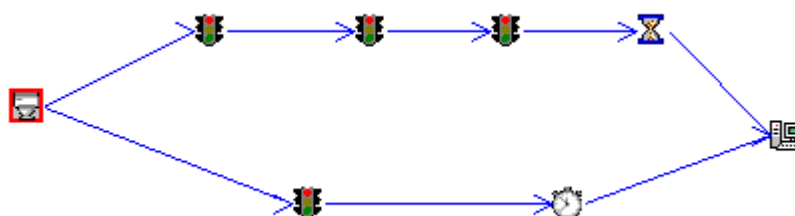


Рисунок 6.4. Пример системы

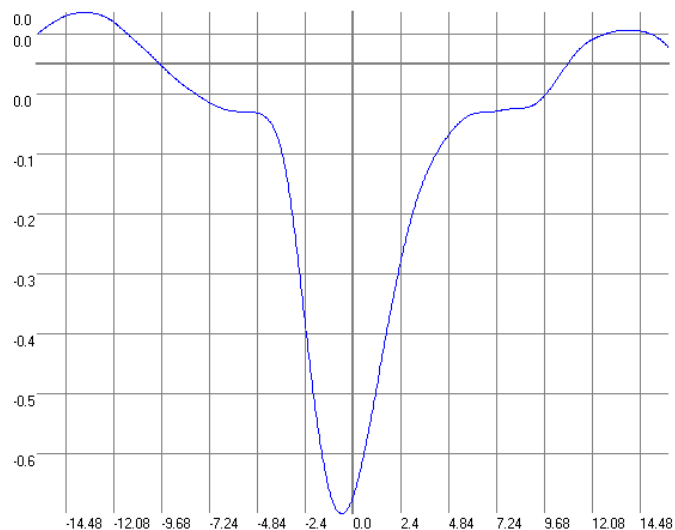


Рисунок 6.5. ВКФ, определенная на блоке анализа

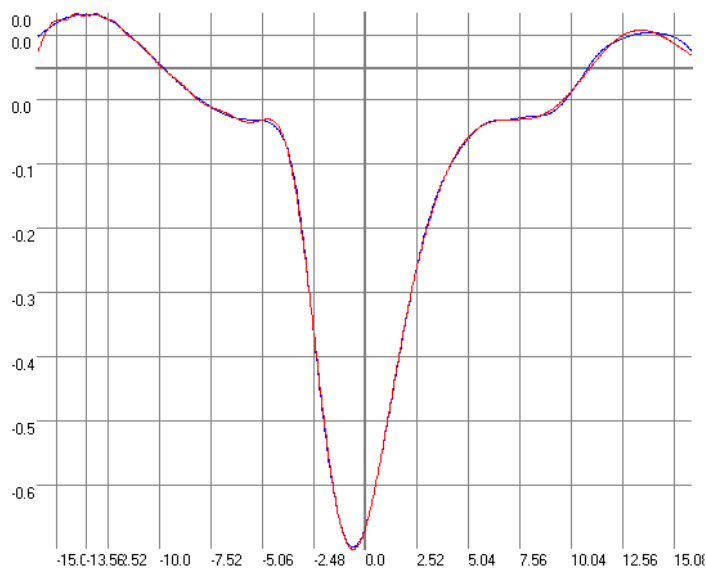


Рисунок 6.6. Аппроксимация ортогональными рядами Лагерра

Особо отметим, что следить за соответствием созданной системы и аппроксимирующих выражений, заносимых для этой системы в базу данных, должен пользователь.

Использование источника белого шума, фильтра, линии задержки или файла основано на описанных выше действиях и не требуют особого описания, но фильтр Лагерра и нелинейный преобразователь требуют дополнительных пояснений.

Для добавления фильтра Лагерра или нелинейного преобразователя требуется добавить этот элемент (при этом флажок «Создан» в области «Фильтр Лагерра» («Нелинейный преобразователь») будет сброшен), затем нажать кнопку «Создать».

Приведем пояснения к производимым здесь операциям.

Для моделирования случайного процесса методом нерекурсивной фильтрации необходимо найти характеристику формирующего фильтра

$$h(\tau) = \frac{1}{2\pi\sqrt{S_0}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (6.1)$$

Выходной сигнал формирующего фильтра может быть определен различными способами в зависимости от способа преобразования аналогового фильтра в цифровой. Одним из способов фильтрации является нерекурсивная с преобразованием

$$Y(j) = \Delta\tau \sum_{i=0}^{M1} x(j-i)h(i), \quad (6.2)$$

где $M1$ – число отсчетов импульсной характеристики, зависящее от вида корреляционной функции;

$\Delta\tau$ – интервал дискретизации исследуемого процесса;

$h(i) = h(i\Delta\tau)$ – значение импульсной переходной характеристики формирующего фильтра.

В случае, когда на вход фильтра подается белый шум, импульсные характеристики формирующих фильтров, позволяющие получить известные корреляционные функции процессов на выходе, приведены в таблице 6.2.

Импульсные характеристики формирующих фильтров

Таблица 6.2

$K_x(\tau)$	$h(\tau)$	k
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|}$	$k\alpha e^{-\alpha\tau}$	$\sigma_x \sqrt{\frac{1}{\alpha\pi}}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$	$k\alpha^2 \tau e^{-\alpha\tau}$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\alpha\pi}}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 - \alpha|\tau|)$	$k\alpha e^{-\alpha\tau} (1 - \alpha\tau)$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\alpha\pi}}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( 1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2 \tau^2}{3} \right)$	$k\alpha^3 \tau^2 e^{-\alpha\tau}$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{3\alpha\pi}}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$	$k\alpha e^{-\alpha\tau} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} - \alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sigma_x \sqrt{\frac{1}{\alpha\pi}}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$k\alpha \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}}{\omega_0} e^{-\alpha\tau} \sin \omega_0 \tau$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\alpha\pi}}$
$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$k\alpha e^{-\alpha\tau} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\alpha\pi}}$

Таким образом, если удастся получить аналитическое выражение для импульсной переходной характеристики, удастся построить фильтр с некоторой корреляционной функцией у процесса на его выходе. Задача аппроксимации импульсных переходных характеристик с целью получения этого аналитического выражения может быть решена с использованием ортогональных функций Лагерра.

Такой сервис и предоставляет модуль фильтр Лагерра в автоматизированной системе с помощью формы, изображенной на рисунке 6.7.

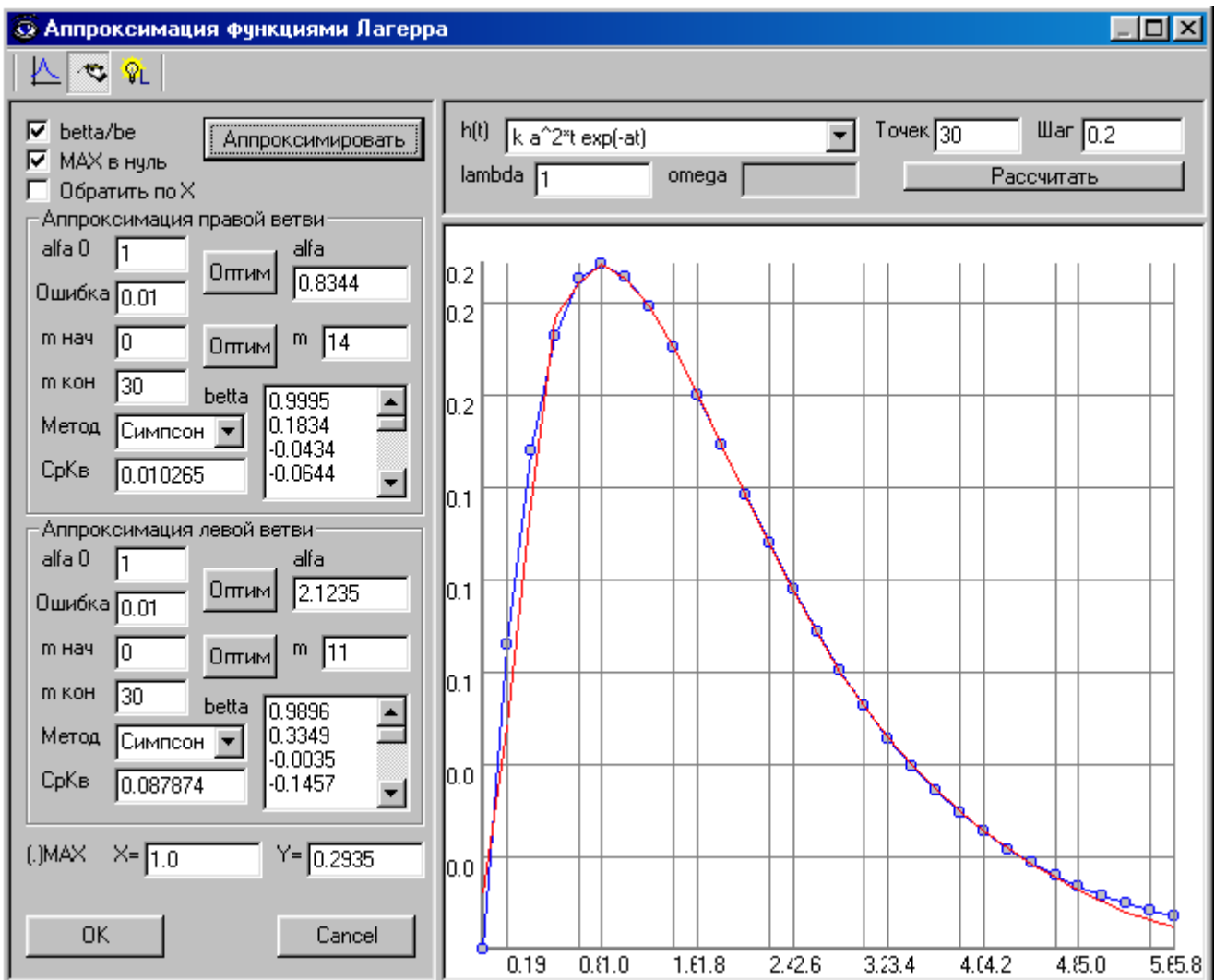


Рисунок 6.7. Аппроксимация импульсных переходных характеристик ортогональными функциями Лагерра


Подробно решение задачи аппроксимации ортогональными функциями Лагерра описана выше в соответствующем разделе. Специфика аппроксимации импульсных переходных характеристик состоит в их положительной определенности. Однако и здесь лучшие, а иногда и единственно удовлетворительные результаты достижимы в случае разбиения функции на две ветви относительно найденного максимума. Тогда выражение импульсной переходной характеристики принимает вид:


$$h_a(\tau) = A_m \left(\sum_{k=0}^{m_n} b_{k,n} 1(\tau - \tau_m) L_k(\tau - \tau_m, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} b_{k,l} 1(\tau_m - \tau) L_k(\tau_m - \tau, \alpha_l) \right). \quad (6.3)$$

Квадратическая погрешность аппроксимации в этом случае будет выражена, как

$$\Delta = \int_{-\infty}^{\infty} \left[h(\tau) - A_m \left(\sum_{k=0}^{m_n} b_{k,n} 1(\tau - \tau_m) L_k(\tau - \tau_m, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} b_{k,l} 1(\tau_m - \tau) L_k(\tau_m - \tau, \alpha_l) \right) \right]^2 d\tau.$$


Для вычисления аппроксимируемой импульсной переходной характеристики необходимо выбрать вид характеристики в поле «h(t)», задать ее параметры «lambda» и «omega» и установить число отсчетов и интервал дискретизации для этой функции. Увеличение числа отсчетов приводит к увеличению времени фильтрации, однако это число должно удовлетворять требуемой точности.

Расчет характеристики и построение графика производится после нажатия на кнопку «Расчитать» или .

Предусмотрен вариант ручного редактирования графика. Соответствующий режим включается кнопкой , после чего узлы графика будут выделены. Выделенные узлы можно перемещать с помощью мыши, но только в вертикальном направлении. Это связано с требованием равномерной дискретизации для аппроксимируемой функции импульсной переходной характеристики. В дальнейшем разработка метода аппроксимации функций с нерегулярной дискретизацией может отменить это требование. Целью введения в автоматизированную систему режима ручного редактирования является решение учебных задач и возможность ввода любых импульсных переходных характеристик, их аппроксимация и последующее создание неограниченного числа разнообразных фильтров.

Для выполнения процедуры аппроксимации необходимо установить флажки в верхнем левом углу страницы. Флажок «МАХ в нуль» означает, что будет найден максимум на графике ВКФ (справа или слева от оси ординат), затем график сдвинется вдоль оси X на величину абсциссы точки максимума. Флажок «beta/be» означает, что вместо параметров аппроксимирующего выражения β , будут использоваться исправленные b .

После установления флажков необходимо определить оптимальные значения параметров ряда Лагерра α и β_0, \dots, β_m (b_0, \dots, b_m) для каждой ветви. Для этого требуется:

- выбрать метод численного интегрирования в поле «Метод»;
- указать начальное приближение α_0 в поле «alfa 0» и погрешность определения α в поле «Ошибка»;
- нажать на кнопку «Оптим» рядом с полем «alfa»;
- выбрать диапазон, в котором будет рассчитано число членов разложения m , в полях «m нач» и «m кон»;
- нажать на кнопку «Оптим» рядом с полем «m»;
- определив α и число членов разложения для обеих ветвей, нажать на кнопку «Аппроксимировать» или .

После этого в поле «beta» появится массив членов разложения β (b), а в поле «СрКв» будет отображена среднеквадратическая ошибка аппроксимации. Будет также построен график исходной ВКФ (синим цветом) и аппроксимирующего выражения (красным цветом).

После нажатия на кнопку «ОК» данные будут утверждены для выбранного фильтра Лагерра, иначе фильтр не будет настроен.

Следующим модулем, требующим особого описания, является нелинейный преобразователь.

При решении задач возникает необходимость в анализе нелинейных систем при случайном входном воздействии. Аналитическое решение этой задачи возможно в некоторых случаях только для нормальных входных процессов, и даже в этом случае, как правило, применяют приближенные методы и оценивают погрешность приближения. Эта процедура достаточно сложна и громоздка. Если же входной процесс отличен от нормального, аналитическое решение задачи практически невозможно. Тем не менее, успешное исследование подобных систем возможно методами имитационного моделирования на ЭВМ.

Для этого необходимо получить случайный процесс с заданным видом корреляционной функции и закона распределения. Нелинейное преобразование меняет вид корреляционной функции, однако, иногда удается найти приемлемое решение этой задачи (см. рисунок 6.8).



Рисунок 6.8. Получение процесса с заданным видом КФ и отличным от нормального законом распределения

Нормирующий преобразователь выполняет преобразование

$$y(t) = \frac{v(t) - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}}. \quad (6.5)$$

Выбрав вид нелинейного преобразования, можно получить случайный процесс с требуемыми характеристиками. Нелинейный преобразователь с интегрированным нормирующим преобразователем на входе можно включить в проектируемую систему и настроить, нажав на кнопку «Создать» и задав необходимые параметры. Предварительно нужно задать вид нелинейного преобразователя: «Аналитическое выражение», «Линейная интерполяция» или «Аппроксимация функциями Лагерра»).

В первом случае появится возможность задания аналитического выражения функции преобразования. При этом точность преобразования будет максимальной. Форма задания аналитического выражения приведена на рисунке 6.9.

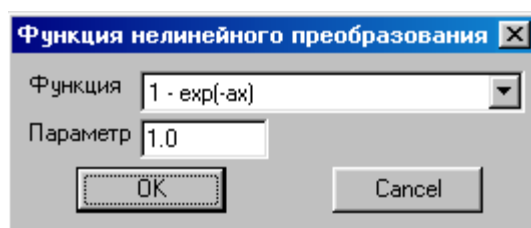


Рисунок 6.9. Нелинейное преобразование

В случае отсутствия аналитического представления возможна линейная интерполяция функции преобразования, которая вводится вручную (с помощью мыши), или задается отсчетами в файле. Форма, соответствующая этой операции, приведена на рисунке 6.10. На функцию преобразования наложены ограничения определенности на интервале $[0,1]$.

Линейная интерполяция позволяет задать преобразование любого вида, однако имеет погрешность определения функции. Иногда удается получить лучший результат, используя аппроксимирующие выражения, например, ортогональные функции Лагерра.

Для этого необходимо настроить нелинейный преобразователь так же, как производилась настройка фильтра, основанного на функциях Лагерра (см. рисунок 6.11).

Она во многом аналогична форме настройки фильтра Лагерра. Здесь необходимо в окне $h(t)$ выбрать вид нелинейного преобразования, а в поле «lambda» задать параметр. После установки интервала и количества отсчетов функция нелинейного преобразования будет построена.

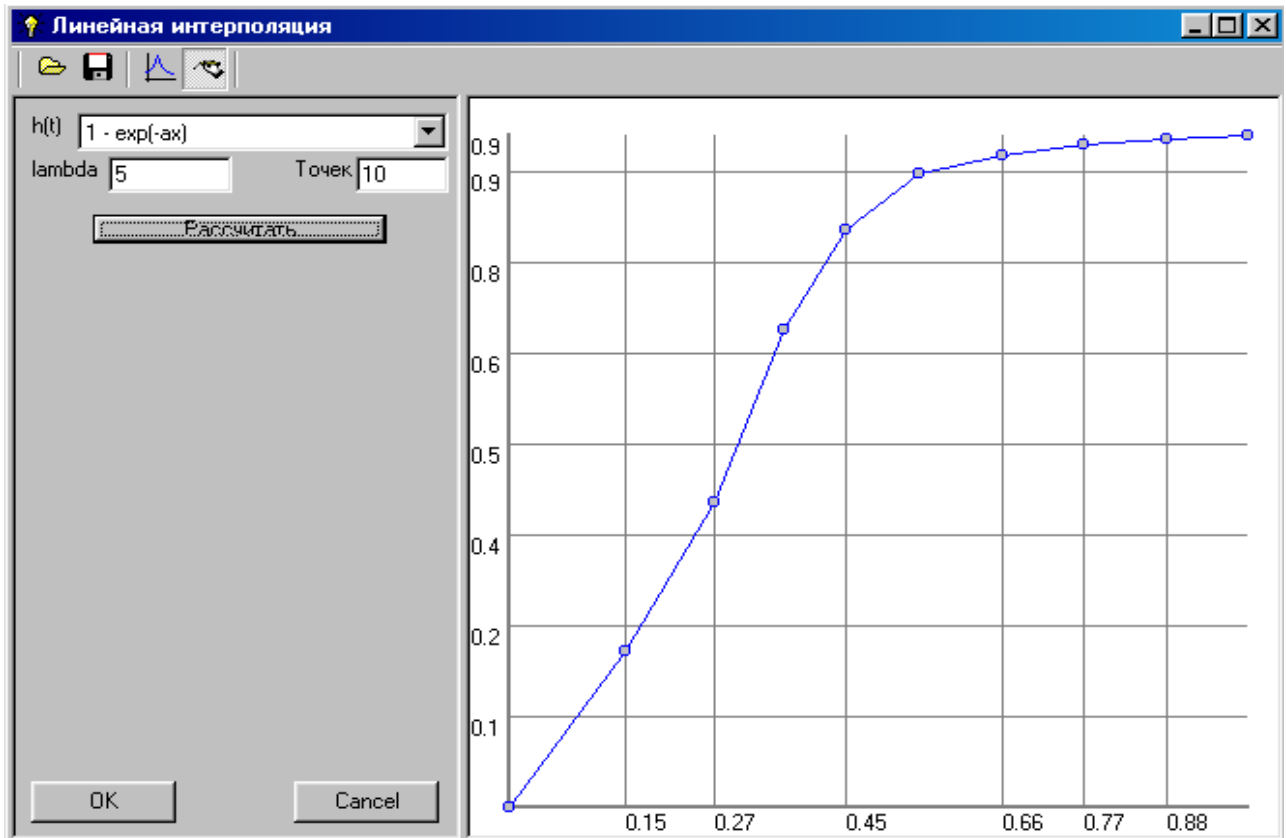


Рисунок 6.10. Нелинейное преобразование. Линейная интерполяция

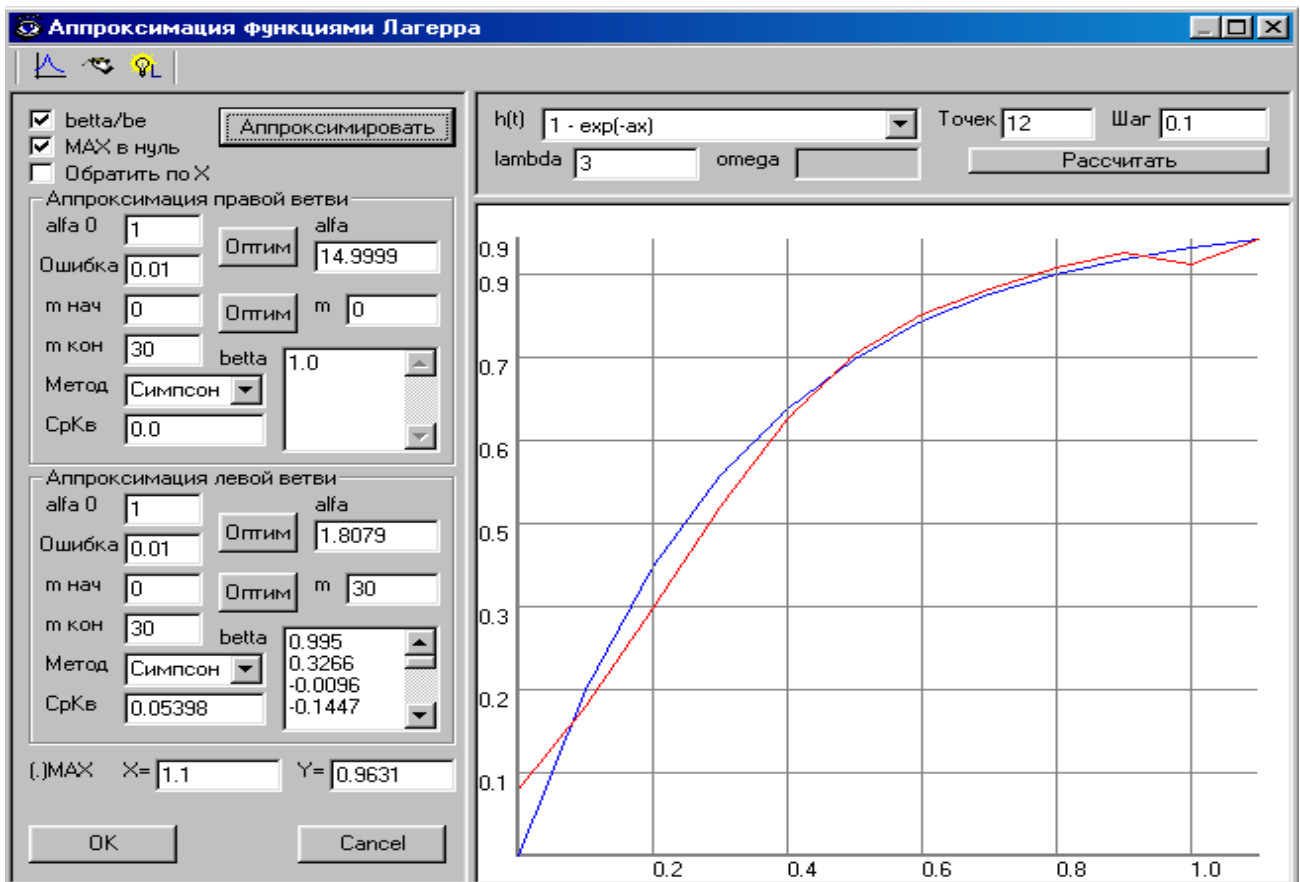


Рисунок 6.11. Нелинейное преобразование. Аппроксимация функциями Лагерра

Следует особо отметить тот факт, что после нормировки значения процесса лежат в диапазоне (0,1). Поэтому интервал дискретизации и число отсчетов нужно подбирать так, чтобы функция преобразования была определена на этом промежутке. Иногда лучшим решением может стать определение этой функции на интервале, большем (0,1).

В случае выбора одного из предлагаемых преобразований операцию аппроксимации можно не проводить. При этом в качестве нелинейного преобразования будет выбрана указанная функция.

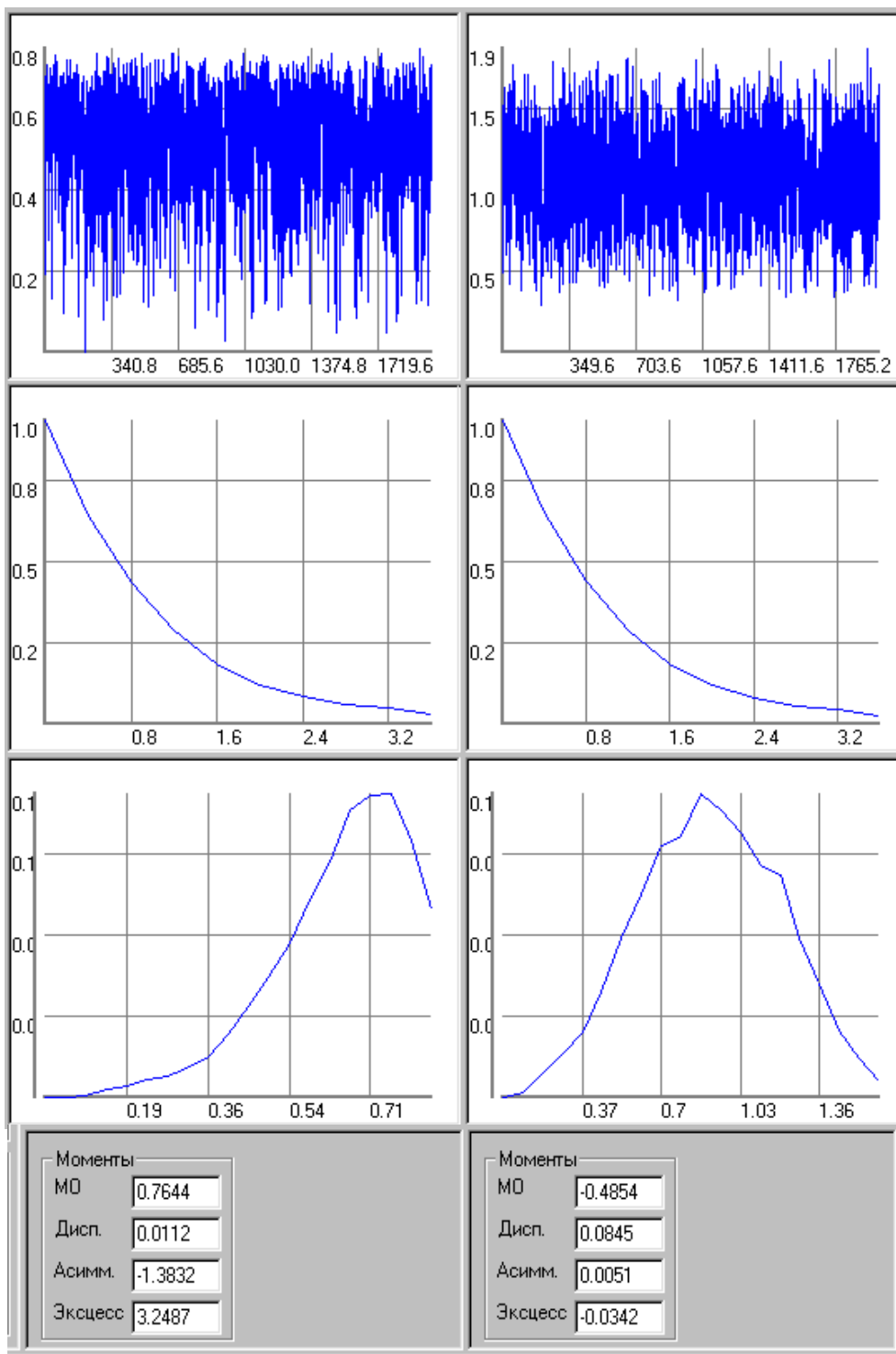


Рисунок 6.12. Корреляционные функции и плотности распределения пары процессов

При неизвестной аналитической форме функции нелинейного преобразования можно аналогично описанному выше для фильтра Лагерра выбрать режим рисования и исправить функцию (задать ее отсчеты вручную). Затем следует аппроксимировать эту функцию и получить параметры функции Лагерра. Нелинейное преобразование в этом случае будет выглядеть, как

$$F_a(x) = A_m \left(\sum_{k=0}^{m_n} b_{k,n} 1(x - x_m) L_k(x - x_m, \alpha_n) + \sum_{k=0}^{m_l} b_{k,l} 1(x_m - x) L_k(x_m - x, \alpha_l) \right), \quad (6.6)$$

$$1(x) = \begin{cases} 1, & x > 0; \\ \frac{1}{2}, & x = 0; \\ 0, & x < 0; \end{cases} \text{ и } 1(-x) = \begin{cases} 0, & x > 0; \\ \frac{1}{2}, & x = 0; \\ 1, & x < 0. \end{cases}$$

После нажатия на кнопку «ОК» данные будут утверждены для выбранного нелинейного преобразователя, иначе он не будет настроен.

Выбор отображаемого графика (корреляционная функция, плотность распределения или случайный процесс) на странице имитационного моделирования систем «БД систем» возможен после правого клика мыши на соответствующем графике.

Иллюстрация описанному выше приведена на рисунке 6.12.

После построения системы производится ее компиляция и, в случае положительного результата проверки системы, генерация случайных процессов в каждом модуле. Два полученных на блоке анализа процессов передаются на страницу 2 оценки взаимной корреляционной функции пары процессов.

В течение операции моделирования исходный белый шум проходит несколько преобразователей, после чего приобретает необходимые характеристики (см. рис.6.13). Диаграмма состояний случайного процесса приведена на рисунке 6.14.



Рисунок 6.13. Введение нелинейного преобразователя

Для каждой системы возможно определение нескольких взаимных корреляционных функций с их последующей аппроксимацией. Перемещение между системами и выбор нужной системы происходит на описанной выше странице 7 «БД систем». Ведение базы данных параметров аппроксимирующих выражений для каждой системы происходит на странице 8 «БД ВКФ». Здесь в трех таблицах (оценок ВКФ, аппроксимирующих функций Лагерра и параметрических моделей) отображается информация об имеющихся аппроксимирующих выражениях, заносимых в базу данных со страниц расчета ВКФ, аппроксимации ортогональными функциями Лагерра и параметрическими моделями, как было описано выше.

В верхней части экрана указывается название системы, для которой были проведены исследования. Для оценки взаимной корреляционной функции указываются *шифр, среднеквадратическое отклонение и максимальная погрешность* в случае, если они были определены при оценке ВКФ (для простейших систем предусмотрена возможность определения аналитического выражения ВКФ), *точки и их количество для левой и правой ветвей и интервал дискретизации*.

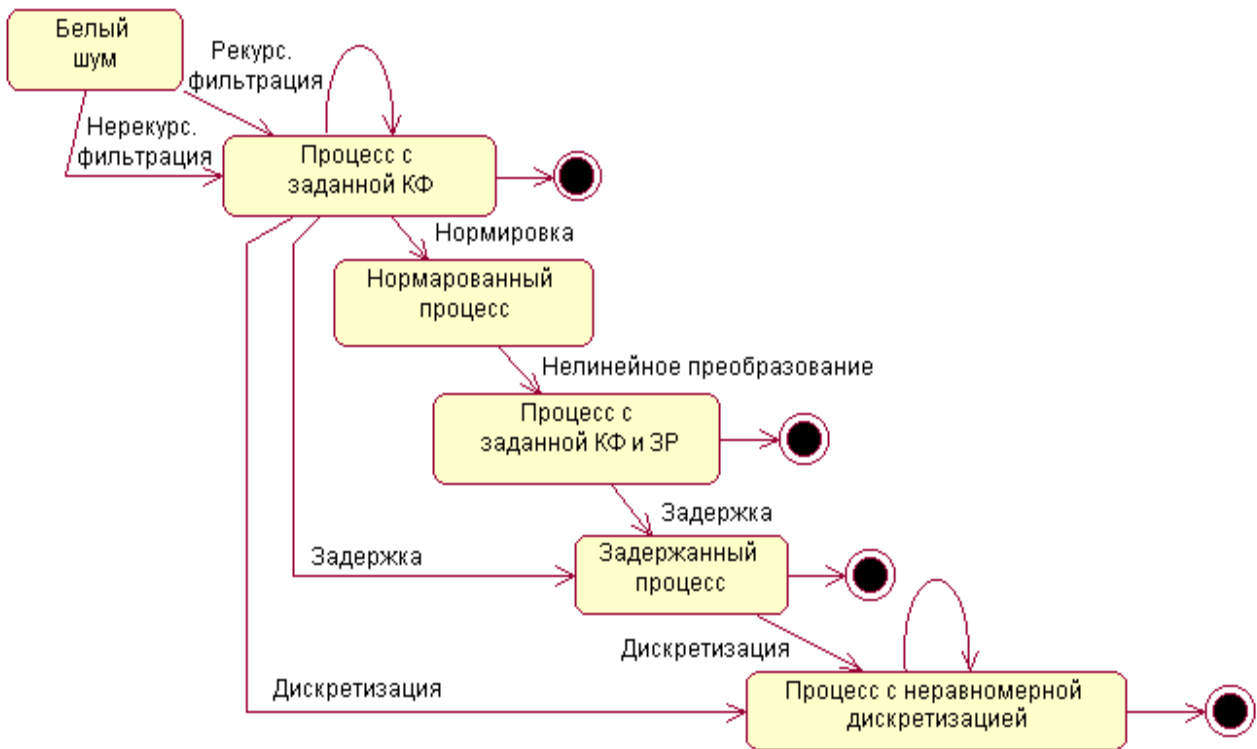


Рисунок 6.14. Диаграмма состояний случайного процесса при моделировании


Для аппроксимаций параметрическими моделями указывается *шифр, вид функции и параметры, СКО и максимальная погрешность для правой и левой ветвей; точка максимума.*

Для аппроксимаций функциями Лагерра указывается *шифр, параметры функций Лагерра, СКО и максимальная погрешность для правой и левой ветвей; точки максимума.*

На этой странице также производится построение графиков взаимных корреляционных функций и спектральных плотностей мощности по параметрам выражений, выделенным в каждой таблице (происходит выделение всей строки). Вид графика (ВКФ или спектр) указывается в поле «Строить».

При построении взаимных корреляционных функций с помощью параметрических моделей и функций Лагерра необходимо установить интервал дискретизации и количество отсчетов правой и левой ветвей. При построении взаимных спектральных плотностей мощности нужно определить интервал дискретизации и количество отсчетов функции. Кроме графика взаимной спектральной плотности мощности возможно построение вещественной, мнимой частей, модуля и фазы спектральной плотности мощности. Вид отображения спектра указывается справа от поля «Строить».

Также нужно выбрать вид отображаемого графика (один из трех), то есть указать таблицу, откуда будут браться выделенные данные. При построении графиков есть цветовое соответствие графика, флажка отображения и выделения в таблице.

Отображение графиков происходит после нажатия на кнопку «Построить!» или . При установке флажка «Чистить» происходит отображение единичных графиков, при сброшенном флажке они накладываются друг на друга.

В случае, когда отображены два графика взаимной корреляционной функции, у которых количество отсчетов правой и левой ветвей и интервалы дискретизации равны, возможно сравнение функций, заключающееся в определении среднеквадратического и максимального отклонений. Для этого нужно построить оба графика и нажать кнопку «Сравнить».

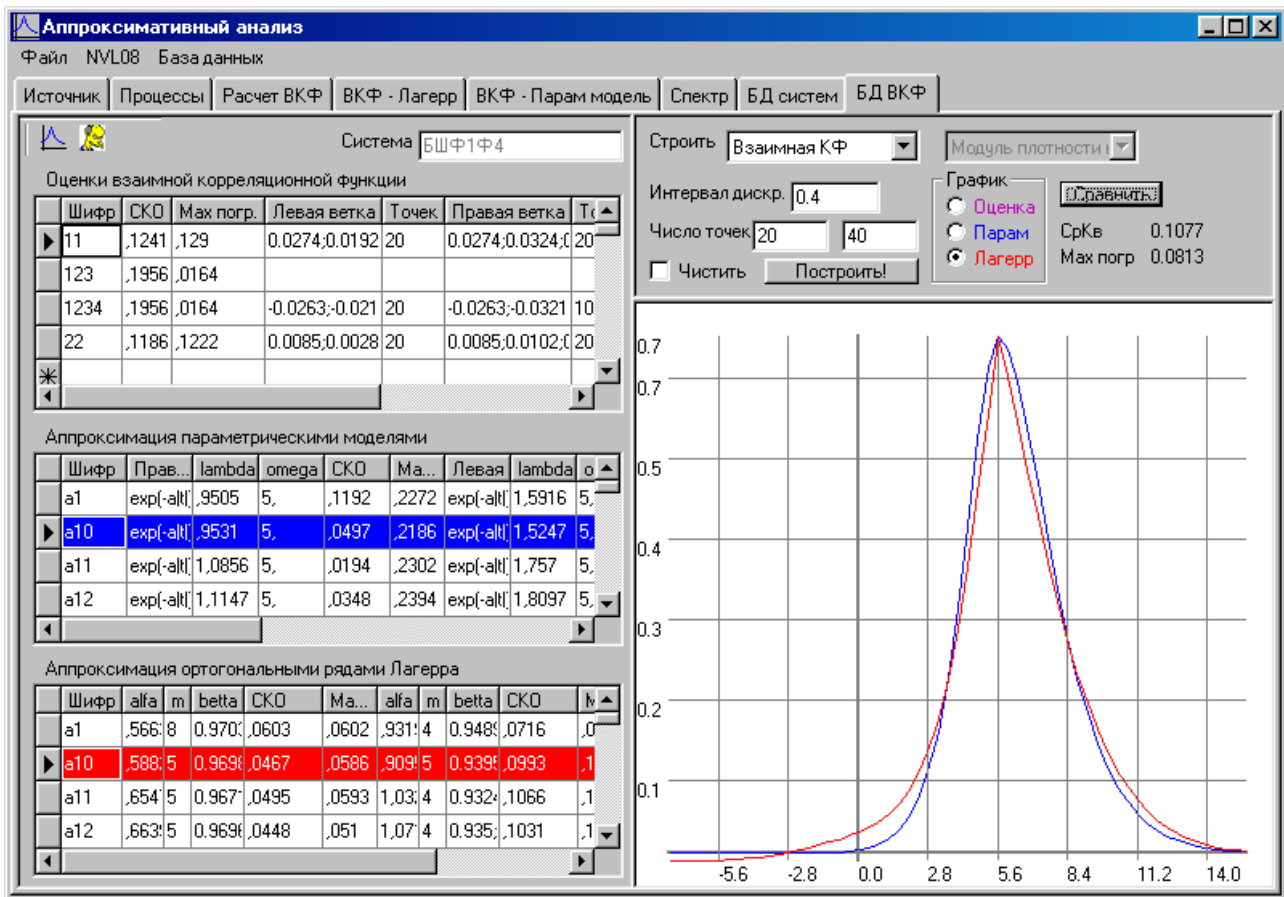


Рисунок 6.15. Страница БД ВКФ

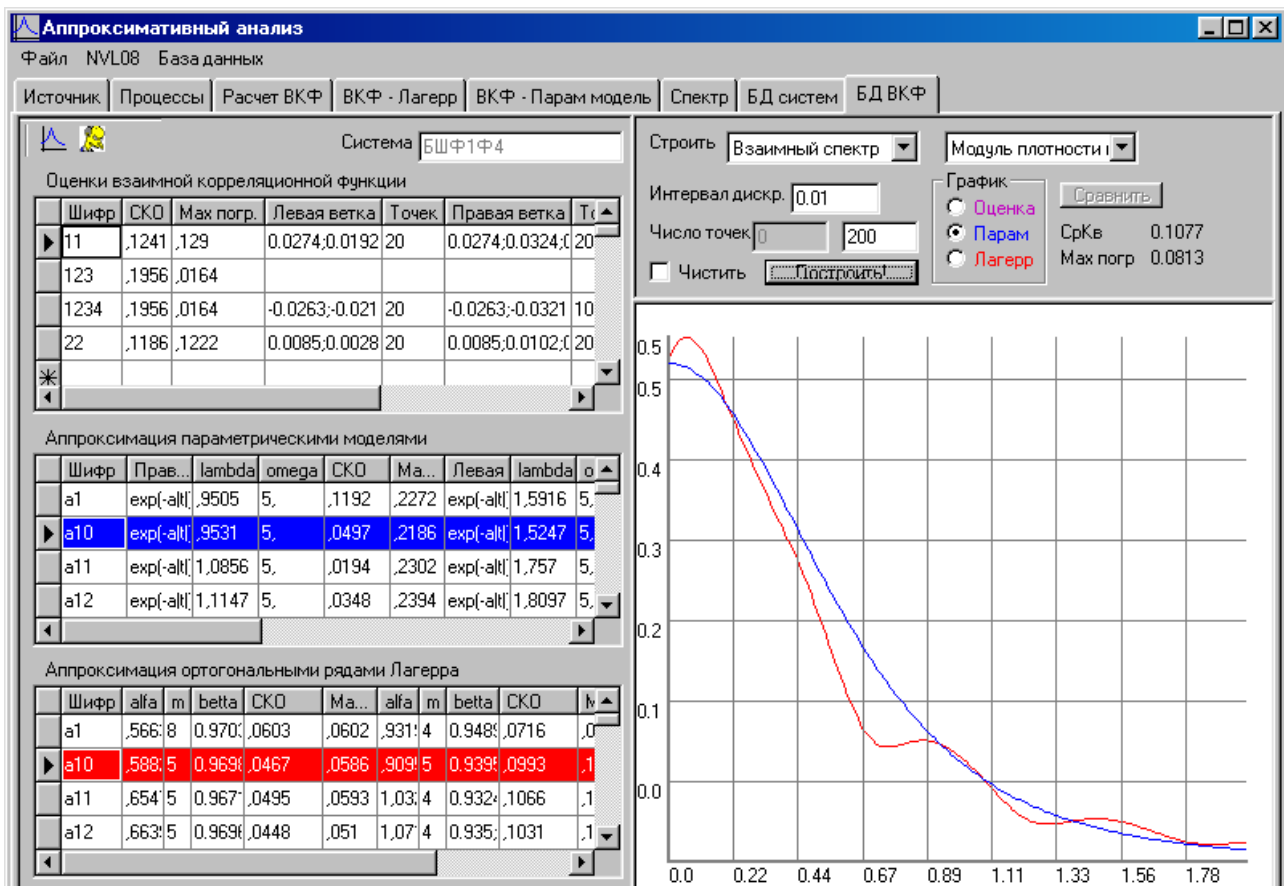


Рисунок 6.16. Построение спектральной плотности мощности

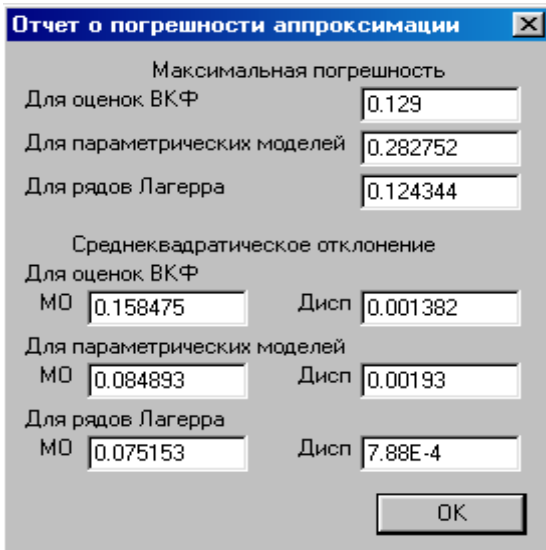



Рисунок 6.17. Отчет о погрешностях

При использовании метода имитационного моделирования для оценки методических погрешностей возможно построение отчета по накопленным данным. Для этого необходимо нажать кнопку , после чего будет произведен анализ таблиц и отображен отчет, пример которого приведен на рисунке 6.17. Отметим, что отчет строится на основании **всех данных в системе**. Поэтому, рекомендуем создавать **отдельные системы для каждого эксперимента** по имитационному моделированию, а также следить за тем, в какую систему заносится сохраняемые параметры аппроксимирующих выражений. Для этого при занесении параметров в базу данных отображается название текущей системы.

В завершение приведем результаты аппроксимации взаимных корреляционных функций процессов, сгенерированных с использованием автоматизированной системы.

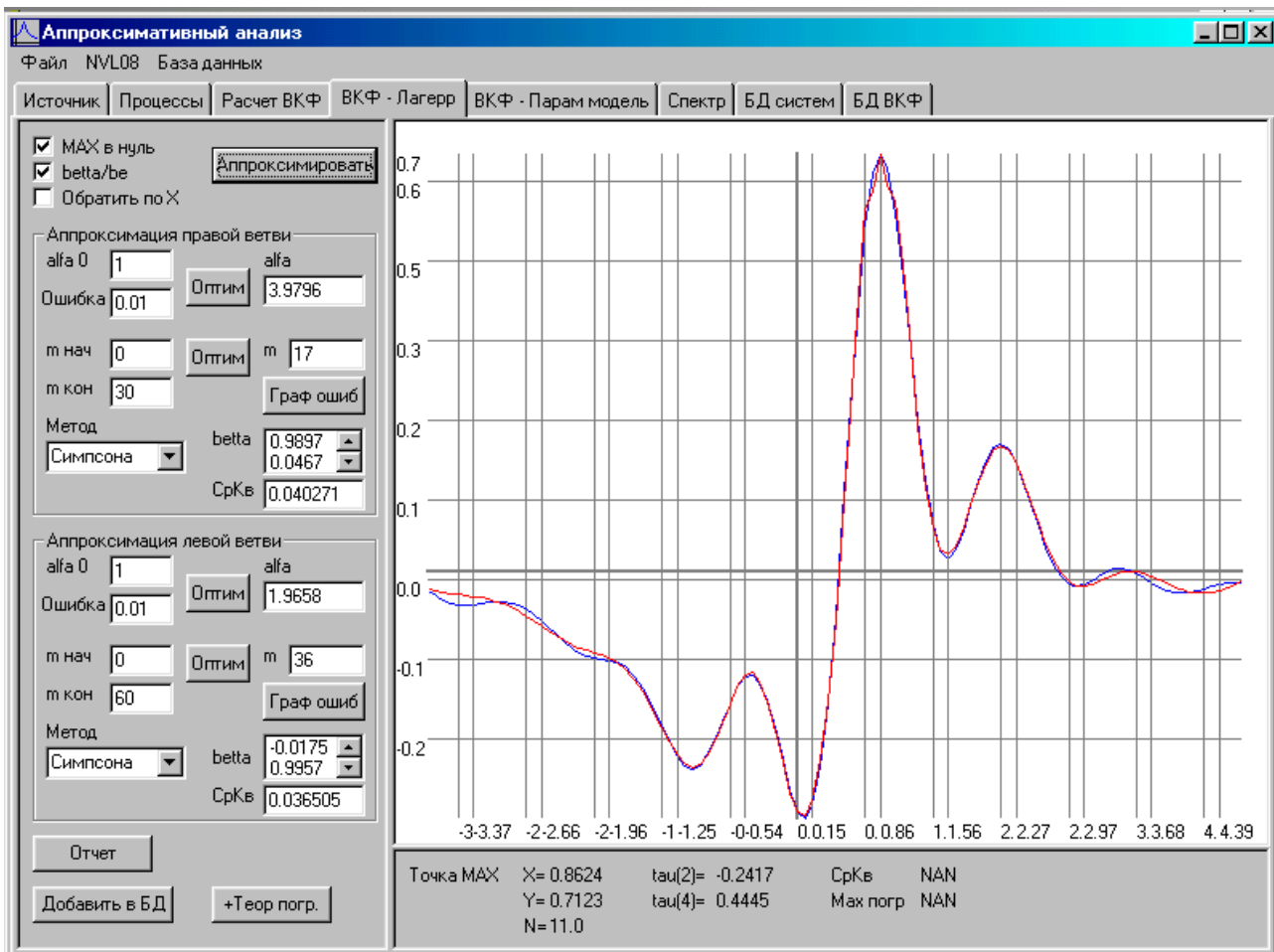


Рисунок 6.18. Пример аппроксимации ВКФ

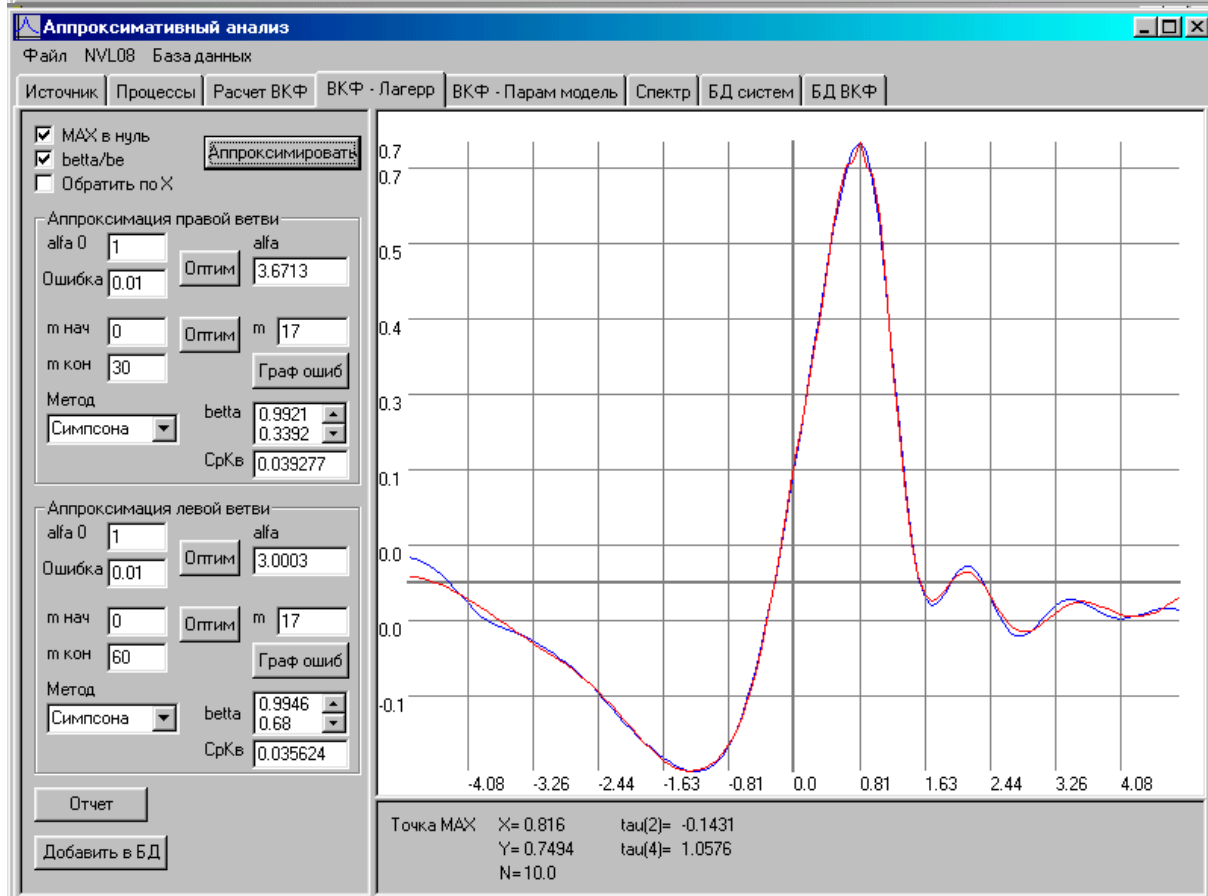
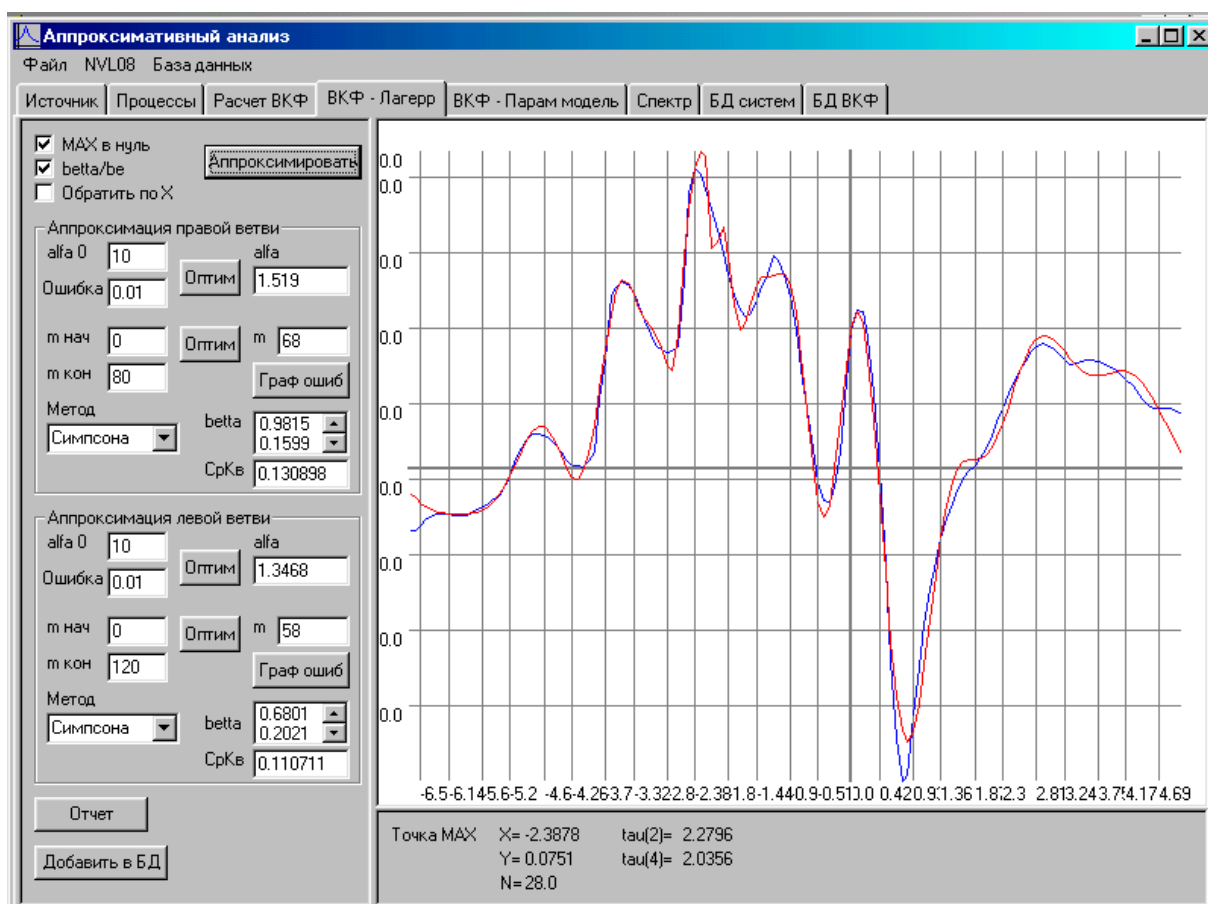


Рисунок 6.19. Результаты аппроксимации

7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА ВВОДА/ВЫВОДА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

7.1. Особенности ввода/вывода аналоговых сигналов

Информационные технологии позволяют организовать научные исследования, учебный процесс с моделированием объектов реального мира и проверкой правильности построенных моделей в результате проведения реального эксперимента. Это становится возможным благодаря наличию интерфейсных блоков, сопрягаемых с ЭВМ, и датчиков физических величин. Сигналы, поступающие от различных объектов, измеряются и отображаются на экране монитора. После чего производится автоматизированный контроль результатов проведенных исследований, а в случае необходимости регулируются параметры эксперимента.

Перспективным направлением применения микропроцессорной и компьютерной техники при обучении является их использование как инструментального средства. При этом выделяются два направления проведения учебных экспериментов:

1. моделирование физических процессов с помощью компьютера.
2. использование интерфейсных блоков, сопрягаемых с ЭВМ, и датчиков физических величин для проведения натурального физического эксперимента.

Первое направление характеризуется тем, что микропроцессорная и вычислительная техника используется для моделирования множества физических явлений, процессов и законов.

Второе связано с использованием интерфейсных блоков, сопряженных с ЭВМ, и датчиков физических величин, что позволяет проводить реальный физический эксперимент с применением конкретного объекта исследования.

Основной подсистемой любого технического средства, предназначенного для получения и обработки измерительной информации, - является измерительно-вычислительный канал.

Под **измерительно-вычислительным каналом** понимается совокупность аппаратно-программных средств, предназначенных для измерения мгновенных значений соответствующей физической величины, обработки результатов измерения и представления конечных результатов в форме, удобной для дальнейшего использования. Структура измерительно-вычислительного канала представлена на рис. 7.1.

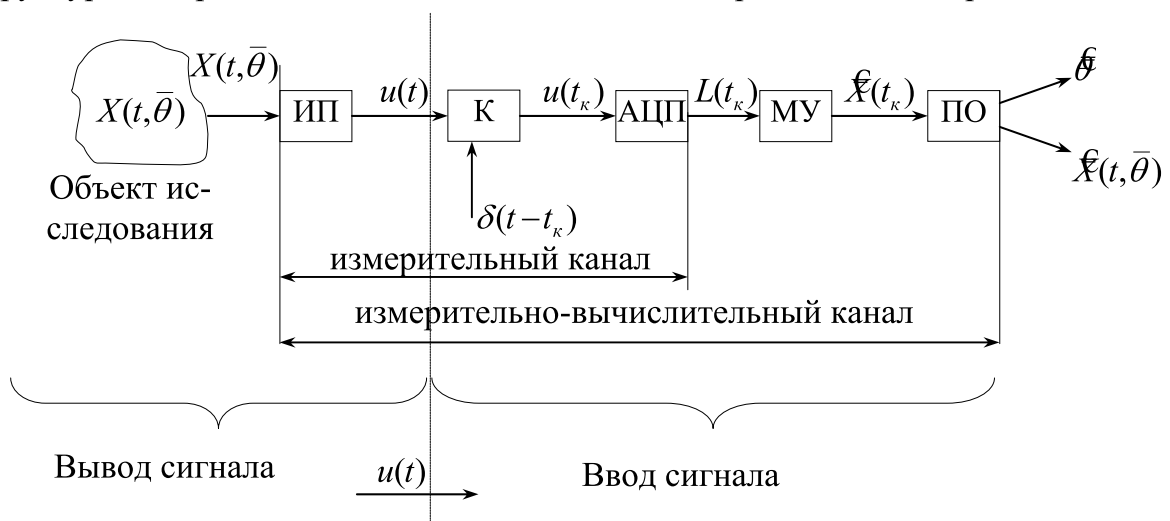


Рисунок 7.1. Измерительно-вычислительный канал

На рисунке приняты следующие обозначения:

ИП – измерительный преобразователь (датчик);

К – коммутатор;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

МУ – масштабирующее устройство;

ПО – процессор обработки;

$u(t)$ – значение электрической величины.

С точки зрения моделирования, измерительно-вычислительный канал можно разбить на две части: одна отвечает за ввод сигнала, другая – за вывод. Ввод сигнала производится на участке измерительного канала от коммутатора до процессора обработки и позволяет вводить аналоговый сигнал в виде напряжения из внешнего, по отношению к ИВК, мира. Здесь сигнал проходит все стадии преобразования: коммутация, квантование, дискретизация, масштабирование. Для изучения характеристик канала и степени влияния его параметров на ошибку передачи данных вводится возможность регулировки параметров преобразования. В частности, изменение разрядности АЦП, задание потока событий, временные метки которого используются при опросе измерительно-вычислительного канала.

При генерации потока событий выбирается модель дискретизации. Если в выбранной модели используется ПСП, то задаётся закон её распределения. Учитывая интересы исследователя, предусмотрена возможность моделирования помех, которые оказывают влияние в виде «дрожания» и r -преобразования. При этом, в качестве параметра задается ЗР ПСП помехи и её параметры. (Например, вероятность пропуска отсчета при r -преобразовании). В качестве масштабирующего коэффициента при генерации потока событий используется шаг принудительной дискретизации.

Источником анализируемого сигнала могут выступать: объект исследования и сигнал, моделируемый другим ИВК.

В случае использования объекта исследования физическая величина, описывающая его поведение, переводится в электрический сигнал и вводится посредством ИП.

Для учебных целей может быть предусмотрена подсистема вывода сигнала, которая позволяет задавать СП, описывающий поведение объекта исследования, и имитировать его функционирование. В этом случае функции объекта исследования и ИП выполняет модель объекта внешнего мира, который реализуется в ИВК.

7.2. Структура автоматизированной системы, моделирующей измерительно-вычислительный канал

Разработанную систему можно разбить на следующие составные подсистемы:

- ввода сигнала;
- вывода сигнала;
- настройки системы;
- оценки числовых характеристик.

Перед началом работы автоматизированную систему ввода/вывода необходимо настроить. Определить местоположение драйвера устройства, задать режим связи источника сигнала с приемником, произвести градуировку измерительно-вычислительного канала. Учитывая возможность независимой работы приемника с передатчиком, настройки системы были разделены на две части, одна из которых отвечает за определение параметров системы при вводе сигнала, другая – при выводе.

Как видно из структурной схемы, представленной на рис. 7.2, за настройку системы при вводе сигнала отвечает блок «Настроить приемник сигнала», а при выводе – «Настроить передатчик сигнала». Все входные воздействия, поступающие в означенные блоки, отображены на структуре. В настройку приемника сигнала входит задание режима работы коммутатора, определение параметров АЦП и его градуировочной характеристики. Настройка передатчика сводится к заданию режима приема/передачи, определению базового адреса ЦАП, заданию времени преобразования и градуировке.

Во избежание повторной настройки системы при каждом ее запуске, предусмотрен механизм сохранения настроек на носителях ЭВМ. Формат файла настроек приведен в приложении П.7.

Подсистема ввода отвечает за прием аналогового сигнала по выбранным каналам, его оцифровку, первичную статистическую обработку и передачу полученного ВР для дальнейшей обработки и анализа или для записи на носители ЭВМ.

Реализация описанных функций возможна при наличии в подсистеме следующих блоков:

- подготовить буфер сигнала;
- сформировать поток событий;
- ввести сигнал;
- настроить приемник сигнала.

Блок «Подготовить буфер сигнала» производит выделение памяти и ее предварительную подготовку для хранения максимально возможного количества результатов измерения входного сигнала в виде ВР. Следует заметить, что максимальное количество измерений задается пользователем системы на этапе ее настройки. После того как буфер сигнала готов к приему, определяется поток событий, временные метки которого используются при чтении мгновенных значений аналогового сигнала. Формирование потока событий производится в соответствии с заданной пользователем моделью дискретизации и типом помехи, влияющей на нее (см. рис. 7.3).

В случае имитации объекта исследования задействуется подсистема вывода сигнала. При этом, случайный процесс с заданным видом корреляционной функции и видом дискретизации, описывающий модель объекта исследования, загружается из файла или принимается из **подсистемы генерации** (см. раздел 1). После чего передается в измерительно-вычислительный канал. Для реализации перечисленных функций подсистема состоит из блоков:

- подготовить СП к передаче;
- настроить передатчик сигнала;
- вывести сигнал посредством МФУ NVL08.

Взаимодействие блоков и внешние воздействия показаны на структурной схеме автоматизированной системы ввода/вывода.

Подсистема оценки числовых характеристик позволяет определить вероятностные характеристики реального и идеального потоков событий. Здесь под идеальным понимается поток событий СП, прочитанного из файла, или ВР, введенного из **подсистемы генерации** - при выводе сигнала, а также поток событий, сгенерированный при подготовке системы к вводу. Под реальным же понимается поток событий, временные метки которого были определены в результате ввода и/или вывода сигнала посредством МФУ NVL08.

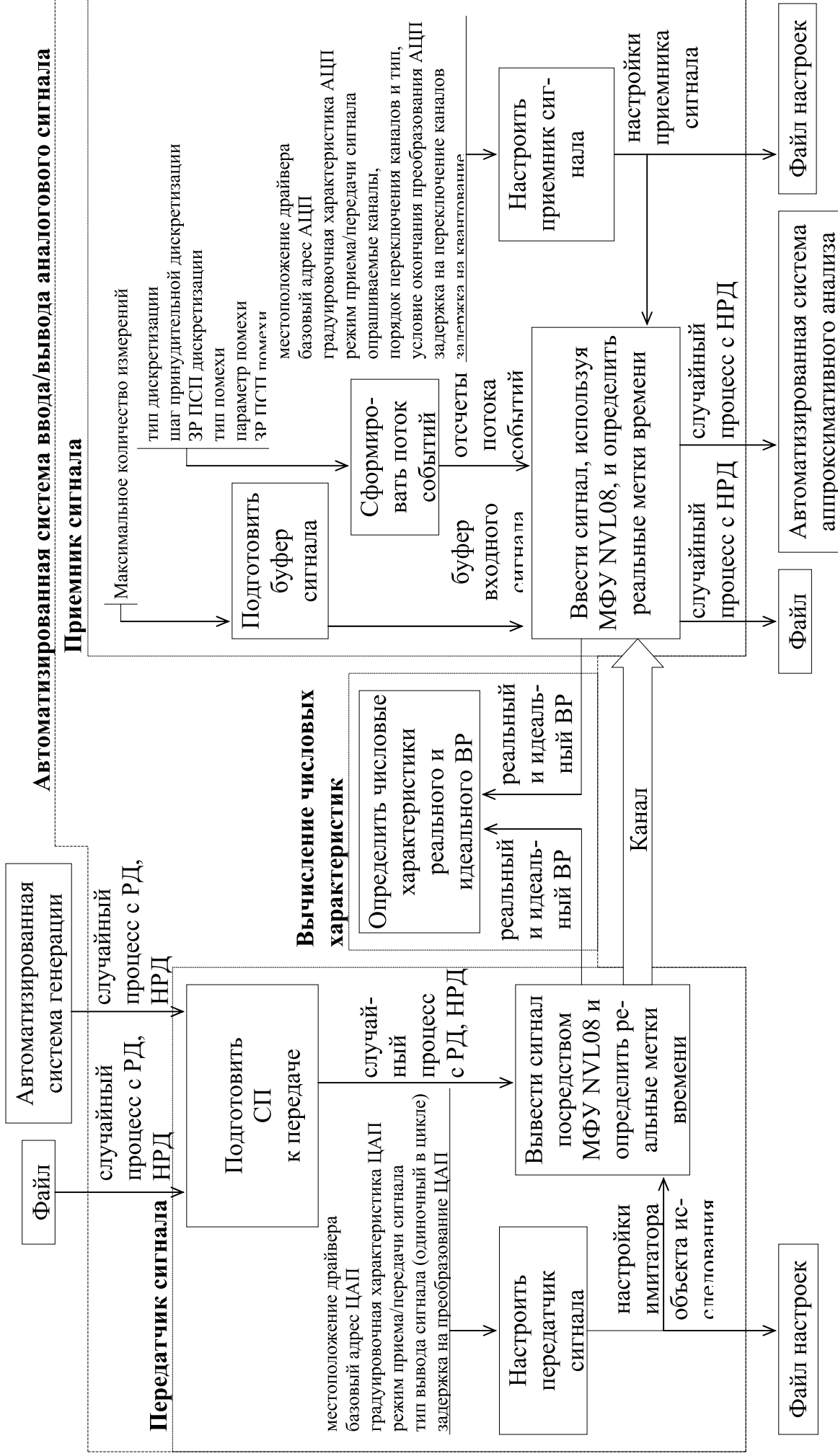


Рисунок 7.2. Структурная схема автоматизированной системы



Рисунок 7.3. Структурная схема блока формирования потока событий

Подсистема позволяет определять моментные характеристики СП, такие как математическое ожидание (МО), дисперсию (Dx), коэффициент асимметрии (Ka) и коэффициент эксцесса (Kε), а также максимальную разность (Δ) и среднеквадратическое отклонение (СКО) временных отсчетов реального и идеального потоков событий. Структура подсистемы оценки числовых характеристик с входными параметрами представлена на рис. 7.4.



Рисунок 7.4. Структурная схема блока определения числовых характеристик ВР

7.3. Модельные представления языка UML

7.3.1. Диаграмма вариантов использования (use case diagram)

Диаграмма вариантов использования системы приведена на рис. 7.5. В разработанной системе можно выделить четыре вида актеров:

- **Экзаменатор**
- **Исследователь**
- **Автоматизированная система генерации**
- **Автоматизированная система аппроксимативного анализа**

Актеры **Экзаменатор** и **Исследователь** подготавливают систему к сеансу приема/передачи сигнала, осуществляют выбор источника/приемника результатов. Производят анализ вычисленных числовых характеристик ВР.

Автоматизированная система генерации является источником СП, моделирующего объект исследования.

Автоматизированная система аппроксимативного анализа принимает ВР введенного сигнала для анализа и обработки.

Система также содержит варианты использования. Названия и краткое описание действий, которые они выполняют, приведены ниже:

- **«Определить местоположение драйвера».** Осуществляется выбор полного имени файла драйвера МФУ NVL08, расположенного на информационном носителе ЭВМ, для его дальнейшего использования;
- **«Определить тип приема/передачи».** Выбирается один из возможных методов приема информации, таких как:
 - с подтверждением передачи информации;
 - без связи источника с приемником;
 - с подтверждением передачи и приема информации.

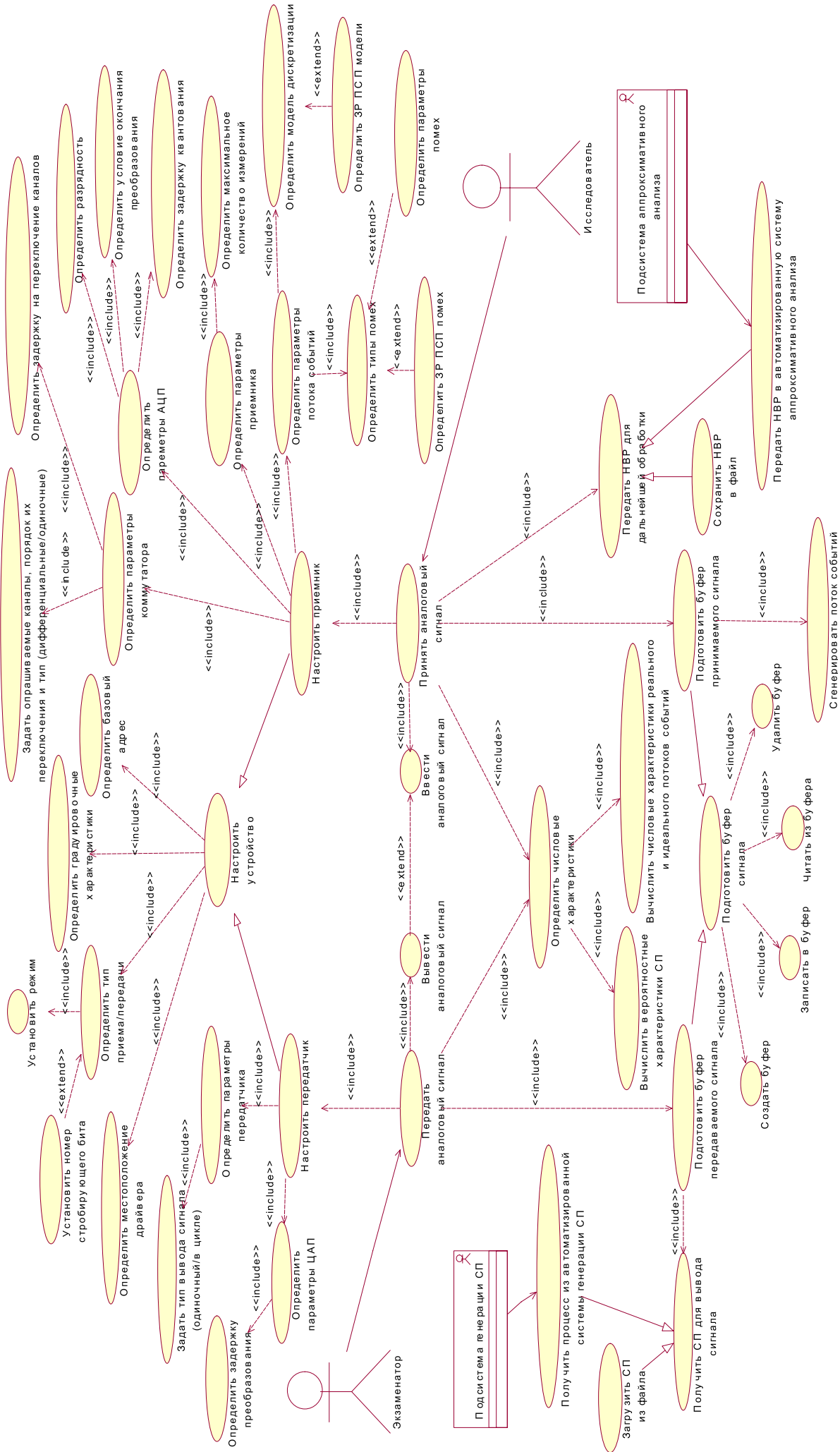


Рисунок 7.5. Диаграмма вариантов использования

Перечисленные методы выбираются в варианте использования **«установить режим»**, а в случае необходимости подтверждения приема или передачи задействуется вариант использования **«установить номер стробирующего бита»**. Этот вариант использования выполняет действия по определению номера цифровой линии МФУ NVL08, используемой в качестве стробирующего сигнала.

- **«Определить градуировочную характеристику»**. Определяется градуировочная характеристика устройства, производится ее аппроксимация методом наименьших квадратов, после чего определяются коэффициенты аппроксимирующей прямой.

- **«Определить базовый адрес»**. Производится установка базового адреса устройства. То есть определяется адресное пространство ЭВМ, где установлено МФУ NVL08.

Перечисленные ранее варианты использования связаны отношением включения с вариантом **«настроить устройство»**, который позволяет произвести общие для приемника и передатчика настройки. **«Настроить устройство»** в свою очередь, является обобщением **«настроить приемник»** и **«настроить передатчик»**.

- **«Настроить передатчик»**. Определяются общие для устройств настройки и задаются присущие лишь передатчику параметры. В частности, в него включается **«определить параметры передатчика»**, где задается тип вывода сигнала: одиночный или в бесконечном цикле, эти действия реализованы в варианте **«задать тип вывода сигнала»**.

- **«Определить параметр ЦАП»**. Задаются параметры цифро-аналогового преобразования. Этот вариант связан отношением включения с **«определить задержку на преобразование»**.

- **«Определить задержку преобразования»**. Задается время на переходные процессы цифро-аналогового преобразования.

- **«Настроить приемник»**. Производится **«настройка устройства»** и выполняются действия, определенные в связанных с ним отношением включения вариантах использования **«определить параметры коммутатора»**, **«определить параметры АЦП»**, **«определить параметры приемника»**, **«определить параметры потока событий»**.

- **«Определить параметры коммутатора»**. Задаётся режим работы коммутатора, количество каналов. Отношением включения связаны: **«задать опрашиваемые каналы, порядок их переключения и тип»**, **«определить задержку на переключение каналов»**.

- **«Задать опрашиваемые каналы, порядок их переключения и тип»**. Производится выбор списка опрашиваемых каналов, определяется порядок их переключения, задается тип: дифференциальные или с общей землей (одиночные).

- **«Определить задержку на переключение каналов»**. Вариант позволяет определиться с задержкой, необходимой для переходных процессов при переключении каналов коммутатора.

- **«Определить параметры АЦП»**. Задаются параметры аналого-цифрового преобразования. Отношением включения связаны варианты: **«определить разрядность»**, **«определить условие окончания преобразования»**, **«определить задержку квантования»**.

- **«Определить разрядность»**. Задается разрядность АЦП, что позволяет исследовать влияние параметров квантования на ошибки передачи данных.

- **«Определить условие окончания преобразования».** Определяется метод передачи информации, т.е. задается флаг ожидания окончания цикла преобразования АЦП.
- **«Определить задержку квантования».** Здесь определяется время переходных процессов при квантовании, которое используется при программном методе приема информации.
- **«Определить параметры приемника».** Позволяет задать параметры буфера для хранения результатов ввода сигнала, в частности определяет его максимальный размер. Задание максимально возможного количества мгновенных значений сигнала осуществляется в варианте – **«определить мах количество измерений».**
- **«Определить параметры потока событий».** Задаются параметры потока событий, определяется модель дискретизации и действующие на него помехи. Временные метки потока событий определяют моменты измерения мгновенных значений сигнала. Отношением включения связаны варианты использования **«определить типы помех»** и **«определить модель дискретизации».**
- **«Определить модель дискретизации».** Позволяет задать модель дискретизации, а в случае использования ПСП – определить её ЗР. Действия по заданию ЗР производятся в варианте **«определить ЗР ПСП модели».**
- **«Определить типы помех».** Определяется имитируемая помеха, действующая на поток событий, задаются её параметры. Операцией включения связаны: **«определить ЗР ПСП помех»** и **«определить параметры помех».**
- **«Определить ЗР ПСП помех».** Задаются типы ЗР ПСП помехи с «дрожанием» и «р-преобразованием».
- **«Определить параметры помех».** Для «дрожания» задается ЗР ПСП и его параметры. При моделировании помехи в виде р-преобразования задаются ЗР ПСП, его параметры и вероятность пропуска отсчетов в потоке событий.
- **«Подготовить буфер сигнала».** Является обобщением для вариантов использования: **«подготовить буфер передаваемого сигнала»**, **«подготовить буфер принимаемого сигнала».** Позволяет создать буфер, удалить его, а также читать и записывать в него информацию. Для этого отношением включения связаны варианты: **«создать буфер»**, **«удалить буфер»**, **«записать в буфер»**, **«читать из буфера».**
- **«Создать буфер».** Вариант предназначен для выделения области в оперативной памяти ЭВМ.
- **«Удалить буфер».** Выполняются действия по освобождению области памяти, выделенной вариантом использования **«создать буфер».**
- **«Записать в буфер».** Позволяет изменить содержимое буфера.
- **«Читать из буфера».** Позволяет определить содержимое буфера.
- **«Подготовить буфер передаваемого сигнала».** Позволяет создать буфер для хранения исходного СП, моделирующего поведение объекта исследования, и занести в него исходные данные. Операцией включения связан вариант **«получить СП для вывода сигнала».**
- **«Получить СП для вывода сигнала».** Данный вариант использования позволяет актеру выбрать источник СП и получить его отсчеты. В роли источника может выступать как файл, так и **«система генерации СП».** Для этих целей на диаграмме представлены варианты: **«загрузить СП из файла»** и **«получить процесс из автоматизированной системы генерации СП».**

- **«Подготовить буфер принимаемого сигнала».** Позволяет создать буфер для хранения максимально возможного количества измерений (этот параметр определяется исследователем), сгенерировать поток событий. Функции генерации потока событий определяются в связанном отношении включения варианте использования – **«сгенерировать поток событий»**. При генерации используются параметры, определенные при настройке приемника в варианте использования **«определить параметры потока событий»**.

При подготовке системы к приему аналогового сигнала необходимо определиться с тем, как принятый сигнал будет обрабатываться. Возможны два варианта: передача в файл для хранения или в **«подсистему аппроксимативного анализа»**. Для реализации этих возможностей в диаграмму включен вариант использования **«передать ВР для дальнейшей обработки»**.

- **«Передать ВР для дальнейшей обработки».** Является обобщением **«сохранить ВР в файл»** и **«передать ВР в подсистему аппроксимативного анализа»**.

- **«Сохранить ВР в файл».** Сохраняет информацию о введенном сигнале из буфера в файл определенного формата (см. приложение П.8).

- **«Передать ВР в подсистему аппроксимативного анализа».** Реализованы функции передачи отсчетов ВР в подсистему **«аппроксимативного анализа»** для определения их характеристик и дальнейшего анализа.

По окончании подготовительного этапа, функции которого реализованы в приведенных выше вариантах использования, осуществляется прием/передача сигнала. Эти функции реализованы в вариантах: **«вывести аналоговый сигнал»** и **«ввести аналоговый сигнал»**.

- **«Вывести аналоговый сигнал».** Данный вариант использования позволяет **«экзаменатору»** произвести имитацию объекта исследования путем последовательного изменения значения электрической величины на аналоговом выходе МФУ NVL08. Значения изменяются в соответствии с отсчетами СП.

- **«Ввести аналоговый сигнал».** Вариант использования позволяет опросить измерительно-вычислительный канал и занести мгновенно измеренные значения сигнала в буфер для дальнейшей обработки или сохранения в файл определенного формата (см. приложение П.8).

После приема сигнала в варианте использования **«определить числовые характеристики»** определяются параметры реального и идеального потоков событий.

Числовые характеристики разделены на две части: **«вероятностные характеристики СП»**, **«взаимные числовые характеристики реального и идеального потоков событий»**. Которые определяются в вариантах: **«вычислить вероятностные характеристики»** и **«вычислить взаимные числовые характеристики реального и идеального потоков событий»**.

- **«Вычислить вероятностные характеристики».** Вариант использования позволяет определить числовые характеристики СП, такие как математическое ожидание (МО), дисперсию (Dx), коэффициент асимметрии (Ka) и коэффициент эксцесса (Kε).

- **«Вычислить взаимные числовые характеристики реального и идеального потоков событий».** С помощью этого варианта использования имеется возможность определения максимальной разности (Δ) между временными метками реального и идеального СП, а также их среднеквадратического отклонения (СКО).

7.3.2. Диаграмма классов (class diagram)

Диаграмма классов разработанной системы приведена на рис. 7.6.

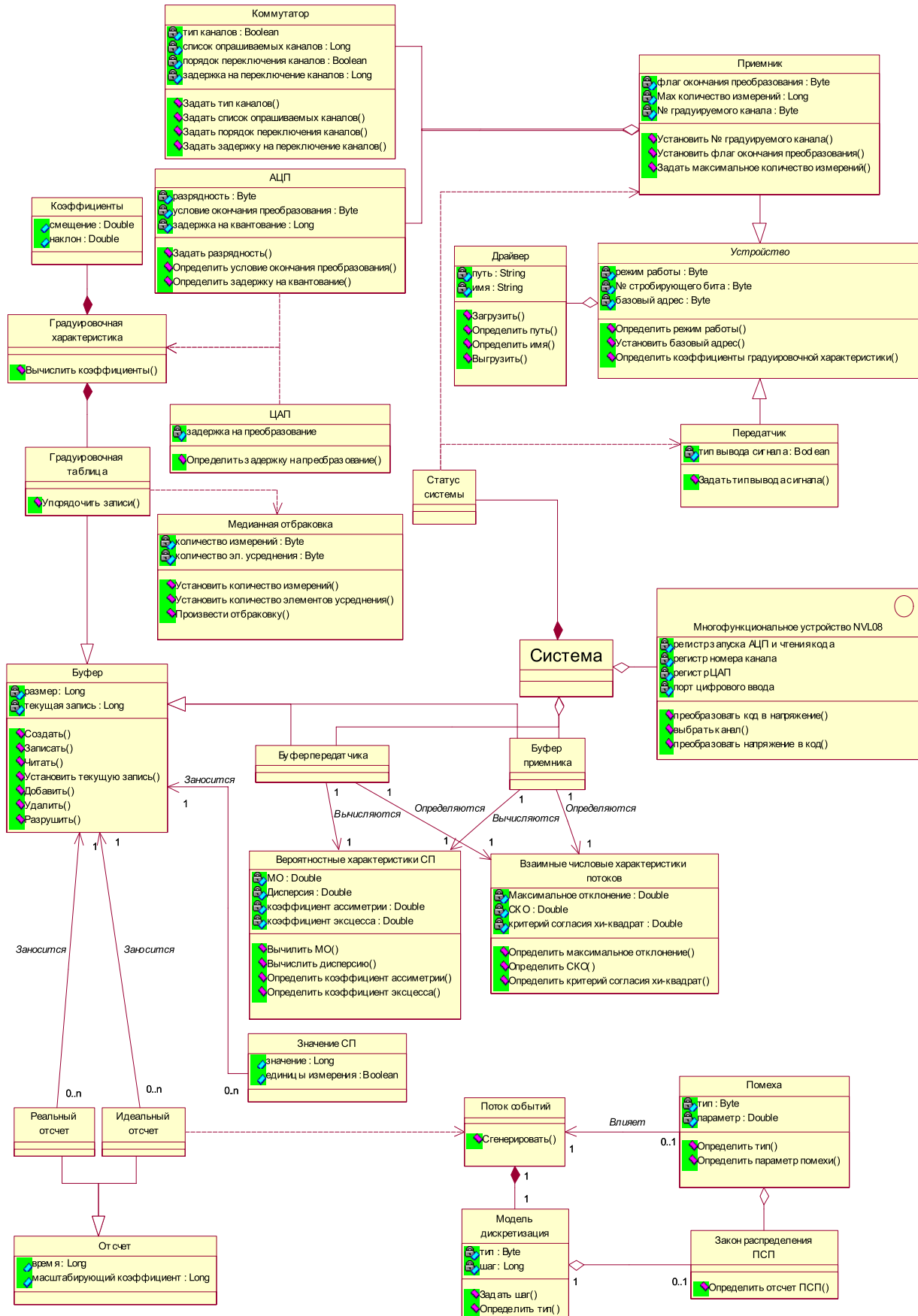


Рисунок 7.6. Диаграмма классов АС ввода/вывода аналогового сигнала

На построенной диаграмме классов, **подсистемы ввода/вывода аналогового сигнала**, были предложены следующие базовые и производные классы:

- «**Статус системы**» – класс, определяющий состояние системы.
- «**Драйвер**»- класс, используемый при определении размещения драйвера.
- «**Устройство**» - класс-шаблон, используемый для определения общих настроек приемника и передатчика. Данный класс является предком для классов: «**Приемник**» и «**Передатчик**», – и связан с ними отношением обобщения.
- «**Приемник**» - класс, используемый при определении состояния приемника.
- «**Коммутатор**» – класс, используемый при определении параметров коммутатора приемника.
- «**АЦП**» - класс, позволяющий определить параметры аналого-цифрового преобразования.
- «**Передатчик**» – класс, используемый при определении состояния передатчика.
- «**Градуировочная характеристика**» – класс, используемый при определении градуировочной характеристики устройства.
- «**Коэффициенты**» – класс, используемый для хранения и определения коэффициентов градуировочной характеристики.
- «**Градуировочная таблица**» – класс, используемый для хранения результатов градуировки.
- «**Медианная отбраковка**» – класс, позволяющий осуществлять медианную отбраковку.
- «**Буфер**» – класс-предок всех буферов системы, позволяющий осуществлять хранение отсчетов СП, в частности его потомками являются: «**Буфер приемника**» и «**Буфер передатчика**». Также этот класс используется для хранения результатов градуировки, поэтому его классом-наследником является - «**Градуировочная таблица**».
- «**Значение СП**» – класс, используемый при определении значения СП.
- «**Отсчет**» – класс, используемый при определении отсчетов СП. Является предком для классов «**Реальный отсчет**» и «**Идеальный отсчет**».
- «**Реальный отсчет**» – класс, используемый при определении реального отсчета СП.
- «**Идеальный отсчет**» – класс, используемый при определении идеального отсчета СП.
- «**Буфер передатчика**» – класс, используемый при хранении информации об СП передатчика и результатов вывода сигнала.
- «**Буфер приемника**» – класс, используемый при хранении СП приемника и результатов ввода сигнала.
- «**Поток событий**» – класс, позволяющий определить временные метки потока событий.
- «**Дискретизация**» – класс, используемый при определении отсчета при заданной модели дискретизации.
- «**Помеха**» – класс, используемый при определении отсчета потока событий с учетом помехи.
- «**Закон распределения ПСП**» – класс, используемый при определении отсчетов ПСП с заданным законом распределения, определенный методом обратной функции.

- «**Вероятностные характеристики СП**» – класс, используемый при определении вероятностных характеристик СП.
- «**Взаимные числовые характеристики потоков**» – класс, используемый при определении взаимных числовых характеристик реального и идеального потоков событий.

Помимо классов на диаграмме приведен интерфейс «**многофункциональное устройство NVL08**», который позволяет определить совокупность операций, обеспечивающих необходимый набор сервисов и функций, предоставляемых МФУ NVL08 при вводе и выводе аналогового сигнала. Этот интерфейс отображает аппаратную часть системы и содержит описание реализуемых операций без указания особенностей их реализации.

7.4. Взаимодействие приемника с передатчиком

7.4.1. Схемы подключения

Как уже отмечалось ранее, возможны два варианта взаимодействия измерительно-вычислительных комплексов:

1) Моделирование измерительно-вычислительного канала на базе одной ЭВМ.

В данной схеме ввод и вывод сигнала осуществляется на одном вычислительном комплексе (см. рис. 7.7). Поэтому, на систему накладываются дополнительные ограничения, в частности, она должна осуществлять параллельный ввод и вывод аналогового сигнала в режиме реального времени.

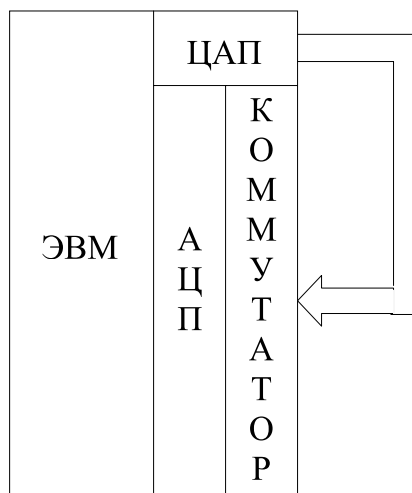


Рисунок 7.7. Схема подключения системы, работающей на базе одной ЭВМ

2) Ввод сигналов от различных источников.

В роли источника сигнала может выступать объект исследования с измерительным преобразователем (датчиком), что позволяет производить натурные эксперименты для определения модели объекта. Если система используется в учебных целях, объект исследования имитируется в ИВК, напряжение на выходе ЦАП которого устанавливается в соответствии со значениями отсчетов СП. Схема подключения изображена на рис. 7.8.

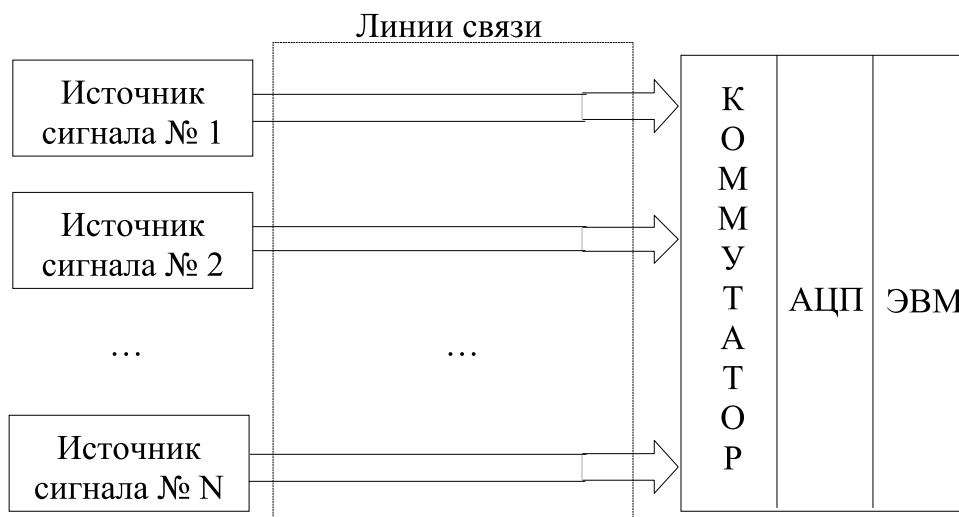


Рисунок 7.8. Схема подключения системы, работающей на базе двух ЭВМ

Максимально возможное количество опрашиваемых по данной схеме каналов составляет: 8 – дифференциальных или 16 – одиночных (с общей землей).

7.4.2. Режимы взаимодействия приемника с передатчиком

При вводе/выводе быстро меняющегося аналогового сигнала возникает необходимость информирования приемника о начале передачи данных. В системе предусмотрено несколько схем связи приемника с передатчиком, каждая из которых описана ниже:

1) Без связи передатчика с приемником.

Приемник начинает прием поступающей на его аналоговый вход информации по команде пользователя и не ждет каких-либо сигналов подтверждения. Структура схемы соединения систем представлена на рис. 7.9.



Рисунок 7.9. Схема соединения АС в 1-ом режиме

Достоинства: Легкость организации обмена по данной схеме, нет необходимости вводить дополнительные линии связи.

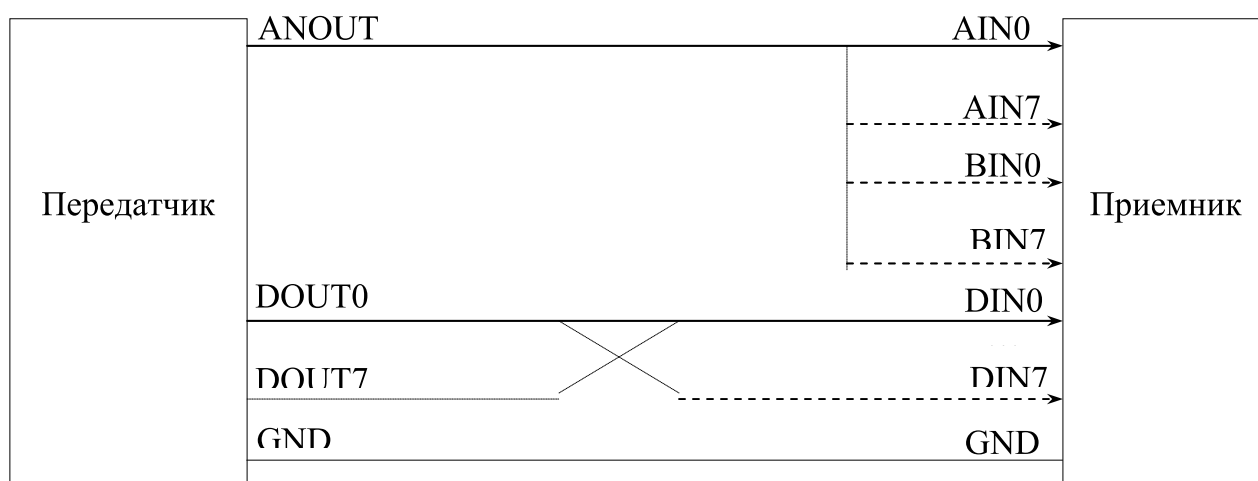
Недостатки: В связи с необходимостью синхронизации пуска приемника и передатчика данная схема может применяться лишь при медленно меняющихся сигналах, для которых задержка начала измерения сигнала не является критичной.

2) С подтверждением передачи информации.

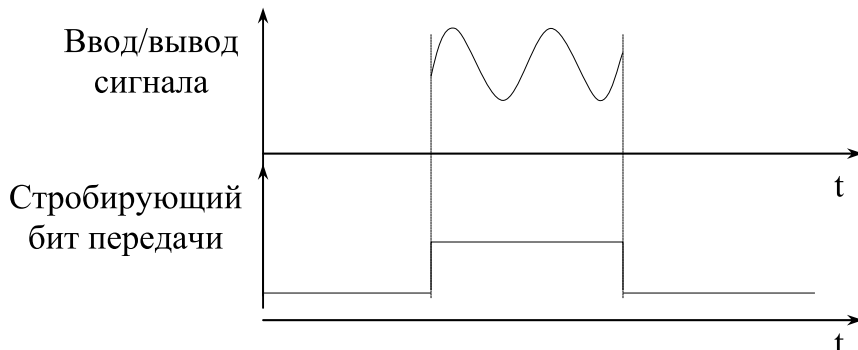
В случае подтверждения передачи информации может потребоваться использование сигналов временной синхронизации.

В данном случае приемник информации, прежде чем начать измерение входного сигнала, дожидается «Подтверждения передачи информации» через линию цифрового выхода (стробирующий бит), выбираемую в настройках устройства.

Структурная схема и временная диаграмма работы системы в данном режиме изображена на рис. 7.10 (а, б).



а) Схема соединения АС в 2-ом режиме



б) Временная диаграмма работы схемы

Рисунок 7.10

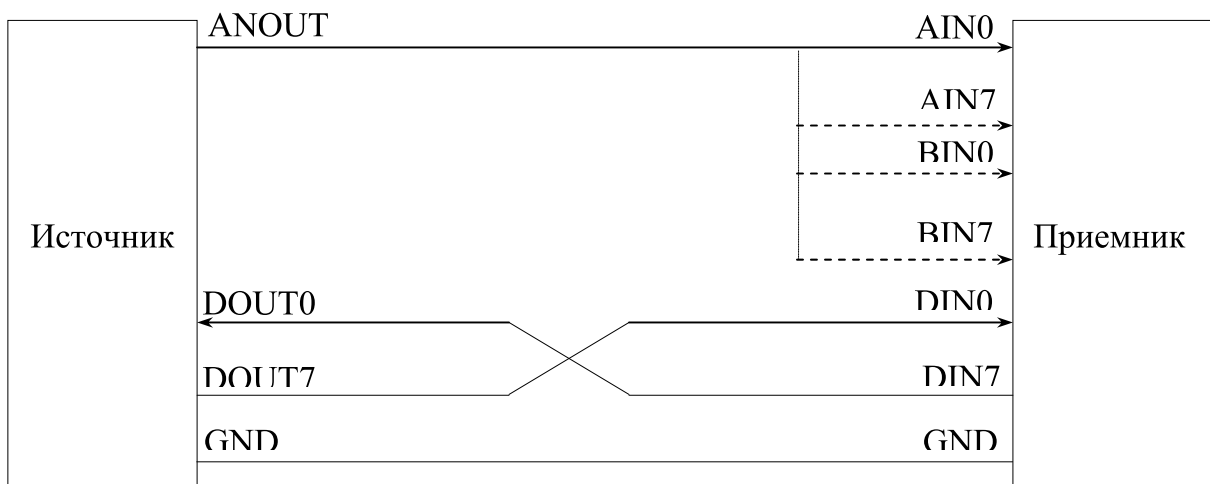
Достоинства: В результате синхронизации приема сигнала с началом передачи, данная схема может работать с достаточно большим диапазоном сигналов, так как время начала передачи сигнала определяется автоматически.

Недостатки: Необходимо вводить дополнительные стробирующие линии подтверждения передачи аналогового сигнала.

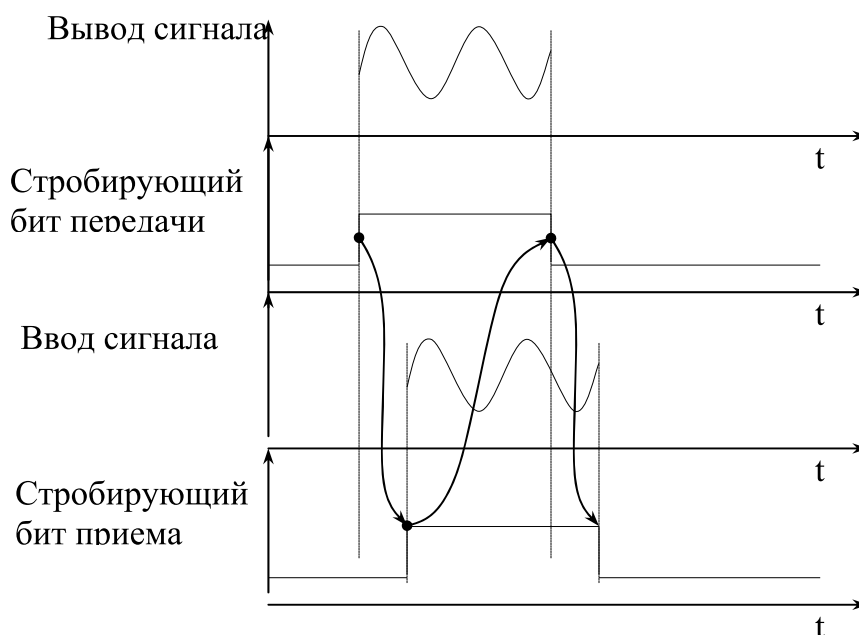
3) С подтверждением передачи и приема информации.

Данная схема позволяет согласовать прием сигнала с началом передачи сигналов от нескольких источников. Инициатором передачи в этом случае является приемник, по команде пользователя он начинает опрашивать флаги передачи выделенных каналов. В случае готовности всех каналов посылает сигнал готовности приема сиг-

нала. После этого все передатчики, получившие сигнал готовности приема, начинают вывод сигнала.



а) Схема соединения АС в 3-ем режиме



б) Временная диаграмма работы схемы

Рисунок 7.11

Достоинства: Данная система обеспечивает возможность синхронного ввода сигнала от нескольких источников.

Недостатки: Необходимо вводить большое количество стробирующих линий подтверждения передачи и приема сигнала.

7.5. Многофункциональное устройство NVL08

Многофункциональное устройство NVL08, выполненное в стандарте интерфейса ISA/EISA, является аппаратной частью автоматизированной системы и изображено на рис.7.12.

Программная часть описываемой системы позволяет одновременно вводить и выводить сигнал с объекта исследования. Для этого выходы устройств NVL08 соединяются специальным образом.

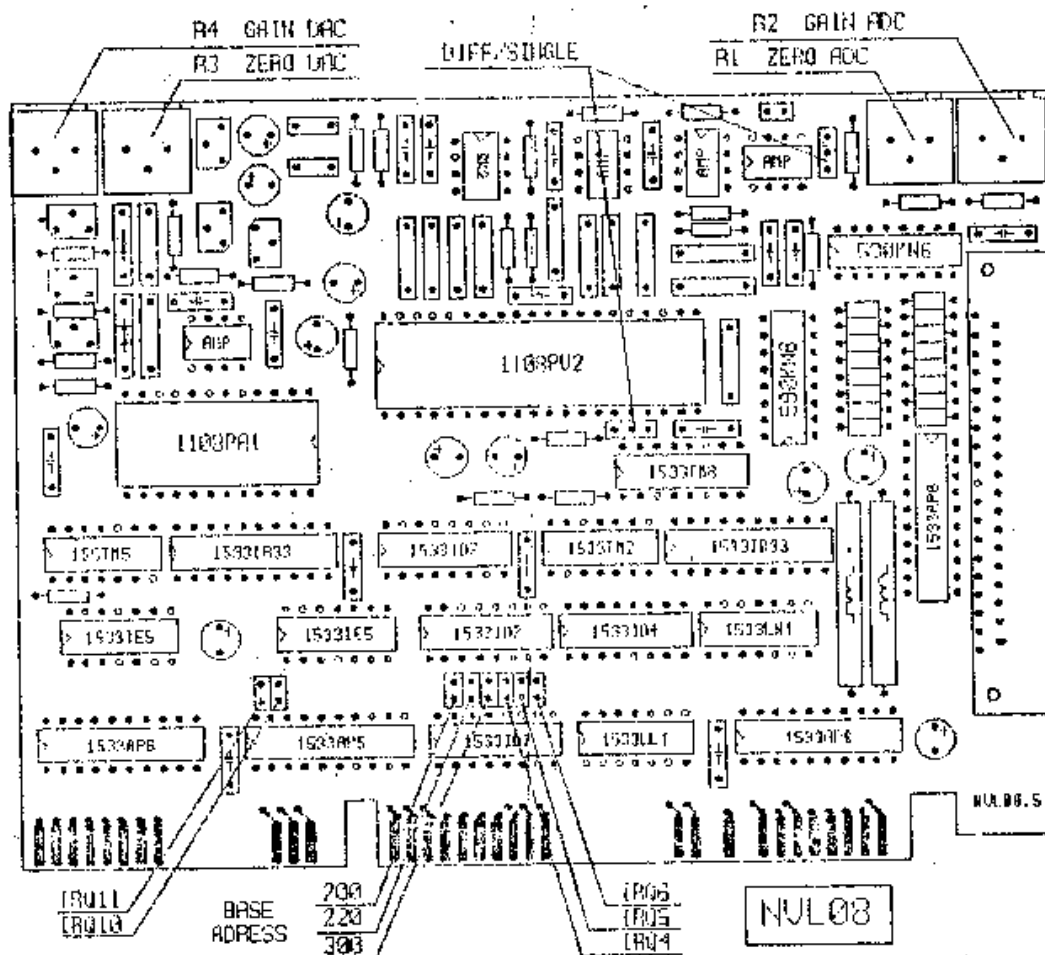


Рисунок 7.12. Многофункциональное устройство NVL08 интерфейса ISA/EISA

Многофункциональное устройство NVL08 предназначено для работы в составе ПЭВМ типа IBM PC AT. Это устройство обеспечивает преобразование внешних аналоговых и цифровых сигналов в форматы данных ПЭВМ и обратное преобразование данных формата ПЭВМ во внешние аналоговые и цифровые сигналы [41].

7.5.1. Функции устройства

Устройство NVL08 выполняет следующие функции:

- аналого-цифровое преобразование;
- цифро-аналоговое преобразование;
- цифровой ввод/вывод.

Аналоговый ввод:	
Разрядность	12 бит
Время преобразования АЦП	4 мкс
Количество каналов	8-дифференциальных 16-одиначных (с общей «землей»)
Диапазон входных напряжений (полная шкала)	$\pm 5V$
Предельное входное напряжение	$\pm 12V$
Время установления УВХ	не более 3 мкс
Производительность устройства в составе IBM PC AT 20 МГц	100000 выборок/с.
Режим запуска	программный
Метод приема информации	программный, по ожиданию готовности, по прерыванию
Аналоговый вывод:	
Разрядность	12 бит
Время установления	≤ 5 мкс.
Количество каналов	1
Диапазон выходного напряжения	$\pm 5.12V$
Линейность	$\pm 0.1\%$
Цифровой ввод:	
Количество входных линий	8 (уровень ТТЛ)
Цифровой вывод:	
Количество выходных линий	8 (уровень ТТЛ) с повышенной нагрузочной способностью (до 30 мА на линию)

7.5.2. Описание структурной схемы устройства

Функционально устройство NVL08 разделяется на следующие логические части:

1. **Блок сопряжения с шиной IBM PC AT** - обеспечивает согласование шины данных IBM PC AT и внутренней шины данных устройства NVL08; дешифрирует адресные комбинации для фиксации адресов логических частей устройства NVL08 в адресном пространстве ввода/вывода IBM PC AT; формирует сигналы запросов на прерывание по линии IRQ на системной шине IBM PC AT.

2. **Блок аналогового ввода** - обеспечивает согласование внешнего измеряемого напряжения со входным сигналом АЦП, преобразование этого сигнала в цифровой код и передачу кода на шину данных IBM PC AT. Этот блок состоит из аналогового коммутатора, буферного дифференциального усилителя, схемы выборки-

хранения, интегрального АЦП, источника опорного напряжения и схемы синхронизации.

3. **Блок аналогового вывода** - обеспечивает преобразование цифровых кодов, передаваемых по шине данных IBM PC AT в аналоговое напряжение. Он состоит из буферного регистра входного кода, интегрального ЦАП, преобразователя ток-напряжение и источника опорного напряжения.

4. **Блок цифрового ввода/вывода** - обеспечивает прием на шину данных IBM PC AT и буферизированную передачу цифровых сигналов разрядностью до 8 бит.

7.5.3. Описание контактов разъема устройства NVL08

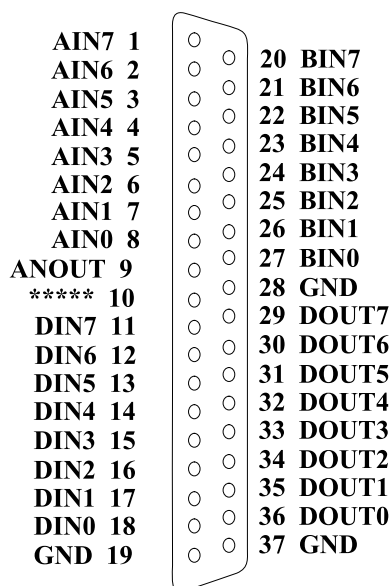


Рисунок 7.13. Распайка разъема

Назначение выходов разъема:

- AIN0..7 и BIN0..7 - входные аналоговые сигналы при дифференциальном включении;
- BIN0..7 – соответствуют сигналам AIN8..15 при одиночном включении;
- ANOUT – выход ЦАПа;
- DIN0..7 – цифровые входы;
- DOUT0..7 – цифровые выходы;
- GND – общий провод.

7.5.4. Программирование устройства NVL08

Программно, в адресном пространстве IBM PC AT, устройство NVL08 представляется в виде набора адресов регистров. Абсолютный адрес каждого регистра NVL08 складывается из двух составляющих - базового адреса и адреса смещения. С помощью перемычек на плате NVL08 базовый адрес может принимать следующие значения: 200h, 220h, 300h.

Это позволяет устанавливать NVL08 на любое «свободное» адресное место в IBM PC AT или же устанавливать до трех устройств в одну IBM PC AT. Адреса смещений постоянны (см. рис. 7.12).

7.5.5. Программирование цифрового ввода/вывода

Прием байта из буфера цифрового порта (выводы 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 внешнего разъёма устройства NVL08) осуществляется операцией чтения байта по адресу $BASE+06h$, где $BASE$ - базовый адрес (устанавливается при поставке $300h$), $06h$ - смещение. Таким образом, адрес регистра порта цифрового ввода равен $300h+06h = 306h$. Запись байта в буфер порта цифрового вывода (выводы 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 внешнего разъёма устройства NVL08) осуществляется операцией записи байта по адресу $BASE+06h$ (Информация в этом буфере будет храниться до следующей операции записи по указанному адресу).

7.5.6. Программирование аналогового выхода

Выходное напряжение ЦАП устройства NVL08 при настройке устанавливается таким образом, что максимальный размах напряжений равен ± 5.12 В, причем минимальному напряжению -5.12 В соответствует код $0000h$, записанный по адресу $BASE+04h$ (вывод 9 внешнего разъёма устройства NVL08), а напряжению $+5.12$ В соответствует код $0FFFh$, записанный по тому же адресу. Код слова ЦАП записывается в буферные регистры, и хранится там до следующей операции вывода.

7.5.7. Программирование АЦП

К программированию АЦП относятся следующие операции:

- управление входным коммутатором;
- запуск АЦП;
- ожидание готовности после цикла преобразования АЦП;
- считывание кода АЦП.

Программное управление входным коммутатором осуществляется путем записи в регистр номера канала по адресу $BASE+02h$ байта с кодом номера канала, напряжение на входе которого надо измерить.

В устройстве NVL08 предусмотрен программный режим запуска АЦП. Для этого необходимо записать любое число по адресу $BASE+00h$.

Действительное значение кода АЦП, соответствующее измеряемому напряжению, формируется в буферном регистре с адресом $BASE+00h$ только после выполнения определённой последовательности действий:

- выбор канала;
- запуск АЦП;
- фиксация момента окончания цикла преобразования АЦП.

Окончание цикла преобразования АЦП может быть зафиксировано тремя способами:

- программно - путем опроса бита готовности;
- программно - путем организации задержки на время преобразования после команды запуска;
- по прерыванию - после окончания цикла преобразования АЦП устройство NVL08 формирует прерывание на одной из следующих линий: $IRQ4$, $IRQ5$, $IRQ6$, $IRQ10$ или $IRQ11$. Номер прерывания выбирается с помощью переключки на плате (см. рис. 7.12). Запрос на прерывание автоматически сбрасывается при чтении регистра с адресом $BASE+00h$.

Формат слова, получаемого при чтении регистра с адресом BASE+00h после окончания цикла преобразования, приведен в представленной ниже таблице:

Формат кода АЦП

Таблица 7.2

Разряды слова	Содержимое
0..11	код АЦП
12	сигнал готовности (сразу после запуска равен лог. «1», а после окончания цикла преобразования этот разряд устанавливается в состояние лог. «0»).
13	сигнал перегрузки по входу (если разряд равен лог. «1», то это означает, что входной сигнал во время преобразования превышал входной диапазон АЦП).
14..15	не используются и их необходимо принудительно обнулять после приема кода АЦП.

7.5.8. Калибровка устройства

Устройство имеет четыре органа настройки:

- смещение АЦП;
- чувствительность АЦП;
- смещение ЦАП;
- размах выходного сигнала ЦАП.

Процедуру калибровки удобно производить, используя тестовую заглушку, распаянную по ниже прилагаемому описанию.

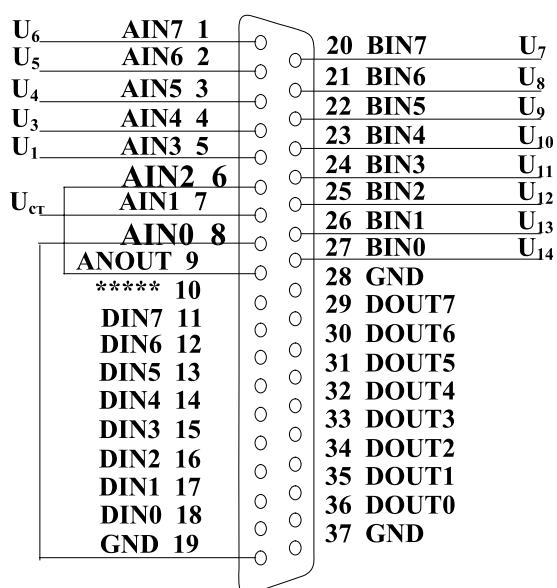


Рисунок 7.14. Схема распайки заглушки для калибровки

В тестовой заглушке нулевой канал АЦП замкнут на общий провод, на канал 1 подается напряжение с внешнего источника (стабилитрон с заранее известным $U_{ст}$), на канал 2 подается выход ЦАП, а на остальные каналы - напряжения от внешнего источника (желательно от батарейки) с использованием делителей. Следует отметить, что после включения питания необходимо выждать около 15 мин для вхождения в режим. Сначала настраивают смещение АЦП резистором R1 по каналу, замкнутому на общий провод. Затем подстройкой резистора R2 производят калибровку по каналу с известным напряжением. Теперь можно приступить к настройке ЦАП, используя настроенный АЦП. Резистором R3 устанавливают нулевое напряжение на выходе ЦАП (чет-

вертое число в строке настройки программы T85AUTO.EXE), резистором R4 устанавливают размах выходного напряжения ЦАП $\pm 5.12V$.

Расположение регулировочных резисторов указано на рис. 7.14.

Программа T85AUTO.EXE, поставляемая в комплекте с многофункциональным устройством NVL08, используется при настройке, а также общей проверке. С её помощью осуществляется общее тестирование шины данных (для чего входы и выходы цифровых портов соединяются побитно на тестовой заглушке), и проверяется функционирование АЦП.

Результаты измерений сведены на экране в 5 колонок:

1. Служит для подстройки нуля АЦП резистором R1; используется нулевой канал.

2. Служит для калибровки АЦП резистором R2 по известному опорному сигналу; используется 1 канал.

3. 3..5. Служат для настройки ЦАП; выход ЦАП на тестовой заглушке должен быть соединен со вторым каналом АЦП. При правильно настроенном ЦАП значение в 3-й колонке должно составлять -3.84, 5-й – +3.84, в 4-й должен быть при этом 0 ± 0.01 V.

4. Настройка ЦАП производится по показаниям 3 и 5 колонок резисторами R3, R4 методом последовательного приближения.

7.5.9. Установка перемычек на устройстве NVL08

С помощью перемычек на устройстве NVL08 производятся следующие переключения:



- Установка базового адреса. (При поставке 300h.)
- Установка номера прерывания, формируемого после окончания цикла преобразования АЦП. (При поставке IRQ5.)
- Установка типа входных линий. Переключаются две перемычки одновременно! (При поставке - дифференциальный вход.)

Расположение перемычек указано на рис. 7.12.

7.6. Подготовка измерительно-вычислительного канала

7.6.1. Программная реализация

Моделирование и передача сигналов через аналоговый канал связи осуществляется с помощью подсистемы ввода-вывода аналогового сигнала (экранная форма приведена на рис. 7.16), которая в свою очередь состоит из двух подсистем:

-  ввода-вывода сигнала;
-  настройки параметров системы.

Каждая подсистема отвечает за выполнение закрепленных за ней функций. Для задания параметров и отображения результатов работы подсистем на основной экранной форме имеются страницы с соответствующими названиями. Выбор подсистемы осуществляется нажатием на вкладке расположенной вверху экранной формы и открытием соответствующей страницы. Для выделения сгруппированных по выполняемым функциям управляющих элементов используются панели.

Панель, в зависимости от выполняемых функций, может включать в себя:

- Заголовок. Содержит информацию о функциях системы реализованных на панели.



Рисунок 7.15. Пример заголовка панели

- Ветвь. Область панели, предназначенная для группировки связанных по смыслу элементов (см. рис. 7.17). Состоит из заголовка и элементов управления, находящихся внутри рамки ветви. Заголовок представляет собой кнопку, управляющую видимостью ветви. Имеются два состояния: «нажата», «отпущена». В нажатом состоянии ветвь видима.

Страница ввода-вывода сигнала

Страница настройки системы

Панель вывода сигнала

Панель ввода сигнала

Область элементов управления

Заголовок ветви

Рабочая область ветви

Выход из подсистемы ввода-вывода аналогового сигнала

Запуск процесса передачи сигнала

Система ввода/вывода аналогового сигнала.

Ввод-вывод сигнала

Настройки

Вывод сигнала...

Ввод сигналов...

Источник: D:\хеккос.rd

Приемник: D:\хеккос2.nrd

Панель вывода сигнала

Панель ввода сигнала

Параметры передатчика

Число отсчетов: 1000

Тип дискретизации: регулярная с интервалом 820 мкс

Вывод в цикле

Вероятностные характеристики СП

Мх: -0,00123 Ка: -0,04811

Дх: 0,99991 Кс: -0,17158

числовые характеристики потоков

Δ: 20 СКД: 0,000017609

График интервалов

Общее число отсчетов: 1000

Число отсчетов 2-ого канала: 1000

Параметры АЦП:

Разрядность: 12 бит

Окончание преобразования: без пров

Поток событий:

№ метки:	0	1	2
t (мкс):	0	822	1683
пропуск:	нет	нет	нет

Поток событий:

Шаг дискретизации: 820

Модель: равномерная

Заг. Фазгр.: Симпсона

а: 0 б: 1

дрожание:

Заг. Фазгр.: Симпсона

а: 0 б: 0,1

р-преобразование:

РП: 0,10

Заг. Фазгр.: Симпсона

а: 0 б: 1

Вероятностные характеристики СП

Мх: -0,00452 Ка: -0,05041

Дх: 0,99946 Кс: -0,15191

числовые характеристики потоков сс

Δ: 162 СКД: 0,000108941

Напряжение (V)

Время (с)

Напряжение (V)

Время (с)

Отсч	№	Время и	Время ре	Значе	Оши
0	2	0 (+0)	19 (+19)	-0,41885	
1	2	820 (+820)	838 (+838)	-0,41885	
2	2	1640 (+1640)	1649 (+1649)	-1,27406	
3	2	2460 (+2460)	2485 (+2485)	-0,82145	
4	2	3280 (+3280)	3287 (+3287)	-0,67141	
5	2	4100 (+4100)	4107 (+4107)	-0,19380	
6	2	4920 (+4920)	4930 (+4930)	-0,63641	
7	2	5740 (+5740)	5748 (+5748)	-0,18129	
8	2	6560 (+6560)	6568 (+6568)	0,59139	
9	2	7380 (+7380)	7388 (+7388)	1,07901	
10	2	8200 (+8200)	8211 (+8211)	0,19380	
11	2	9020 (+9020)	9028 (+9028)	0,46886	

Генерировать

Пуск

Выход

Рисунок 7.16. Основная экранная форма АС ввода/вывода аналогового сигнала

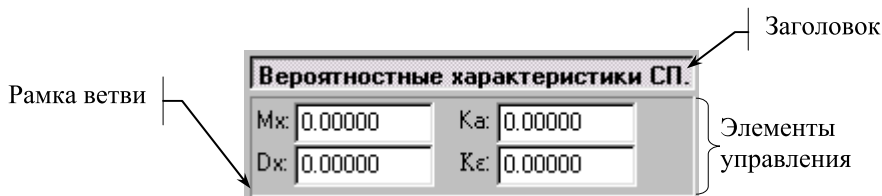


Рисунок 7.17. Пример ветви

- График и таблицу для наглядного представления данных. При работе с графиками имеется возможность их масштабирования. Для выделения нужной области графика необходимо нажать левую кнопку мыши и, удерживая её, перемещать указатель из верхнего левого в нижний правый угол. По окончании выделения области необходимо отпустить кнопку. Для отображения графика в обычном масштабе необходимо нажать левую кнопку мыши и, удерживая её, переместить указатель из нижнего правого в верхний левый угол. Для перемещения вдоль оси координат графика необходимо, нажав правую кнопку мыши, перемещать её указатель.

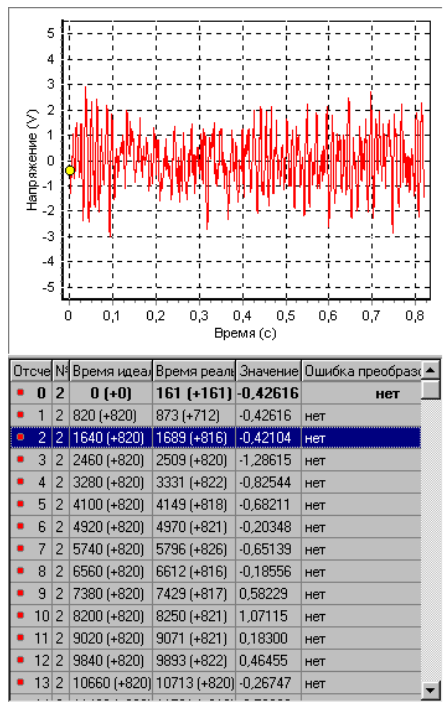




Рисунок 7.18. График и таблица приемника сигнала

В ячейке «отсчеты» таблицы для этих целей имеется поле, отображающее тип линии. Во всплывающем меню таблицы приведены номера каналов и указаны типы линий, используемых при отображении сигналов. Всплывающее меню представлено на рис. 7.19. Оно состоит из элементов, управляющих видимостью сигнала, полученного по каналу. При выделении канала в пункте меню полученный по нему сигнал отображается на графике с указанным типом линий. При снятии выделения сигнал на график не выводится. Как видно из рис. 7.19, последний элемент меню управляет видимостью всех сигналов, полученных по каналам. Следует заметить, что работа с графиками и таблицей передатчика осуществляется аналогично.



Рисунок 7.19. Всплывающее меню таблицы приемника сигнала

- Подвижная панель. Это панель, на которой не помещаются все управляющие элементы. Чтобы увидеть тот или иной элемент управления, нужно установить указатель мыши на место в панели, свободное от управляющих элементов, нажать левую кнопку мыши и, удерживая её, переместить панель управления так, чтобы на экране появился нужный элемент. Курсор при этом примет форму  или , в зависимо-

сти от направления перемещения. Измененная форма курсора говорит о том, что включен режим перемещения панели (см. рис. 7.20).

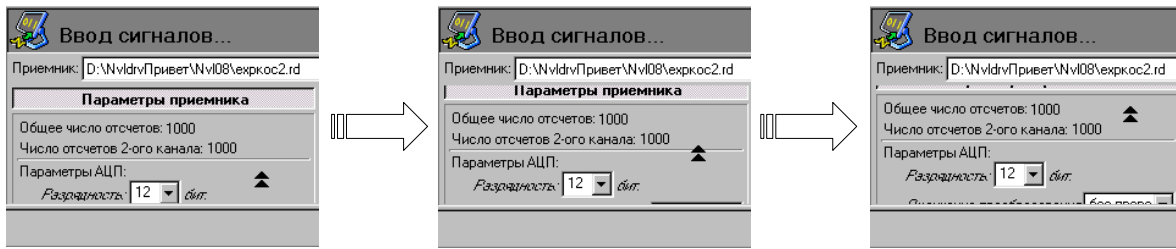


Рисунок 7.20. Демонстрация работы подвижной панели

- **Временная ось.** Это график для отображения меток времени сгенерированного потока событий. Метки временной оси отображаются в виде зеленых прямоугольников с шагом принудительной дискретизации. Отсчеты сгенерированного по-

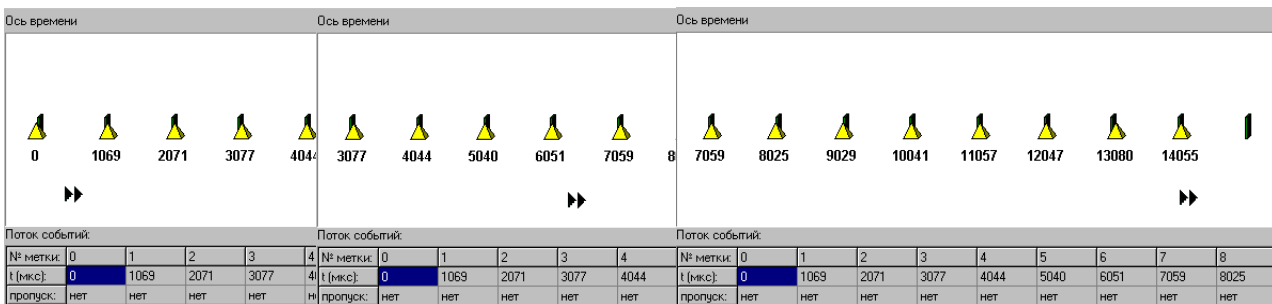




Рисунок 7.21. Демонстрация перемещения по оси времени.

тока событий изображаются в виде пирамид. Красным цветом выделяются пропущенные отсчеты, желтым—отсчеты времени, в которое было произведено измерение сигнала. Перемещение по оси времени осуществляется с помощью мыши. Для этого необходимо поместить указатель мыши над графиком, нажать левую кнопку мыши и,

удерживая её, изменить координаты временной оси, чтобы на графике появился нужный отсчет времени. Курсор при этом примет форму  или , в зависимости от направления перемещения. Измененная форма курсора говорит о том, что включен режим перемещения по временной оси. На рис. 7.21 приведен пример перемещения по оси времени.

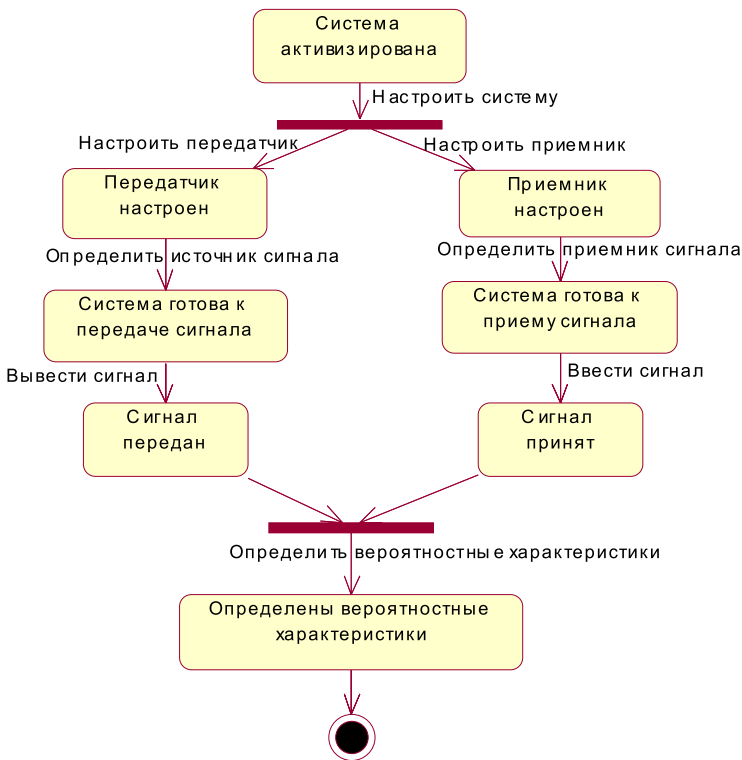



Рисунок 7.22. Диаграмма состояний системы при вводе-выводе сигнала


NVL08 измерительно-вычислительного канала. Для этого производится настройка на странице подсистемы « Настройки». Эта страница состоит из двух частей:

- Область выбора действия. Располагается в правой части страницы. Позволяет осуществлять выбор действия по настройке определенной части системы.
- Панель для настройки системы. Состоит из элементов управления, позволяющих задать параметры системы для выбранного действия. В нижней части панели располагается кнопка «Применить», которая позволяет системе использовать выбранные настройки.

7.6.2. Настройка системы

Последовательность действий, которые необходимо выполнить для настройки системы, приведена на рис. 7.24 в виде диаграммы деятельности.

При настройке системы возможно выполнение следующих действий:

-  Настройка драйвера. Позволяет определить местоположение драйвера устройства на диске заданием полного пути к нему (см. рис. 7.23).

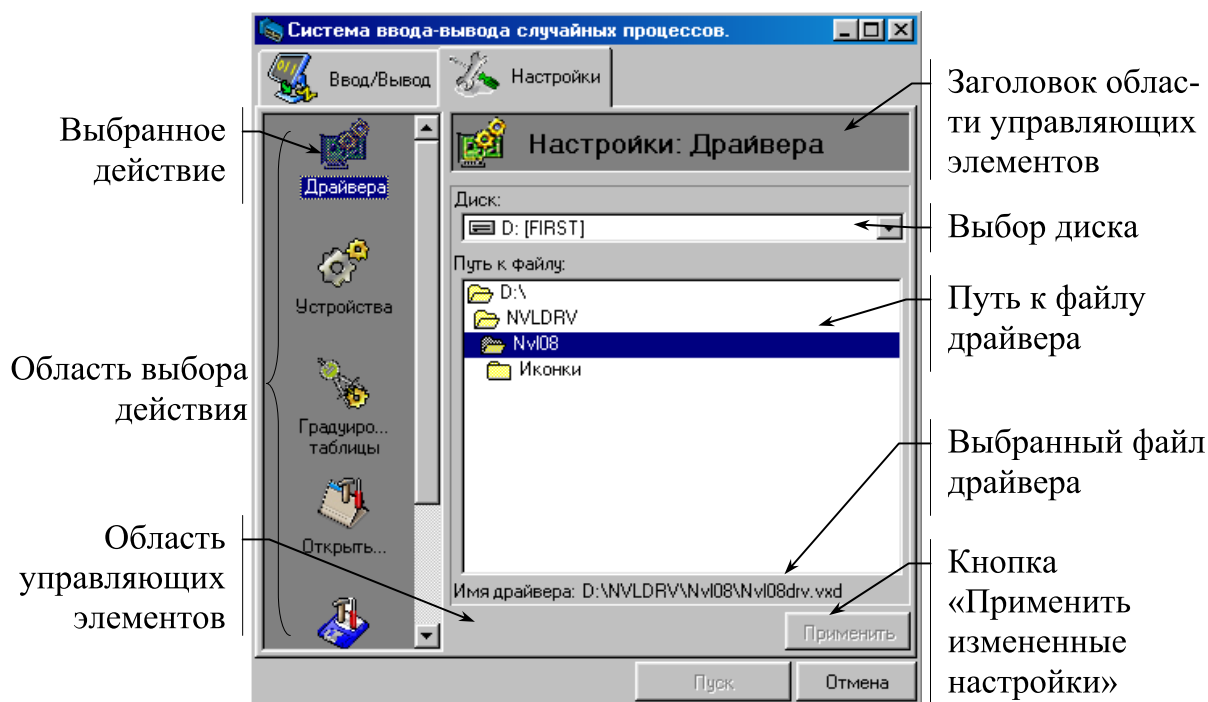





Рисунок 7.23. Панель настройки драйвера

-  Определение параметров устройства. Здесь задается режим ввода/вывода сигнала, определяется местоположение устройства в адресном пространстве ЭВМ, для чего указывается «Базовый адрес». В случае выбора режима с подтверждением передачи или подтверждением приема и передачи сигнала, задается номер стробирующего бита для ЦАП и АЦП. Параметры преобразователей располагаются на разных панелях, видимостью которых можно управлять с помощью кнопок:  ЦАП и  АЦП. При настройке АЦП задается максимально возможное количество измерений сигнала, которое система может выполнить за один сеанс приема-передачи. Указываются задержки на переключение каналов аналогового коммутатора и задержка на преобразование сигнала из аналоговой формы в код.

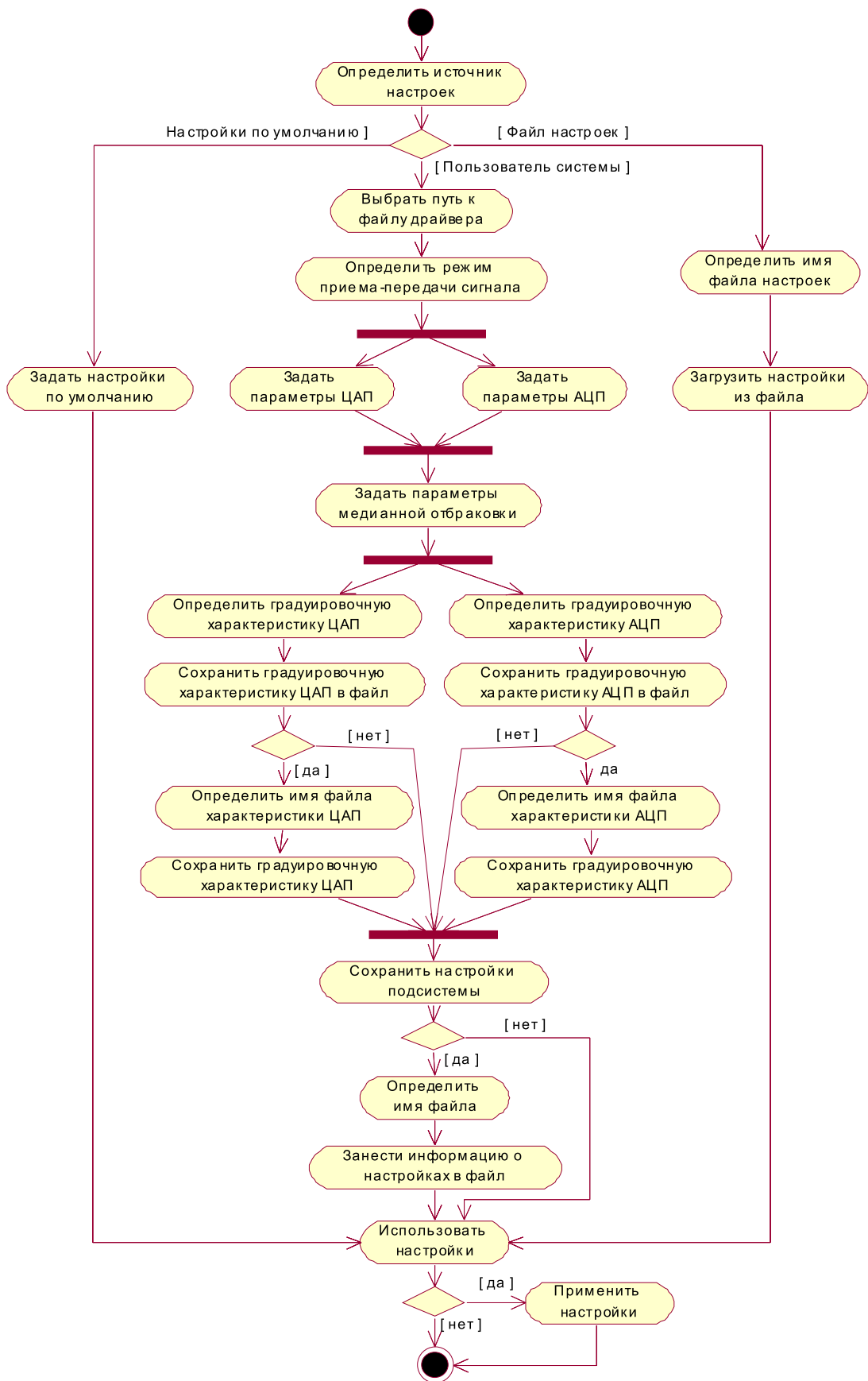


Рисунок 7.24. Диаграмма деятельности (activity diagram).
Настройка системы

Задержка на преобразование в АЦП используется при вводе аналогового сигнала без проверки окончания преобразования. Она выбирается больше заявленного в техническом описании многофункционального устройства NVL08 времени преобразования и выбирается опытным путем с тем, чтобы указанного времени было достаточно для завершения переходных процессов в устройстве. Согласно техническим характеристикам устройства это время должно составлять 4 мкс. На самом деле, для гарантированного преобразования, этот параметр должен быть больше 30 мкс. В случае ввода сигнала по прерыванию задается номер прерывания, которое возбуждается по окончании аналого-цифрового преобразования. При моделировании объекта исследования на одной ЭВМ возникает необходимость учета времени преобразования в ЦАП. Это обусловлено тем, что моменты времени цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования совпадают. Рассмотрим пример вывода сигнала с регулярной дискретизацией, равной 400 мкс, и ввода его посредством АЦП с тем же периодом. Для этого приведем временную диаграмму преобразования сигналов.

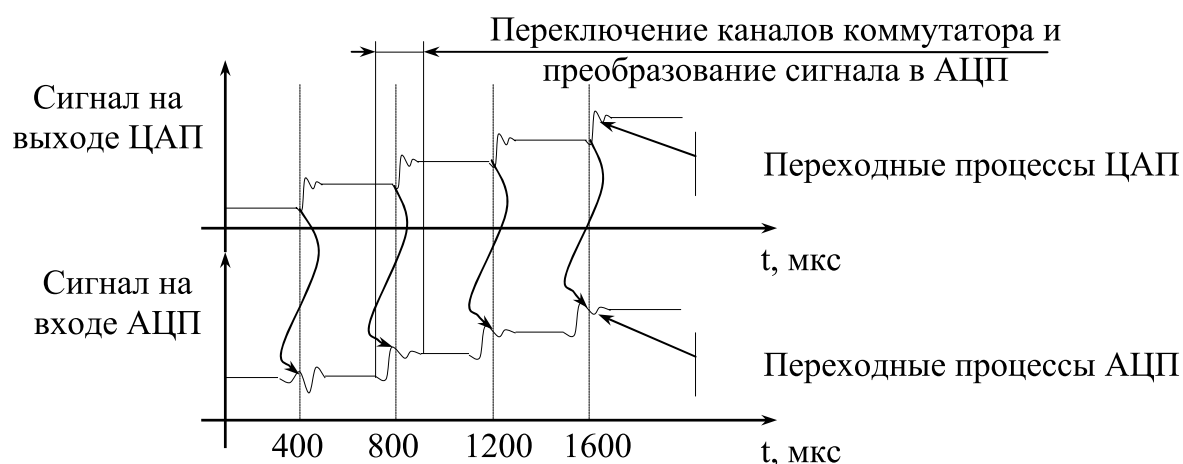


Рисунок 7.25. Временная диаграмма преобразования сигналов без учета времени преобразования ЦАП

Из временной диаграммы видно, что момент установления нового значения на ЦАП совпадает по времени с чтением сигнала на входе АЦП, что приводит к измерению неустановившегося сигнала. В результате происходит сдвиг прочитанного сигнала на шаг дискретизации. Чтобы избежать этого, вводится параметр «задержка на преобразование ЦАП», который позволяет производить измерения сигнала со сдвигом по оси времени (см. рис. 7.26).

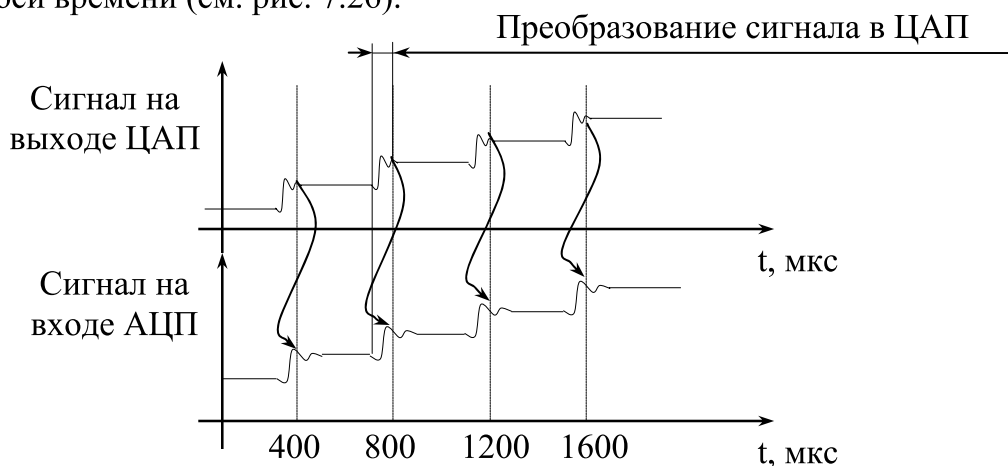


Рисунок 7.26. Временная диаграмма преобразования сигналов с учетом времени преобразования ЦАП

Этот параметр должен быть больше времени установления сигнала, указанного в технических характеристиках устройства, и меньше времени измерения значения сигнала следующего отсчета.

Ниже приведены экранные формы настройки ЦАП и АЦП (см. рис. 7.27).

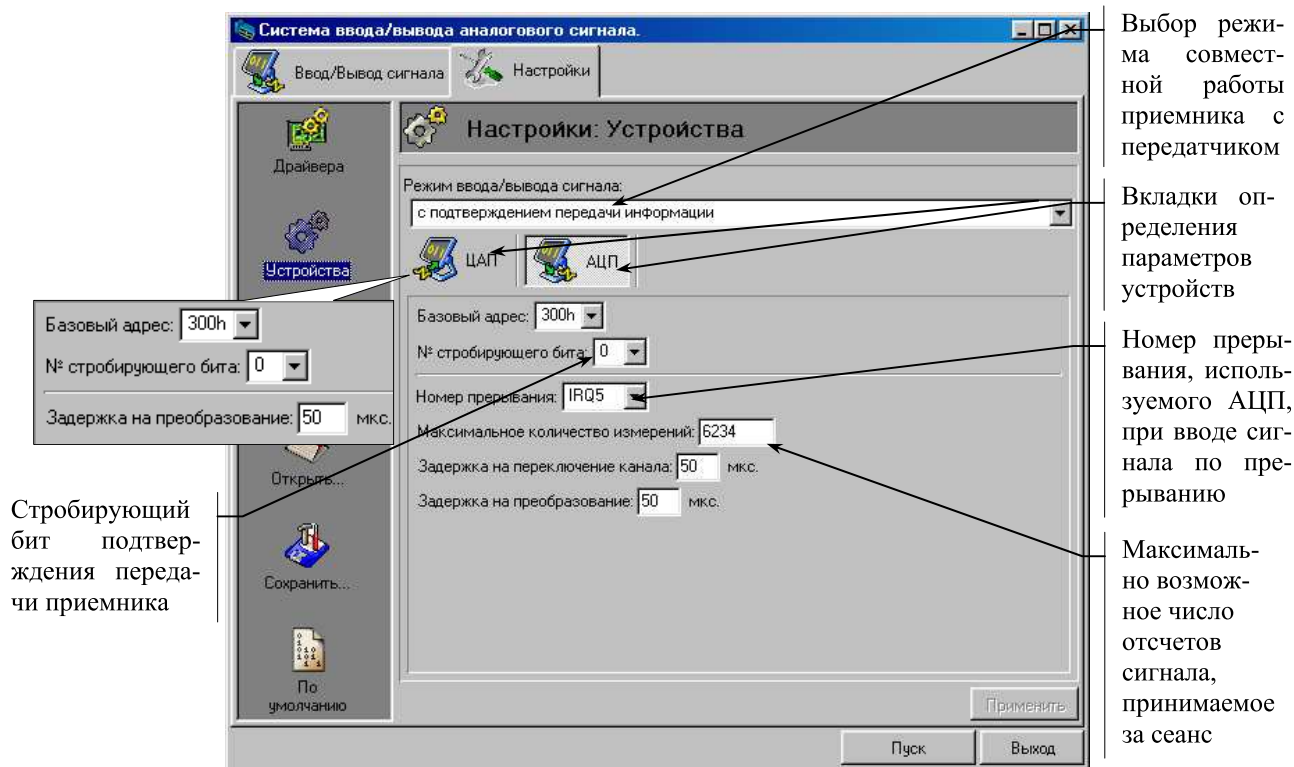



Рисунок 7.27. Панель настройки устройства

- 
 Определение градуировочной характеристики. На этой панели осуществляется определение градуировочных характеристик ЦАП и АЦП. Ввиду неидеальности аналого-цифровых преобразователей, используемых в системе, появляется необходимость «сглаживания» результатов измерений. Для этого при определении градуировочной характеристики используется медианная отбраковка. Её параметры задаются в виде общего количества измерений, производимых при определении соответствия код-напряжение, и количества элементов усреднения. Для начала градуировки необходимо задать вид измерителя напряжения. Возможны два варианта. Первый с использованием внешнего измерителя, в этом случае код выдается с помощью ЦАП, а напряжение, соответствующее этому коду, вводится пользователем по результатам измерений внешним к системе вольтметром. Второй вариант градуировки позволяет определять связь характеристик ЦАП и АЦП. Этот вариант позволяет обойтись доступными системе средствами без использования дополнительных средств измерения, что удобно в случае использования одной ЭВМ. После определения вида измерителя необходимо добавить запись в градуировочную таблицу. Это возможно путем выбора элемента во всплывающем меню или нажатием горячей клавиши «Ins». После чего задается выходной сигнал в одноименном элементе управления, и нажимается клавиша «Enter», тем самым подается команда на запуск процесса измерения сигнала и определения величины напряжения по полученному коду. Как видно из рис. 7.28, имеется возможность задавать единицы измерения. В случае, когда производится моделирование канала на одном вычислительном комплексе, нет необходимости работать с кодами, так как можно задать напряжение, и система пере-

считает его в код по имеющейся градуировочной характеристике ЦАП. Панель с элементами управления для определения градуировочных характеристик приведена на рис. 7.28.

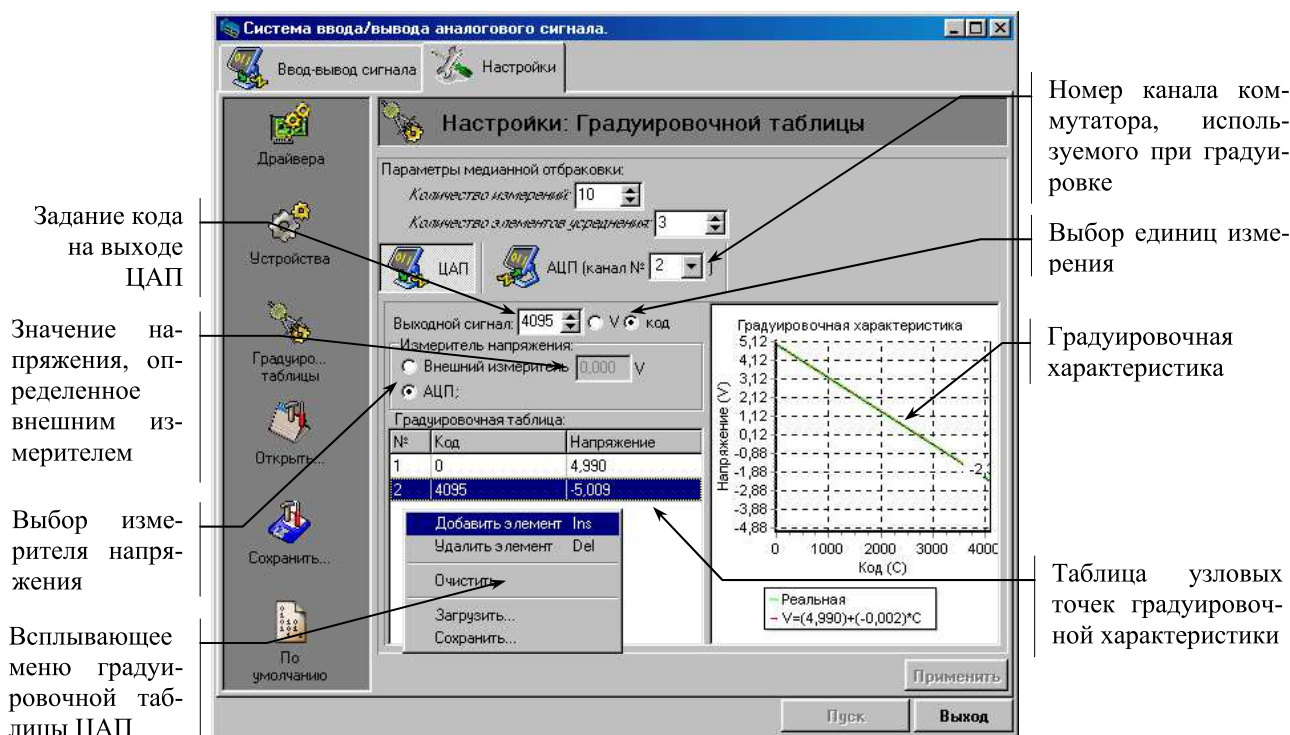


Рисунок 7.28. Панель градуировки ЦАП

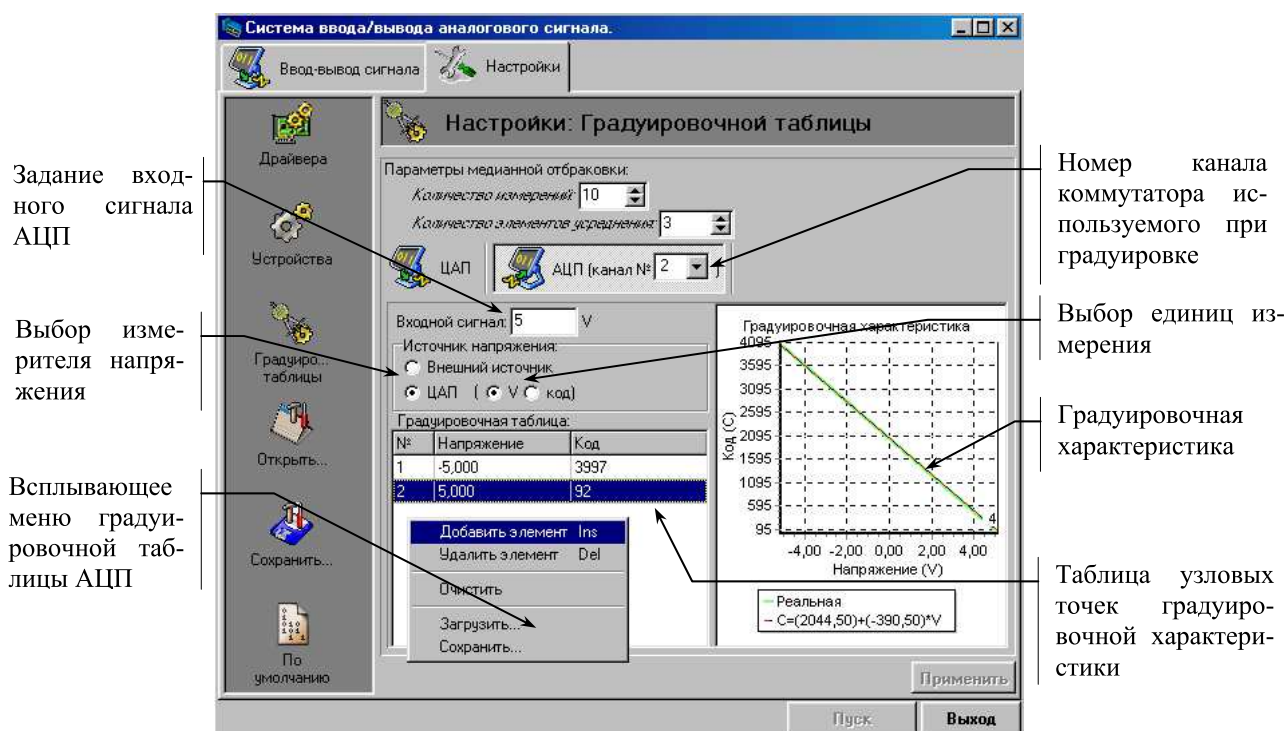





Рисунок 7.29. Панель градуировки АЦП


При измерении сигнала с помощью АЦП в системе необходимо выбрать канал приема. Для этого, при условии не пустой градуировочной таблицы, в элементе управления «АЦП (канал № XX)» задается номер канала (см. рис. 7.29). Если сиг-

нал измеряется с помощью внешнего измерителя напряжения, то необходимо ввести выходной сигнал, нажать клавишу «Enter», после чего ввести измеренное значение с помощью управляющего элемента внешнего измерителя. Результаты градуировки отображаются на графике «Градуировочная характеристика», а коэффициенты, рассчитанные методом наименьших квадратов, отображаются в его нижней части.



При работе с градуировочной таблицей доступны функции удаления записи, очистки таблицы, её сохранения и загрузки из файла. Для определения необходимой функции выбирается элемент во всплывающем меню таблицы. После окончания градуировки необходимо применить новые коэффициенты градуировочной характеристики с помощью расположенной в нижней части панели кнопки «Применить». Когда все настройки переданы в систему, кнопка не активна.

-  Сохранить настройки. По завершении определения параметров системы, можно сохранить настройки на информационных носителях вычислительного комплекса. Градуировочная характеристика сохраняется в файле настроек в виде пути к сохраненной таблице. Поэтому, перед сохранением настроек системы необходимо сохранить файл с градуировочной таблицей нужного преобразователя напряжение-код. Если необходимо использовать выбранные настройки при каждом запуске системы, то их необходимо сохранить в корневом каталоге в файле с названием «NVL08.set».
-  Открыть настройки. Предназначено для загрузки ранее сохраненных настроек.
-  Настройки по умолчанию. В случае необходимости можно воспользоваться настройками по умолчанию для использования их в системе.

7.7. Прием-передача аналогового сигнала с использованием подсистемы ввода-вывода

После того как система настроена, можно приступать к приему-передаче аналогового сигнала через имитатор аналогового канала. Для чего выбирается страница « Ввод-вывод сигнала» одноименной подсистемы. Эта подсистема позволяет, как выводить ВР в виде аналогового сигнала, так и вводить его от внешних источников напряжения. Прием сигнала может осуществляться по 8-дифференциальным или 16-одиноким каналам.

По функциональному назначению, страница разбита на две панели:

- 1)  Ввод сигнала. Предоставляет интерфейс между пользователем и подсистемой ввода аналогового сигнала (см. рис. 7.30).
- 2)  Вывод сигнала. Обеспечивает интерфейс с подсистемой вывода сигнала. Эта подсистема позволяет имитировать объект исследования путем вывода временно-го ряда с заданным видом корреляционной функции в виде аналогового сигнала (см. рис. 7.37).

7.7.1. Прием данных в аналоговой форме от объекта исследования

Прием данных осуществляется с использованием подсистемы ввода. Эта подсистема позволяет вводить аналоговый сигнал в моменты времени, определяемые потоком событий, генерируемым перед сеансом ввода. Параметры принимаемого сигнала приведены в таблице 7.3.

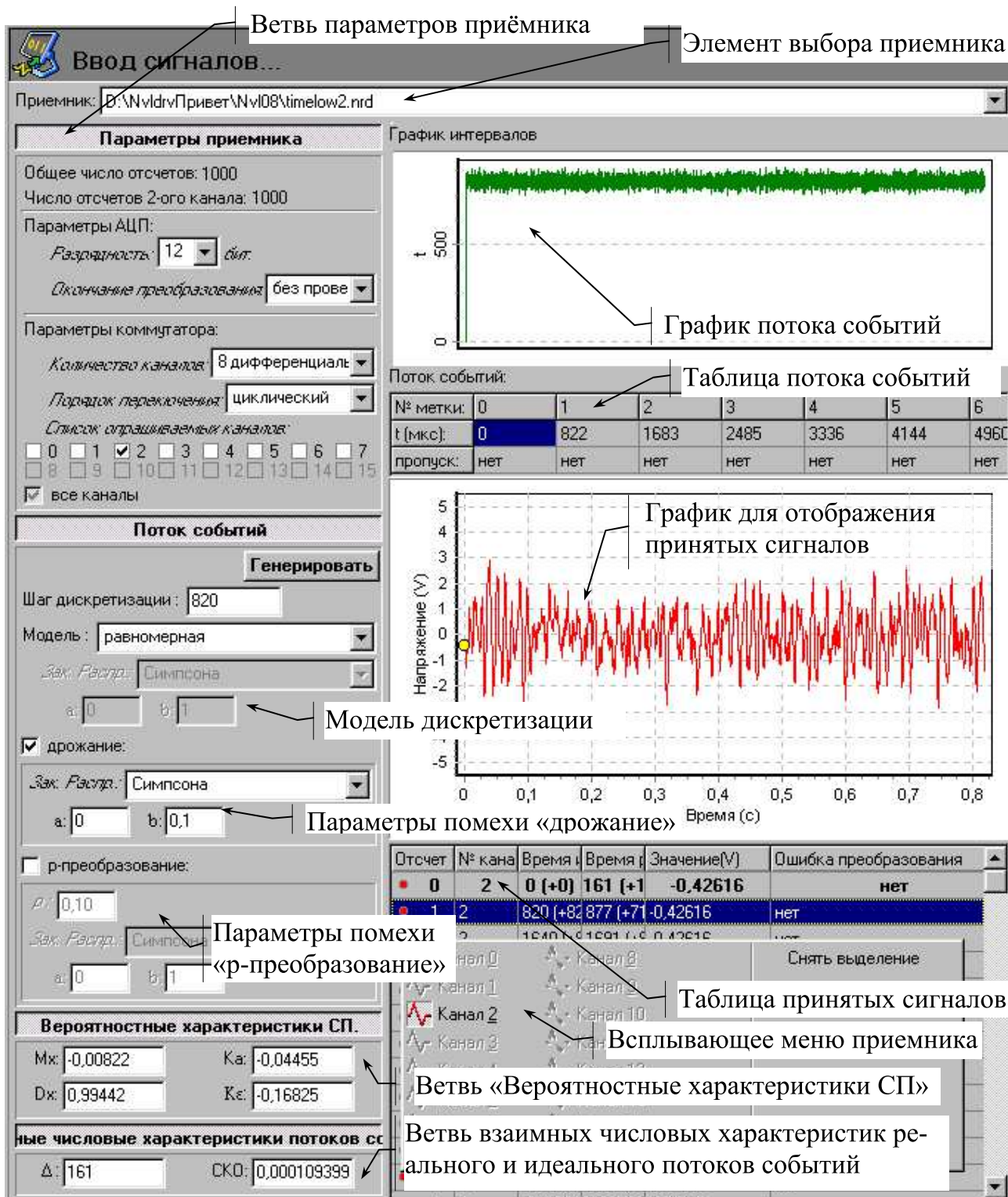


Рисунок 7.30. Панель «Ввод сигнала»

Основные характеристики принимаемого сигнала

Таблица 7.3

Параметр	Min	Типовое значение	Max
Число каналов аналогового ввода	1	1	8-дифференциальных; 16-одиочных
Сканирование каналов		программируемое	
Разрешение АЦП, бит	2	12	12
Шкала преобразования АЦП, В	-5	-	+5
Запуск АЦП		программный	
Точность привязки запуска АЦП к шкале времени, не хуже, мкс	30	50	100
Длительность непрерывного съема информации, отсчетов на канал	0	1000	10000

Панель ввода имеет шесть основных элементов (см. рис. 7.19):

- Управляющий список «Приемник». Этот элемент интерфейса предназначен для выбора приемника сигналов, полученных с помощью МФУ NVL08;
- Подвижная панель настройки приемника. На этой панели располагаются элементы управления параметрами приемника, которые сгруппированы по функциональному назначению в ветви:
 - Параметры приемника. Задаются основные параметры АЦП и коммутатора аналоговых каналов, отображается общее число произведенных измерений и число отсчетов, принятое по каналу выделенного в данный момент отсчета. Текущий отсчет – отсчет, выделенный в таблице принятых сигналов. Параметры аналого-цифрового преобразования задаются выбором из списка типа окончания преобразования «Окончание преобразования» и разрядности АЦП (список «Разрядность»). К параметрам коммутатора относятся: количество каналов, порядок их переключения и список опрашиваемых каналов. Первые два параметра задаются выбором элемента в списке, а опрашиваемые каналы задаются выделением номеров. Для выделения всех каналов имеется флажок «все каналы». В случае, когда все каналы выделены, выбор флажка приводит к отмене выделения каналов;
 - Поток событий. Здесь задаются параметры потока событий, временные метки которого определяют моменты измерения сигнала. При нажатии кнопки «Генерировать» происходит генерация потока событий с заданными значениями параметров;
 - Вероятностные характеристики СП. Производится оценка моментных характеристик СП. Здесь вычисляются оценки M_x , D_x , K_a , K_ϵ ;
 - Взаимные числовые характеристики потоков событий. Отображается результат вычисления максимального отклонения временных меток реального и идеального потоков событий, а также их СКО.
- График потока событий. График позволяет отображать следующие зависимости:
 - График интервалов;
 - Ось времени. Отображаются метки времени реального и идеального потоков событий;

- Функцию плотности ПСП, используемой в модели дискретизации;
- Функцию плотности ПСП, используемой при моделировании помехи «дрожания»;
- Функцию плотности ПСП, используемой при моделировании помехи «р-преобразования».

Задание выводимой на график зависимости осуществляется во всплывающем меню графика (см. рис. 7.31);

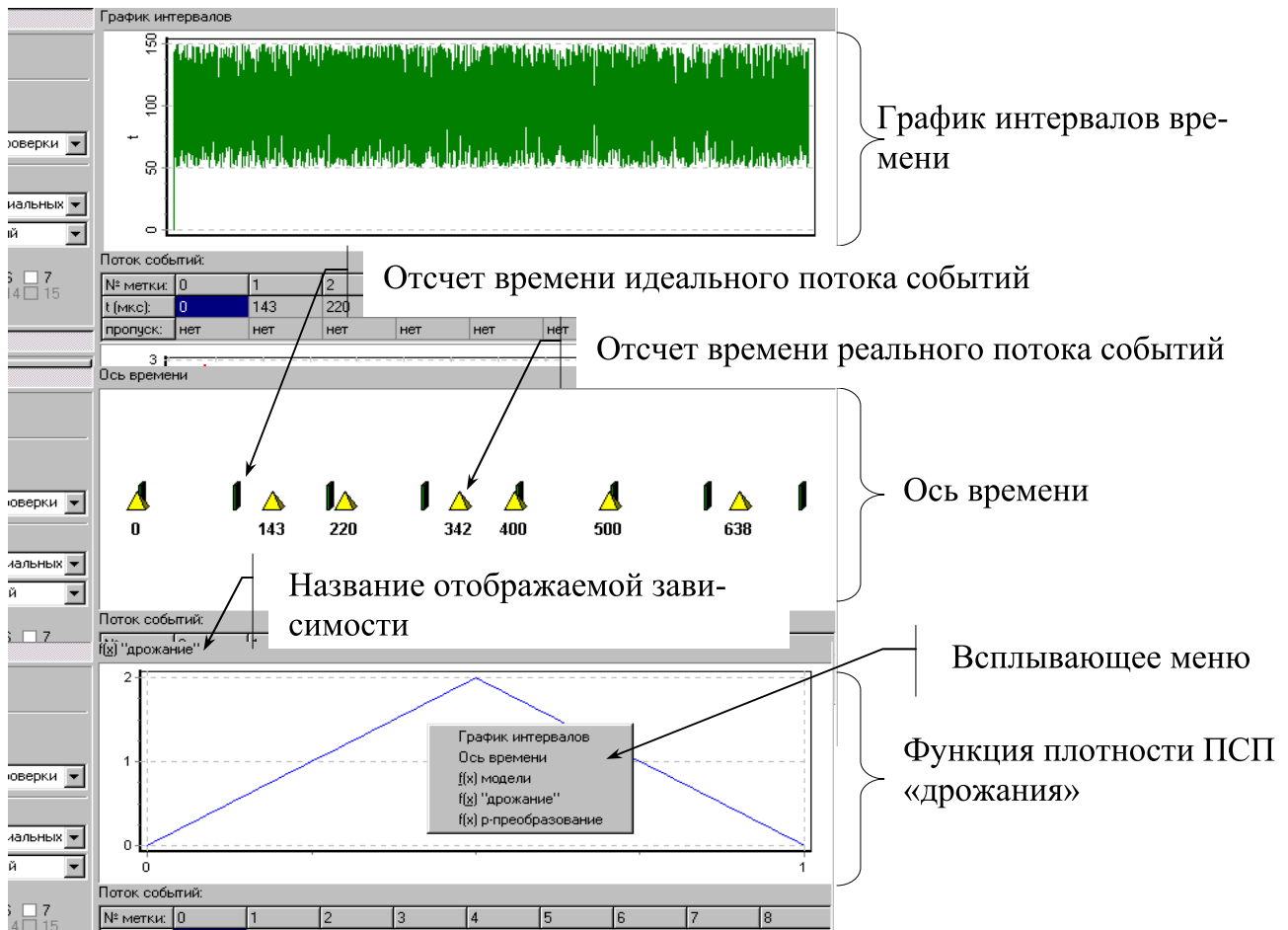


Рисунок 7.31. График потока событий

- Таблица потока событий. Отображает временные метки потока событий, номера меток, а также показывает необходимость пропуска. Изменение текущего отсчета времени приводит к отображению нового отсчета на оси времени;
- График принятых сигналов. На нем отображаются сигналы, принятые по каналам аналогового коммутатора. За каждым каналом закреплен тип и цвет линий, используемых для отображения сигнала;
- Таблица принятых сигналов. В таблицу сводится информация о номере отсчета, канале, по которому он был принят, а также его время и значение. В столбцах «Время идеальное» и «Время реальное» приведены абсолютные величины времени. В скобках указано время, прошедшее от предыдущего отсчета (единицы измерения мкс). Для удобства пользователя таблица имеет всплывающее меню, позволяющее задавать видимость временных меток ВР, введенных по каналам. Помимо этого, при перемещении по таблице выделенный отсчет отображается на графике ВР в виде точ-

ки. В последнем столбце таблицы приводится ошибка преобразования. Здесь указывается один из возможных типов ошибок:

- Нет сигнала готовности. Возникает в случае ввода сигнала по готовности;
- Перегрузка. Появляется при превышении лимита на уровень входного напряжения;
- Превышение лимита времени. Проявляется при вводе сигнала по ожиданию, когда исчерпан лимит отведенного для этого времени.

Для ввода аналогового сигнала необходимо выполнить определенную последовательность действий, указанную на диаграмме деятельности (activity diagram). Диаграмма приведена на рис. 7.32.

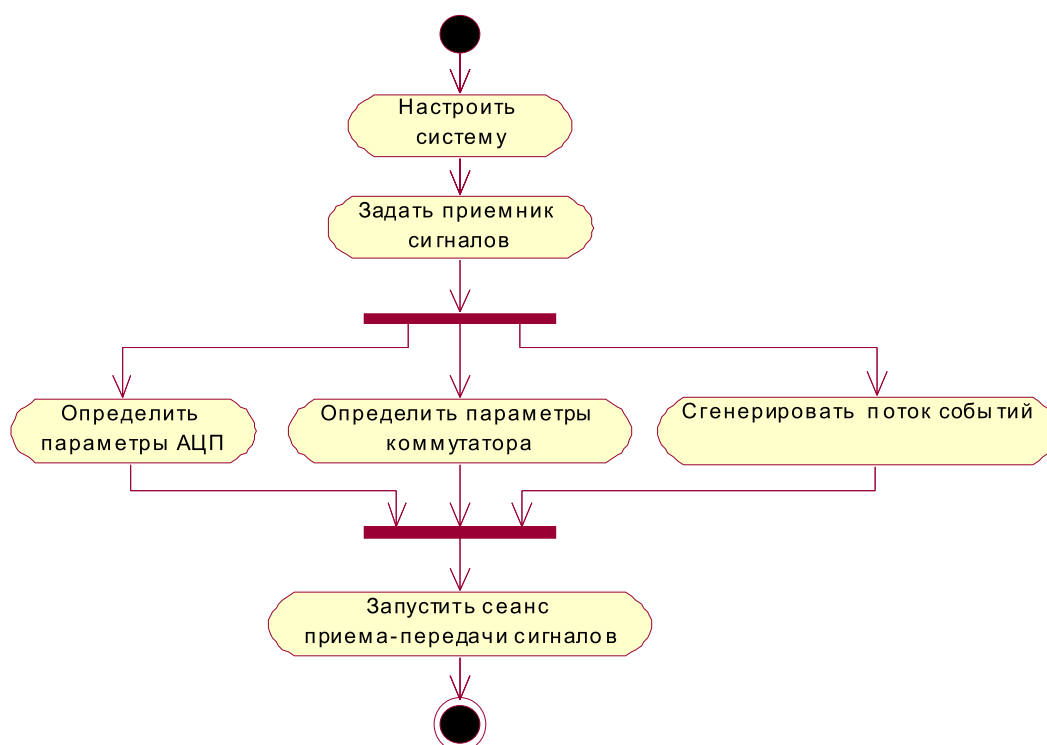


Рисунок 7.32. Диаграмма деятельности. Ввод сигнала

При вводе сигнала необходимо настроить систему. Последовательность действий при настройке описана в пункте 7.6.2.

Вторым шагом при вводе сигнала является выбор приемника сигналов. Выбор осуществляется в списке «Приемник», который указывает на файл хранения введенного сигнала на диске или на то, что для дальнейшей обработки он будет передан в «Подсистему аппроксимативного анализа». Эта ситуация возможна в случае вызова подсистемы ввода-вывода из «Подсистемы генерации». С помощью списка можно выбрать файл, который будет рассматриваться как приемник. Предусмотрена также возможность закрытия ранее открытого приемника (см. рис. 7.33). В случае, когда приемником сигнала выступает «Подсистема аппроксимативного анализа», функция «Открыть...» приемника недоступна. Для того, чтобы выбрать файл-приемник, пользователю необходимо в элементе выбора «Приемник» выбрать функцию «Открыть...» и задать в появившемся диалоговом окне имя файла. После этого, панель приемника становится активной, а данные из выбранных каналов после приема будут записываться в файл с составным именем. Первая часть составного имени – выбран-

ное имя файла-приемника, вторая – номер канала. Например, если пользователь выбрал имя файла-приемника «D:\NVL08\process.nrd», то результаты ввода по второму каналу будут сохранены в файл с именем «D:\NVL08\process2.nrd».

Ниже, на рис. 7.33, изображен список «Приемник» в различных режимах работы системы.

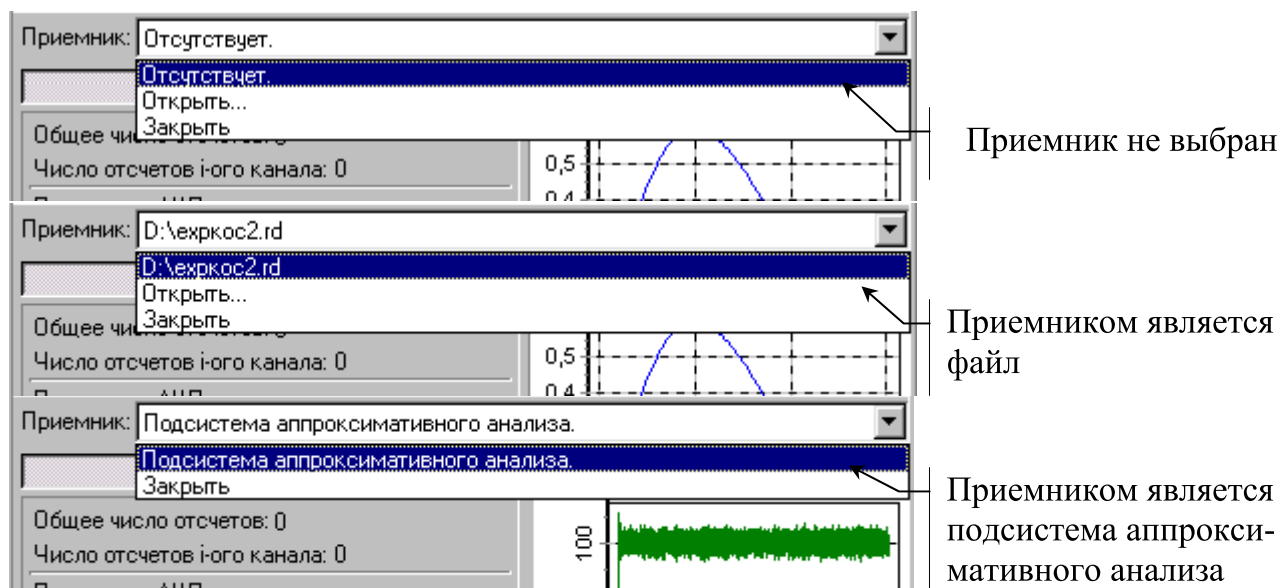


Рисунок 7.33. Управляющий элемент выбора приемника

После выбора приемника сигналов необходимо определить:

- Параметры АЦП. Выбирается разрядность АЦП, задается условие окончания аналого-цифрового преобразования сигнала;
- Параметры коммутатора. Определяется количество каналов коммутатора, выбирается порядок их переключения. Указываются каналы, по которым осуществляется измерение уровня сигнала;
- Сгенерировать поток событий. Генерация потока событий происходит в несколько этапов. Задаются параметры потока, после чего производится его генерация.
- На диаграмме деятельности рис. 7.34 показана последовательность действий, необходимых для генерации потока событий. Вначале задается шаг принудительной дискретизации. Шаг используется в качестве масштабирующего коэффициента времени, т.е. получаемые при моделировании временные отсчеты умножаются на эту величину. Далее выбирается модель дискретизации. Имеется два вида моделей:
 - Равномерная. Отсчеты времени данной модели удалены друг от друга на величину шага принудительной дискретизации;
 - Аддитивная. Для определения временных меток необходимо сгенерировать случайные величины $\{\xi_i\}_{i=1..N}$ с законом распределения $f_\xi(\xi)$. Суммирование полученных реализаций позволит определить метки времени потока. Для определения моментов наступления событий в системе временные метки умножаются на величину шага дискретизации.

Для оценки влияния помех на принимаемый сигнал в системе предусмотрена возможность моделирования помех:

- «дрожание»;
- р-преобразование.

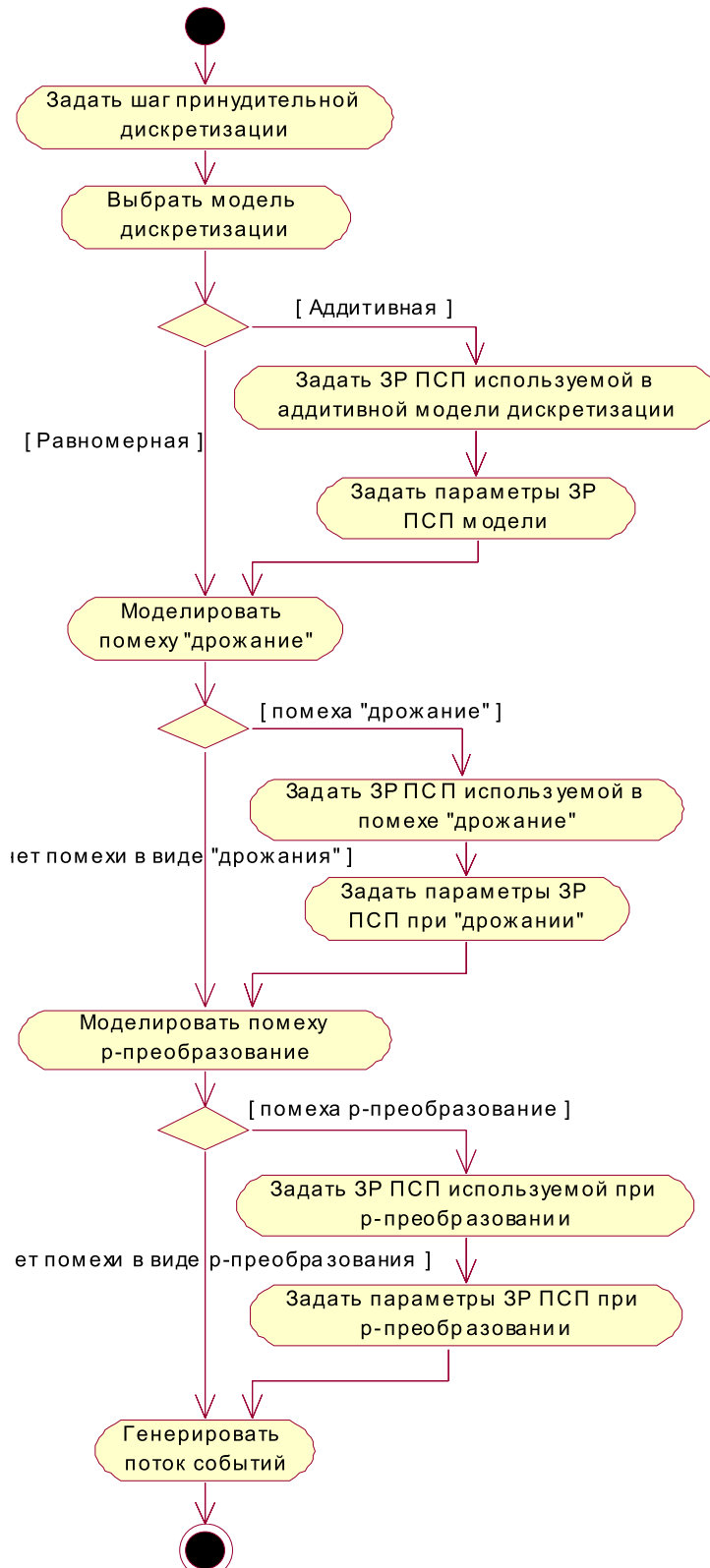


Рисунок 7.34. Диаграмма деятельности.
Генерация потока событий

Для указания необходимости наложения помехи на модель дискретизации устанавливается соответствующий флажок. После чего становятся доступными элементы, позволяющие задать параметры помехи.

При определении временных меток аддитивной дискретизации, а также генерации случайной величины помехи, используется метод обратной функции. Данный метод подробно описан в [30]. При нажатии кнопки «Генерировать» происходит генерация потока событий с заданными ранее параметрами.

По окончании настройки приемника запускается сеанс ввода аналоговых сигналов. Для этого необходимо нажать на кнопку «Пуск».

Рассмотрим взаимодействие объектов системы для случая приема сигнала с подтверждением передачи. Последовательность событий, происходящих в системе, приведена на диаграмме последовательностей (см. рис. 7.35).

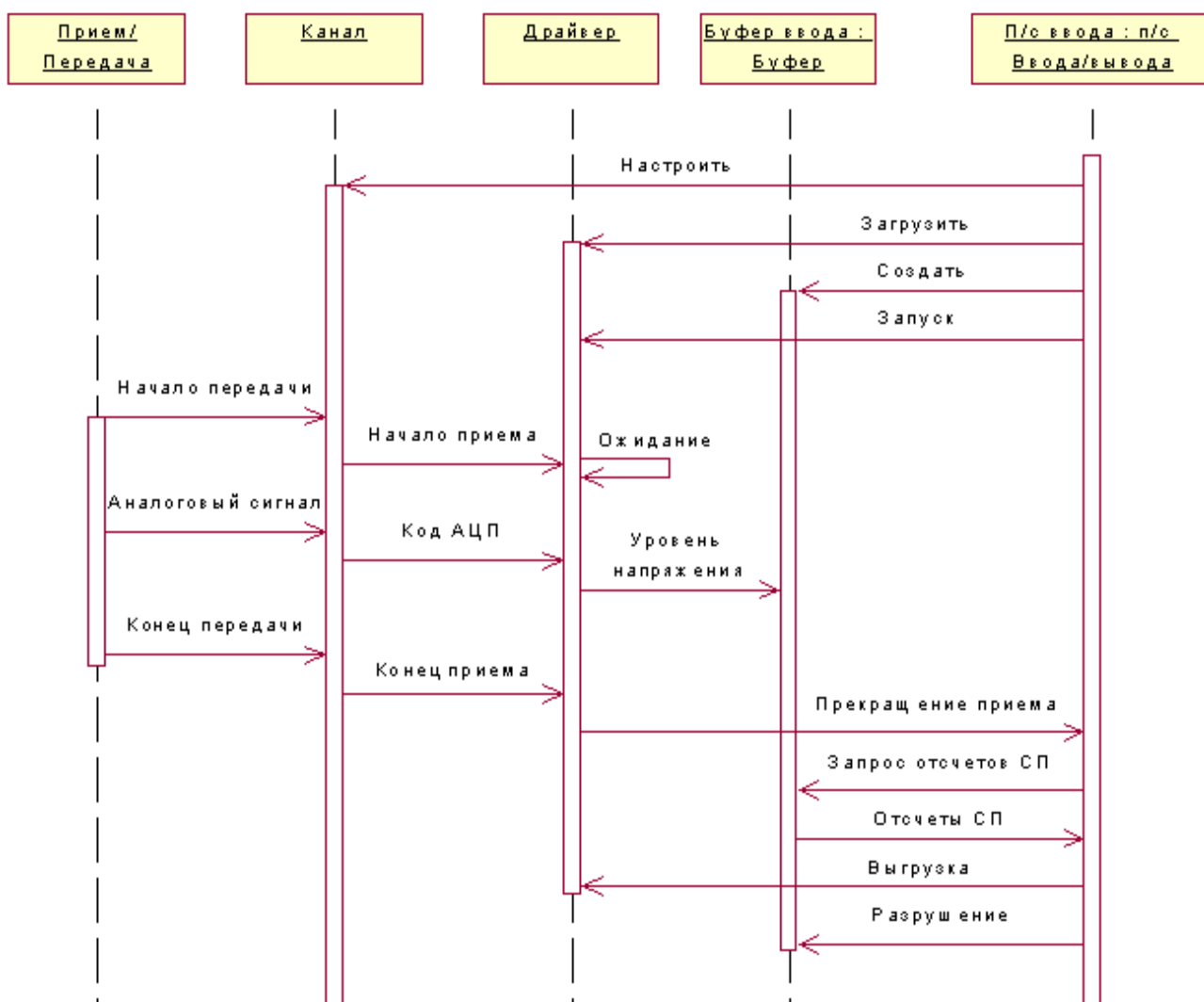


Рисунок 7.35. Диаграмма последовательностей при вводе сигнала

Как видно из диаграммы, во взаимодействии участвуют пять объектов:

- Подсистема ввода. Объект типа «подсистема ввода/вывода», осуществляет управление процессом приема сигнала из аналогового канала;
- Буфер ввода. Объект типа буфер, предназначен для записи принимаемых из аналогового канала данных;

- Драйвер. Программное обеспечение, работающее в составе операционной системы и взаимодействующее непосредственно с многофункциональным устройством NVL08. Драйвер представляет собой низкоуровневый программный модуль, выполненный в виде виртуального драйвера внешнего устройства (VxD);
 - Канал. Совокупность аппаратных средств, осуществляющих преобразование кода в аналоговый сигнал, его передачу и обратное преобразование аналогового сигнала в код;
 - Прием/передача. Абстрактный объект, который является источником аналогового сигнала.

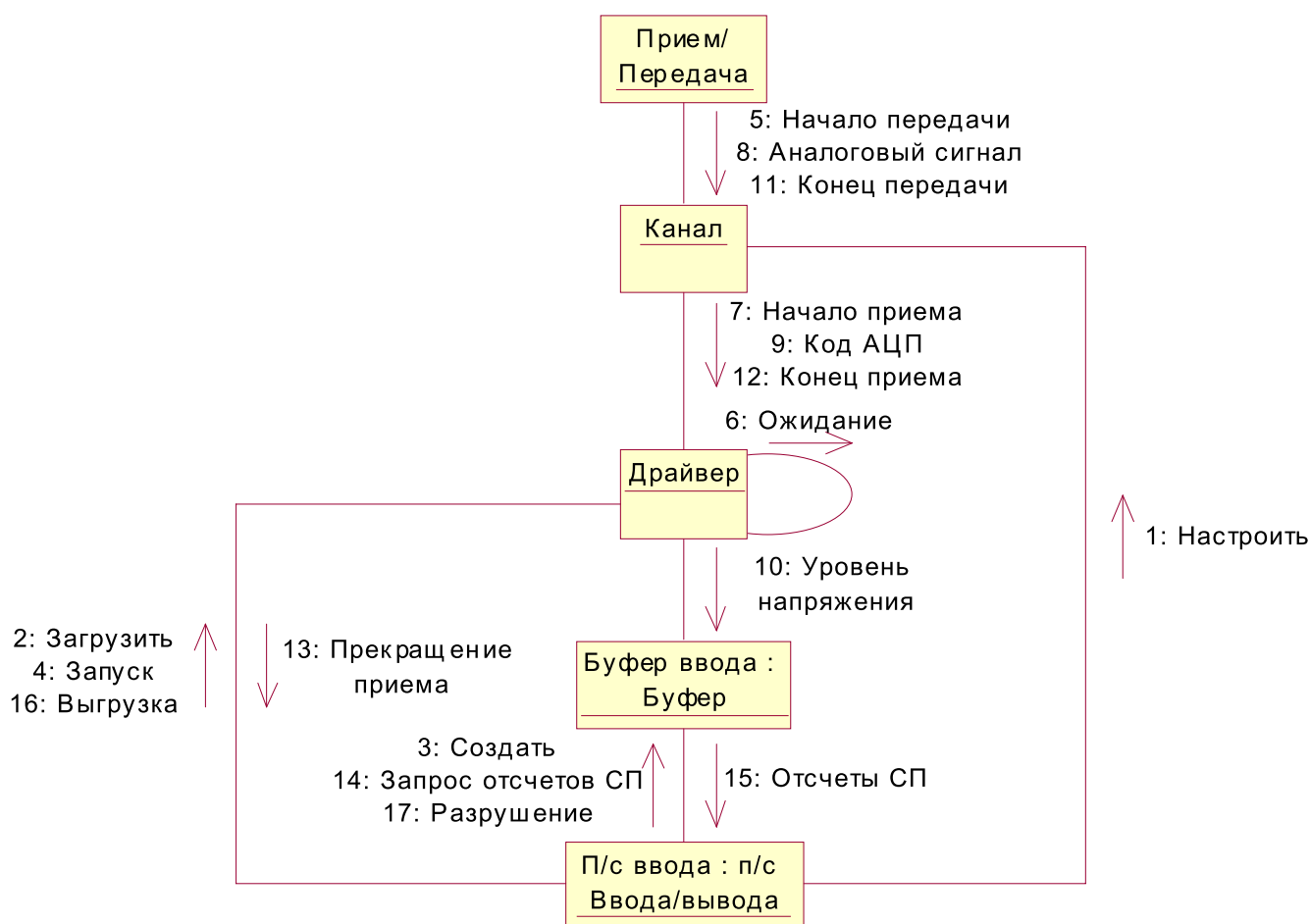


Рисунок 7.36. Диаграмма кооперации при вводе сигнала

Из диаграммы кооперации, представленной на рис. 7.36, видна структура взаимодействия объектов системы. По нажатию кнопки «Пуск» подсистема ввода настраивает канал, загружает виртуальный драйвер устройства и создает буфер для хранения принимаемых данных. При создании буфера временные метки заполняются в соответствии со сгенерированным потоком событий. После завершения подготовительного этапа запускается процедура драйвера, реализующая сеанс приема сигнала. В этой процедуре ожидается приход сигнала «начало приема», который инициируется каналом после прихода сигнала «начало передачи» от объекта «Прием/передача». После подтверждения начала передачи в канале производится аналого-цифровое преобразование с занесением кода, соответствующего уровню измеренного сигнала, в буфер. Также в буфер заносится время измерения сигнала. Измерение сигнала прекращается во время прихода сигнала «Конец передачи» или после проведения максимально возможного количества измерений. При этом, драйвер посылает сообщение

подсистеме ввода о прекращении приема. Подсистема посылает запрос и чтение отсчетов принятого сигнала. После чего, происходит выгрузка драйвера и разрушение промежуточного буфера хранения принятого сигнала.

7.7.2. Моделирование объекта исследования

При моделировании объекта исследования формируется аналоговый сигнал в виде напряжения на выходе МФУ NVL08 с характеристиками, приведенными в таблице 7.4. Передача данных через аналоговый канал осуществляется с использованием подсистемы вывода. Эта подсистема позволяет выводить прочитанный из источника сигнал.

Основные характеристики сигнала, передаваемого при моделировании

Таблица 7.4

Параметр	Min	Типовое значение	Max
Разрешение ЦАП, бит	2	12	12
Шкала преобразования ЦАП, В	-5	-	+5
Точность привязки запуска АЦП к шкале времени, не хуже, мкс	30	50	100
Длительность непрерывного съема информации, отсчетов	0	1000	10000

Панель «Вывод сигнала» построена по тому же принципу, что и панель «Ввод сигналов» (см. рис.7.37). Она содержит:

- Управляющий список «Источник». Список предназначен для выбора источника сигнала, моделирующего объект исследования. В качестве сигнала выступает ВР с равномерной или неравномерной дискретизацией;
- Подвижная панель задания и отображения параметров передатчика. На панели располагаются элементы управления параметрами передатчика, сгруппированные по функциональному признаку в ветви:
 - Параметры передатчика. Задается режим вывода сигнала (одиночный/в цикле), отображается общее число отсчетов выводимого сигнала и тип дискретизации. В случае регулярной дискретизации указывается её шаг.
 - Вероятностные характеристики СП. Производится оценка моментных характеристик СП. Здесь вычисляются оценки M_x , D_x , K_a , K_ϵ .
 - Взаимные числовые характеристики потоков событий. Отображается результат вычисления максимального отклонения временных меток реального и идеального потоков событий, а также их СКО.
- График ВР, имитирующего объект исследования. Отображается временной ряд, прочитанный из источника. Зеленым цветом выделяется ВР с идеальными метками времени (прочитанными из источника), красным – ВР с метками времени, определенными при выводе сигнала;
- Таблица ВР, имитирующего объект исследования. В таблице отображена информация о номере отсчета, идеальном и реальном времени, а также о значении сигнала. В столбцах «Время идеальное» и «Время реальное» приведены абсолютные величины времени. В скобках указано число мкс, прошедшее от предыдущего отсче-

та. Таблица имеет всплывающее меню, позволяющее управлять видимостью реальных и идеальных временных меток. При перемещении по таблице выделенный отсчет отображается на графике ВР в виде точки.

Элемент выбора источника

Ветвь «параметры передатчика»

Ветвь «Вероятностные характеристики СП»

Ветвь взаимных числовых характеристик реального и идеального потоков событий

График ВР, имитирующего объект исследования

Таблица ВР, имитирующего объект исследования

Всплывающее меню источника

Отс	Время идеал	Время реаль	Значение
0	0 (+0)	19 (+19)	-0,41885
1	820 (+820)	828 (+809)	-0,41885
2			27406
3			82145
4			57141
5			19380
6	4920 (+820)	4926 (+817)	-0,63641

Рисунок 7.37. Панель «Вывод сигнала»

Последовательность действий, производимых при выводе сигнала, указана на диаграмме деятельности, представленной ниже (см. рис. 7.38).

При выводе сигнала необходимо настроить систему. Последовательность действий описана в пункте 7.6.2. После чего необходимо выбрать источник сигнала. Для этого в списке «Источник» выбирается имя файла с ВР, подготовленным к выводу. В случае вызова подсистемы ввода-вывода из «Подсистемы генерации» ВР передается системе при её запуске. В списке «Источник» имеется возможность закрытия ранее открытого источника. В случае, когда источником сигнала является «Подсистема генерации», функция «Открыть...» источника недоступна, а подсистема ввода-вывода вызывается из неё. Для того чтобы выбрать файл-источник, пользователю необходимо в элементе выбора «Источник» задать функцию «Открыть...» и определить в появившемся диалоговом окне имя файла. После чего панель источника становится активной, а данные из выбранного файла читаются в подсистему. При этом, отобража-

ется число отсчетов прочитанного ВР, тип дискретизации, вычисляются вероятностные характеристики.

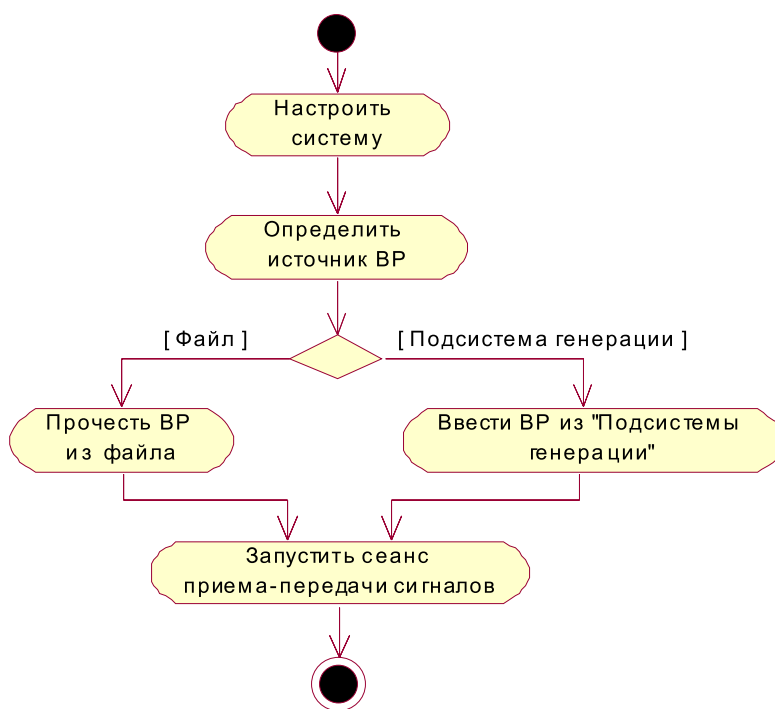


Рисунок 7.38. Диаграмма деятельности. Вывод сигнала

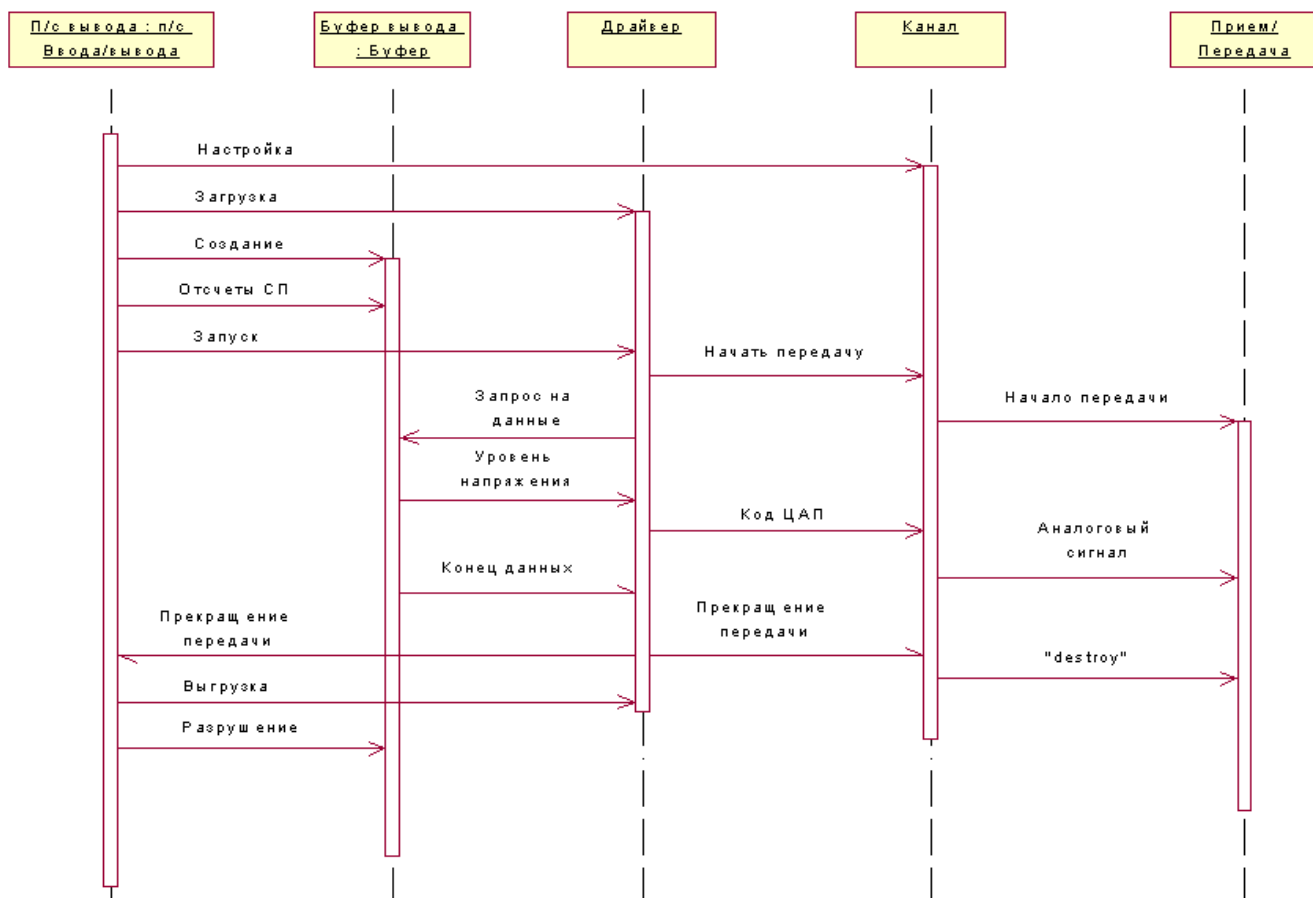


Рисунок 7.39. Диаграмма последовательностей при выводе сигнала

После задания выводимого сигнала в виде ВР необходимо запустить сеанс передачи сигнала. При этом выполняется последовательность событий, приведенная на диаграмме последовательностей (см. рис. 7.39). Диаграмма отображает взаимодействие объектов системы для случая передачи сигнала с подтверждением.

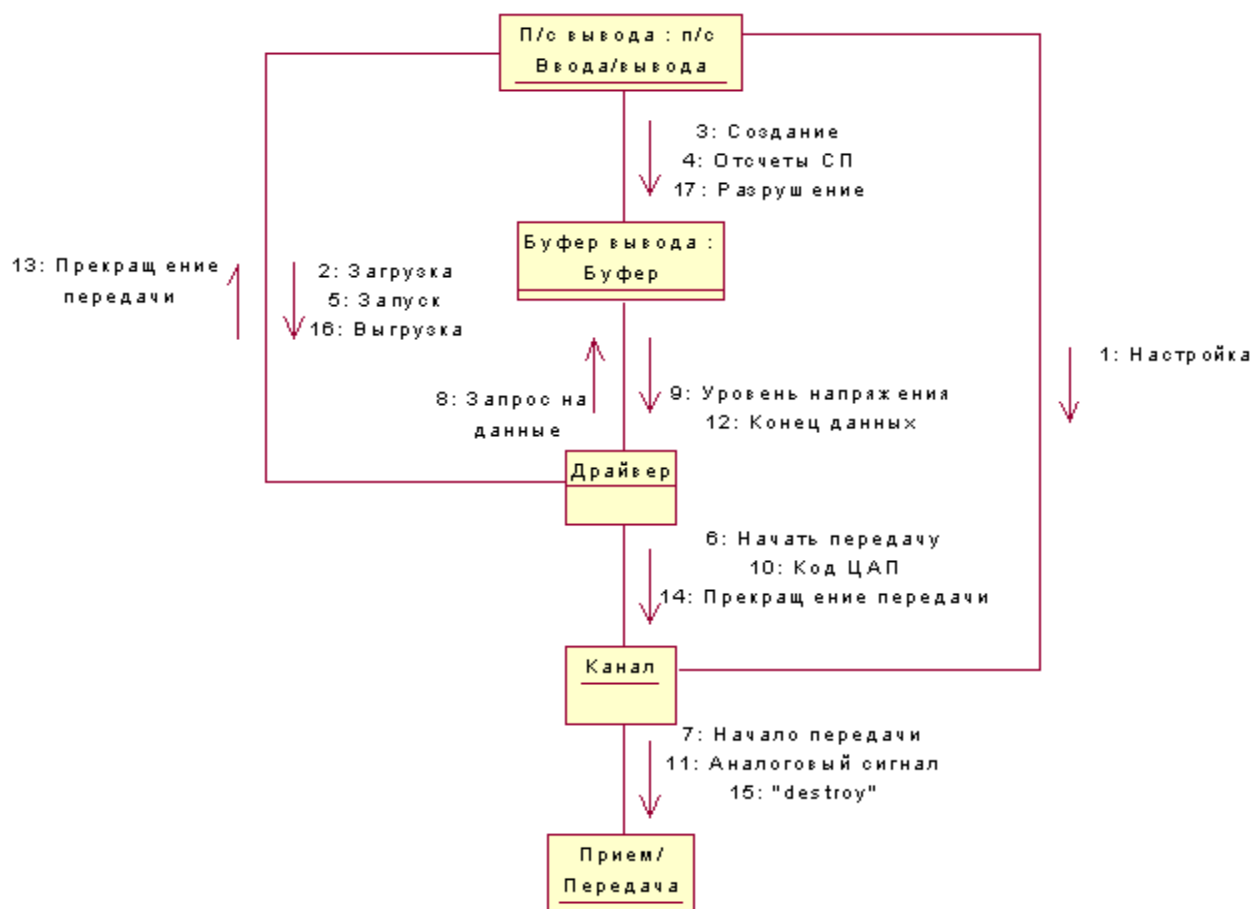


Рисунок 7.40. Диаграмма кооперации при выводе сигнала

На диаграмме последовательностей указано пять объектов. Причем, объекты «Драйвер», «Канал», «Прием-передача» заимствованы из диаграммы последовательностей ввода сигналов. Подсистема вывода, указанная на диаграмме, является объектом типа «п/с ввода/вывода». Она осуществляет управление процессом передачи сигнала через аналоговый канал. В буфере вывода хранится информация о выводимом сигнале.

Диаграмма кооперации, представленная на рис. 7.40, отображает взаимодействие объектов системы. По нажатию кнопки «Пуск» подсистема вывода настраивает канал, загружает виртуальный драйвер устройства, создает и заполняет буфер для хранения передаваемого ВР. Запускает процедуру драйвера, реализующую сеанс передачи сигнала. При этом устанавливается флаг «Начать передачу» и производится преобразование кодов, находящихся в буфере, в уровни напряжения на выходе ЦАП. После вывода всех данных драйвер проверяет режим вывода сигнала. Если установлен режим циклического вывода, происходит повторный вывод сигнала, иначе драйвер посылает сообщение подсистеме вывода и снимает флаг «Начать передачу». Сеанс передачи прекращается. Подсистема вывода в ответ на пришедшее сообщение выгружает драйвер устройства и разрушает промежуточный буфер вывода сигнала.

7.7.3. Прием-передача аналоговых сигналов

По окончании приведенных выше действий система готова к сеансу приема-передачи аналогового сигнала. При нажатии на кнопку «Пуск» начинается сеанс передачи, при этом появляется диалоговое окно, изображенное на рис. 7.41. В этом окне отображается режим работы системы. В частности, из рисунка видно, что прием сигнала не производится, т.к. напротив этого пункта находится символ **✗**, но зато производится вывод сигнала, этот факт отмечен символом **✓**.

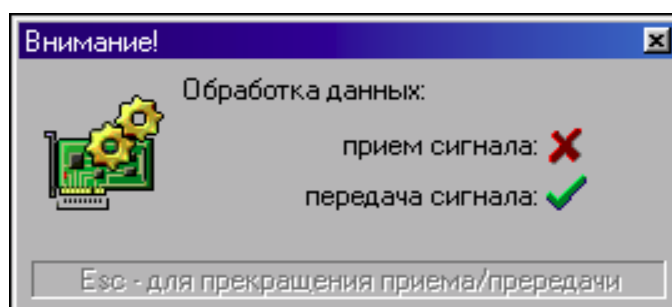


Рисунок 7. 41. Окно приема-передачи сигнала

Следует заметить, что во время сеанса приема-передачи сигнала система подчиняет себе все ресурсы вычислительного комплекса и не реагирует на команды пользователя. Поэтому, для случая экстренной остановки процесса предусмотрена горячая клавиша «Esc». При её нажатии система выходит из режима приема-передачи, отображает данные, которые удалось ввести и/или вывести, и позволяет пользователю осуществлять управление системой.

По окончании ввода-вывода сигнала производится подсчет вероятностных характеристик и их отображение в соответствующих элементах управления. Также осуществляется запись полученных сигналов в приемник.

Для завершения работы с системой необходимо нажать кнопку «Выход».

ЧАСТЬ 2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

1. ВЗАИМНЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Цель работы: Изучение методов моделирования случайных процессов и оценки взаимных корреляционных функций.

1.1. Содержание лабораторной работы

Лабораторная работа включает в себя генерацию пары процессов с определением интервала дискретизации и определение взаимной корреляционной функции.

В начале работы на первой странице генерируется «белый шум». При этом, необходимо выбрать интервал дискретизации на основе информации об используемых фильтрах.

Например, для заданных функций $e^{-\lambda|\tau|} \cos \omega_0 \tau$ и $e^{-\lambda|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$ определение интервала дискретизации выгладит так:

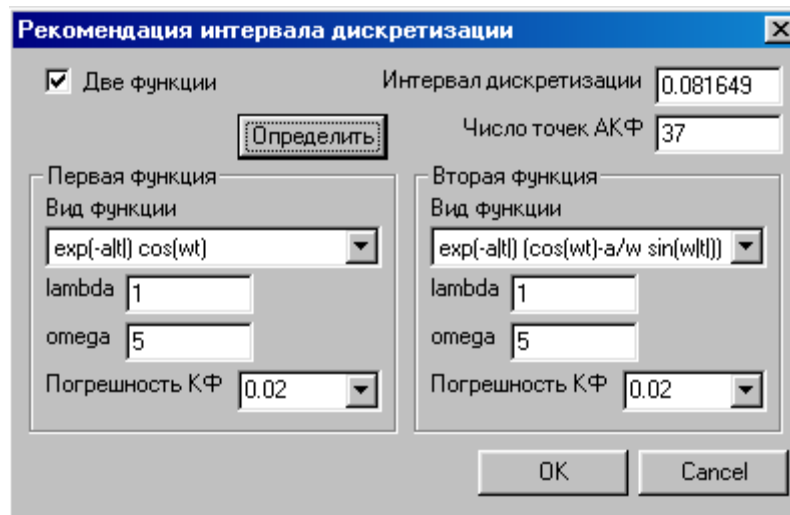


Рисунок 1.1. Рекомендации по выбору интервала дискретизации

После этого результирующий белый шум подается на страницу 2, где устанавливаются требуемые функции (см. рис. 1.2). Здесь нужно установить заданные значения параметров и величину задержки, затем нажать кнопку «Генерация».

Задержку в данной работе установите в 0. Рекомендуем попробовать изменить задержку второго процесса в окне «Задержка» и определить влияние задержки на взаимную корреляцию процессов. Задержка задается длительностью интервала и количеством интервалов. Таким образом, предоставлена возможность наглядно задавать задержку, кратную интервалу дискретизации.

Взаимную корреляционную функцию полученной пары процессов можно рассчитать на странице 3, установив предварительно число точек левой и правой ветвей графика (см. рис. 1.3).

Фазовый портрет добавляется нажатием кнопки «Фазовый портрет» (см. рис. 1.3). Теоретически рассчитанная ВКФ добавляется после нажатия «+Теор. график». Она представляет собой функцию, полученную аналитически на основе сведений о характере и параметрах пары формирующих фильтров, на вход которых поступает

один «белый шум». Выражения для всех используемых в автоматизированной системе фильтров приведены в приложении. Рекомендуем получить аналитические выражения для других случаев.

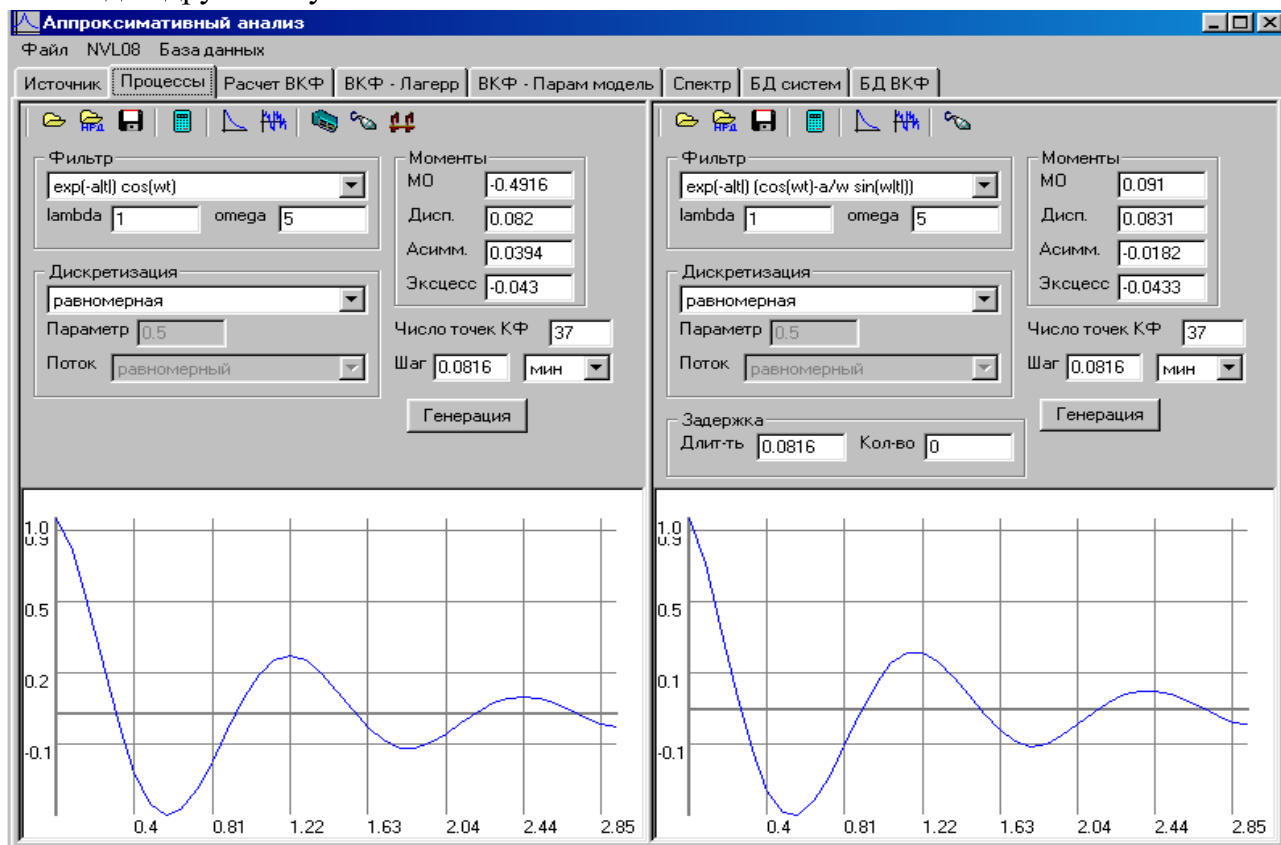


Рисунок 1.2. Корреляционные функции пары процессов

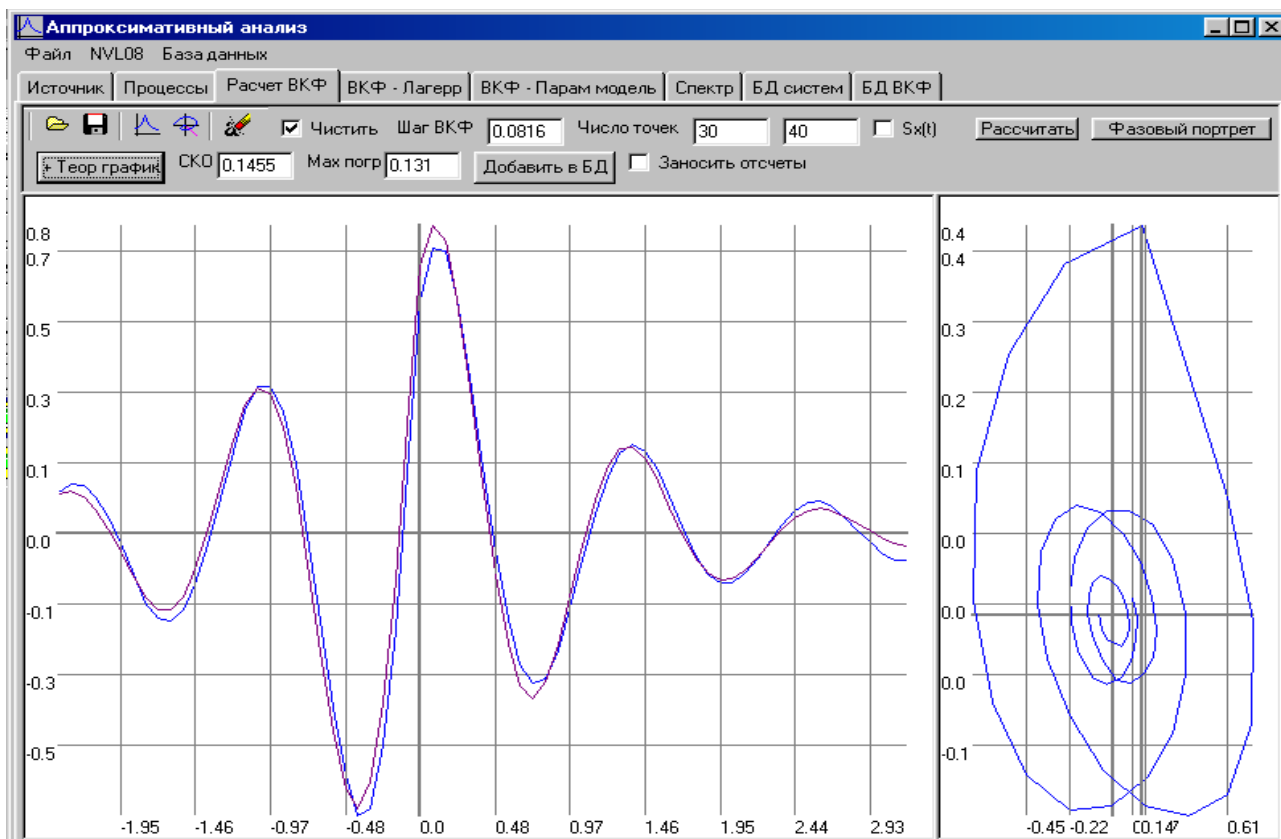


Рисунок 1.3. Взаимная корреляционная функция и её фазовый портрет

Интервал дискретизации, установленный на первой странице, передается автоматически на вторую и третью, однако можно его установить вручную. В качестве эксперимента рекомендуем посмотреть результаты при различных интервалах дискретизации и ответить на вопрос: как влияет интервал дискретизации на качество генерации процесса с заданной КФ, на определение ВКФ?

После наложения экспериментально рассчитанной ВКФ и полученной аналитически, в соответствующих полях отображаются среднеквадратическое отклонение и максимальная погрешность. Суть лабораторной работы состоит в последовательном выполнении 29 экспериментов по генерации пары процессов и расчету их ВКФ с накоплением сведений об ошибке оценки ВКФ. Таким образом, результатом работы станет получение методической погрешности оценки ВКФ методом имитационного моделирования.

Если ведется база данных, необходимо подключить систему, вызвав пункт меню «База данных/Соединение». В этом случае на странице БД систем необходимо создать свою систему, нажав на кнопку и указав в качестве названия свою фамилию. После этого нужно вернуться на страницу «Расчет ВКФ» и нажать «Заносить в БД». Поскольку информация обо всех отчетах определяемой ВКФ не нужна, не следует устанавливать флажок «Заносить отчеты».

После проведения 29 экспериментов результаты будут отображены на странице «БД ВКФ»:

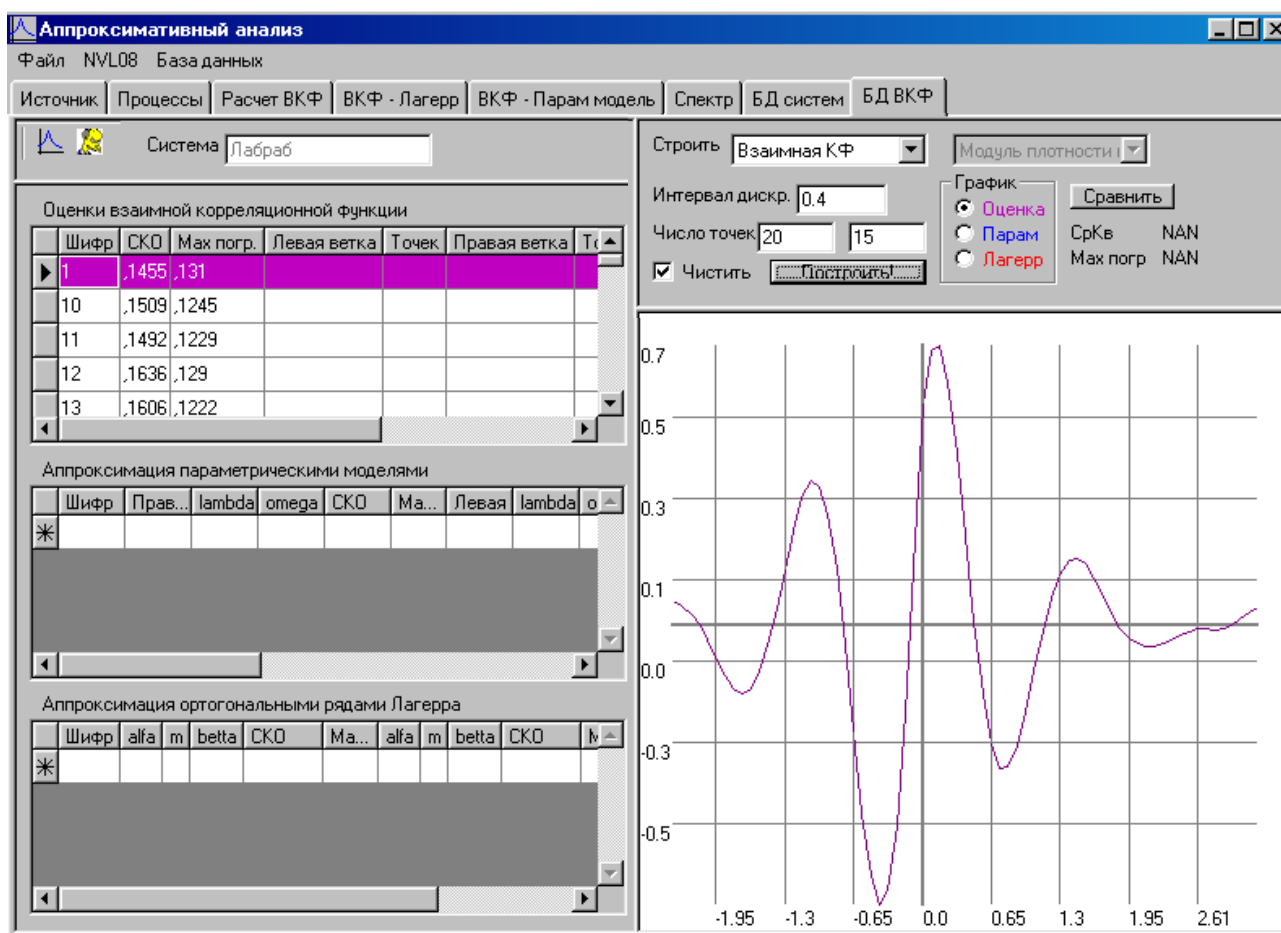


Рисунок 1.4. База данных взаимной корреляционной функции


В случае отсутствия базы данных необходимо вручную заполнить таблицу, пример которой приведен ниже:

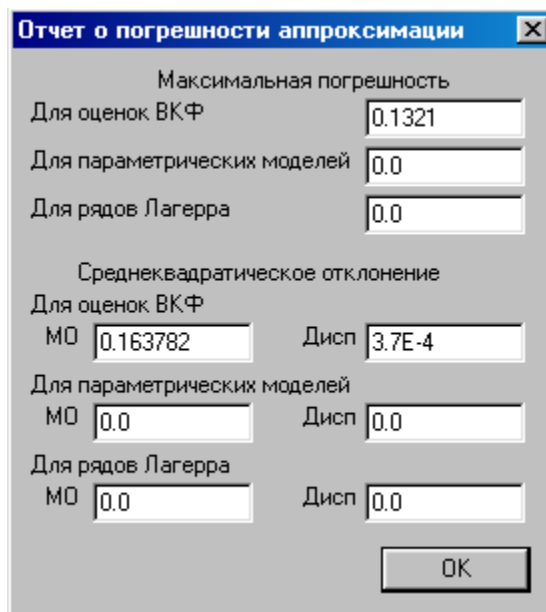
Результаты моделирования

Таблица 1.1

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
СКО	0,1455	0,1509	0,1492	0,1636	0,1606	0,1736	0,1743
Мах погрешность	0,131	0,1245	0,1229	0,129	0,1222	0,125	0,1292
Номер эксперимента	8	9	10	11	12	13	14
СКО	0,1616	0,1552	0,1806	0,1521	0,178	0,156	0,1915
Мах погрешность	0,121	0,1234	0,1235	0,1211	0,1319	0,1239	0,1285
Номер эксперимента	15	16	17	18	19	20	21
СКО	0,1501	0,1436	0,1425	0,16	0,1531	0,1592	0,1447
Мах погрешность	0,124	0,1265	0,1312	0,1279	0,1227	0,1235	0,1241
Номер эксперимента	22	23	24	25	26	27	28
СКО	0,2107	0,216	0,1916	0,1521	0,1466	0,1439	0,1777
Мах погрешность	0,1244	0,1289	0,1194	0,1276	0,126	0,1321	0,1243
Номер эксперимента	29						
СКО	0,1652						
Мах погрешность	0,1298						

После подсчета погрешностей матожидание СКО составит 0,1638, максимальная погрешность – 0,1321. Последнее значение – методическая погрешность, полученная методом имитационного моделирования.

В случае использования базы данных для оценки методических погрешностей возможно построение отчета по накопленным данным. Для этого необходимо нажать кнопку , после чего будет произведен анализ таблиц и отображен отчет, пример которого приведен на рисунке 1.5.



Отчет о погрешности аппроксимации

Максимальная погрешность

Для оценок ВКФ

Для параметрических моделей

Для рядов Лагерра

Среднеквадратическое отклонение

Для оценок ВКФ

МО Дисп

Для параметрических моделей

МО Дисп

Для рядов Лагерра

МО Дисп

Рисунок 1.5. Отчет о результатах моделирования

На рисунке 1.6 приведены взаимные корреляционные функции для рассматриваемых моделей при разном объеме выборки. Особо отметим совпадение функций на начальном участке в случае малого числа отсчетов исходного случайного процесса.

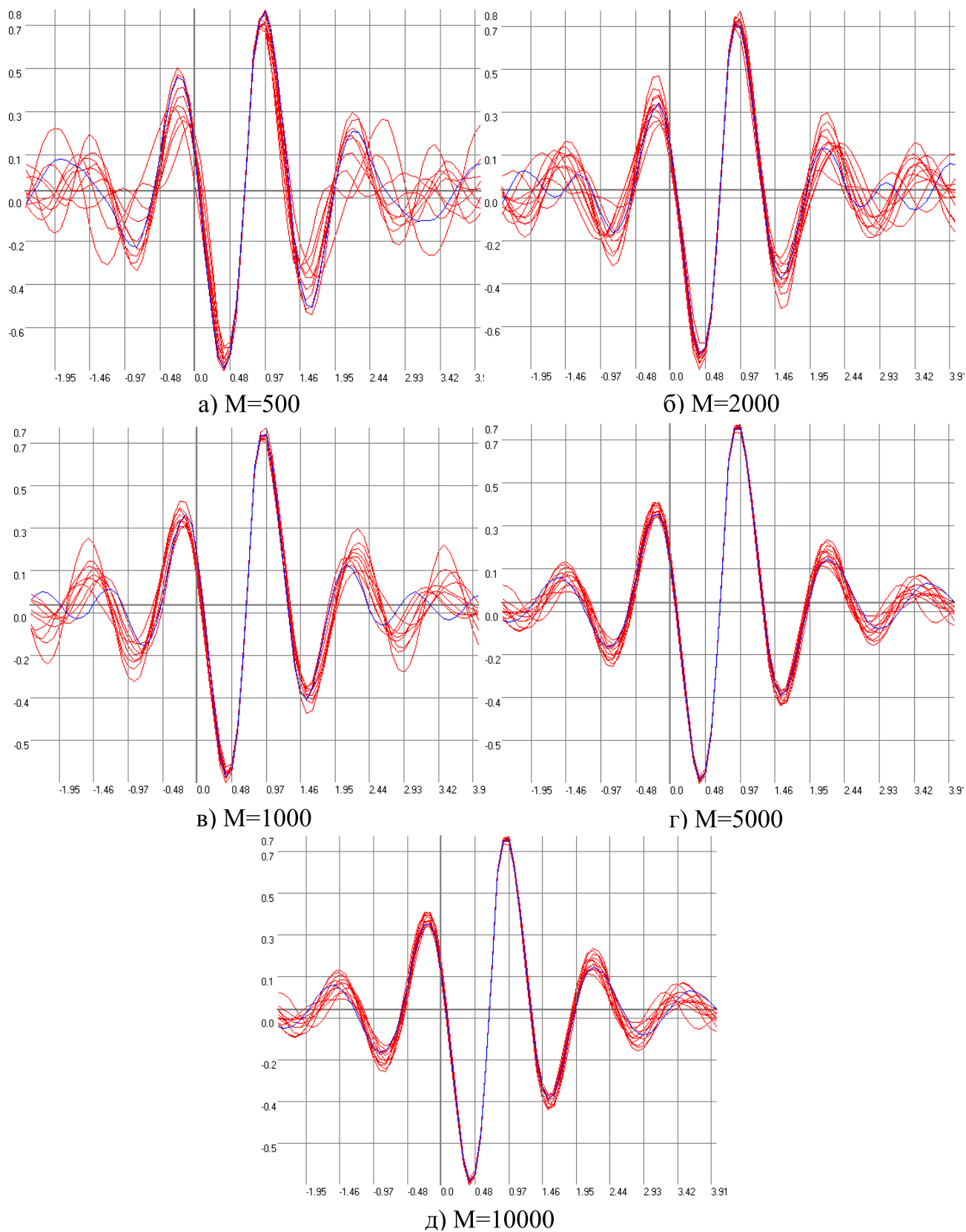


Рисунок 1.6. Взаимные корреляционные функции при объеме выборки M

1.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: вид пары автокорреляционных функций, значения их параметров.
2. Определить интервал дискретизации.
3. Сгенерировать «белый шум».
4. Получить пару процессов.
5. Оценить ВКФ и построить её аналитический график.
6. Занести погрешности в БД. (В случае отсутствия БД оформить таблицу 1.1).
7. Повторить пункты 3–6 29 раз.
8. Определить погрешность моделирования пары процессов методом имитационного моделирования.
9. Оформить отчет.

1.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Метод и алгоритм моделирования коррелированных временных рядов с заданным преподавателем видом корреляционной функции.
3. Импульсная характеристика формирующего фильтра (приложение П.2).
4. Примеры реализации коррелированных временных рядов для объёма выборки $M=5000$ и соответствующих им корреляционных функций.
5. Фазовые портреты корреляционных функций.
6. Погрешности генерирования коррелированных временных рядов для $N=500, 1000, 2000, 5000$, представленные в табличной форме (количество реализаций для каждого модельного эксперимента равно 29). Интервал дискретизации выбрать для восстановления корреляционной функции с погрешностью $\delta = 0,02$.
7. Графические зависимости погрешности генерирования от объёма выборки - $M=500, 1000, 2000, 5000$.
8. Выводы по работе.

1.4. Контрольные вопросы

1. Какие вероятностные характеристики относятся к характеристикам взаимосвязи?
2. Какие случайные процессы, временные ряды относятся к коррелированным случайным процессам?
3. Какой метод лежит в основе генерирования временных рядов с заданным видом корреляционной функции?
4. От чего зависит выбор интервала дискретизации случайного процесса?
5. Что такое фазовый портрет корреляционной функции?
6. Какая часть фазового портрета является наиболее информативной?
7. Как отличить фазовый портрет колебательной корреляционной функции?
8. Что характеризует показатель колебательности корреляционной функции?
9. В чем заключается методика оценки качества генерирования случайного процесса с заданным видом корреляционной функции с использованием фазового портрета корреляционной функции?

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ НЕЭКВИДИСТАНТНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Цель работы: изучение методов оценки взаимной корреляционной функции в случае неравномерной дискретизации случайных процессов.

2.1. Содержание лабораторной работы

Лабораторная работа включает в себя генерацию пары процессов с неравномерной дискретизацией (неэквидистантных временных рядов), оценку взаимной корреляционной функции с использованием АИИКФ и анализ влияния метода дискретизации на погрешности. Метод, основанный на АИИКФ, описан в [28].

Аналогично первой работе необходимо сгенерировать «белый шум» на первой странице автоматизированной системы. Затем нужно указать заданные фильтры на второй странице. Новым в этой работе будет задание параметров дискретизации в группе «Дискретизация». Для определения взаимной корреляционной функции с использованием АИИКФ необходимо указать интервал принудительной дискретизации. Так как у неэквидистантного временного ряда интервал дискретизации не является постоянной величиной, необходимо выбрать алгоритм определения интервала дискретизации (средний или минимальный среди всех интервалов). В случае использования р-преобразования нужно выбрать минимальный интервал, дискретизации с дрожанием – средний. Предлагается для указанного вида дискретизации попробовать разные интервалы принудительной дискретизации, в том числе задавать вручную, и оценить результаты определения корреляционной функции с использованием АИИКФ. Страница с примером нерегулярной дискретизации (здесь происходит потеря половины отсчетов) приведен на странице 2.1:

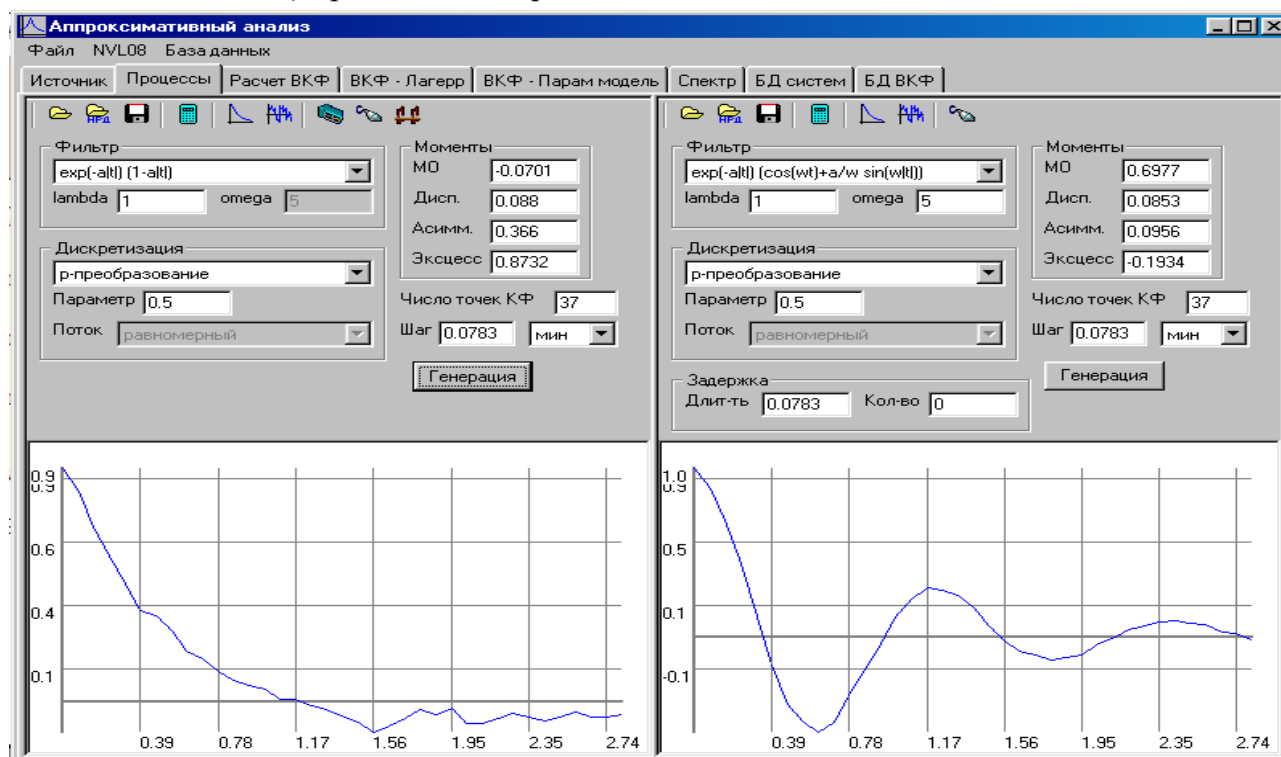


Рисунок 2.1. Корреляционные функции пары процессов неэквидистантных временных рядов

Предлагаем сравнить с результатами определения корреляционной функции процессов с равномерной дискретизации:

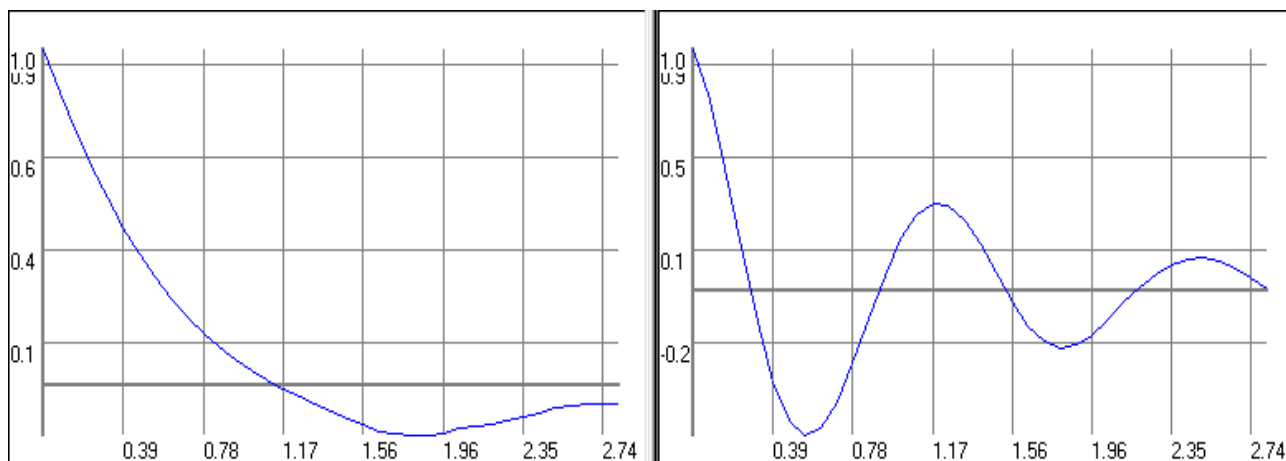


Рисунок 2.2. Корреляционные функции регулярных рядов

После получения пары процессов необходимо определить их взаимную корреляционную функцию на странице 3:

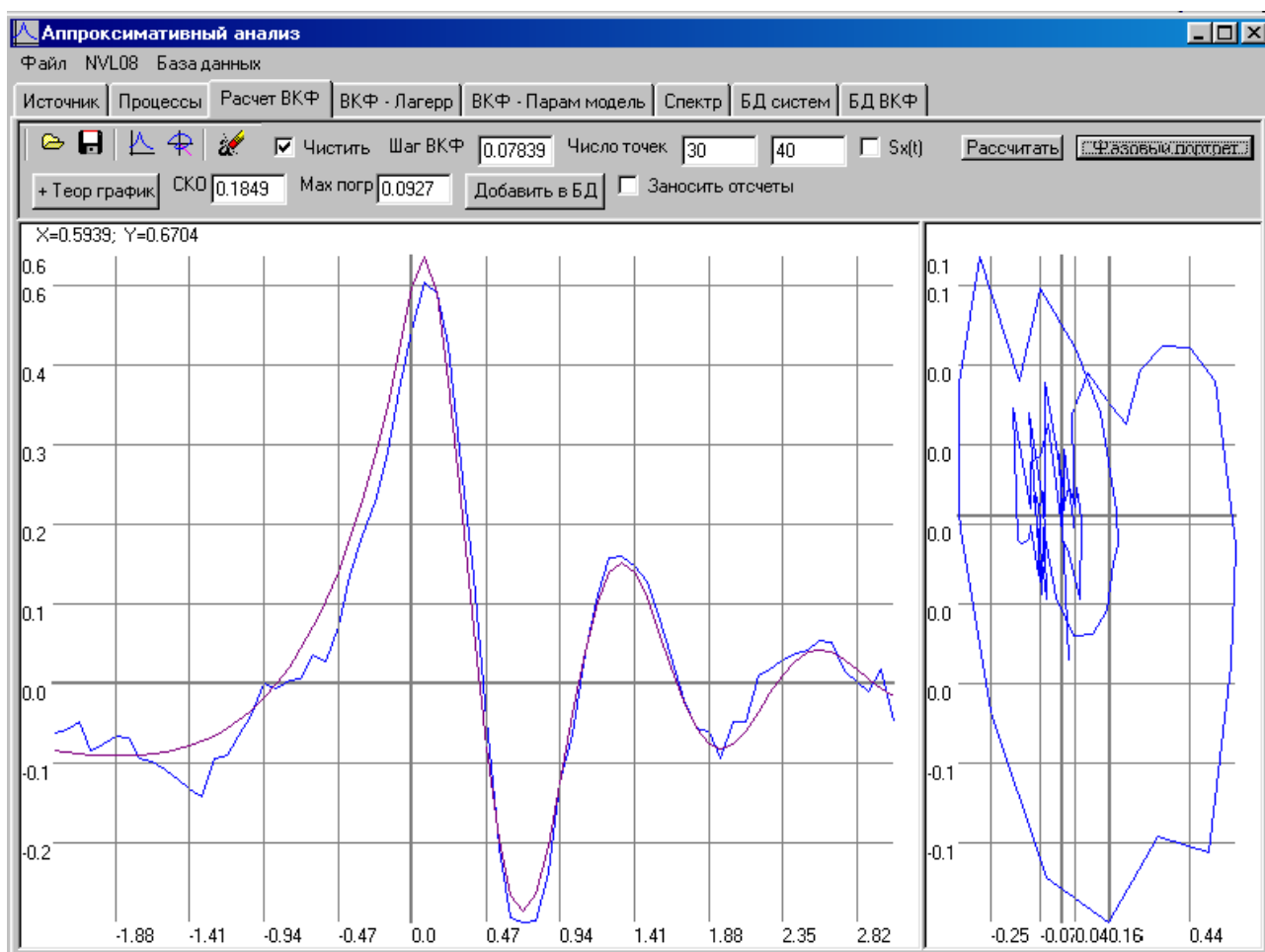


Рисунок 2.3. Взаимная корреляционная функция неэквилистантного временного ряда и её фазовый портрет

В этой работе нужно провести 29 экспериментов по генерации пары неэквидистантных временных рядов и оценить погрешность сравнительно с аналитической взаимной корреляционной функцией. Как и в первой работе, можно использовать базу данных или заносить погрешности вручную в таблицу 2.1. Так для р-преобразования с параметром 0,5 имеем:

Результаты моделирования

Таблица 2.1

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
СКО	0,1771	0,1548	0,2483	0,155	0,2073	0,1888	0,1816
Мах погрешность	0,0965	0,0824	0,1492	0,0653	0,11	0,1136	0,0918
Номер эксперимента	8	9	10	11	12	13	14
СКО	0,2149	0,1981	0,2162	0,1585	0,2082	0,2019	0,2687
Мах погрешность	0,0948	0,0973	0,1232	0,1037	0,1161	0,0975	0,1509
Номер эксперимента	15	16	17	18	19	20	21
СКО	0,2123	0,1943	0,1713	0,2135	0,1855	0,1763	0,2116
Мах погрешность	0,106	0,0873	0,0877	0,1241	0,1059	0,1095	0,1119
Номер эксперимента	22	23	24	25	26	27	28
СКО	0,2046	0,1868	0,2126	0,18	0,2391	0,2289	0,2148
Мах погрешность	0,1094	0,0798	0,1057	0,0946	0,1369	0,0928	0,0857
Номер эксперимента	29						
СКО	0,2023						
Мах погрешность	0,0962						

После подсчета погрешностей матожидание СКО составит 0,2006, максимальная погрешность – 0,1509.

2.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание у преподавателя: вид корреляционных функций, значения их параметров, модель нерегулярной дискретизации, значения её параметров.
2. Определить интервал дискретизации ВКФ.
3. Сгенерировать «белый шум».
4. Сгенерировать пару временных рядов с заданными видами корреляционных функций и заданными параметрами – $N=5000$ (интервал дискретизации определить исходя из погрешности восстановления корреляционной функции $\delta = 0,02$).
5. Для каждой пары временных рядов с помощью алгоритма нерегулярной дискретизации сгенерировать пару неэквидистантных временных рядов с заданными параметрами нерегулярной дискретизации (рассмотреть модели с р-преобразованием, «дрожанием» и аддитивной случайной дискретизацией).
6. Для каждой пары неэквидистантных временных рядов с помощью алгоритма с использованием интервальной корреляционной функции определить взаимную корреляционную функцию и построить её аналитический график.
7. Определить погрешности оценивания ВКФ и занести их в БД. (В случае отсутствия БД оформить таблицу).
8. Повторить пункты 3-7 29 раз.

9. Определить погрешность генерации пары процессов методом имитационного моделирования.
10. Оформить отчет.

2.3. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Метод и алгоритм моделирования неэквидистантного временного ряда с заданным видом корреляционной функции и модели нерегулярной дискретизации.
3. Графики двух процессов.
4. График полученной ВКФ.
5. Аналитическое выражение взаимной корреляционной функции.
6. Результаты имитационного моделирования.
7. Выводы по работе.

2.4. Контрольные вопросы

1. Назовите основные свойства потоков событий.
2. Каким образом задаются потоки случайных событий?
3. Назовите основные классы неэквидистантных временных рядов.
4. Назовите типовые модели неэквидистантных временных рядов.
5. Назовите основные характеристики неэквидистантных временных рядов.
6. Каким образом генерируются неэквидистантные временные ряды?
7. Что характеризует интервальная корреляционная функция?
8. Назовите основные методы корреляционного анализа неэквидистантных временных рядов.
9. К какому классу алгоритмов относятся алгоритмы корреляционного анализа с использованием интервальной корреляционной функции?

3. АППРОКСИМАЦИЯ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ЛАГЕРРА

Цель работы: изучение методов аппроксимации взаимной корреляционной функции ортогональными функциями Лагерра.

3.1. Содержание лабораторной работы

Лабораторная работа включает в себя генерацию пары процессов с равномерной и неравномерной дискретизацией, определение взаимной корреляционной функции и аппроксимацию ВКФ ортогональными рядами Лагерра. Она основана на первых двух работах, поэтому часть, посвященная получению пары процессов с равномерной и неравномерной дискретизацией, считается изученной и здесь опущена. В предлагаемом примере следует установить задержку для второго процесса на 10 интервалов дискретизации.

Итак, после генерации пары процессов взаимная корреляционная может быть определена, как показано на рис. 3.1.

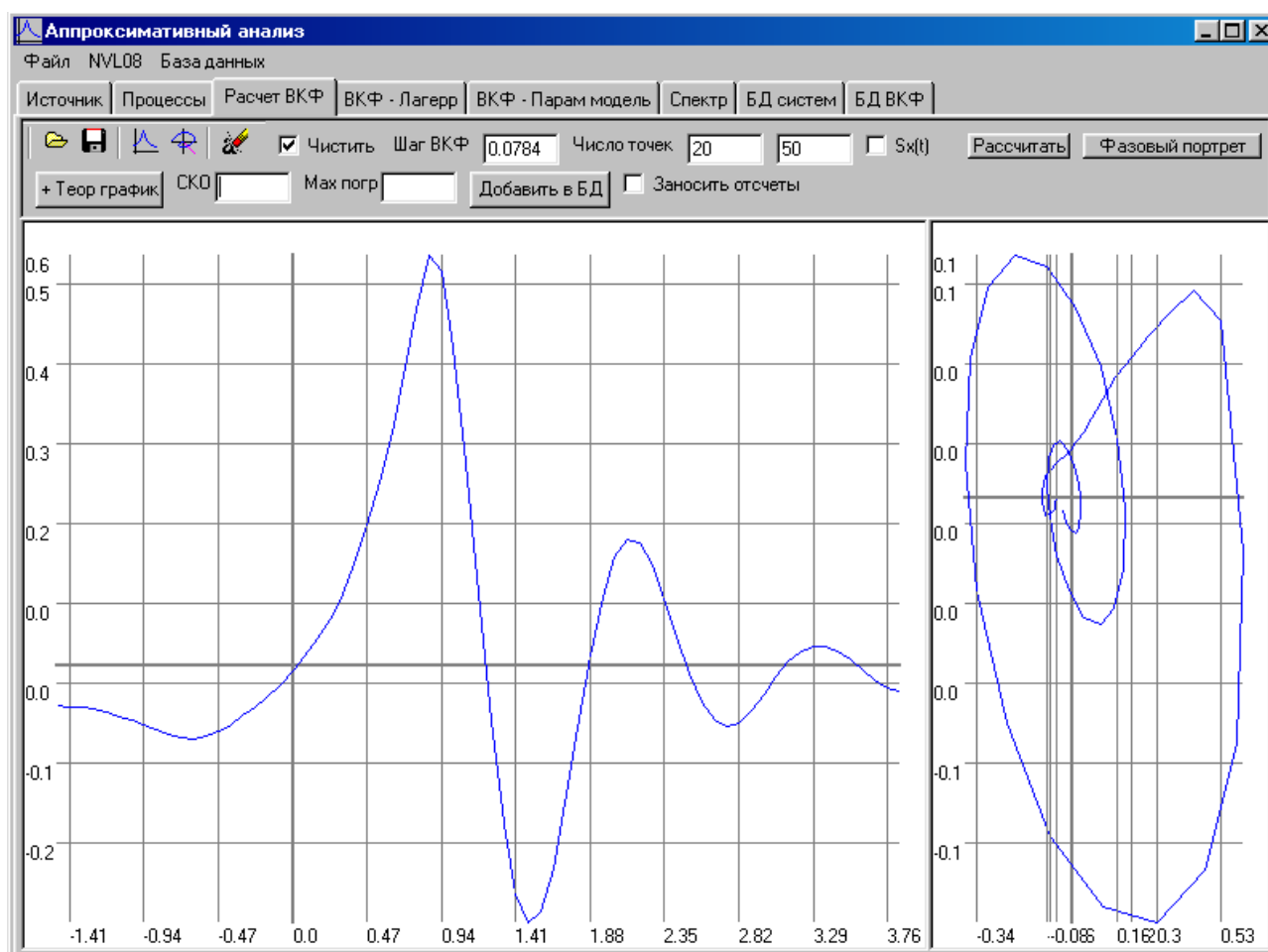


Рисунок 3.1. Взаимная корреляционная функция и её фазовый портрет

Перейдем на страницу 4 и определим параметры аппроксимирующего выражения Лагерра для этой функции. Для этого следует установить флажок «beta/be» и «Мах в нуль». Далее необходимо подобрать параметры аппроксимирующего выражения. Необходимо установить рекомендуемый метод интегрирования Симпсона в соответствующем окне. После нажатия на кнопку «Оптим», необходимо рассчитать рекомендуемые значения сначала для α , затем для числа членов разложения m . Для некоторого круга функций значение α , определяемое методом, используемым в системе (он указан в описании системы), не является оптимальным. Этот метод позволяет «акцентировать» внимание на начале функции и при достаточно небольшом числе членов разложения получить удовлетворительную аппроксимацию. Однако в некоторых случаях необходимо точно подобрать выражение и для «хвоста» функции. Поэтому, рекомендуем на основе предложенного значения α подобрать параметр, при котором среднеквадратическая погрешность аппроксимации ветви будет минимальной.

Следующим шагом является выбор числа членов разложения. Здесь нужно задать интервал, в котором производится поиск оптимального числа. График погрешности при различном числе членов разложения можно посмотреть после нажатия на «Граф ошибок».

Для указанного варианта картина аппроксимации представлена на рис. 3.2.

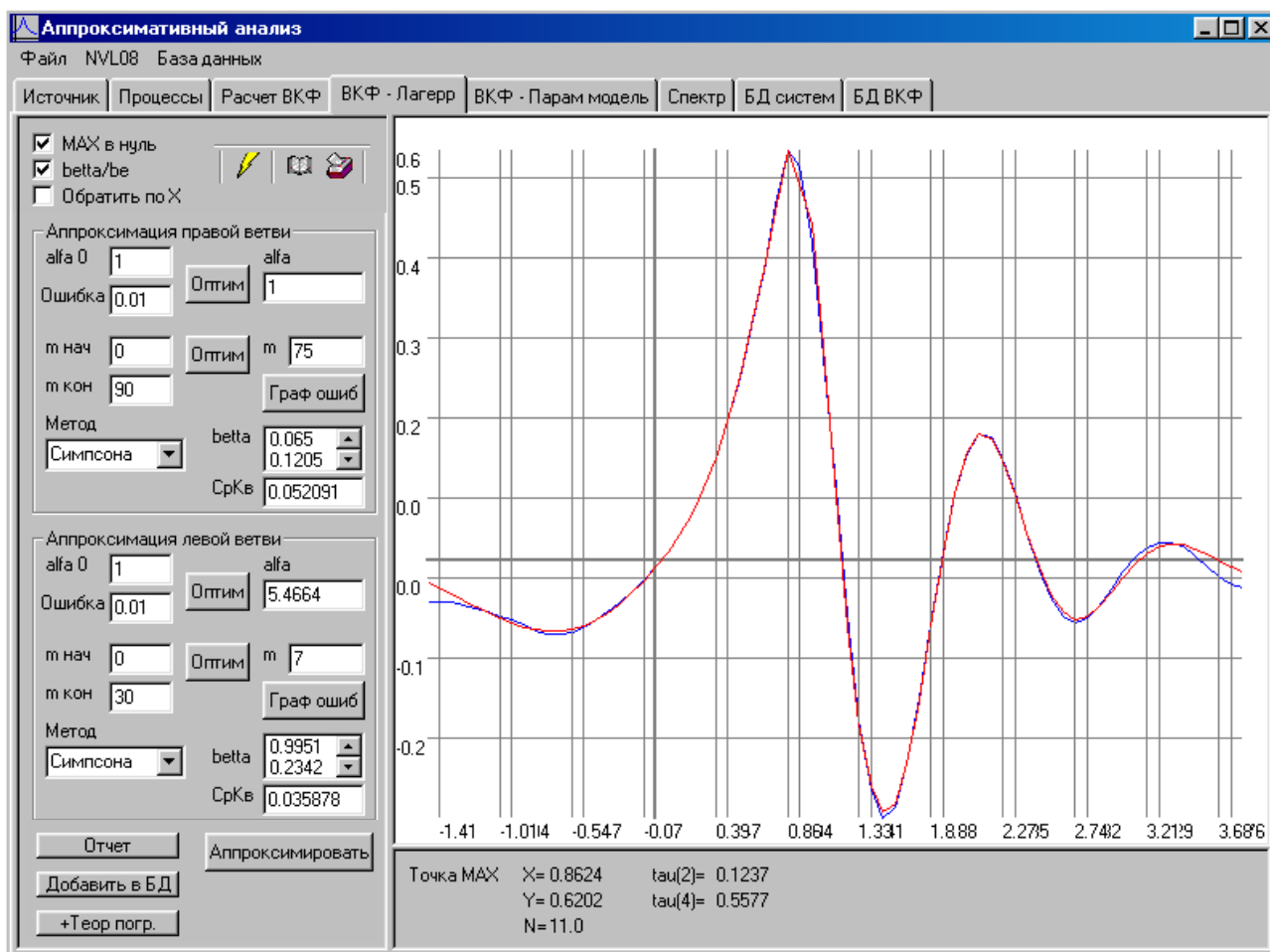


Рисунок 3.2. Результаты аппроксимация взаимной корреляционной функции ортогональными функциями Лагерра

Зависимость полной погрешности от числа членов разложения ряда при заданном значении α для правой ветви приведена на рис. 3.3.

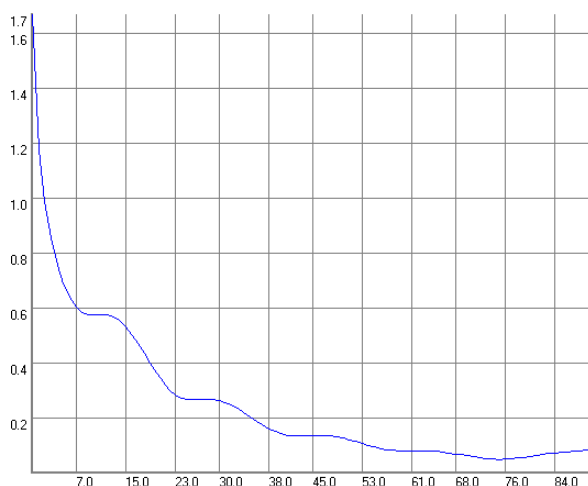


Рисунок 3.3

Видно, что при большом числе членов разложения погрешность меняется незначительно, поэтому, можно выбрать и меньшее значение параметра α .

На рис. 3.4 приведен пример аппроксимации при ручном подборе параметра α . Как следует из рисунка, уменьшение значения параметра α приводит к увеличению членов разложения ряда.

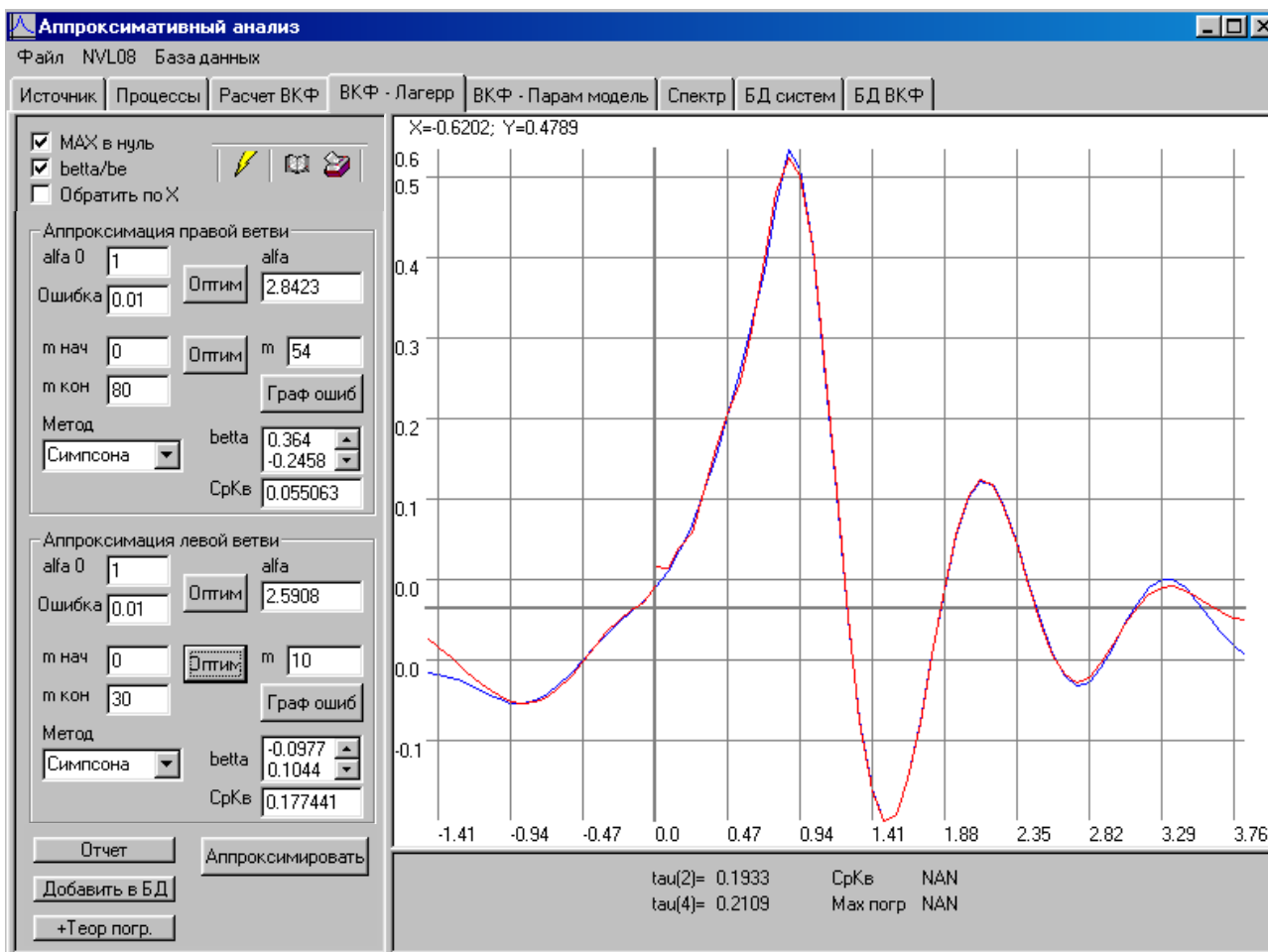


Рисунок 3.4. Результаты аппроксимации

Суть работы состоит в проведении 29 экспериментов аппроксимации взаимных корреляционных функций процессов, полученных после фильтрации 29 разных «белых шумов». Необходимо определить методическую погрешность аппроксимации функциями Лагерра при помощи базы данных, либо вручную. Результаты эксперимента приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
СКО	0,0521	0,0393	0,0699	0,0481	0,0382	0,0465	0,0644
	0,0359	0,0618	0,0474	0,0879	0,0783	0,0751	0,0436
Мах погрешность	0,0426	0,0394	0,0421	0,0410	0,0403	0,0401	0,0437
	0,0145	0,0384	0,0404	0,0086	0,0470	0,0449	0,0140
Номер эксперимента	8	9	10	11	12	13	14
СКО	0,0315	0,0660	0,0447	0,0412	0,0533	0,0433	0,0370
	0,0787	0,0385	0,0607	0,0898	0,0511	0,0703	0,0809
Мах погрешность	0,0350	0,0422	0,0379	0,0374	0,0427	0,0401	0,0388
	0,0413	0,0292	0,0433	0,0464	0,0249	0,0421	0,0158
Номер эксперимента	15	16	17	18	19	20	21
СКО	0,0362	0,0428	0,0320	0,0523	0,0403	0,0419	0,0753
	0,0733	0,0585	0,0710	0,0513	0,0898	0,0933	0,0346
Мах погрешность	0,0367	0,0413	0,0324	0,0434	0,0392	0,0397	0,0429
	0,0391	0,0365	0,0370	0,0404	0,0392	0,0465	0,0260
Номер эксперимента	22	23	24	25	26	27	28
СКО	0,0325	0,0453	0,0483	0,0333	0,0500	0,0379	0,0595
	0,0877	0,0744	0,0516	0,0745	0,0375	0,0698	0,0604
Мах погрешность	0,0366	0,0406	0,0408	0,0365	0,0409	0,0392	0,0438
	0,0360	0,0400	0,0132	0,0373	0,0114	0,0487	0,0143
Номер эксперимента	29						
СКО	0,0451						
	0,0500						
Мах погрешность	0,0418						
	0,0231						

После подсчета погрешностей матожидание СКО составит 0.0556, максимальная погрешность – 0.0487.

Соотношение графиков аналитически определенной ВКФ и аппроксимирующего выражения представлено на рисунке 3.5.

Отметим, что погрешность, вызванная такими параметрами, как, например, конечность выборки исходного «белого шума», и погрешность аппроксимации могут компенсировать друг друга.

Аналогичный эксперимент нужно провести и в случае использования неравномерной дискретизации. Процедура аппроксимации выглядит аналогично описанной выше, однако аппроксимация ВКФ НВР дает большую погрешность сравнительно с рассмотренным выше примером. Однако, даже при потере половины отсчетов, удается найти аппроксимирующее выражение с достаточно небольшой погрешностью. Это иллюстрирует рисунок 3.6 и результаты, представленные в таблице 3.2.

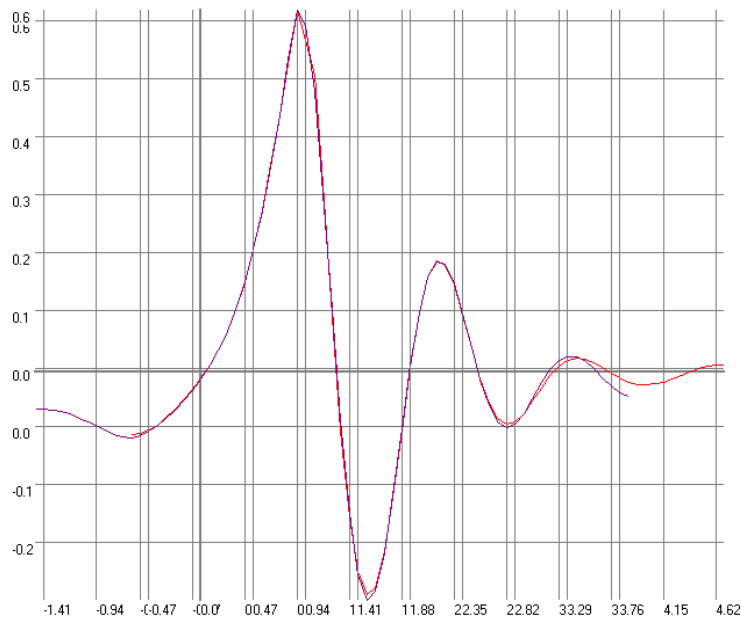


Рисунок 3.5

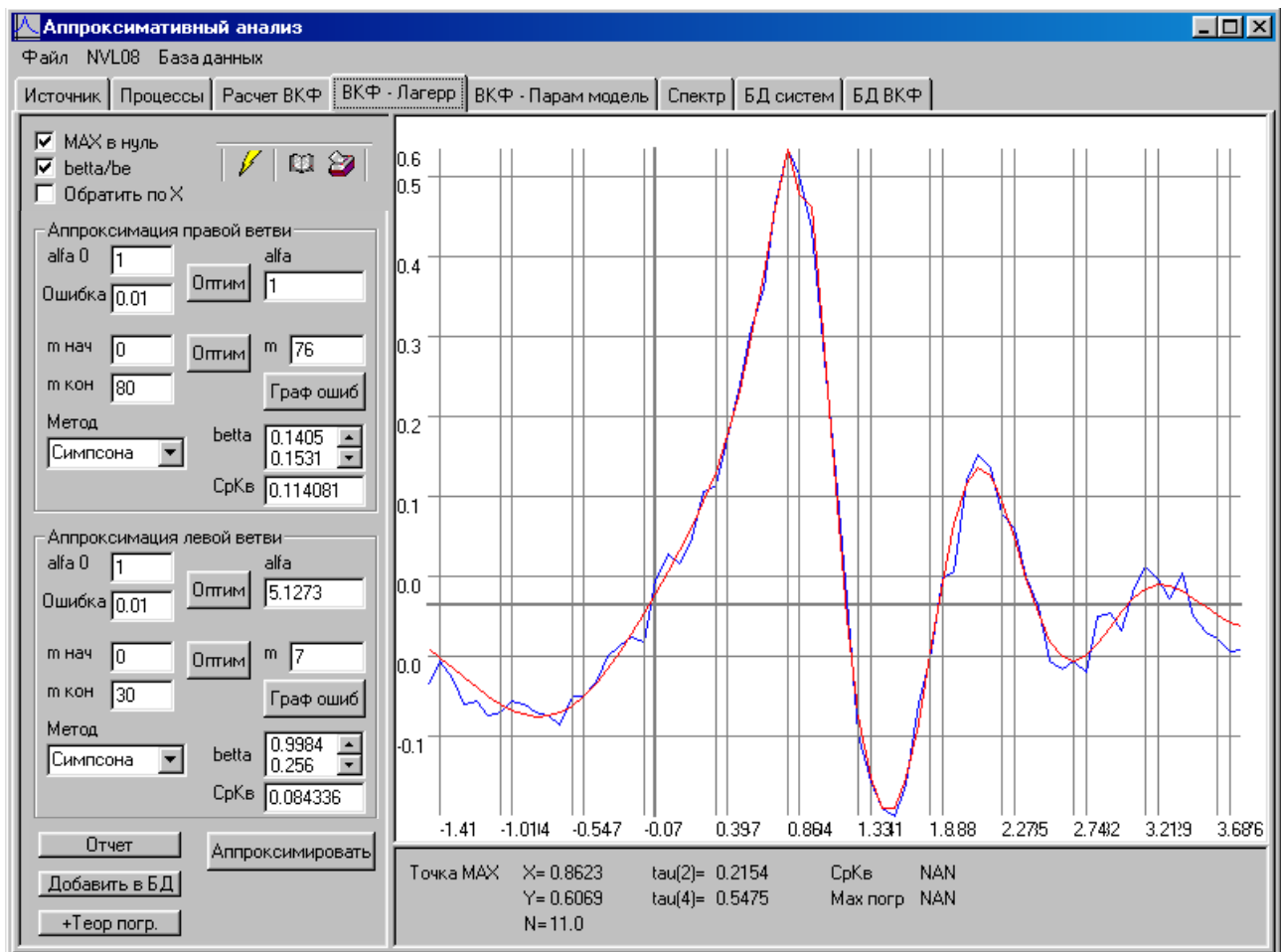


Рисунок 3.6. Результаты аппроксимации

Погрешности аппроксимации

Таблица 3.2

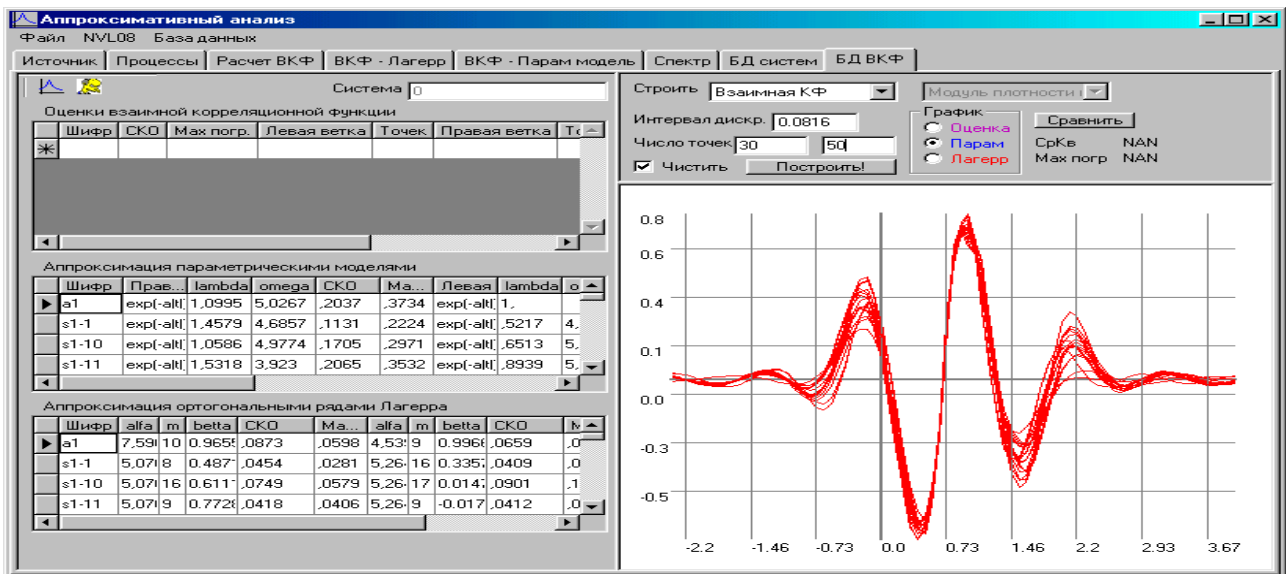
Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
СКО	0,0789	0,0982	0,0927	0,0974	0,0952	0,1298	0,0966
	0,0858	0,0731	0,0887	0,0913	0,0657	0,0840	0,0913
Мах погрешность	0,0778	0,0648	0,0860	0,0931	0,0650	0,1369	0,0940
	0,0590	0,0559	0,0729	0,0910	0,0548	0,0812	0,0646
Номер эксперимента	8	9	10	11	12	13	14
СКО	0,0869	0,0799	0,1008	0,0760	0,1204	0,1002	0,1026
	0,0905	0,0728	0,0743	0,0755	0,0679	0,0979	0,0620
Мах погрешность	0,0634	0,0891	0,0964	0,0513	0,1439	0,0709	0,0824
	0,0775	0,0555	0,0796	0,0836	0,0619	0,0852	0,0471
Номер эксперимента	15	16	17	18	19	20	21
СКО	0,1078	0,0941	0,0967	0,0902	0,0921	0,1041	0,1079
	0,1073	0,0831	0,2573	0,0863	0,0827	0,0804	0,0846
Мах погрешность	0,0847	0,0761	0,0790	0,0814	0,0724	0,1239	0,0874
	0,1030	0,0647	0,3550	0,0578	0,0721	0,0593	0,0897
Номер эксперимента	22	23	24	25	26	27	28
СКО	0,1141	0,0878	0,0901	0,1164	0,1094	0,0878	0,0822
	0,0843	0,0718	0,0821	0,0752	0,0717	0,0820	0,0771
Мах погрешность	0,1063	0,0604	0,0872	0,1253	0,1083	0,0822	0,0671
	0,0808	0,0772	0,0800	0,0522	0,0722	0,0593	0,0539
Номер эксперимента	29						
СКО	0,0958						
	0,0763						
Мах погрешность	0,0742						
	0,0720						

После подсчета погрешностей матожидание СКО составит 0.0923, максимальная погрешность – 0.355.

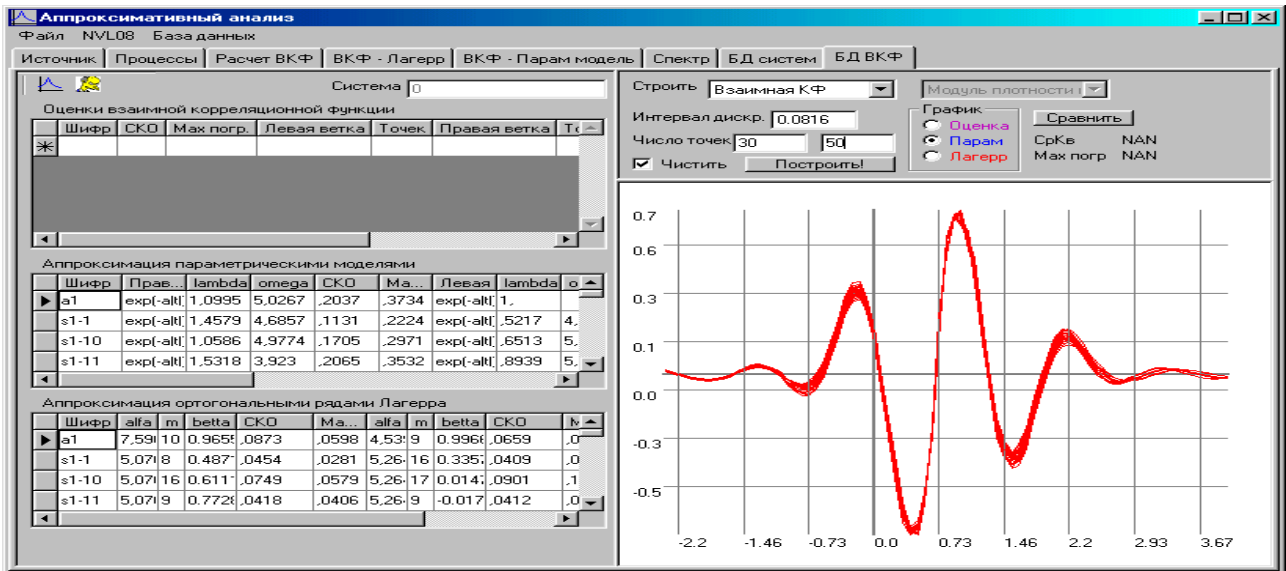
На рисунке 3.7 приведены результаты аппроксимации взаимной корреляционной функции ортогональными функциями Лагерра при разных объемах выборки и количествах отсчетов взаимной корреляционной функции.

3.2. Задание на самостоятельную работу

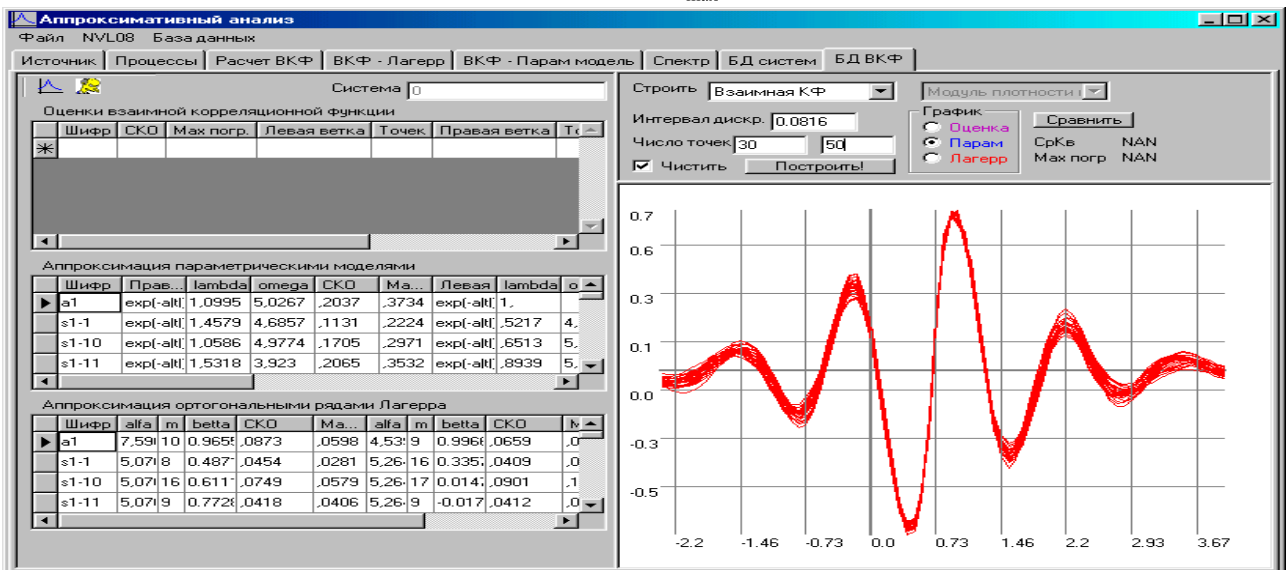
1. Получить задание: вид функций, параметры.
2. Определить интервал дискретизации, сгенерировать «белый шум», получить пару процессов с равномерной дискретизацией.
3. Оценить ВКФ и построить аналитический график.
4. Аппроксимировать ВКФ ортогональными функциями Лагерра и занести результаты аппроксимации с указанием погрешностей в БД. (В случае отсутствия БД оформить таблицу.)
5. Повторить процедуру аппроксимации для 29 разных генераций «белого шума».
6. Определить методическую погрешность аппроксимации ВКФ методом имитационного моделирования.



а) $M=500, J_{\max} = 20$



б) $M=5000, J_{\max} = 20$



в) $M=5000, J_{\max} = 40$

Рисунок 3.7. Результаты аппроксимации ВКФ функциями Лагерра

7. Получить пару процессов с неравномерной дискретизацией, предварительно задав параметры дискретизации.
8. Оценить ВКФ НВР и построить аналитический график.
9. Аппроксимировать ВКФ НВР ортогональными функциями Лагерра и занести результаты аппроксимации с указанием погрешностей в БД (в случае отсутствия БД оформить таблицу).
10. Повторить процедуру аппроксимации для одной генерации «белого шума» для 29 разных генераций пары НВР.
11. Определить методическую погрешность аппроксимации ВКФ НВР методом имитационного моделирования.
12. Оформить отчет.

3.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Метод и алгоритмы аппроксимации корреляционных функций ортогональными функциями Лагерра.
3. График полученной ВКФ и аппроксимирующего выражения для пары СП с равномерной дискретизацией.
4. График полученной ВКФ и аппроксимирующего выражения для пары СП с неравномерной дискретизацией.
5. Результаты имитационного моделирования.
6. Выводы по работе.

3.4. Контрольные вопросы

1. Какие параметры описывают ортогональное разложение корреляционной функции и спектральной плотности мощности?
2. Из каких соображений выбирается начальное приближение параметра ортогональных функций Лагерра?
3. Какие методы оценки параметра функций Лагерра Вы знаете?
4. Назовите самый простой метод оценки параметра функций Лагерра.
5. Почему увеличение числа членов разложения ортогонального ряда не всегда приводит к уменьшению погрешности аппроксимации?
6. В чём заключается основное «неудобство» ортогональных разложений?

4. АППРОКСИМАЦИЯ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ФУНКЦИЯМИ ЗАДАННОГО ВИДА

Цель работы: изучение методов аппроксимации взаимной корреляционной функции функциями заданного вида.

4.1. Содержание лабораторной работы

При наличии априорной информации о случайных процессах в паре при аппроксимации взаимных корреляционных функций в ряде случаев эффективным является метод аппроксимации функциями заданного вида.

К достоинствам этого метода можно отнести незначительное влияние на него неравномерности дискретизации процессов, к недостатку – ограниченное число используемых параметрических моделей, необходимость наличия априорной информации о виде выражения и более узкий, сравнительно с функциями Лагерра, круг аппроксимируемых ВКФ.

Сложность идентификации процесса в паре может снять использование фазовых портретов функций модели и ветви ВКФ.

В данной лабораторной работе необходимо провести аппроксимацию для пары случайных процессов с равномерной и неравномерной дискретизацией.

Для функций нашего варианта, исследуемых в предыдущих работах, проведем аппроксимацию параметрическими моделями сначала для равномерной дискретизации, затем для НВР. В ходе аппроксимации будем учитывать погрешности для того, чтобы в конце работы, основываясь на методе имитационного моделирования, определить методическую погрешность аппроксимации ВКФ функциями заданного вида.

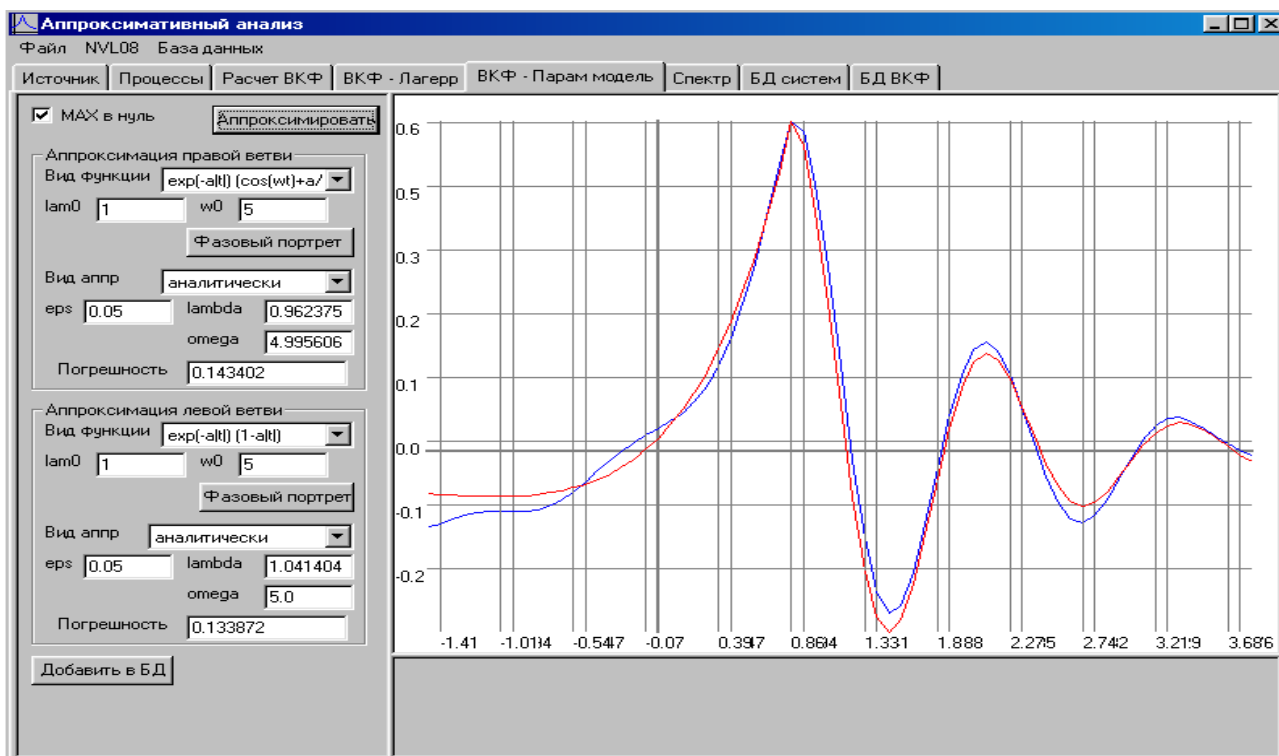


Рисунок 4.1. Результаты аппроксимации взаимной корреляционной функции функциями заданного вида

Приведем также фазовые портреты, построенные для правой и левой ветвей. Фазовые портреты играют ключевую роль при определении вида модели в случае выбора аппроксимирующего выражения. Особенно информативным здесь является участок функции в начале графика (близкий к значению функции 1). Совпадение аппроксимирующей и исходной функции на этом участке, так называемом «хвосте», говорит о правильном выборе аппроксимирующего выражения и служит критерием при аппроксимации.

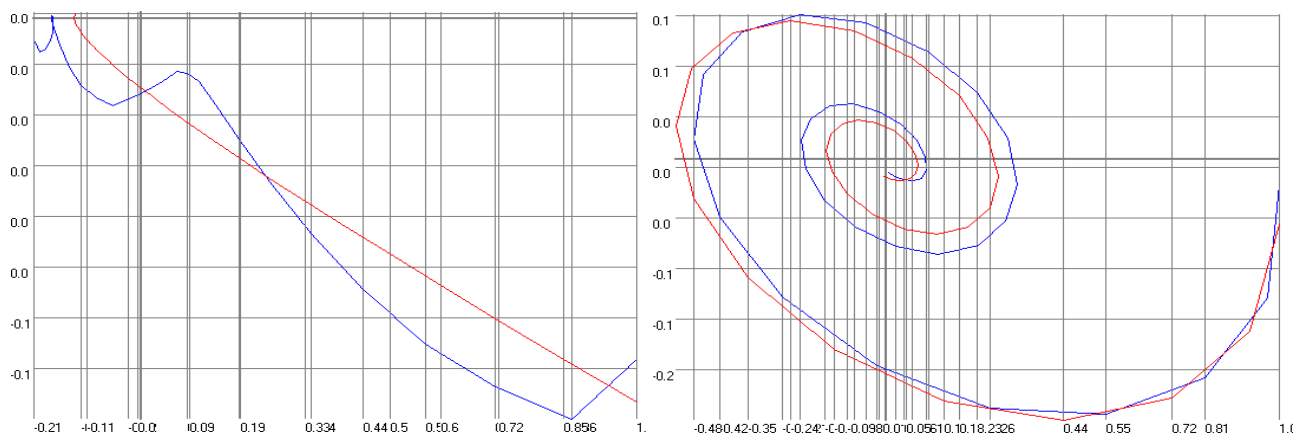


Рисунок 4.2. Фазовые портреты левой и правой ветвей взаимной корреляционной функции

Так выглядит результат аппроксимации ВКФ параметрическими моделями. Отметим, что аналитический вид аппроксимации дает более точный результат сравнительно с конечно-разностным методом или симплекс-методом (Нелдера-Мида), но обладает худшей сходимостью. Поэтому, если не удастся найти значения параметров выбранных выражений, рекомендуем или изменить начальные приближения, или использовать метод Нелдера-Мида. Значения параметров, полученные с помощью этого метода, могут стать затем начальными приближениями для аналитического метода.

Приведем также результаты аппроксимации ВКФ процессов с потерей отсчетов. Особо отметим трудность идентификации вида функции по фазовым портретам (см. рисунок 4.3).

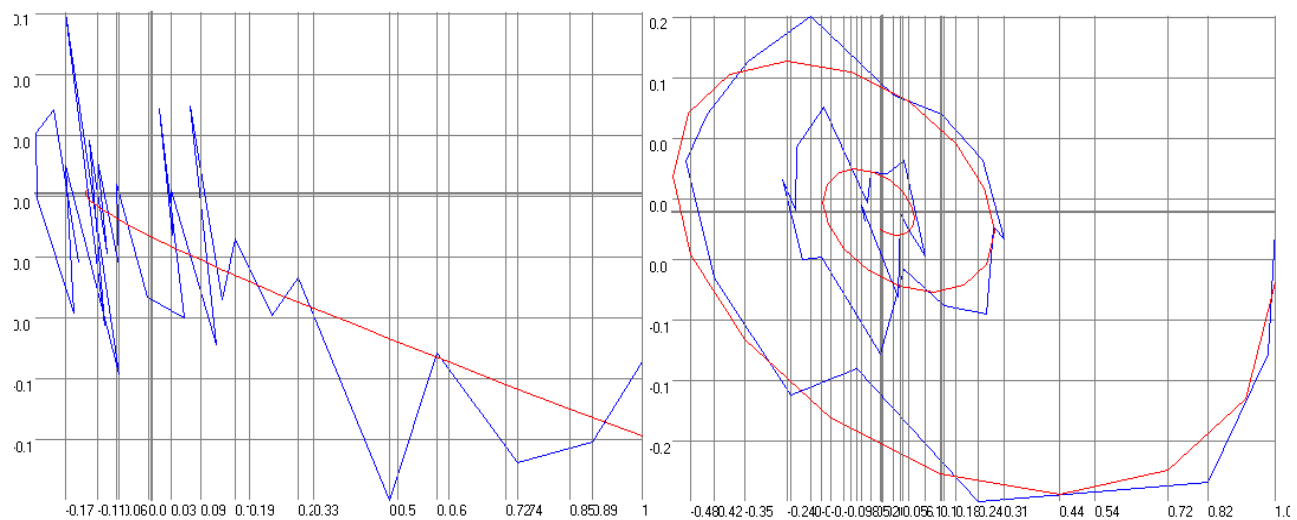


Рисунок 4.3. Фазовые портреты левой и правой ветвей взаимной корреляционной функции неэквидистантного временного ряда

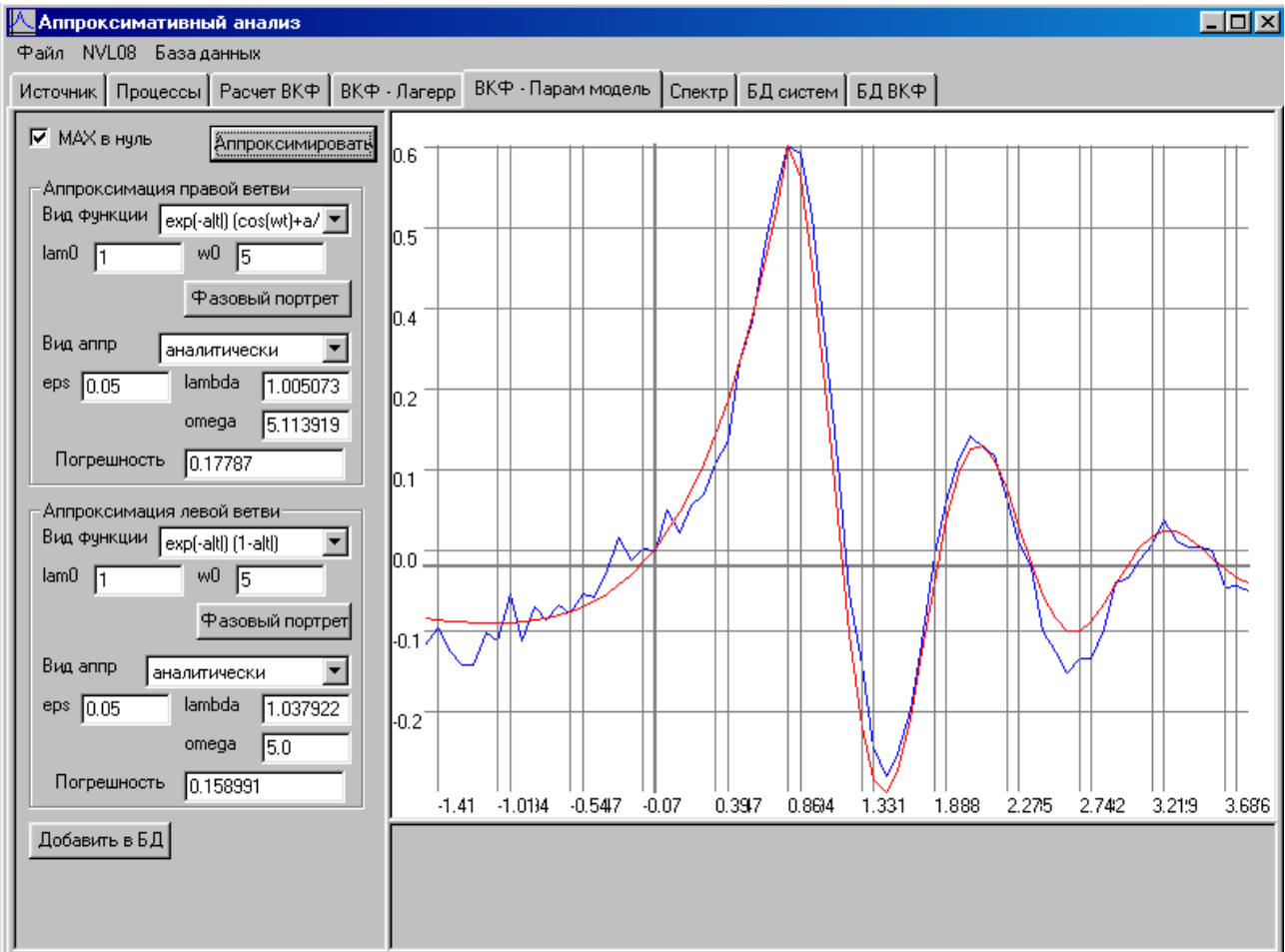


Рисунок 4.4. Результат аппроксимации взаимной корреляционной функции неэквидистантного временного ряда функциями заданного вида

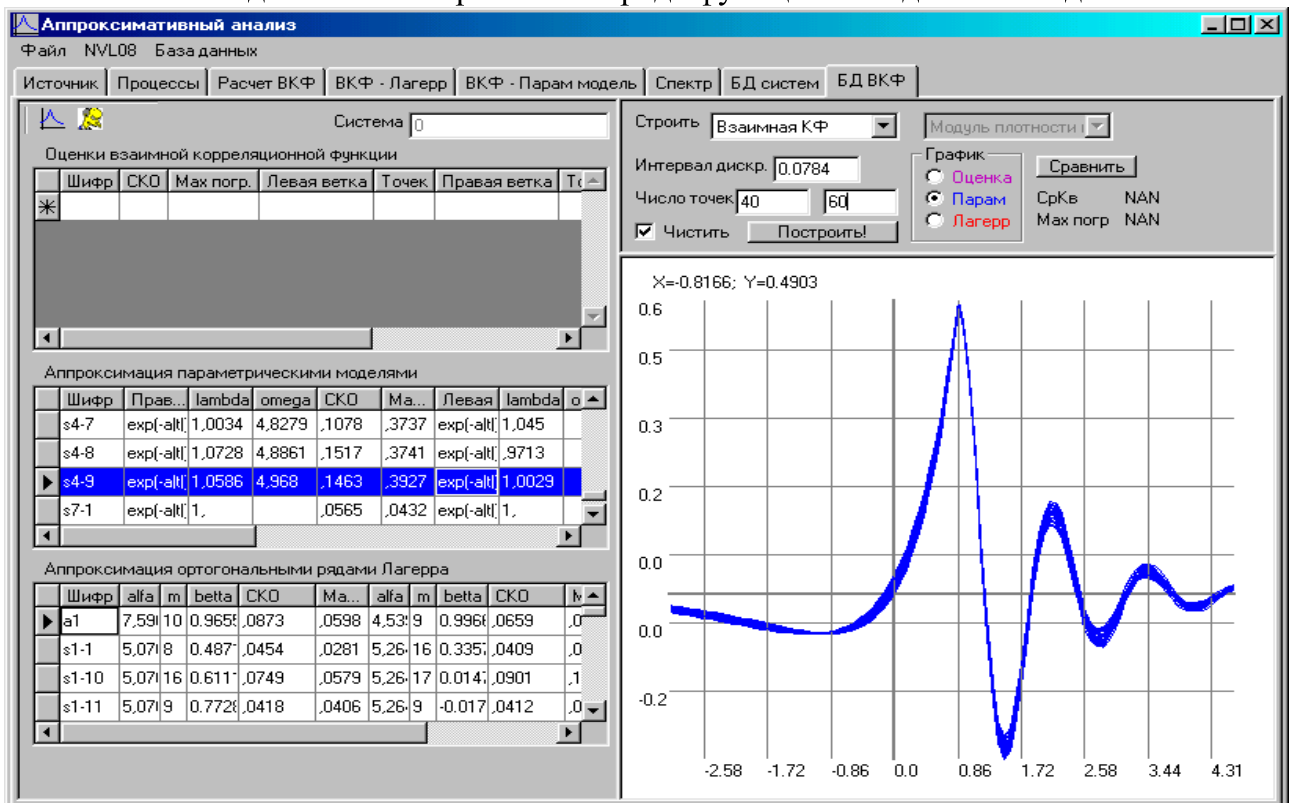


Рисунок 4.5. Результаты аппроксимации ВКФ

Результаты моделирования занесем в таблицы 4.1-4.2

Дискретизация равномерная

Таблица 4.1

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
СКО	0,1270	0,0827	0,1718	0,1080	0,0713	0,0940	0,1270
	0,1013	0,0970	0,1298	0,0992	0,0774	0,1617	0,1306
Мах погрешность	0,3812	0,3760	0,3860	0,3727	0,3780	0,3802	0,3829
	0,3765	0,3760	0,3706	0,3709	0,3776	0,3789	0,3723
Номер эксперимента	8	9	10	11	12	13	14
СКО	0,1114	0,1414	0,1250	0,1434	0,1047	0,0675	0,0705
	0,0696	0,1090	0,0881	0,1408	0,1604	0,1148	0,1188
Мах погрешность	0,3858	0,3915	0,3824	0,3803	0,3784	0,3758	0,3727
	0,3799	0,3732	0,3824	0,3740	0,3784	0,3758	0,3701
Номер эксперимента	15	16	17	18	19	20	21
СКО	0,0759	0,1369	0,1090	0,1029	0,1137	0,0528	0,1281
	0,1106	0,1768	0,1404	0,0939	0,1839	0,1361	0,1886
Мах погрешность	0,3690	0,3897	0,3833	0,3746	0,3756	0,3726	0,3892
	0,3690	0,3746	0,3753	0,3746	0,3756	0,3726	0,3819
Номер эксперимента	22	23	24	25	26	27	28
СКО	0,1054	0,1569	0,1334	0,0963	0,1095	0,1338	0,1240
	0,1288	0,1144	0,1678	0,1585	0,1495	0,0944	0,1032
Мах погрешность	0,3776	0,3832	0,3782	0,3917	0,3830	0,3814	0,3819
	0,3731	0,3709	0,3755	0,3783	0,3791	0,3790	0,3819
Номер эксперимента	29						
СКО	0,1040						
	0,1564						
Мах погрешность	0,3687						
	0,3673						

После подсчета погрешностей матожидание СКО составит 0.1195, максимальная погрешность – 0.3917.

Неэквидистантный временной ряд

Таблица 4.2

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
СКО	0,2212	0,1809	0,1899	0,1837	0,1789	0,1836	0,2229
	0,1503	0,1607	0,1678	0,1451	0,1708	0,1919	0,1551
Мах погрешность	0,3755	0,4143	0,3858	0,3664	0,3639	0,3204	0,3685
	0,3461	0,3917	0,3844	0,3532	0,3707	0,3766	0,4365
Номер эксперимента	8	9	10	11	12	13	14
СКО	0,1565	0,1608	0,1597	0,1691	0,1772	0,1361	0,1495
	0,2036	0,1507	0,1475	0,1920	0,1792	0,1680	0,1852
Мах погрешность	0,3886	0,3914	0,3786	0,4322	0,3744	0,3599	0,4100
	0,3886	0,3896	0,3786	0,5421	0,3672	0,3599	0,3821

Продолжение таблицы 4.2

Номер эксперимента	15	16	17	18	19	20	21
СКО	0,1710	0,2132	0,1580	0,1675	0,2120	0,1473	0,1913
	0,1777	0,1640	0,1519	0,1293	0,1708	0,1194	0,1792
Мах погрешность	0,3778	0,3706	0,3376	0,3842	0,3785	0,3633	0,3398
	0,3637	0,4370	0,3376	0,3842	0,4368	0,3633	0,3989
Номер эксперимента	22	23	24	25	26	27	28
СКО	0,1218	0,1454	0,1384	0,1926	0,2060	0,1409	0,1933
	0,1501	0,1684	0,1792	0,1231	0,1702	0,1703	0,1204
Мах погрешность	0,3947	0,3790	0,3871	0,4261	0,3440	0,3722	0,4073
	0,3947	0,3790	0,4348	0,3883	0,4107	0,3704	0,3750
Номер эксперимента	29						
СКО	0,2425						
	0,1383						
Мах погрешность	0,4572						
	0,4204						

После подсчета погрешностей матожидание СКО составит 0.1688, максимальная погрешность – 0.5421.

Приведем иллюстрацию к описанному выше решению задачи идентификации на основе сравнения фазовых портретов. На рисунке 4.6 изображены фазовые портреты правой ветви взаимной корреляционной функции двух процессов. Сравнения графиков в области, близкой к единице, может дать достаточно информации для успешной идентификации модели.

4.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: вид функций, параметры.
2. Определить интервал дискретизации, сгенерировать «белый шум», получить пару процессов с равномерной дискретизацией.
3. Оценить ВКФ и построить аналитический график.
4. Аппроксимировать ВКФ параметрическими моделями и занести результаты аппроксимации с указанием погрешностей в БД (в случае отсутствия БД оформить таблицу).
5. Повторить процедуру аппроксимации для 29 разных генераций «белого шума».
6. Определить методическую погрешность аппроксимации ВКФ методом имитационного моделирования.
7. Получить пару процессов с неравномерной дискретизацией, предварительно задав параметры дискретизации.
8. Оценить ВКФ НВР и построить аналитический график.
9. Аппроксимировать ВКФ НВР параметрическими моделями и занести результаты аппроксимации с указанием погрешностей в БД. (В случае отсутствия БД оформить таблицу.)
10. Повторить процедуру аппроксимации для одной генерации «белого шума» для 29 разных генераций пары НВР.
11. Определить методическую погрешность аппроксимации ВКФ НВР методом имитационного моделирования.
12. Оформить отчет.

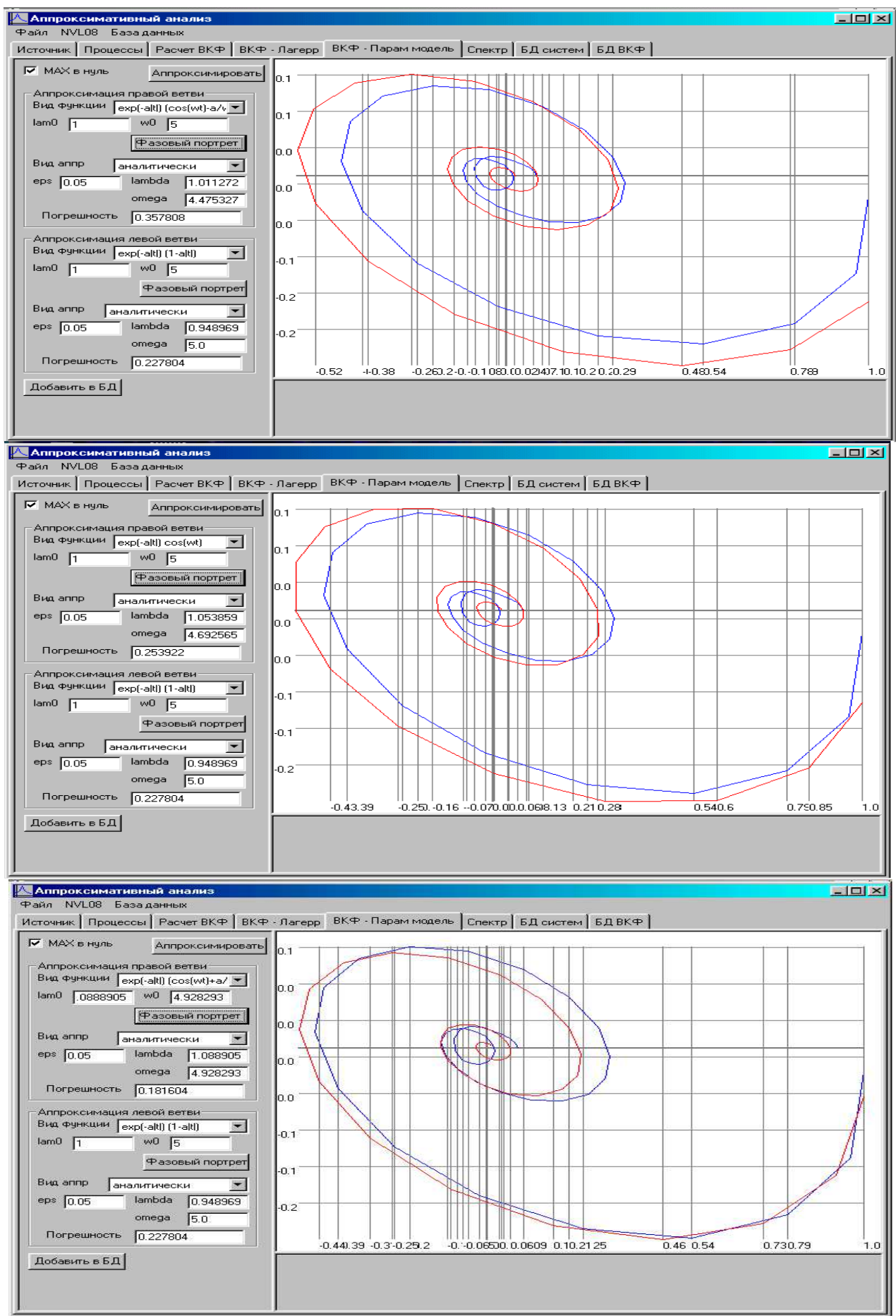


Рисунок 4.6. Фазовые портреты

4.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Графики двух процессов с равномерной дискретизацией.
4. График полученной ВКФ и аппроксимирующего выражения для пары СП с равномерной дискретизацией.
5. График полученной ВКФ и аппроксимирующего выражения для пары СП с неравномерной дискретизацией.
6. Результаты имитационного моделирования.

4.4. Контрольные вопросы

1. Какие численные методы применяются при аппроксимации корреляционных функций и спектральных плотностей мощности?
2. Какой участок фазового портрета является самым информативным?
3. Как отличить фазовый портрет колебательной корреляционной функции от фазового портрета монотонной корреляционной функции?
4. Из каких соображений выбирается начальное приближение при аппроксимации корреляционных функций параметрическими моделями?
5. Какой метод аппроксимации корреляционных функций параметрическими моделями обладает лучшей сходимостью?
6. Какой метод аппроксимации проще реализовать?
7. В чём заключается специфика аппроксимации взаимных корреляционных функций по сравнению с аппроксимацией автокорреляционных функций?
8. Можно ли идентифицировать модель корреляционной функции неэквидистантного временного ряда по фазовому портрету?
9. Как образом производится идентификация модели корреляционной функции неэквидистантного временного ряда?
10. Из каких соображений выбирается начальное приближение при аппроксимации корреляционных функций неэквидистантного временного ряда параметрическими моделями?
11. В чём заключается специфика аппроксимации корреляционных функций неэквидистантного временного ряда параметрическими моделями?
12. Каким образом производится аппроксимация спектральных плотностей мощности неэквидистантных временных рядов?

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРИ ОТСЧЕТОВ НА КАЧЕСТВО АППРОКСИМАЦИИ

Цель работы: изучение особенностей аппроксимации в случае недостаточного объема информации.

5.1. Содержание лабораторной работы

Рассмотрим следующую схему:

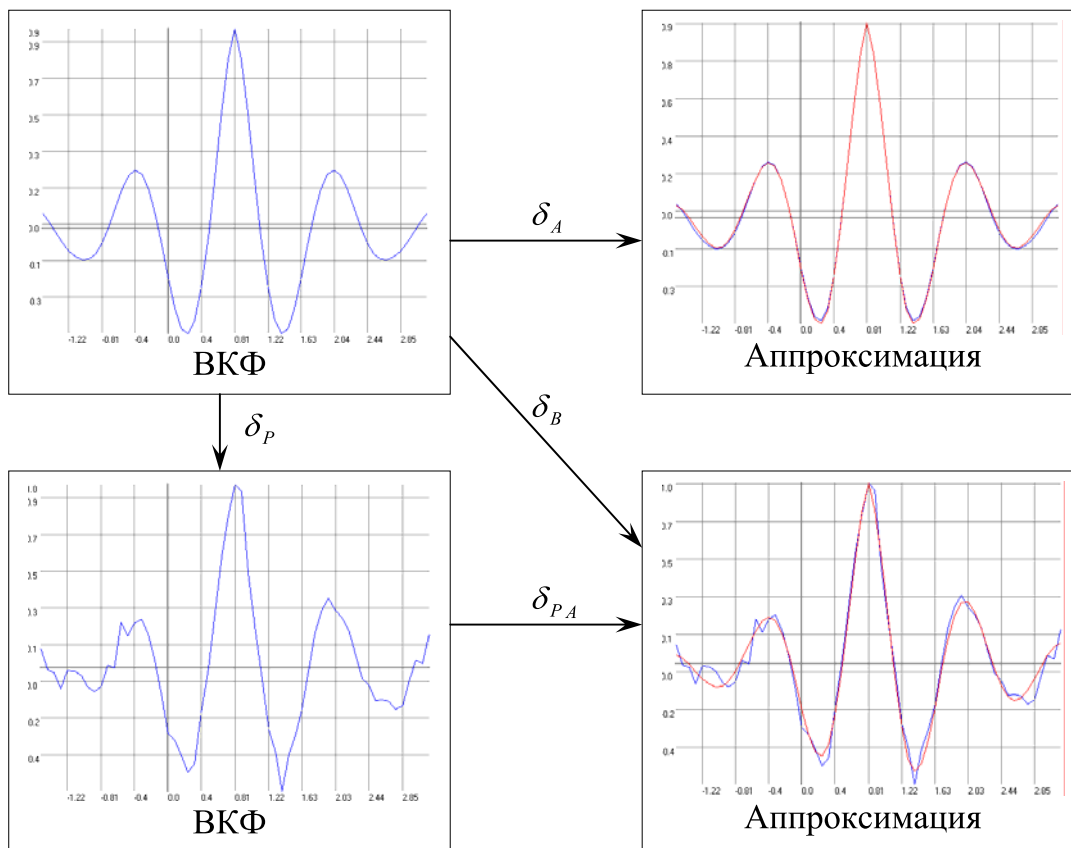


Рисунок 5.1. Аппроксимация ВКФ при потере отсчетов

Здесь

δ_P – погрешность, вызванная потерей отсчетов;

δ_A – погрешность аппроксимации ВКФ;

δ_{PA} – погрешность аппроксимации ВКФ процессов с потерей отсчетов;

δ_B – погрешность, сравнительно со значениями ВКФ процессов без потери.

Процедура аппроксимации, кроме того, что дает возможность представить в аналитической форме статистические данные, иногда позволяет снизить погрешность, вызванную неточностью или отсутствием данных. Такой возможностью в большей мере обладает аппроксимация параметрическими моделями.

Подобная ситуация возникает, например, при передаче данных по реальному каналу.

На рисунках 5.2–5.3 изображены графики взаимной корреляционной функции и ее аппроксимации параметрическими моделями и ортогональными рядами Лагерра для пары процессов с равномерной дискретизацией и с потерей отсчетов.

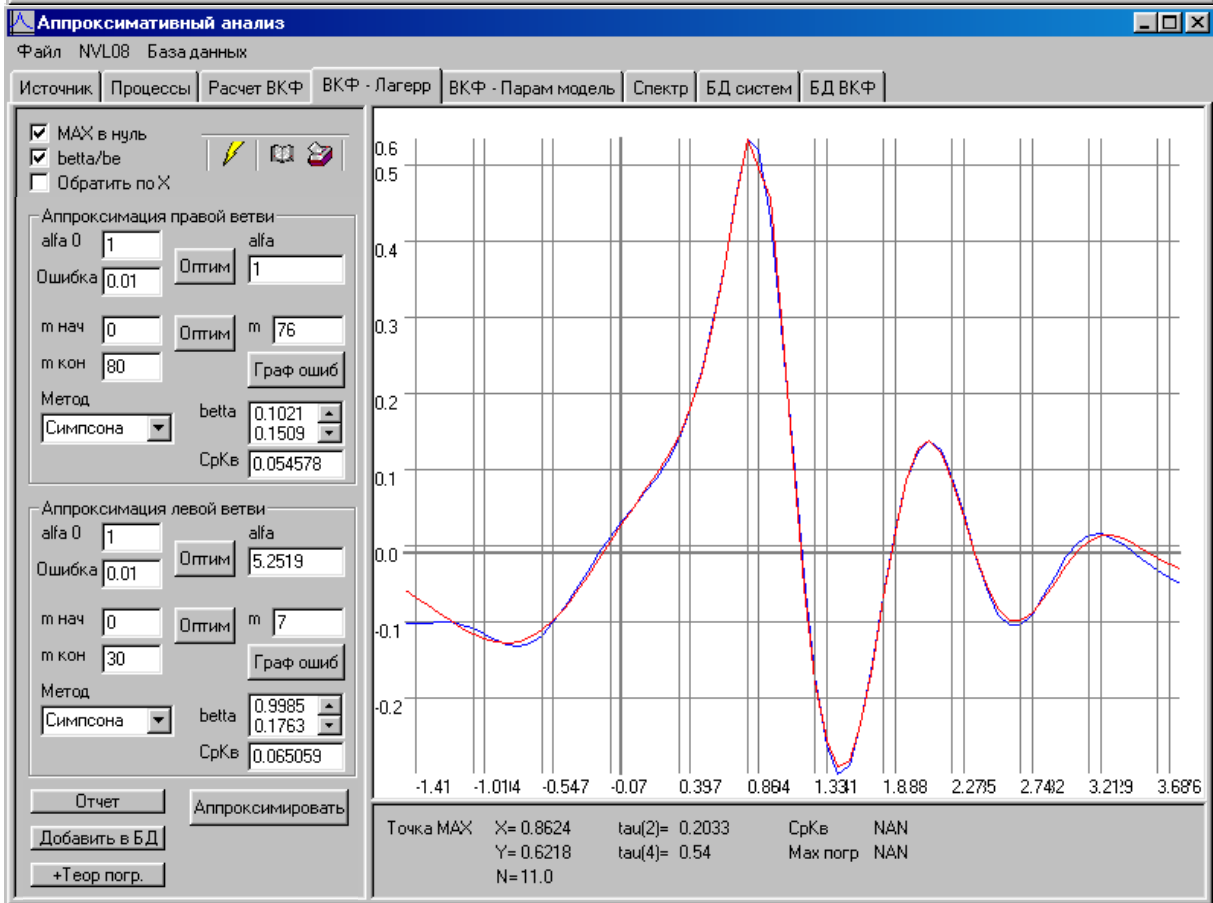
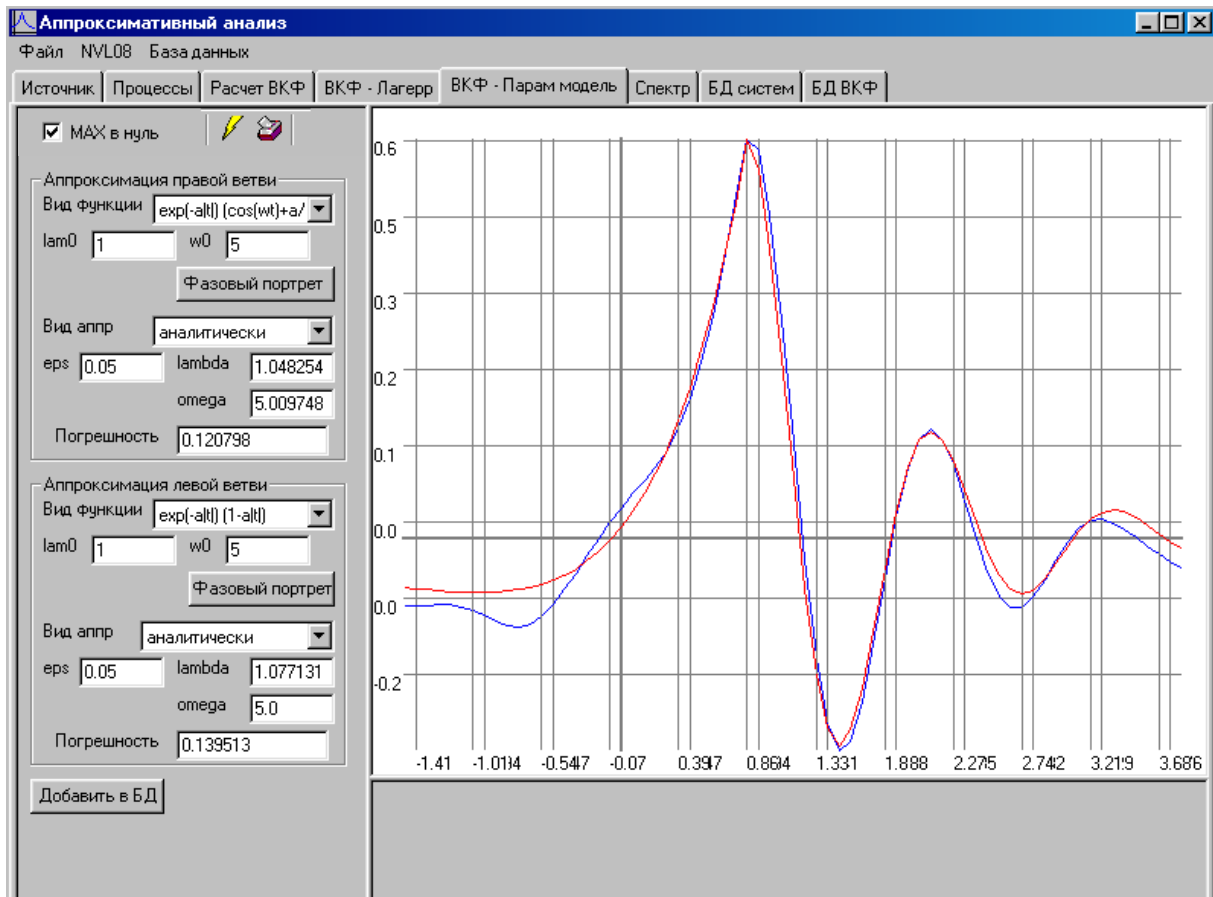


Рисунок 5.2. Аппроксимация взаимной корреляционной функции функциями заданного вида и ортогональными функциями Лагерра

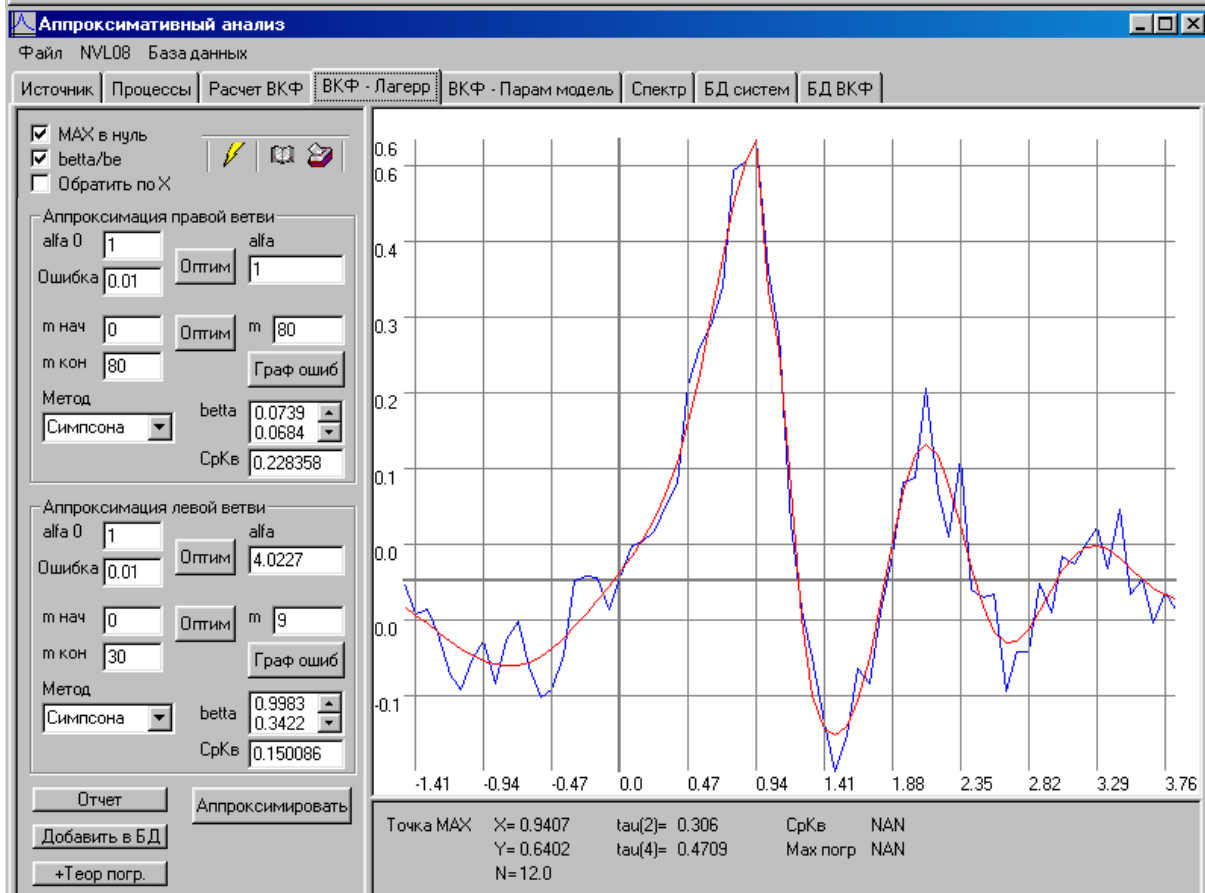
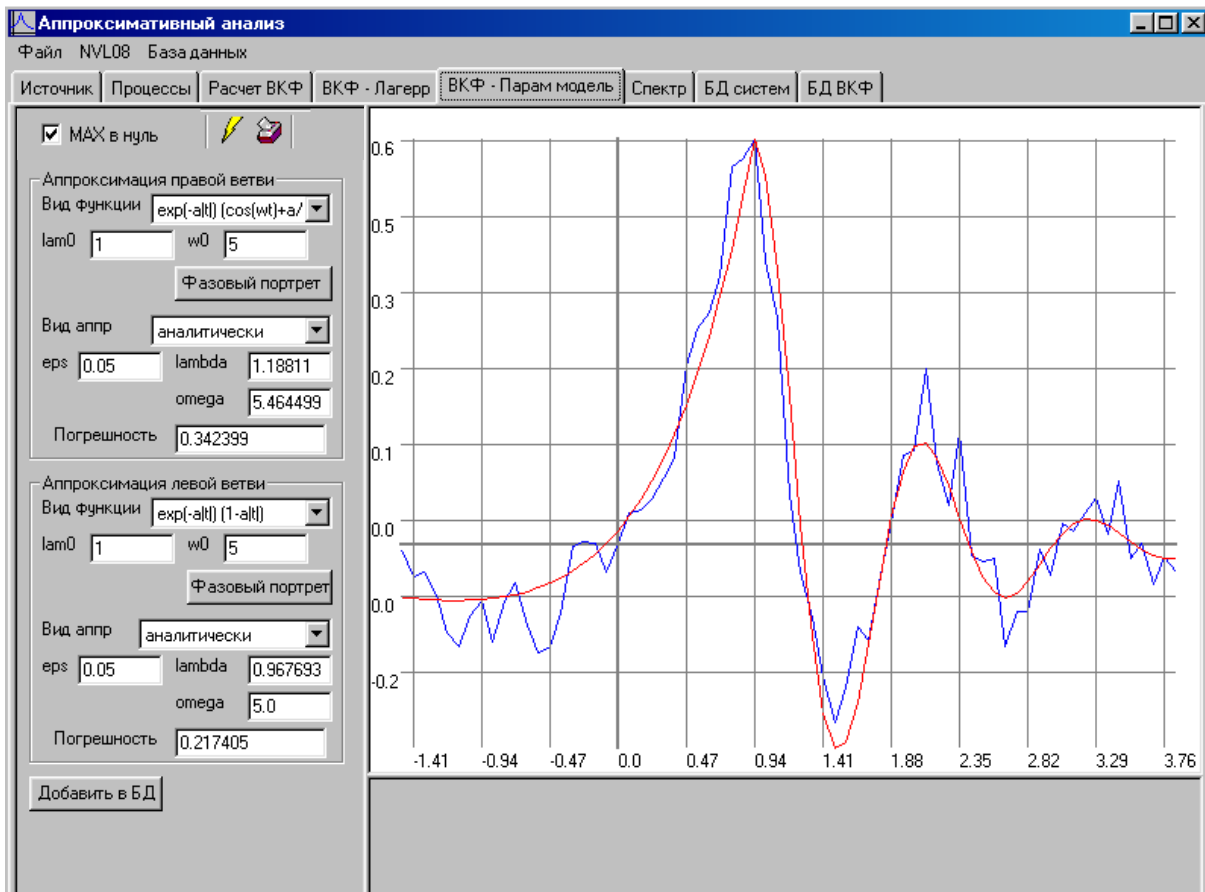


Рисунок 5.3. Аппроксимация взаимной корреляционной функции функциями заданного вида и ортогональными функциями Лагерра

Произведем сравнение графиков ВКФ неравномерной дискретизации, построенных с помощью функций Лагерра и параметрических моделей с графиком функции (на рисунках у них шифр «025») с графиком оценки взаимной корреляционной функции в случае отсутствия потери отсчетов (шифр «1»).

Здесь следует особое внимание обратить на значения среднеквадратического отклонения и максимальной погрешности в правой области страницы над графиками. Так, в случае потери отсчетов взаимная корреляционная функция определяется с погрешностью 0,2535 (0,1265), после аппроксимации ортогональными функциями Лагерра погрешность удастся снизить до 0,1716 (0,1043), а в случае параметрических моделей – до 0,1682 (0,0953). Отметим тот факт, что функции параметрических моделей для рассматриваемого примера, вообще говоря, не совпадают с функциями ветвей взаимной корреляционной функции.

На рисунке приведены результаты сравнения взаимных корреляционных функций в случае потери отсчетов, на рисунке – сравнение функций, полученных при аппроксимации ВКФ процессов с потерей отсчетов и взаимных корреляционных функций процессов без потерь.

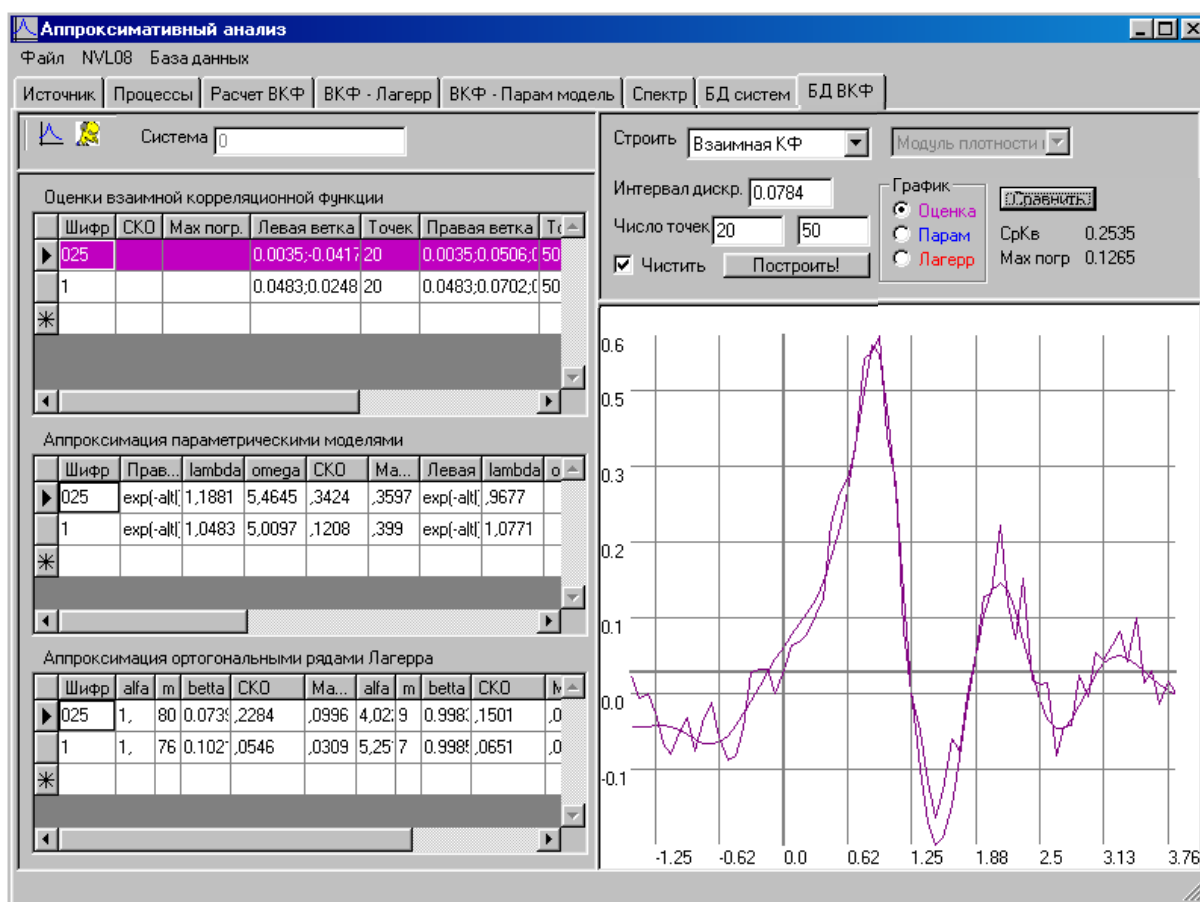


Рисунок 5.4. Взаимные корреляционные функции: процессов с равномерной дискретизацией и процессов с потерей отсчетов

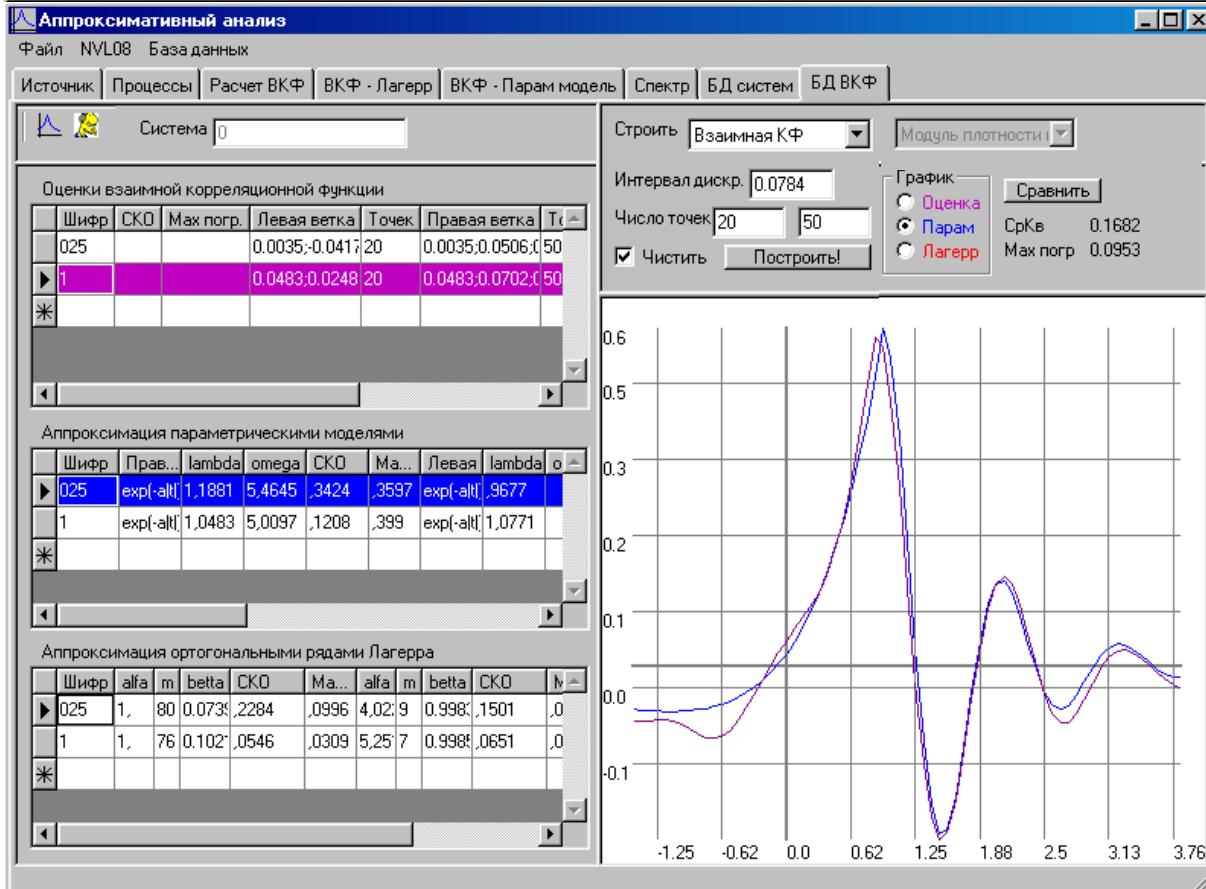
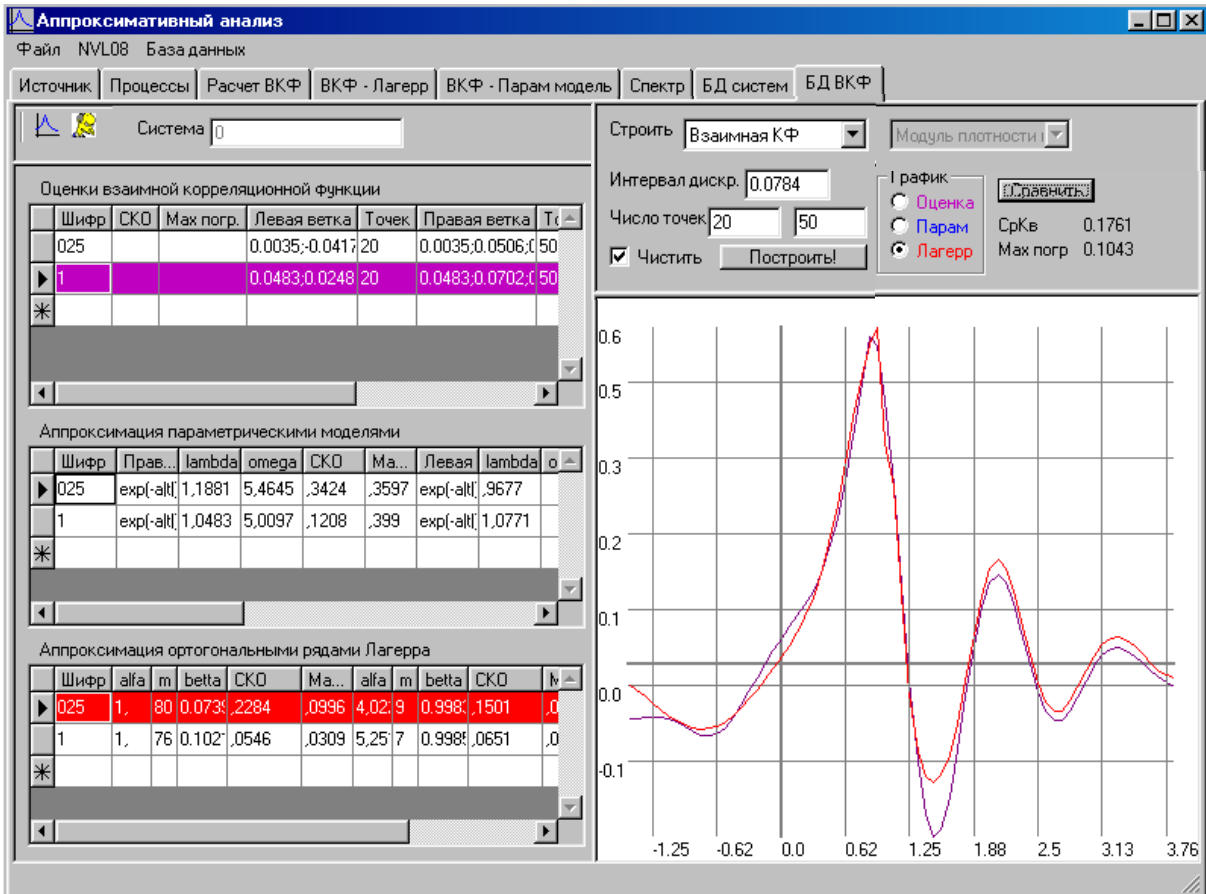


Рисунок 5.5. Взаимные корреляционные функции: процессов с равномерной дискретизацией и процессов с потерей отсчетов

На рисунке 5.6 приведен результат сравнения модулей спектральной плотности мощности.

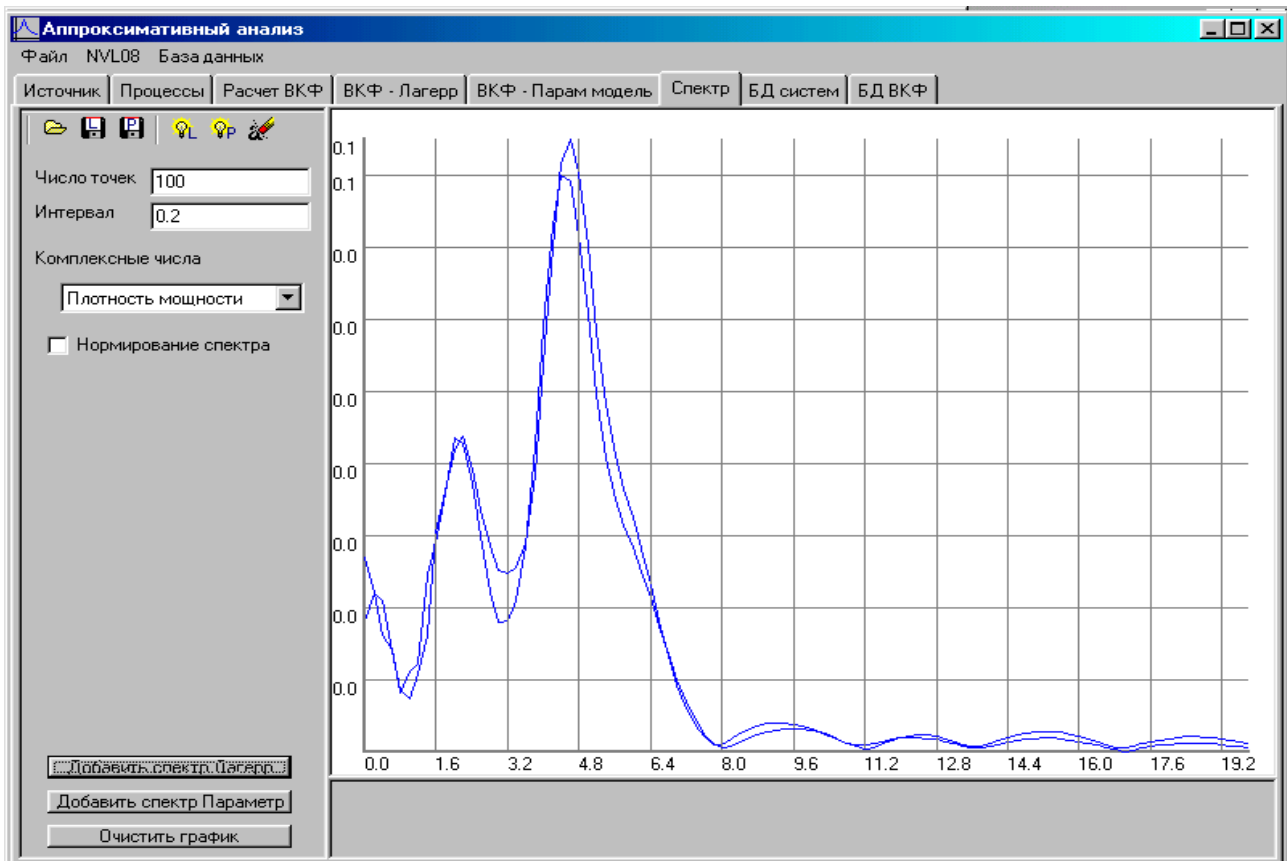


Рисунок 5.6. Результаты сравнения спектров

Лабораторная работа состоит в выполнении описанных выше действий для функций, заданных в варианте. Для этого необходимо сгенерировать пару процессов с равномерной дискретизацией с использованием фильтрации аналогично лабораторной работе 1, затем оценить взаимную корреляционную функцию и построить аппроксимирующие выражения для случая равномерной дискретизации. В случае наличия базы данных необходимо занести функцию в таблицу оценок взаимных корреляционных функций, иначе следует сохранить результат в файле.

Далее необходимо задать вид неравномерной дискретизации и параметр, указанные в задании, и сгенерировать новую пару процессов. Определенную на третьей, четвертой и пятой страницах оценку взаимной корреляционной функции и параметры аппроксимирующих функций Лагерра и параметрических моделей следует также занести в базу данных или сохранить в файле.

Основываясь на четырех полученных графиках, следует найти значения погрешности и сравнить графики первой оценки взаимной корреляционной функции (для случая с равномерной дискретизацией) с графиками второй оценки и аппроксимирующих выражений (для случая с неравномерной дискретизацией).

В качестве дополнительного (не обязательного, ввиду большой трудоемкости) элемента лабораторной работы рекомендуется проведение 29 описанных выше экспериментов с целью определения погрешностей методом имитационного моделирования.

5.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: вид функций, параметры.
2. Определить интервал дискретизации, сгенерировать «белый шум», получить пару процессов с равномерной дискретизацией.
3. Оценить ВКФ.
4. Занести ВКФ с отсчетами в БД.
5. Получить пару процессов с неравномерной дискретизацией, предварительно задав параметры дискретизации – потерю отсчетов.
6. Оценить ВКФ НВР.
7. Занести ВКФ с отсчетами в БД.
8. Аппроксимировать ВКФ НВР ортогональными функциями Лагерра и занести результаты аппроксимации с указанием погрешностей в БД. (В случае отсутствия БД сохранить в файл.)
9. Аппроксимировать ВКФ НВР параметрическими моделями и занести результаты аппроксимации с указанием погрешностей в БД. (В случае отсутствия БД сохранить в файл.)
10. Провести сравнение графиков ВКФ, аппроксимирующего выражения Лагерра и параметрических моделей (3 функции) для случая с потерей отсчетов с графиком ВКФ в случае отсутствия потерь. Сравнение провести посредством определения погрешностей.
11. Оформить отчет.

5.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. График полученных ВКФ в случае равномерной дискретизации и в случае неравномерной дискретизацией (потери отсчетов).
4. График ВКФ в случае равномерной дискретизации и аппроксимирующего выражения Лагерра в случае неравномерной дискретизацией (потери отсчетов).
5. График ВКФ в случае равномерной дискретизации и аппроксимирующего выражения, основанного на параметрических моделях, в случае неравномерной дискретизацией (потери отсчетов).
6. Результаты погрешностей.
7. Результаты имитационного моделирования.

5.4. Контрольные вопросы

1. Почему аппроксимация взаимной корреляционной функции иногда приводит к уменьшению погрешностей ее оценки?
2. В каких случаях для уменьшения погрешности оценки взаимной корреляционной функции применима ее аппроксимация?
3. В чем отличие аппроксимации функциями заданного вида от аппроксимации ортогональными функциями Лагерра? Назовите особенности, преимущества и недостатки каждого метода аппроксимации.

6. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ПАР СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Цель работы: изучение метода моделирования случайных процессов с помощью композиции отдельных имитационных модулей.

6.1.Содержание лабораторной работы

Данная работа производится с использованием седьмой страницы. Здесь реализована наглядная и эффективная схема получения пар случайных процессов путем составления системы из известных структурных единиц – модулей с заданными свойствами. Случайный процесс или генерируется в модуле, или преобразуется некоторым образом при прохождении через него. Для получения необходимых характеристик случайного процесса необходимо задать параметры модулей. Процессу проектирования и компиляции, а так же правилам создания систем посвящена специальная глава. Для выполнения этой лабораторной работы необходимо внимательно ознакомиться с правилами стыковки модулей в этой автоматизированной системе.

Лабораторная работа 6 посвящена созданию системы, состоящей из источника «белого шума», двух фильтров, линии задержки и обязательного блока анализа. В ходе работы необходимо составить систему, соответствующую заданным в задании функциям, получить взаимную корреляционную функцию, аппроксимировать ее параметрическими моделями и ортогональными функциями Лагерра и построить спектральную плотность мощности. При этом особое внимание следует уделить этапу

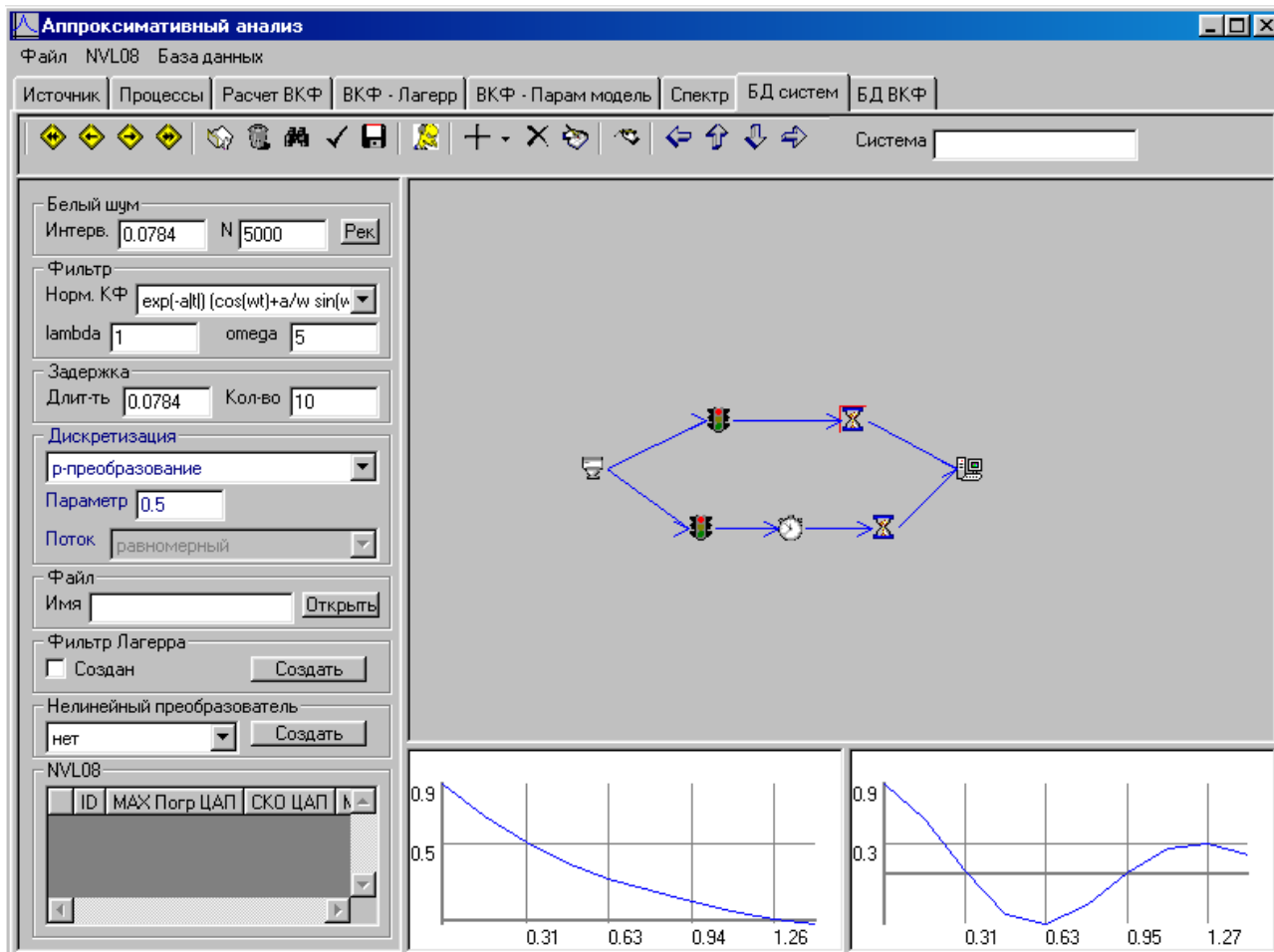


Рисунок 6.1. Моделирование системы

создания системы, так как в следующих двух работах эти навыки будут необходимы и построению спектральной плотности мощности, вопросу, упущенному в предыдущих работах ввиду их повышенной трудоемкости.

Суть эксперимента состоит в построении нескольких спектральных плотностей мощности при потере и малом количестве отсчетов.

При составлении системы рекомендуем сначала добавить все элементы-модули, затем установить связи между элементами, после чего настроить элементы. **Не забывайте нажимать кнопку редактирования после изменения параметров выделенного элемента!** В случае использования базы данных рекомендуем сохранять созданные системы – после этого можно вернуться к созданной ранее системе.

На первом этапе лабораторной работы нужно создать систему, представленную на рисунке 6.1

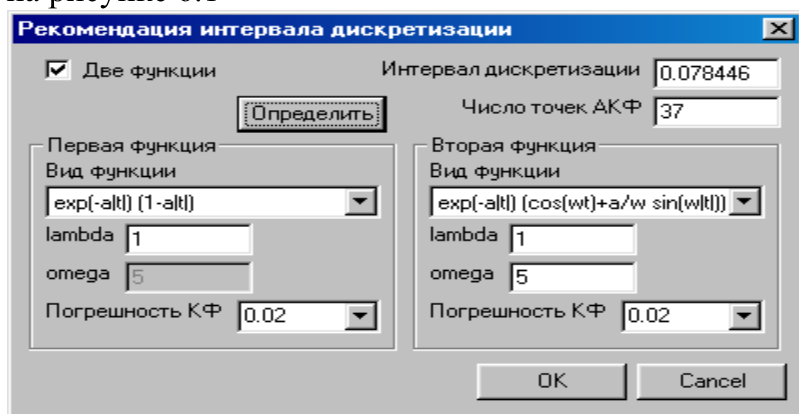


Рисунок 6.2. Определение интервала дискретизации

До компиляции системы необходимо задать параметры модулей. Определить рекомендуемое значение интервала дискретизации можно с помощью уже знакомой формы после нажатия кнопки «Рек». Заполняемая при этом форма изображена на рисунке 6.2.

После перехода на страницу «Расчет ВКФ» выполняемые действия аналогичны описанным выше.

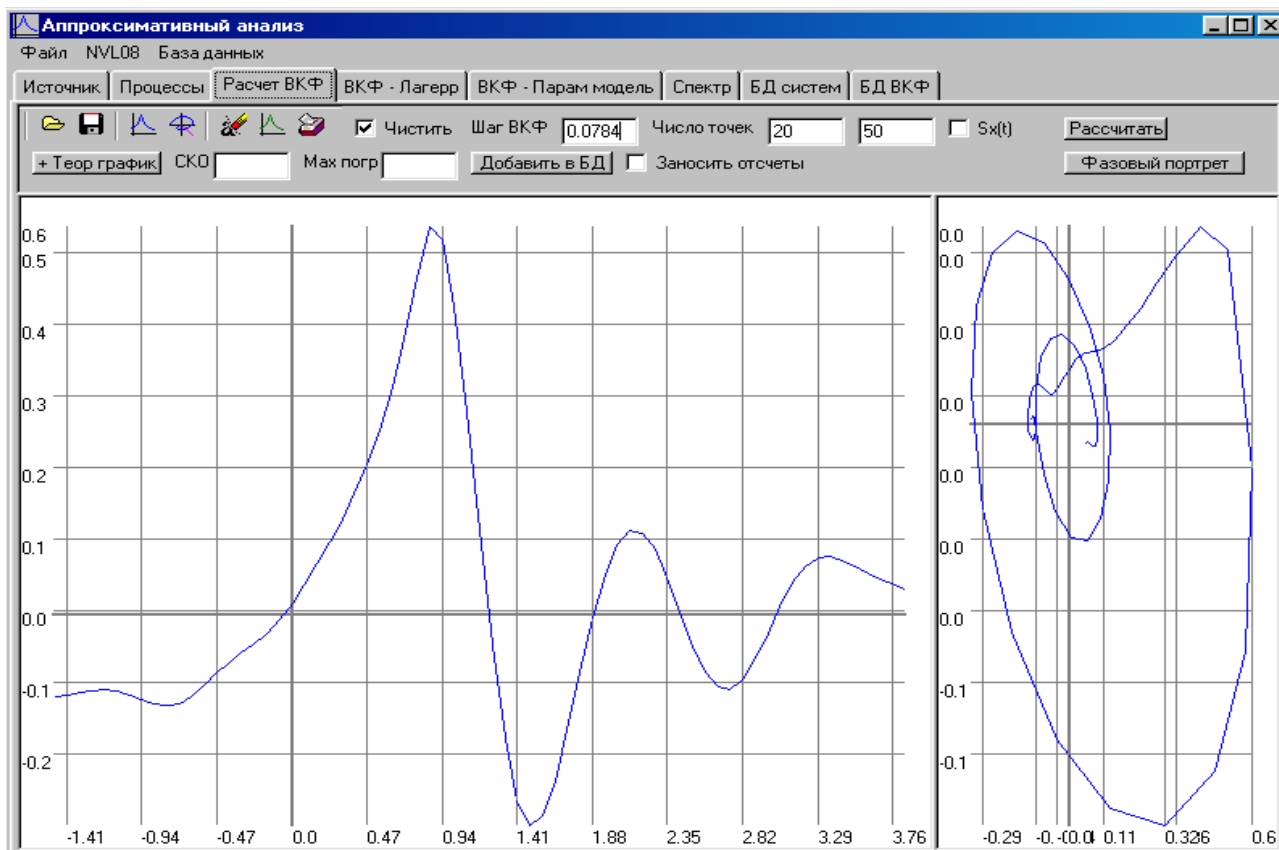


Рисунок 6.3. Оценка ВКФ при равномерной дискретизации

На рисунках 6.3–6.4 приведены результаты моделирования и аппроксимации взаимных корреляционных функций при равномерной дискретизации и в случае потери половины отсчетов.

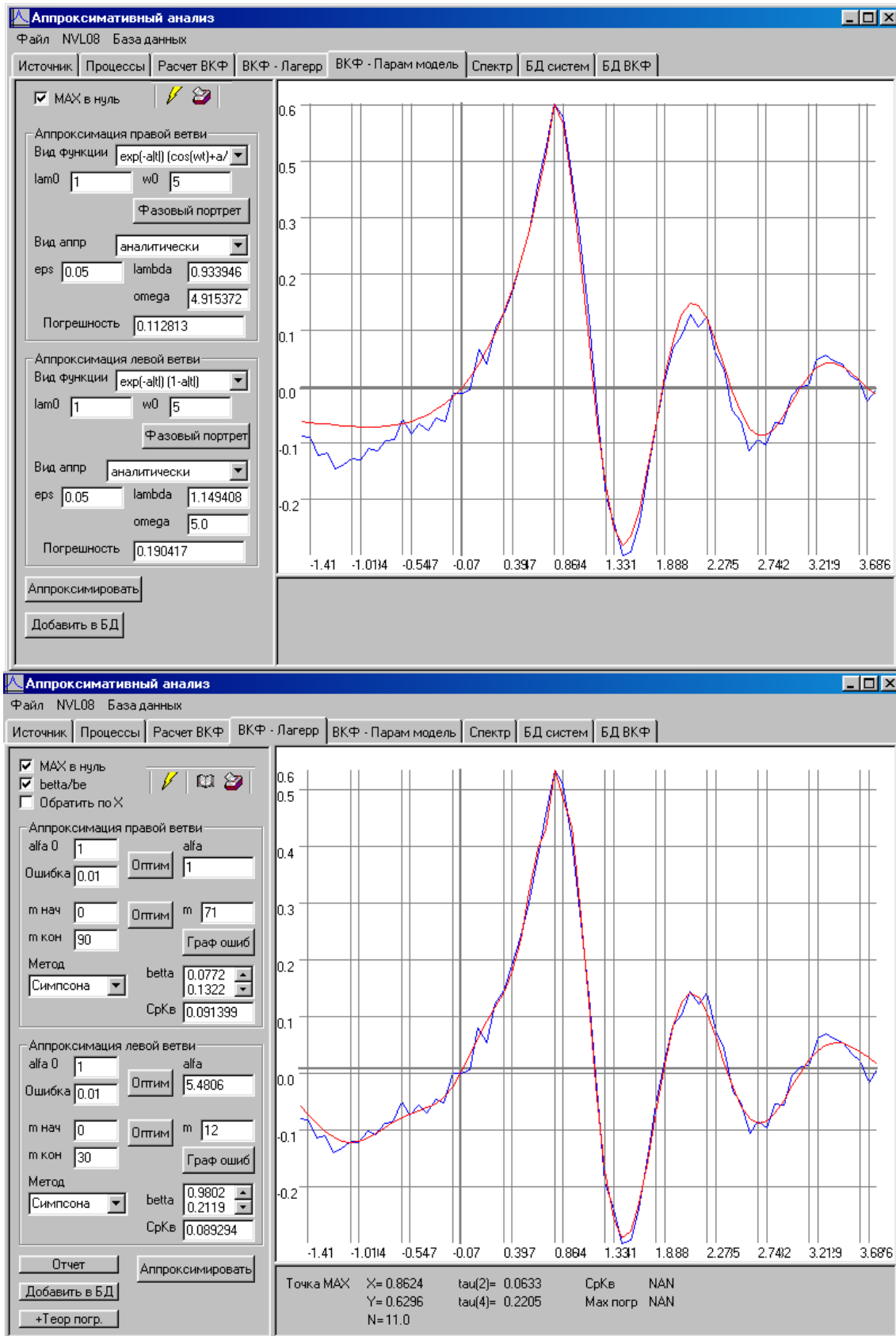


Рисунок 6.4. Аппроксимация ВКФ процессов после р-преобразования

Следующим шагом лабораторной работы является создание схемы, включающей некоторое число фильтров, задержек, блоков дискретизации, один источник «белого шума» и один блок анализа. Требуется провести несколько экспериментов по получению выражения для спектральной плотности мощности по параметрам аппроксимирующих выражений.

Например, для случая аппроксимации автокорреляционной функции получим следующие результаты (рисунки 6.5–6.6 для числа отсчетов 500,6 следующие – для числа отсчетов 1000 при потере половины отсчетов).

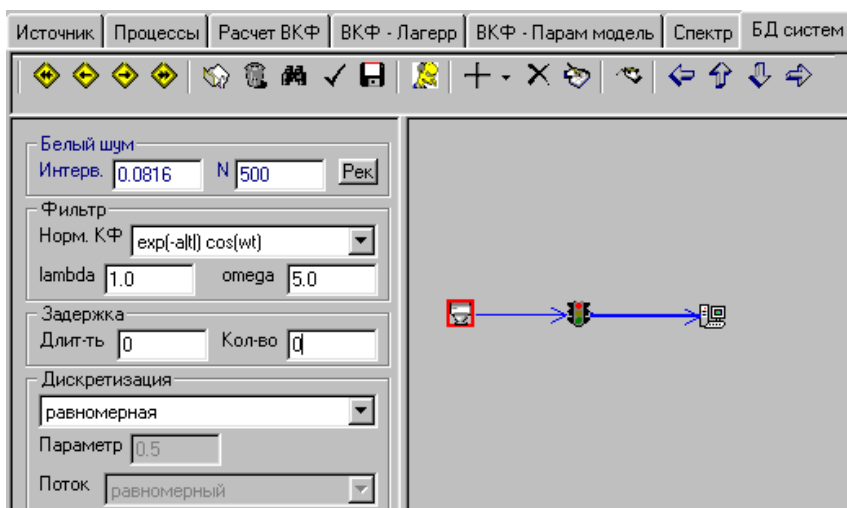


Рисунок 6.5. Система генерации случайных процессов

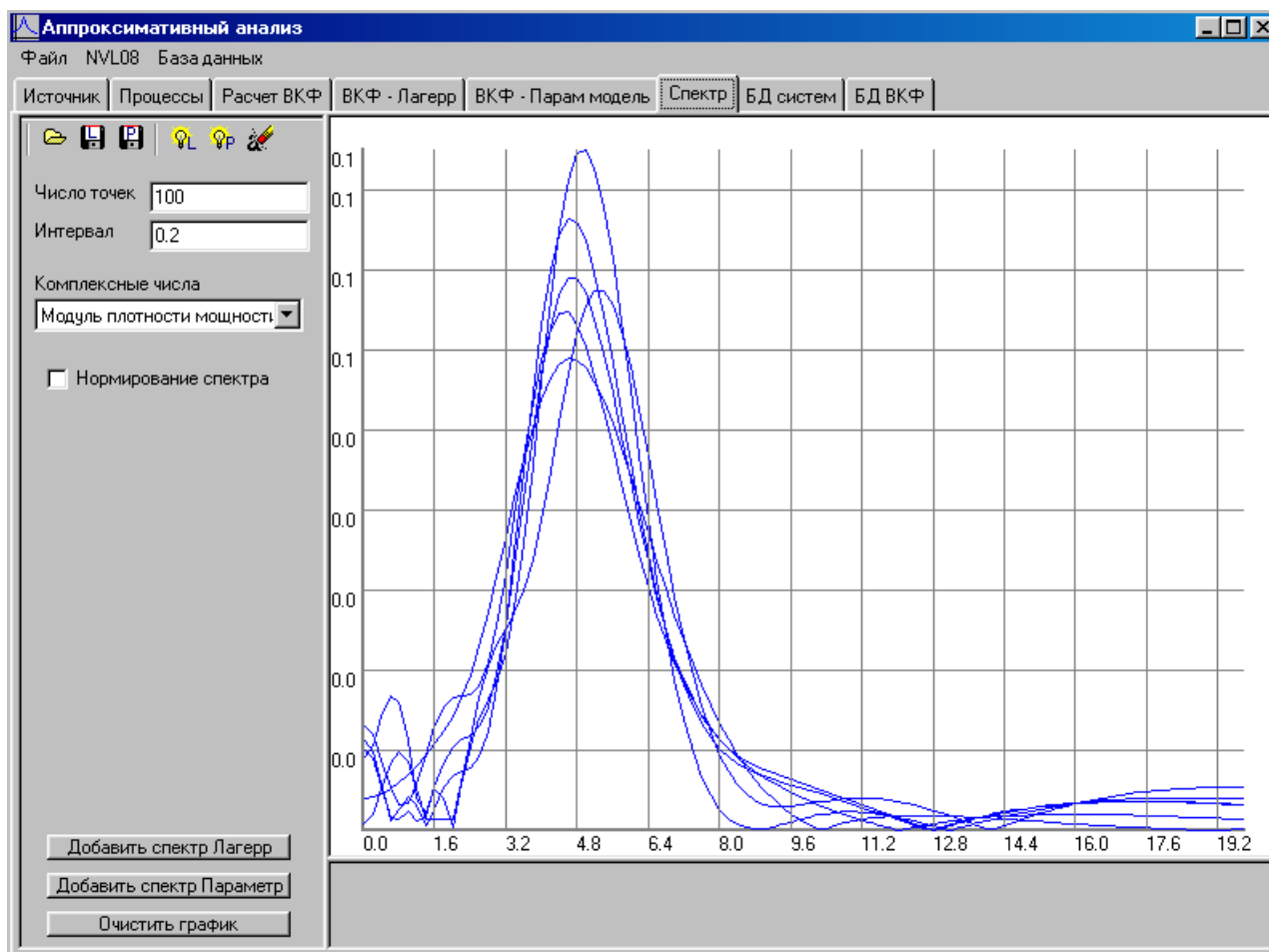


Рисунок 6.6. Модули спектральной плотности мощности

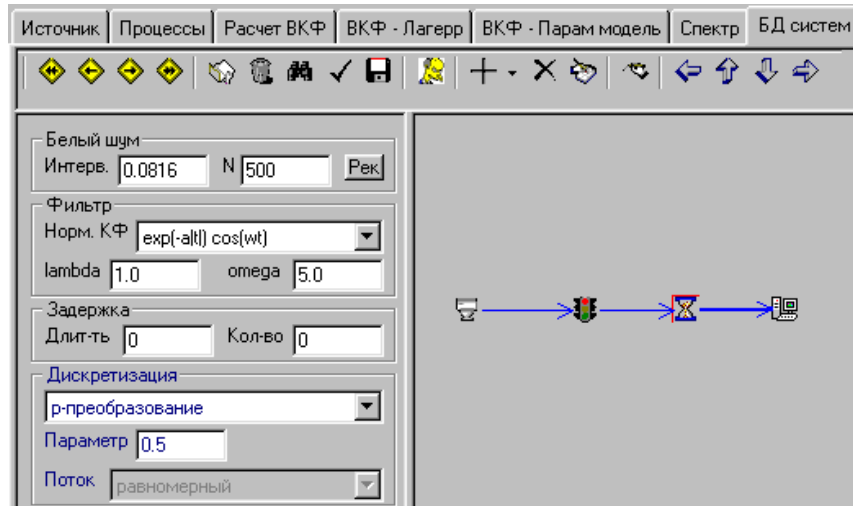


Рисунок 6.7. Система генерирования пары НВР

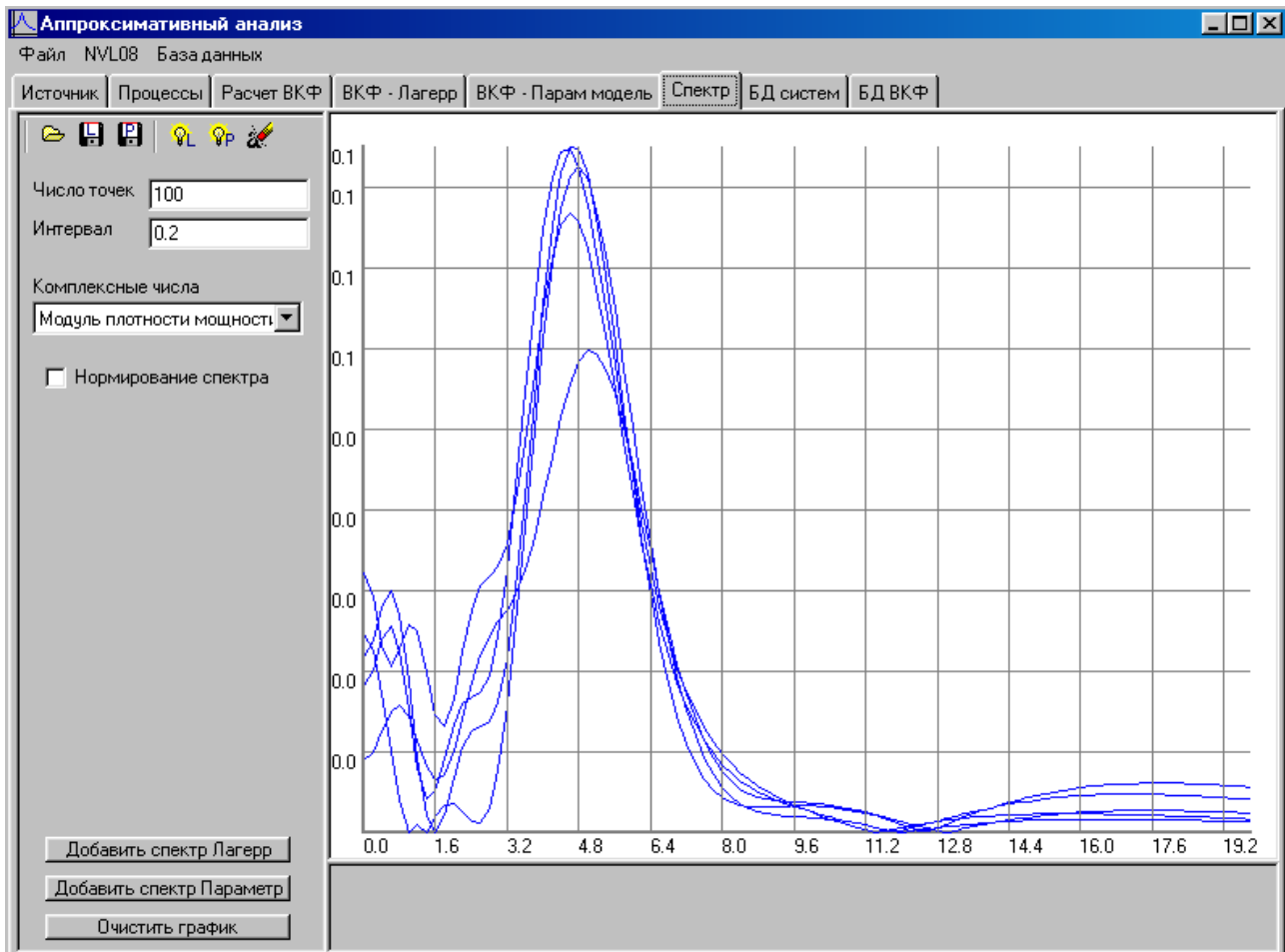


Рисунок 6.8. Модули взаимной спектральной плотности мощности пары НВР

6.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: вид функций, параметры.
2. Составить схему для выполнения преобразований, требуемых для получения указанной в задании пары случайных процессов. Настроить модули.
3. Скомпилировать систему и построить ВКФ.
4. Аппроксимировать ВКФ, получить спектральные плотности мощности.
5. Составить новую систему из некоторого числа модулей и получить новую ВКФ.
6. Построить 5 графиков взаимной спектральной плотности мощности для генерируемой пары процессов для двух разных вариантов настройки модулей системы.
7. Оформить отчет.

6.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. Схемы систем.
4. Графики ВКФ и аппроксимирующих функций.
5. Графики взаимных спектральных плотностей мощности.

6.4. Контрольные вопросы

1. Какие численные методы применяются при аппроксимации спектральных плотностей мощности?
2. Как можно представить спектральную плотность мощности графически?
3. Какие параметры описывают ортогональное разложение спектральной плотности мощности?
4. Как можно определить эквивалентную полосу пропускания?
5. В чем заключается специфика аппроксимации взаимных спектральных плотностей мощности?
6. В чем особенность аппроксимации взаимных спектральных плотностей мощности неэквидистантных временных рядов?



7. АППРОКСИМАЦИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ЛАГЕРРА

Цель работы: изучение метода построения фильтров с использованием аппроксимации импульсной переходной характеристики ортогональными функциями Лагерра.

7.1. Содержание лабораторной работы

Для некоторых функций вид импульсной переходной характеристики, используемой при построении фильтра для получения случайного процесса с заданной корреляционной функцией, с точностью до коэффициента совпадает с видом этой функции. В подобных случаях в качестве аппроксимирующего выражения функции переходной характеристики оказываются приемлемыми ортогональные функции Лагерра.

В данной лабораторной работе необходимо создать фильтр с использованием аппроксимации импульсной характеристики. Для этого необходимо создать систему, представленную на рисунке 7.1.

Фильтр Лагерра () добавляется в систему нажатием кнопки  . Далее следует нажать кнопку «Создать» в группе управляющих элементов «Фильтр Лагерра» и заполнить форму, приведенную на рисунке 7.2. Здесь изображена переходная характеристика для получения процесса с нормированной КФ вида
$$e^{-\lambda|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right).$$

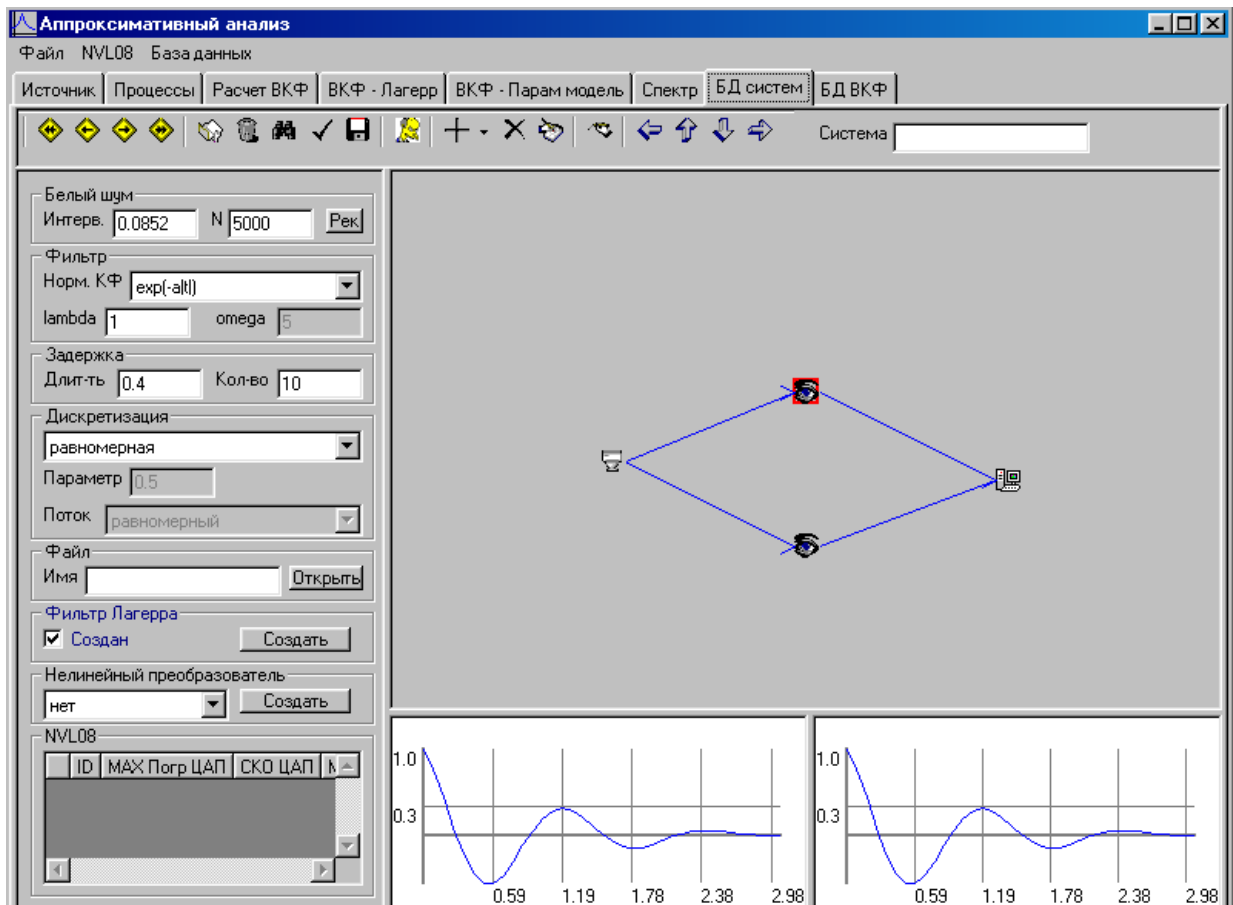


Рисунок 7.1. Синтез системы, содержащей фильтры Лагерра

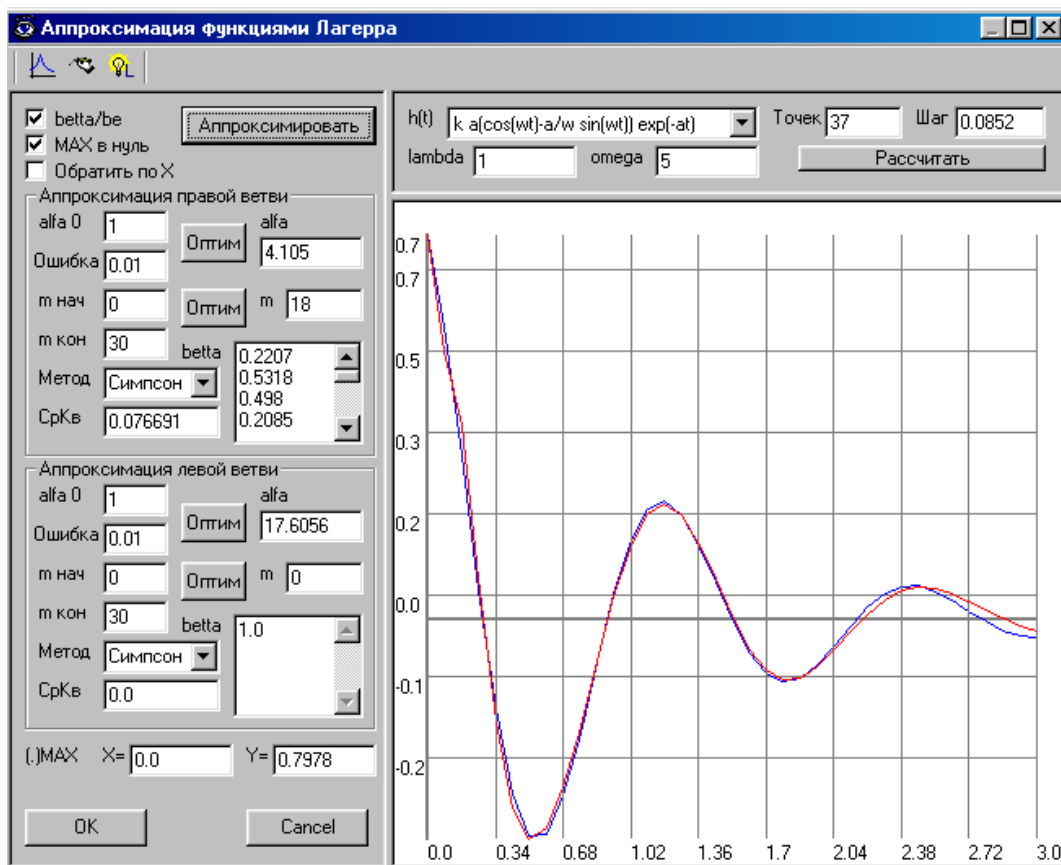


Рисунок 7.2. Аппроксимация импульсной переходной характеристики ортогональными функциями Лагерра

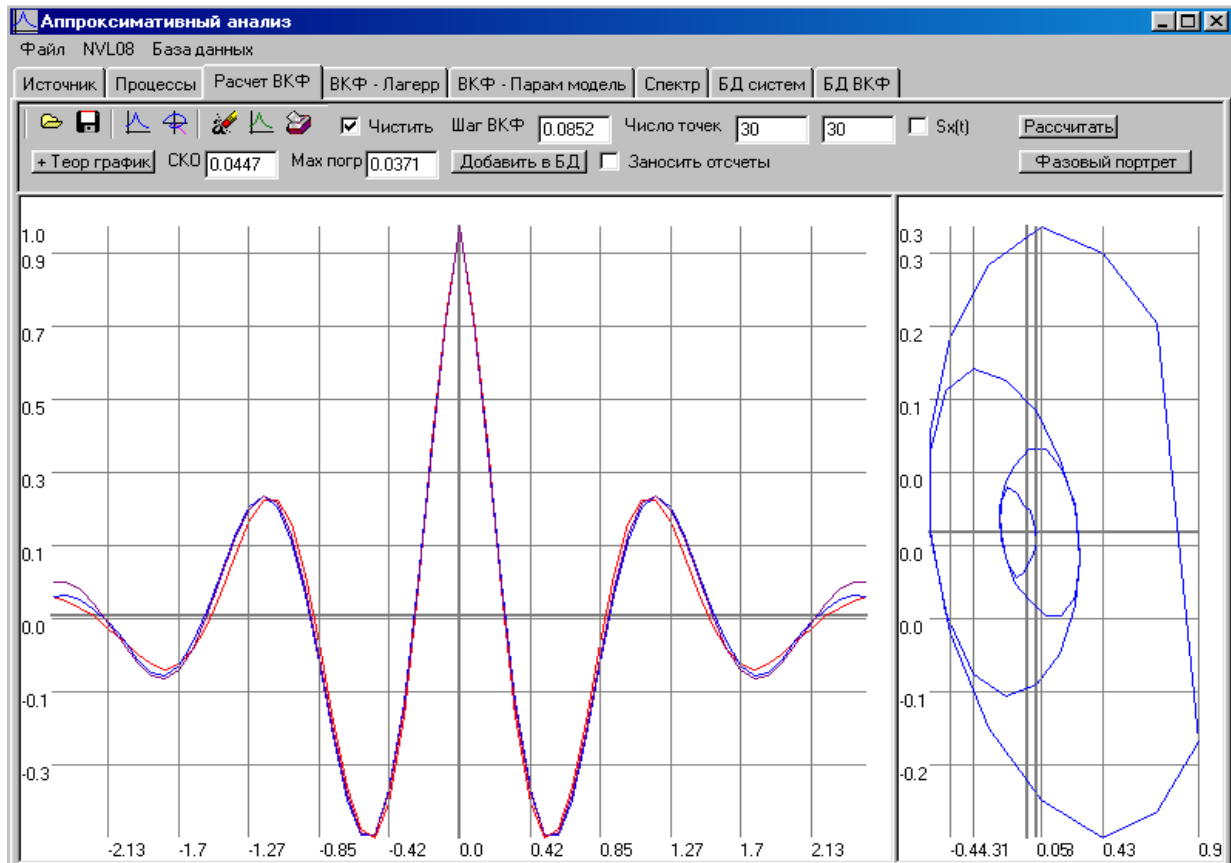


Рисунок 7.3. Взаимные корреляционные функции процессов, получаемых разными методами

На рисунке 7.3 приведены взаимные корреляционные функции пары сгенерированных процессов и пары процессов, полученных методом, описанным в первой лабораторной работе, сравнительно с аналитическим выражением.

Для способа генерирования процессов с заданной взаимной корреляционной функцией, основанном на использовании аппроксимирующих импульсную переходную характеристику ортогональных функций Лагерра, определим погрешность методом имитационного моделирования. Для этого следует заполнить таблицу 7.1. В таблице 7.2 приведен пример заполнения.

При выполнении лабораторной работы необходимо на странице «БД систем» создать новую систему, настроить фильтры Лагерра, сгенерировать пару процессов; на странице «Расчет ВКФ» оценить взаимную корреляционную функцию. После установки на странице «Процессы» вида и параметров корреляционной функции для первого и второго фильтров на странице «Расчет ВКФ» можно добавить график аналитически определенной взаимной корреляционной функции. Определяемые при этом погрешности следует сохранить в базу данных или занести в таблицу.

После проведения описанных действий 29 раз, нужно оценить максимальную погрешность и математическое ожидание среднеквадратического отклонения.

Таблица 7.1

Номер эксперимента	1	2	3	...	28	29
СКО						
Мах погрешность						

Таблица 7.2

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
СКО	0,1631	0,1294	0,1604	0,1385	0,1761	0,103	0,1176
Мах погрешность	0,0907	0,058	0,0785	0,0662	0,0935	0,0742	0,0612
Номер эксперимента	8	9	10	11	12	13	14
СКО	0,0945	0,0844	0,1085	0,069	0,1423	0,1567	0,0787
Мах погрешность	0,0665	0,0402	0,0595	0,0407	0,0671	0,0839	0,0419
Номер эксперимента	15	16	17	18	19	20	21
СКО	0,1263	0,1272	0,0742	0,0678	0,1431	0,153	0,1374
Мах погрешность	0,0689	0,0622	0,0398	0,038	0,0876	0,0951	0,0697
Номер эксперимента	22	23	24	25	26	27	28
СКО	0,1563	0,1195	0,1033	0,1789	0,0732	0,1066	0,1663
Мах погрешность	0,0866	0,0852	0,0532	0,0902	0,052	0,0651	0,0844
Номер эксперимента	29						
СКО	0,0707						
Мах погрешность	0,0394						

После подсчета погрешностей математическое ожидание СКО составит 0,0951, максимальная погрешность – 0,1216.

В качестве дополнительного задания предлагается сравнить оценку ВКФ, аппроксимацию ВКФ процессов, полученных с использованием описанного метода, с аналогичными оценками для процессов, полученных с использованием первых двух страниц автоматизированной системы.

7.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: вид функций, параметры.
2. Составить схему, включающую фильтры Лагерра, настроить модули, откомпилировать систему.
3. Построить ВКФ на странице «Расчет ВКФ».
4. Задать на второй странице («Процессы») параметры теоретически рассчитываемой ВКФ и построить ее график на третьей странице.
5. Повторить компиляцию системы и построение теоретической ВКФ 29 раз, при использовании БД заносить погрешности в каждом случае, иначе заполнить таблицу погрешностей.
6. Определить погрешность генерации пары процессов с использованием фильтра Лагерра с помощью метода имитационного моделирования.
7. Аппроксимировать ВКФ, получить спектральные плотности мощности.
8. Оформить отчет.

7.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. Схема системы.
4. Графики взаимных корреляционных функций.
5. Результаты имитационного моделирования.

7.4. Контрольные вопросы

1. Для каких процессов (указать вид корреляционной функции) возможно применение используемого метода фильтрации?
2. Есть ли необходимость в выделении максимума, двух ветвей импульсной характеристики и использовании алгоритма, описанном для взаимной корреляционной функции при аппроксимации импульсных переходных характеристик?
3. Оценить возможность применения описанного метода на основе данных, полученных экспериментально.

8. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПАР ПРОЦЕССОВ С НЕКОТОРЫМ ВИДОМ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ И ЗАКОНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ОТЛИЧНЫМ ОТ НОРМАЛЬНОГО

Цель работы: исследование возможности генерирования пар случайных процессов с заданной взаимной корреляционной функцией и законом распределения, отличным от нормального.

8.1. Содержание лабораторной работы

В ходе данной лабораторной работы необходимо построить систему, содержащую модуль, осуществляющий нелинейное преобразование процесса. Предусмотрено три вида таких модулей, основанных в зависимости от способа преобразования на использовании аналитического выражения, линейной интерполяции некоторой функции и аппроксимации ортогональными рядами Лагерра. Обоснование этого подхода приведено в разделе 1.6.

Для выполнения лабораторной работы требуется построить систему модулей, аналогичную приведенной на рисунке. Следует обратить внимание на вид нелинейного преобразования (аналитический, линейная интерполяция и аппроксимация функциями Лагерра). В лабораторной работе необходимо провести все три вида нелинейного преобразования.

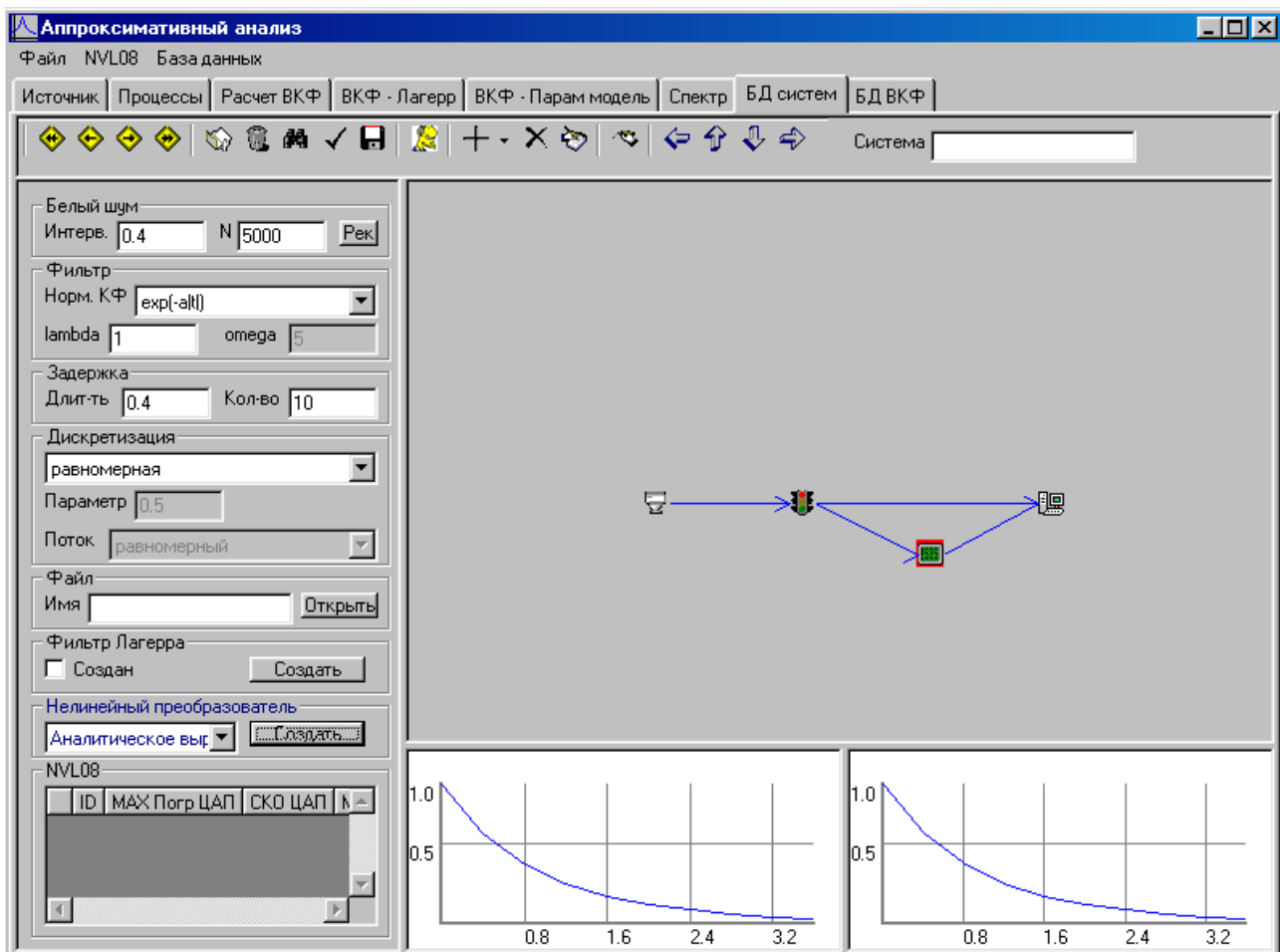


Рисунок 8.1. Использование нелинейного преобразования процесса с аналитически заданной функцией

Далее приведем графики автокорреляционных функций, плотностей мощности, случайных процессов и значения моментных характеристик этих процессов. Правый столбец характеристик определен для процесса, над которым было выполнено нелинейное преобразование.

Следует обратить внимание на разные значения моментов процессов. В автоматизированной системе определяются нормированные корреляционные функции, поэтому значения математического ожидания и дисперсии требуется учитывать при определении взаимной корреляционной функции и спектральной плотности мощности по параметрам аппроксимирующих выражений. Подчеркнем, что в данной автоматизированной системе ВКФ и спектр рассчитываются для нормированных процессов.

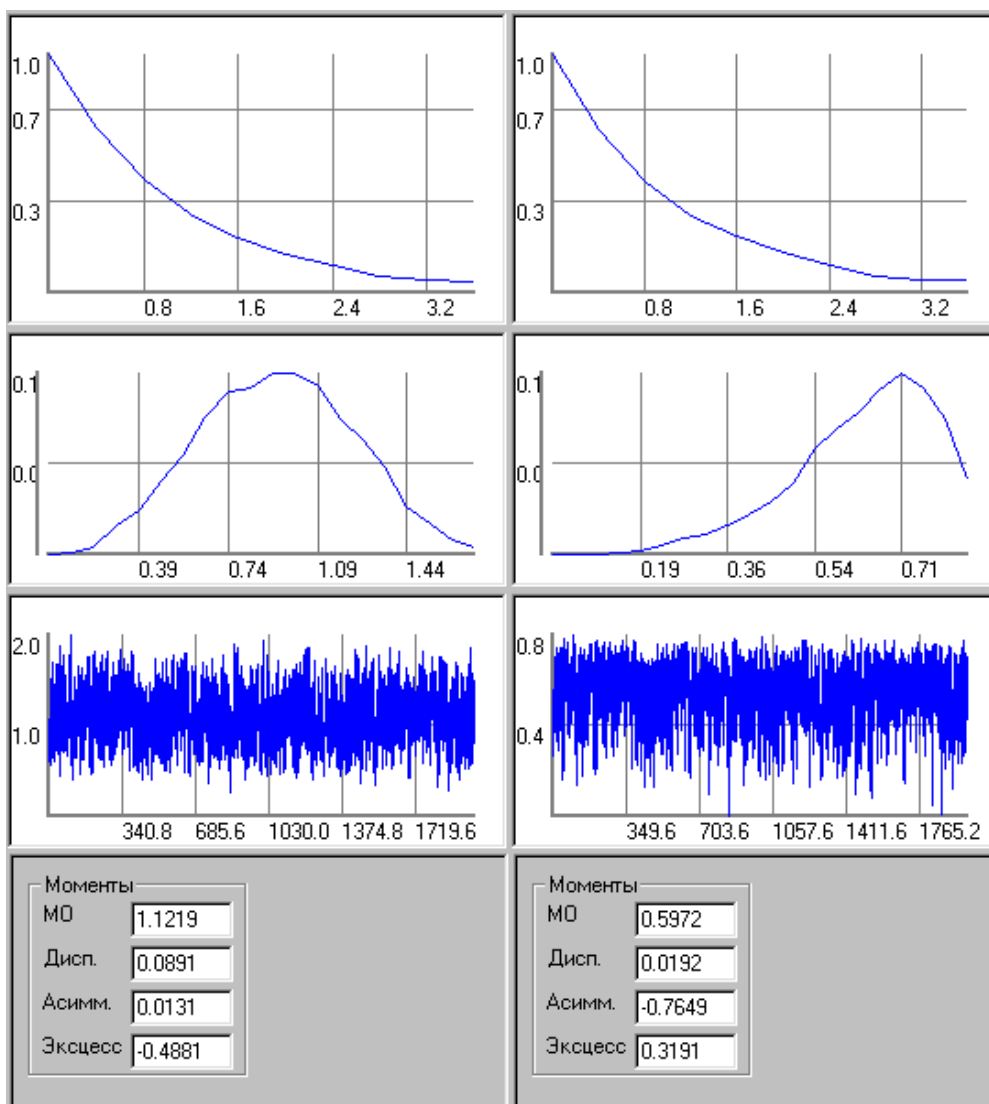


Рисунок 8.2. Графики корреляционных функций, плотностей вероятности, случайных процессов и значения моментов

Полученная в результате взаимная корреляционная функция приведена рисунке 8.3. Так же приведен вид взаимной корреляционной функции, полученной аналитически (для его определения необходимо на странице «Процессы» установить вид и параметры фильтров).

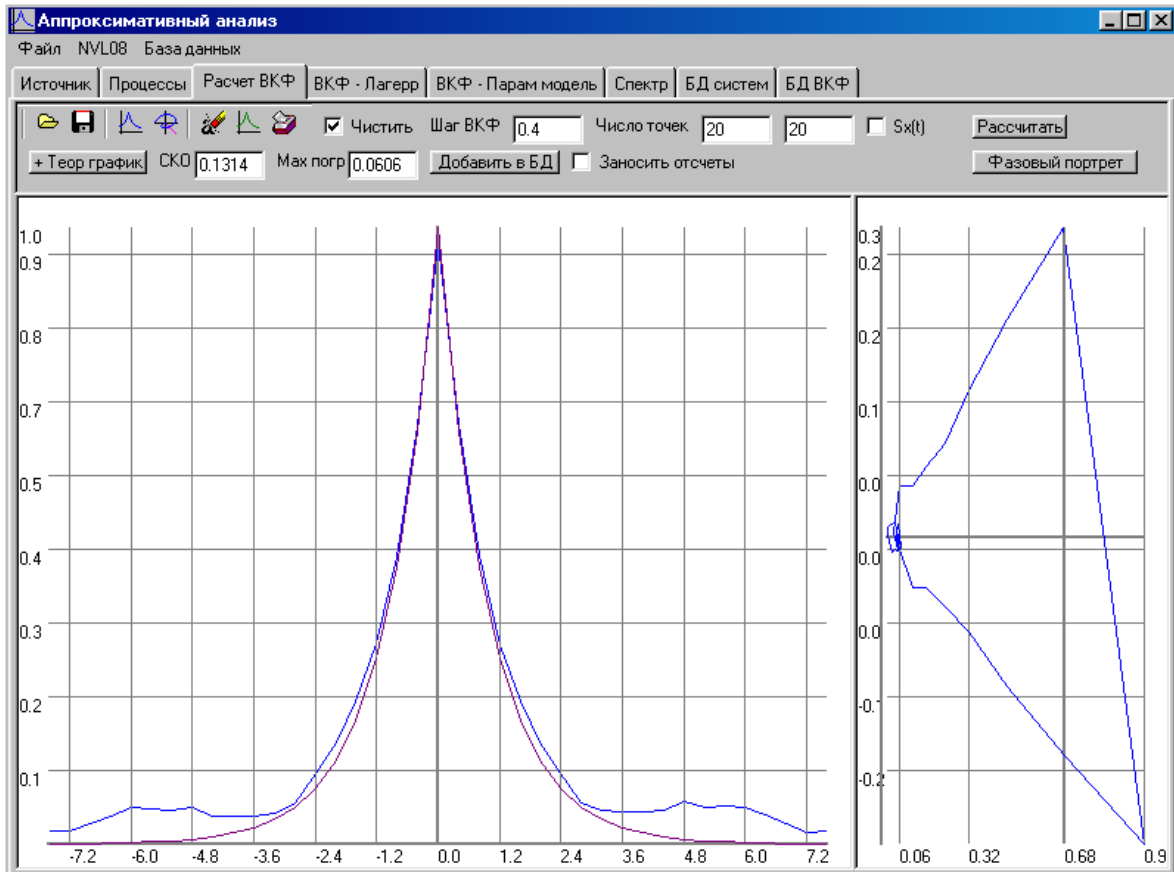


Рисунок 8.3. Взаимная корреляционная функция процессов

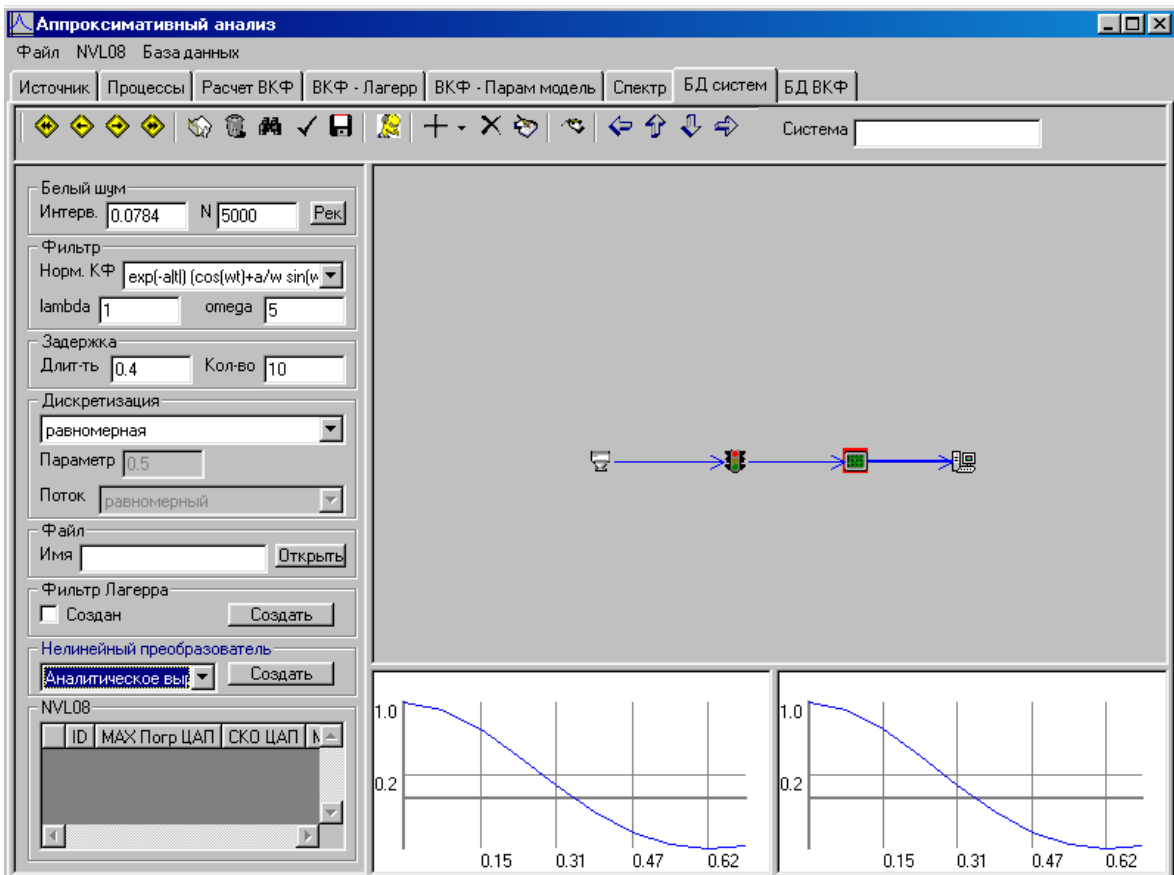


Рисунок 8.4. Нелинейное преобразование, заданное аналитически

Эксперимент состоит в построении спектральных плотностей мощности для случайных процессов с разными параметрами нелинейного преобразования, и, как следствие, с разными законами распределения.

Например, для системы, приведенной на рисунке 8.4, нелинейное преобразование задавалось в виде $1 - e^{-\lambda x}$. При различных значениях λ система была скомпилирована. Построенные после этого взаимные корреляционные функции были аппроксимированы ортогональными функциями Лагерра и по параметрам аппроксимирующих выражений были построены спектральные плотности мощности. На рисунках 8.5–8.6 приведены полученные результаты. Проведение аналогичного эксперимента не должно вызвать трудностей в случае успешного выполнения предыдущих лабораторных работ.

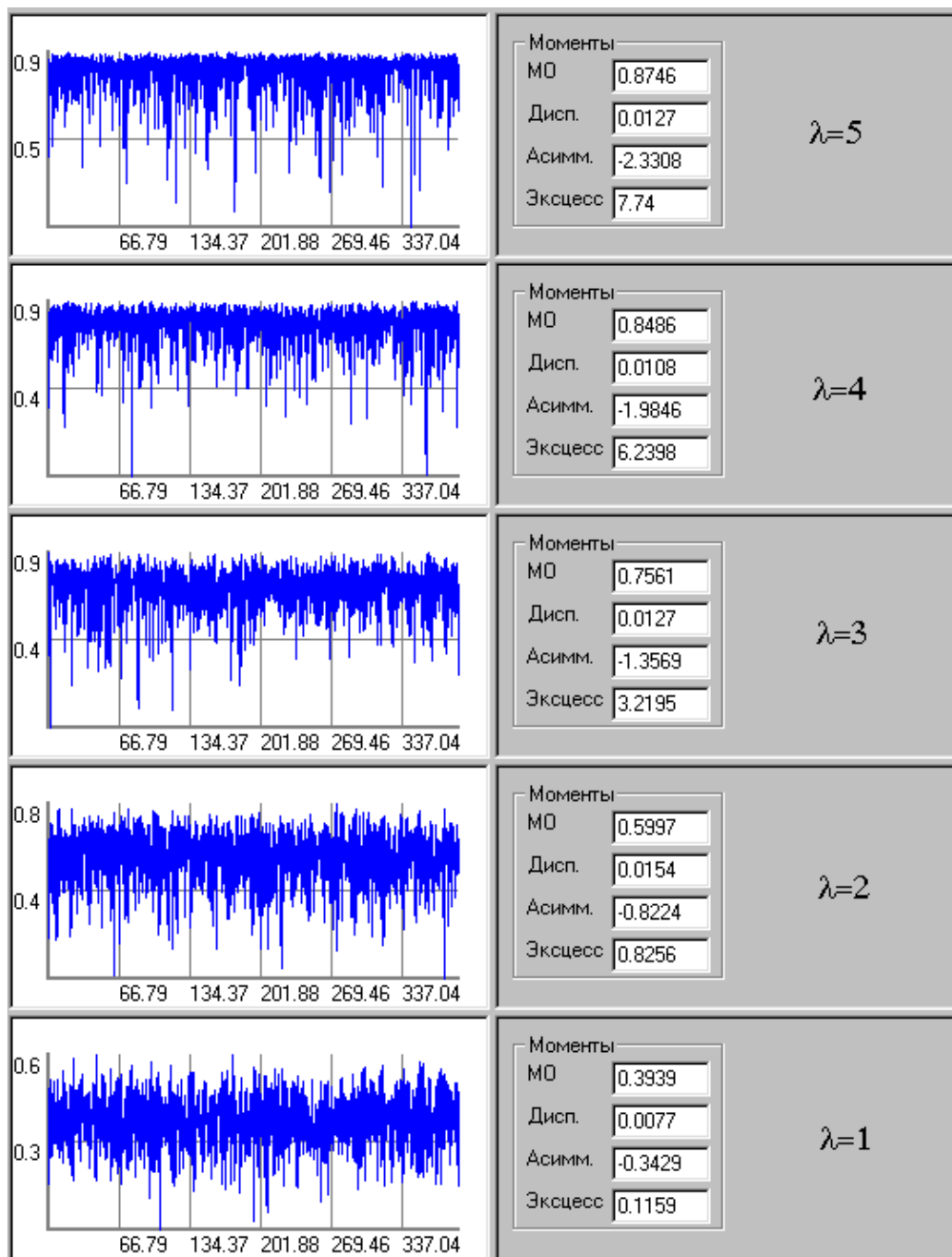


Рисунок 8.5. Процессы и моментные характеристики при различных параметрах нелинейного преобразования

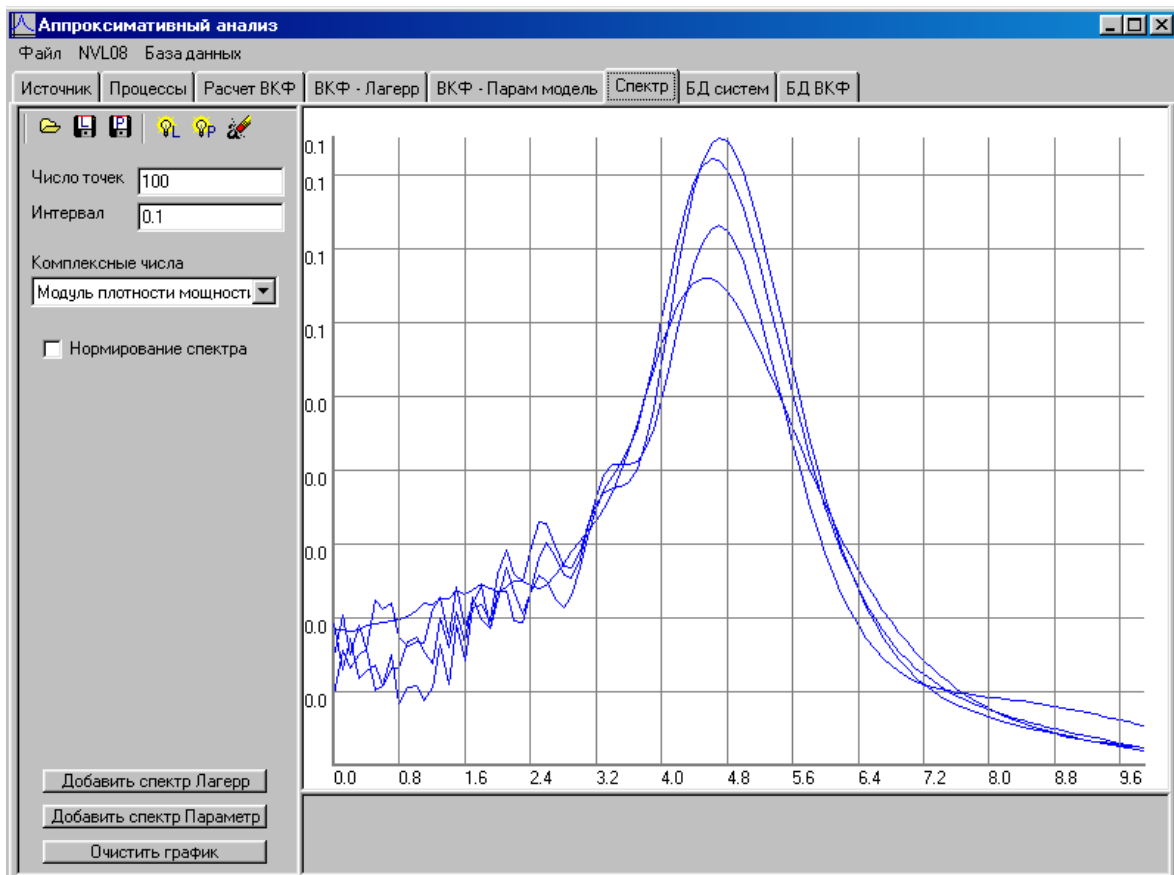


Рисунок 8.6. Модули спектральной плотности мощности процессов при разных параметрах нелинейного преобразования

Другой способ задания нелинейного преобразования – линейная интерполяция функции преобразования – позволяет получать фактически любые виды преобразований, однако обладает меньшей точностью, чем аналитическое задание функций. Здесь можно задать точки функции вручную, или загрузить из файла. Результаты, полученные при таком задании нелинейного преобразования, представлены на рисунке 8.7, 8.8, функция преобразования – на рисунке 8.9. В этом примере меняется закон распределения, но оставляет неизменным вид корреляционной функции.

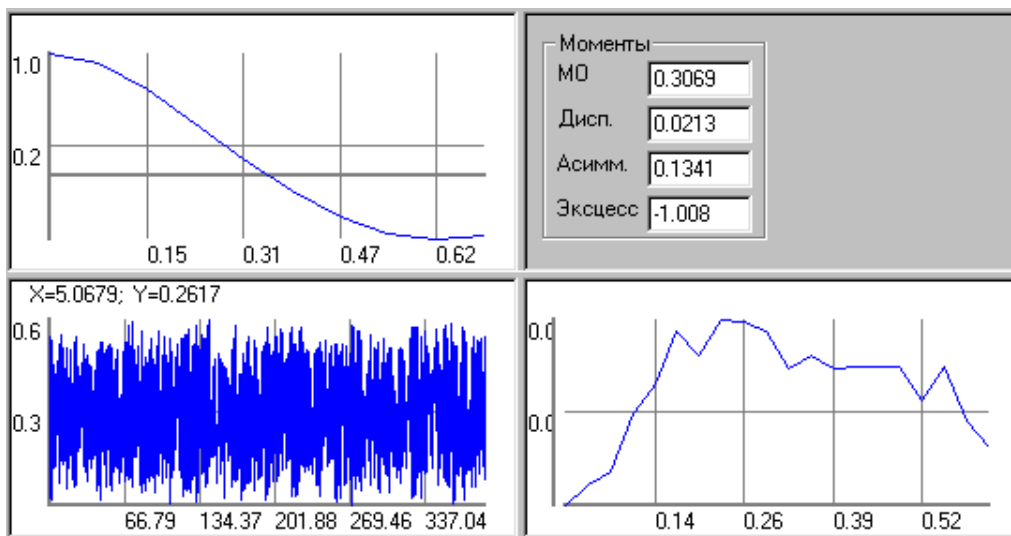


Рисунок 8.7. Характеристики процесса при нелинейном преобразовании, заданном с помощью линейной интерполяции

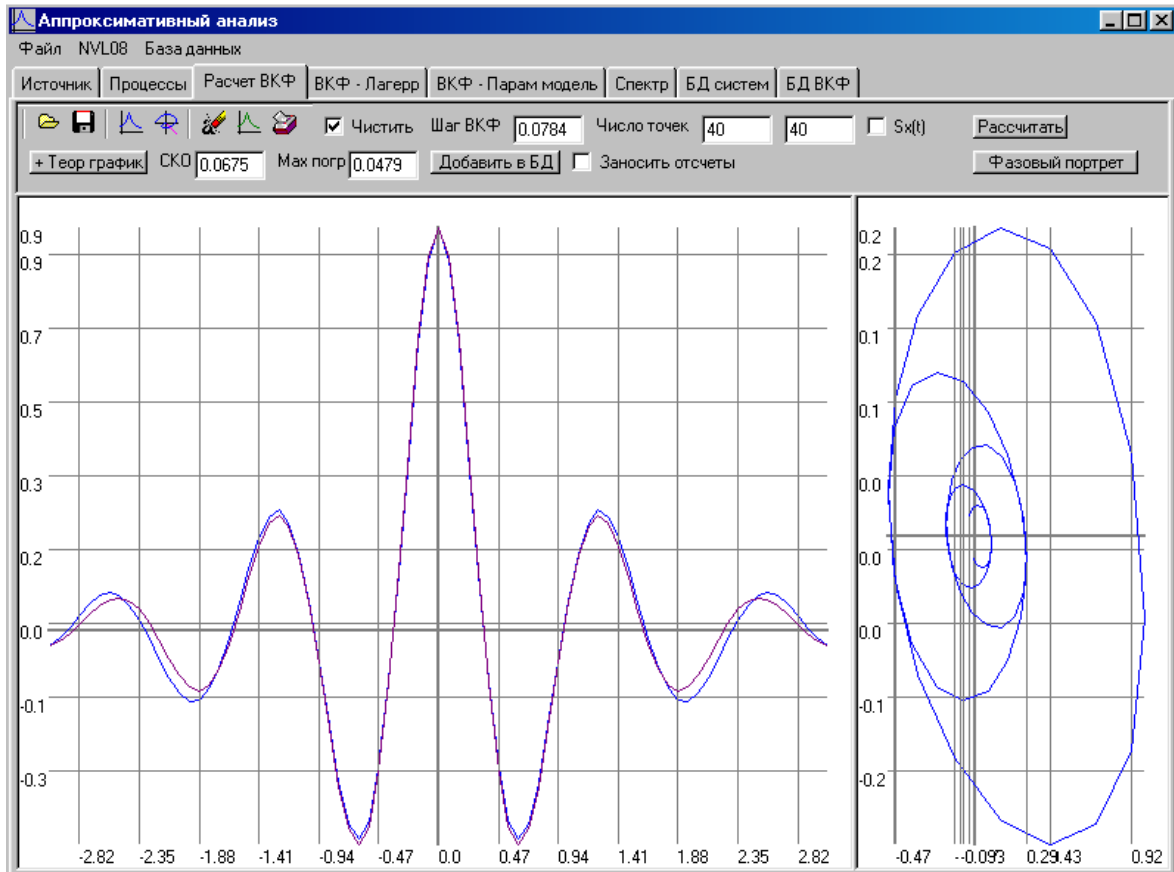


Рисунок 8.8. Корреляционная функция процесса с законом распределения, отличным от нормального

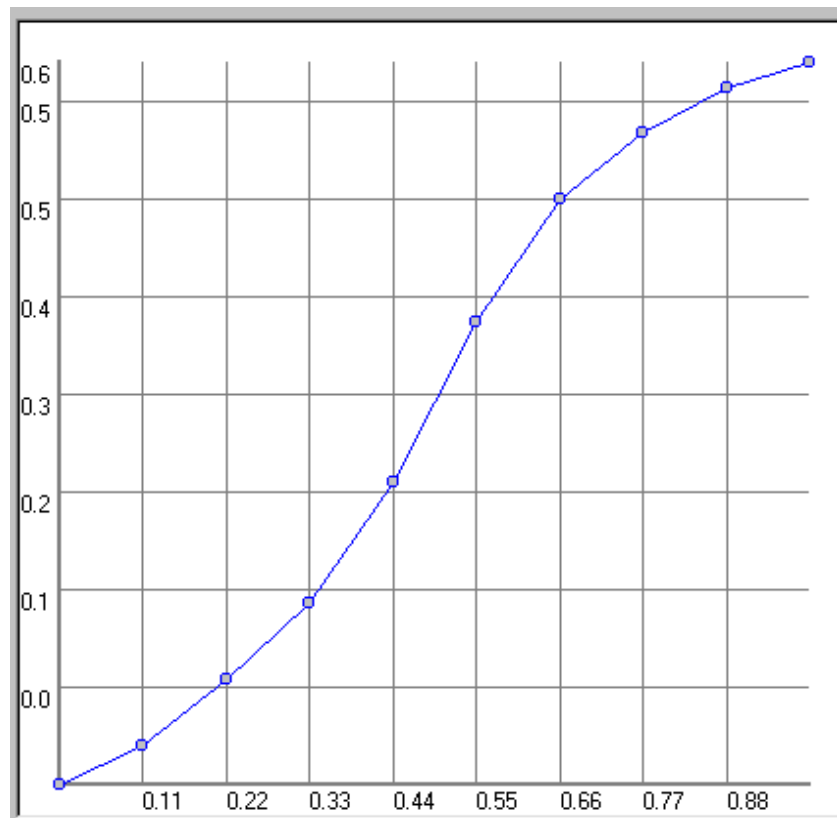


Рисунок 8.9. Функция нелинейного преобразования

Другой пример иллюстрирует, как нелинейное преобразование приведёт не только к изменению закона распределения случайного процесса, но и вида корреляционной функции.

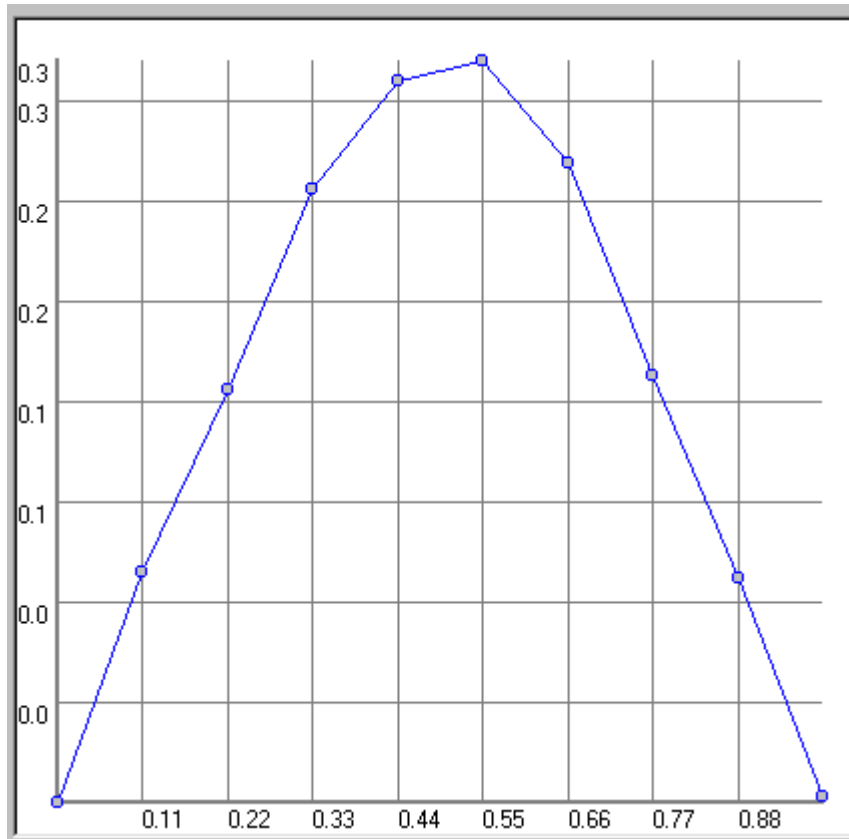


Рисунок 8.10. Функция нелинейного преобразования, приводящего к изменению вида КФ

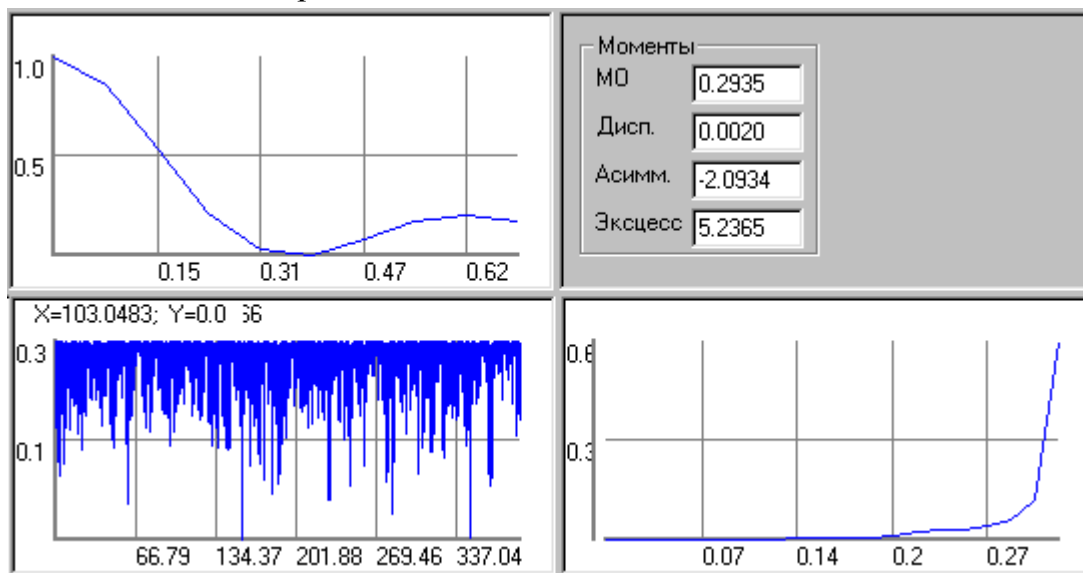


Рисунок 8.11. Характеристики процесса после нелинейного преобразования, меняющего вид КФ

На рисунках 8.12–8.14 приведены корреляционная функция, результаты ее аппроксимации ортогональными функциями Лагерра и построенная по ним спектральная плотность мощности.

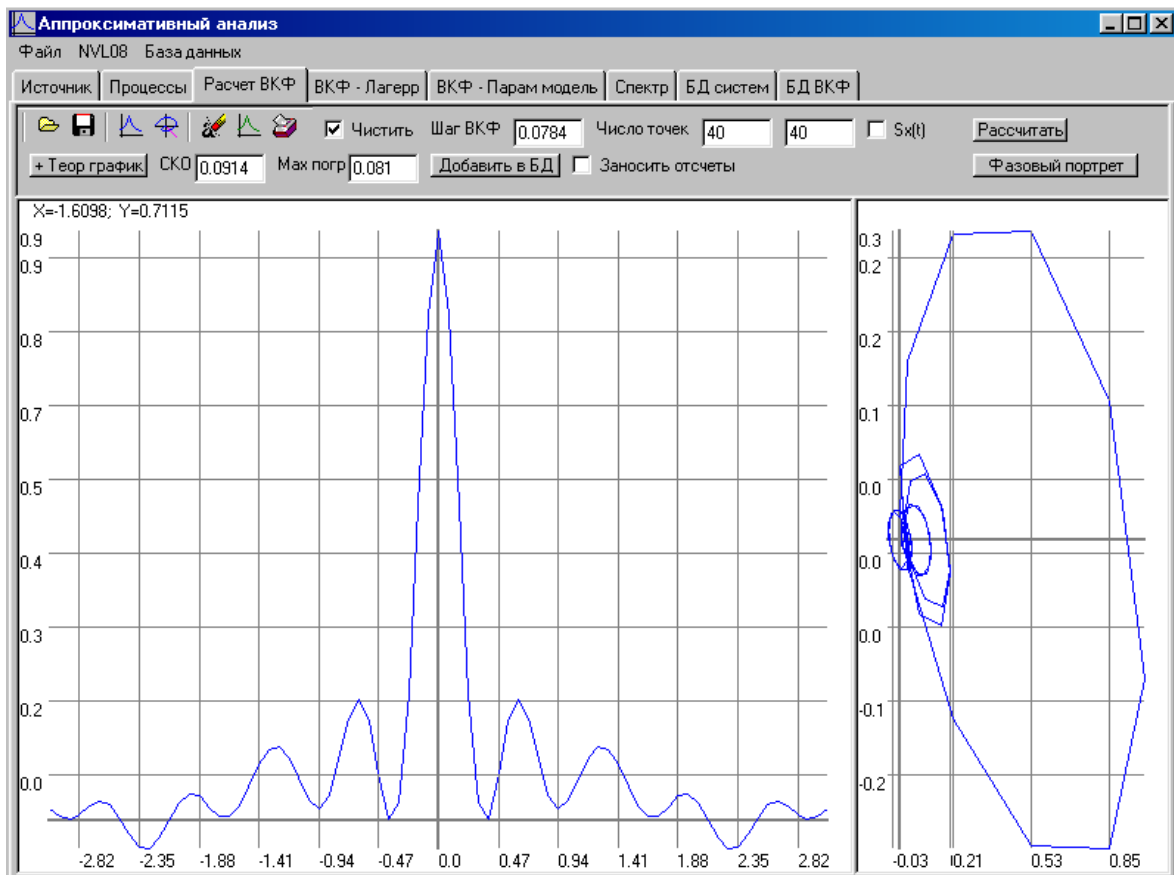


Рисунок 8.12. Корреляционная функция после нелинейного преобразования

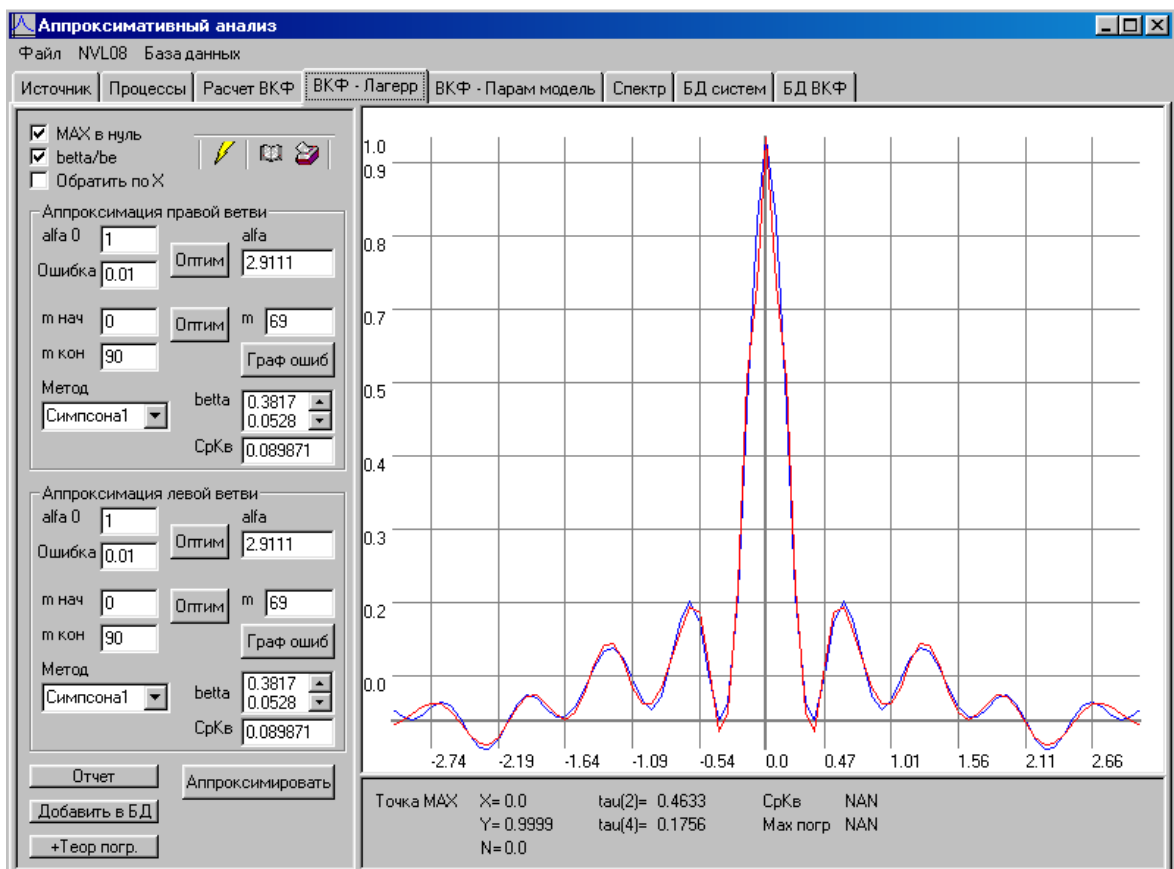


Рисунок 8.13. Аппроксимация корреляционной функции процесса с законом распределения, отличным от нормального

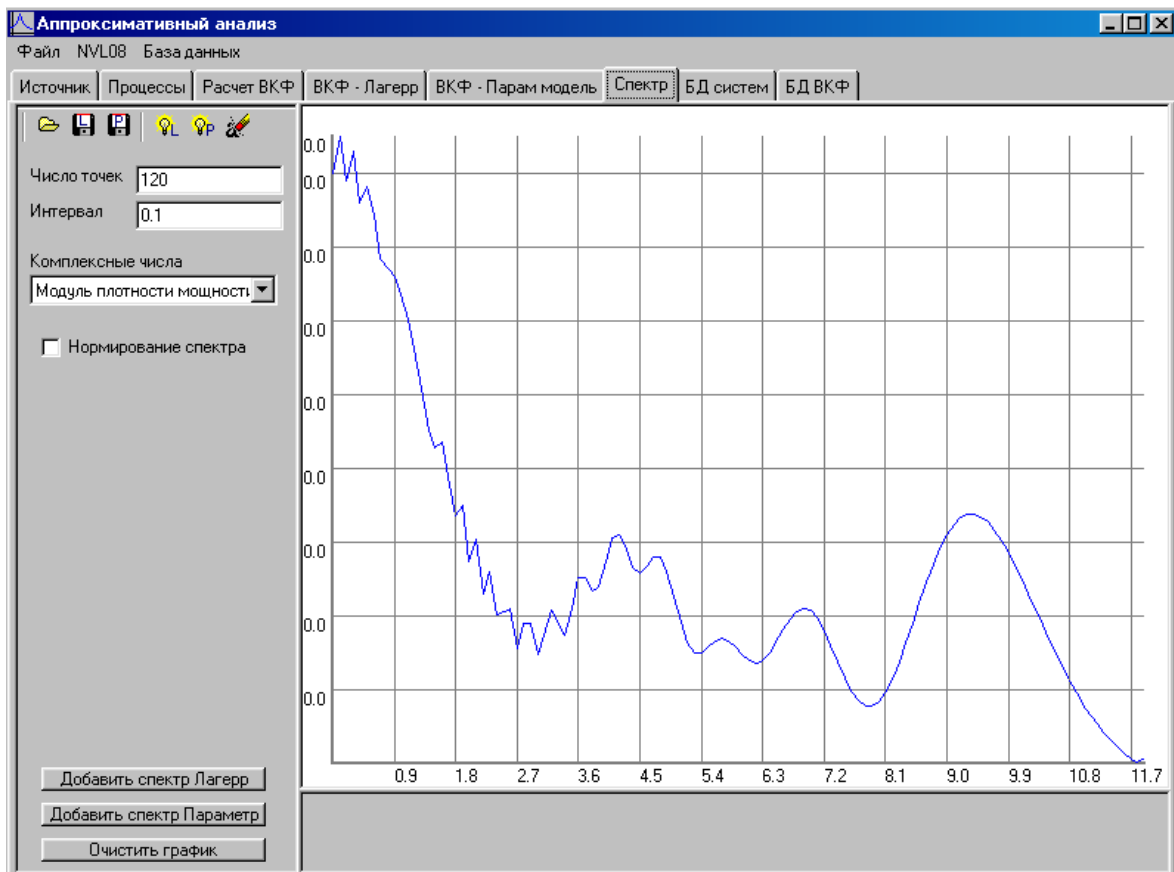


Рисунок 8.14. Модуль спектральной плотности мощности процесса с законом распределения, отличным от нормального

Линейная интерполяция позволяет задать фактически любое преобразование, однако страдает некоторой неточностью представления функции. Поэтому, в ряде случаев более эффективным является использование метода аппроксимации нелинейного преобразования, например, ортогональными функциями Лагерра. В завершение лабораторной работы предлагается провести несколько экспериментов по представлению функции нелинейного преобразования с помощью ряда Лагерра и получить взаимные корреляционные функции.

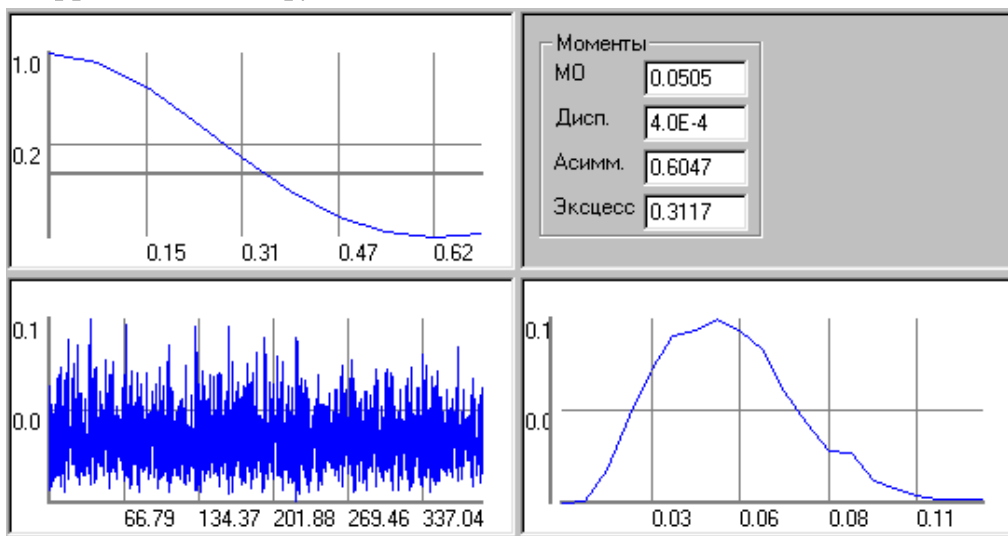


Рисунок 8.15. Характеристики процесса после нелинейного преобразования с использованием функций Лагерра

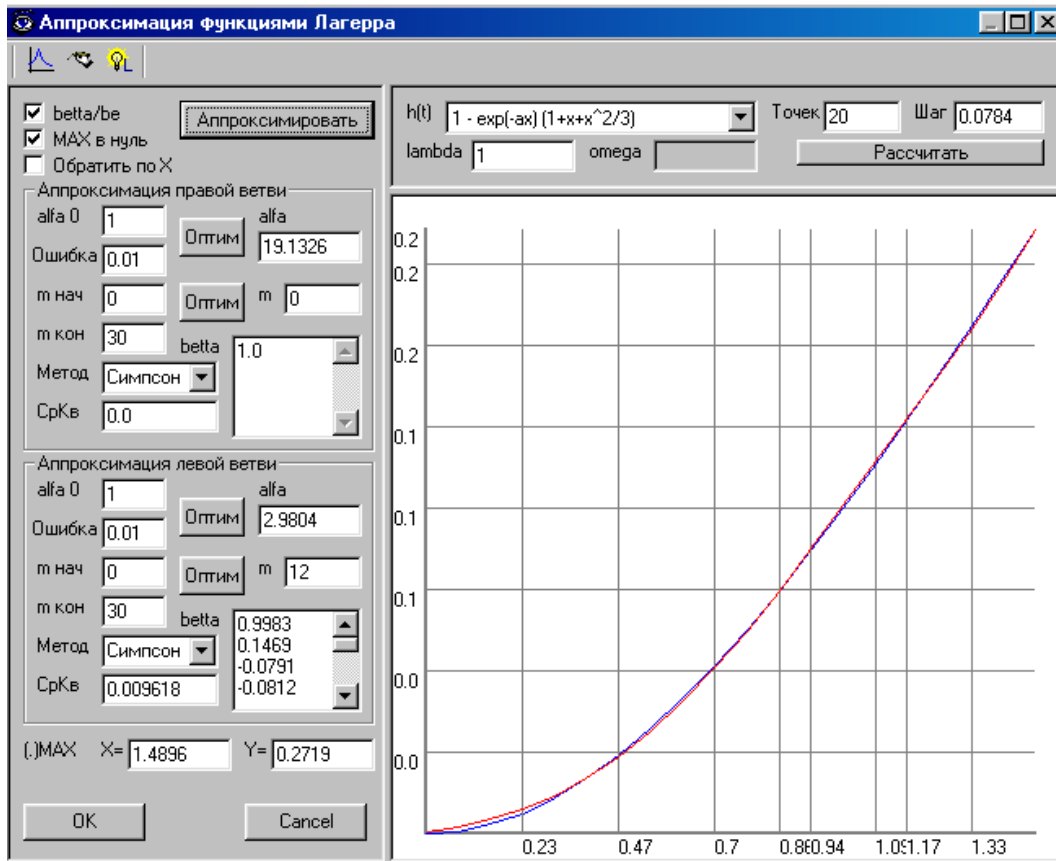


Рисунок 8.16. Аппроксимация функции нелинейного преобразования функциями Лагерра

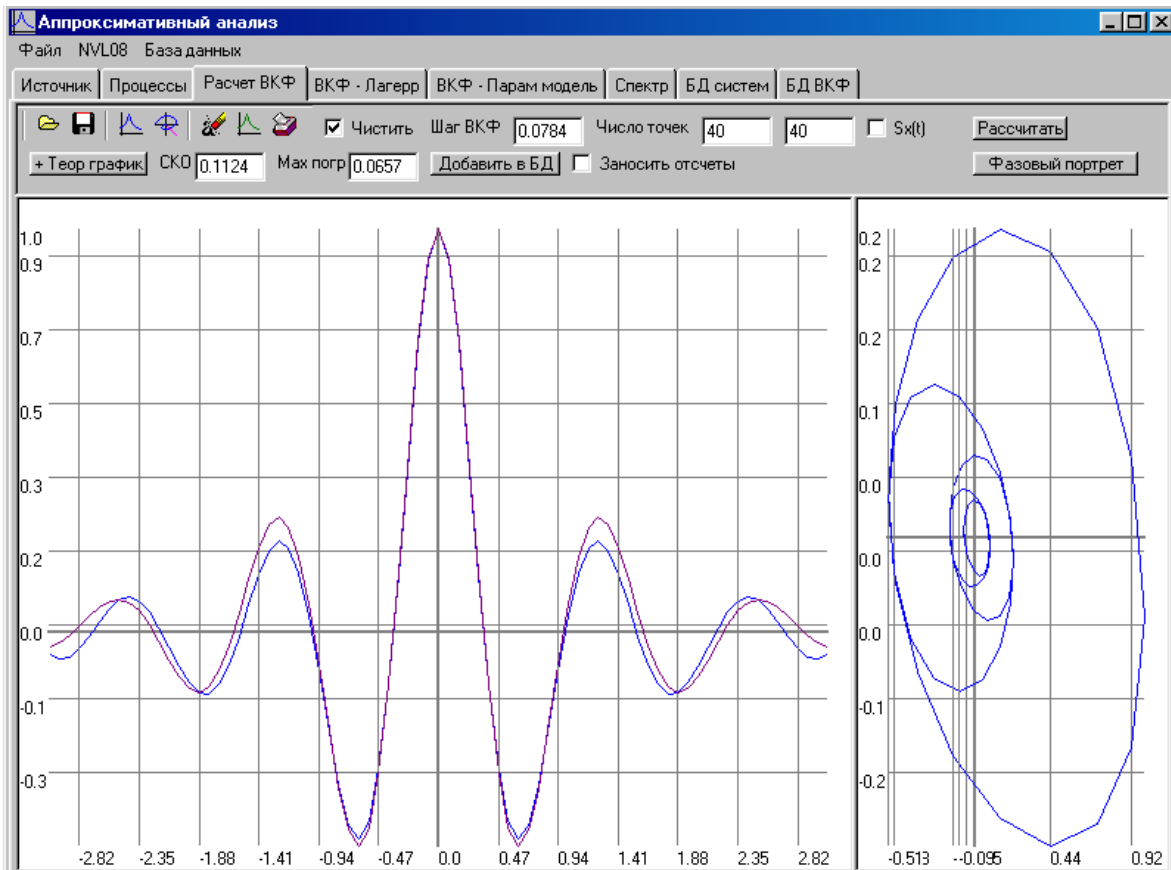


Рисунок 8.17. Корреляционная функция процесса после нелинейного преобразования с использованием функций Лагерра

8.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: вид функций, параметры, вид нелинейного преобразования.
2. Составить схему, содержащую нелинейный преобразователь. Настроить модули.
3. Скомпилировать систему и построить ВКФ.
4. Построить спектральные плотности мощности для нескольких значений параметра функции нелинейного преобразования. Для этого построить ВКФ и провести их аппроксимацию одним из методов.
5. Провести нелинейное преобразование, пользуясь линейной интерполяцией функции. Выбрать функцию, при которой вид корреляционной функции остается аналогичным случаю отсутствия нелинейного преобразователя. Построить ВКФ. Какие это функции?
6. Провести аппроксимацию функциями Лагерра функции нелинейного преобразования. Построить ВКФ.
7. Оформить отчет.

8.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. Графики ВКФ и спектральных плотностей мощности. Для каждой корреляционной функции обязательно указать значения моментов (матожидания, дисперсии и проч.) случайных процессов.

8.4. Контрольные вопросы

1. Что представляет собой нелинейное преобразование?
2. Почему после выполнения нелинейного преобразования меняется закон распределения?
3. Как определяется нормированная корреляционная функция? Что характеризуют моментные характеристики?
4. Нужно ли нормировать случайный процесс перед выполнением нелинейного преобразования? Почему?

9. АППРОКСИМАТИВНЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Цель работы: приобретение навыков корреляционно-спектрального анализа данных, получаемых в ходе эксперимента.

9.1. Содержание лабораторной работы

Преыдущие лабораторные работы были тесно связаны с моделированием процессов и анализом данных, полученных в результате имитационного моделирования. После выполнения этих работ можно приступить к проведению реальных экспериментов и аппроксимативному анализу данных, поступающих извне автоматизированной системы. В системе поддерживается возможность использования файлов практически на всех этапах корреляционно-спектрального анализа. Для выполнения этой лабораторной работы настоятельно рекомендуем ознакомиться с форматами файлов системы.

Спецификой работы с данными, полученными в ходе экспериментов (например, физических), является отсутствие какой-либо информации о случайных процессах. Особенно критическим может стать отсутствие информации о виде корреляционных функций. При использовании параметрических моделей в качестве аппроксимирующих выражений в этом случае необходимо проводить идентификацию вида функции – в качестве одного из способов идентификации предлагается сравнение фазовых портретов (для приводимого примера на рисунке 9.3 см. рисунок 9.1). В случае анализа взаимных корреляционных функций, из-за их большого разнообразия, задача выбора аналитической модели затруднена, и аппроксимация может быть произведена с помощью ортогональных функций Лагерра.

Лабораторная работа включает загрузку функций, полученных в результате эксперимента из файла, подбор наилучшего (здесь критерием служит минимум среднеквадратической погрешности) аппроксимирующего выражения и построение спектральной плотности мощности. Для аппроксимации ортогональными функциями Лагерра необходимо формировать файлы отчета.

На рисунках 9.2–9.5 и в таблице 1 приведены результаты первого эксперимента, на рисунках 9.6–9.9 и в таблице 2 – второго эксперимента.

Отдельно отметим, что особое внимание при работе с данными, полученными в результате эксперимента, следует обратить на определение интервала дискретизации, как аппроксимируемой функции, так и ее преобразования Фурье.

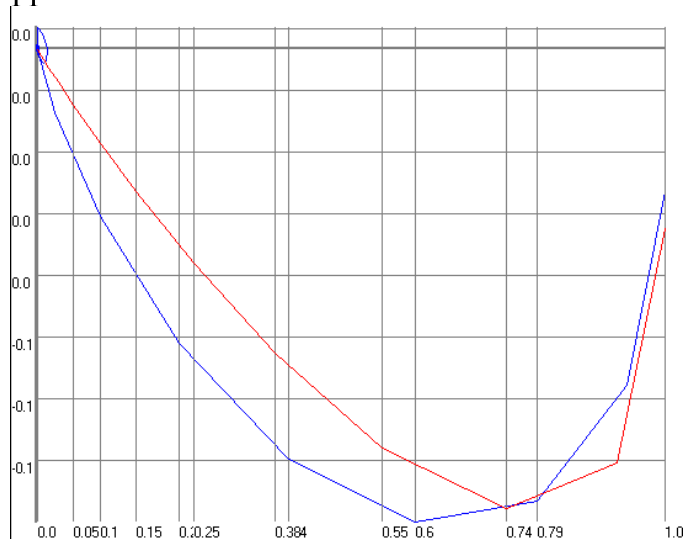


Рисунок 9.1. Идентификация по фазовым портретам

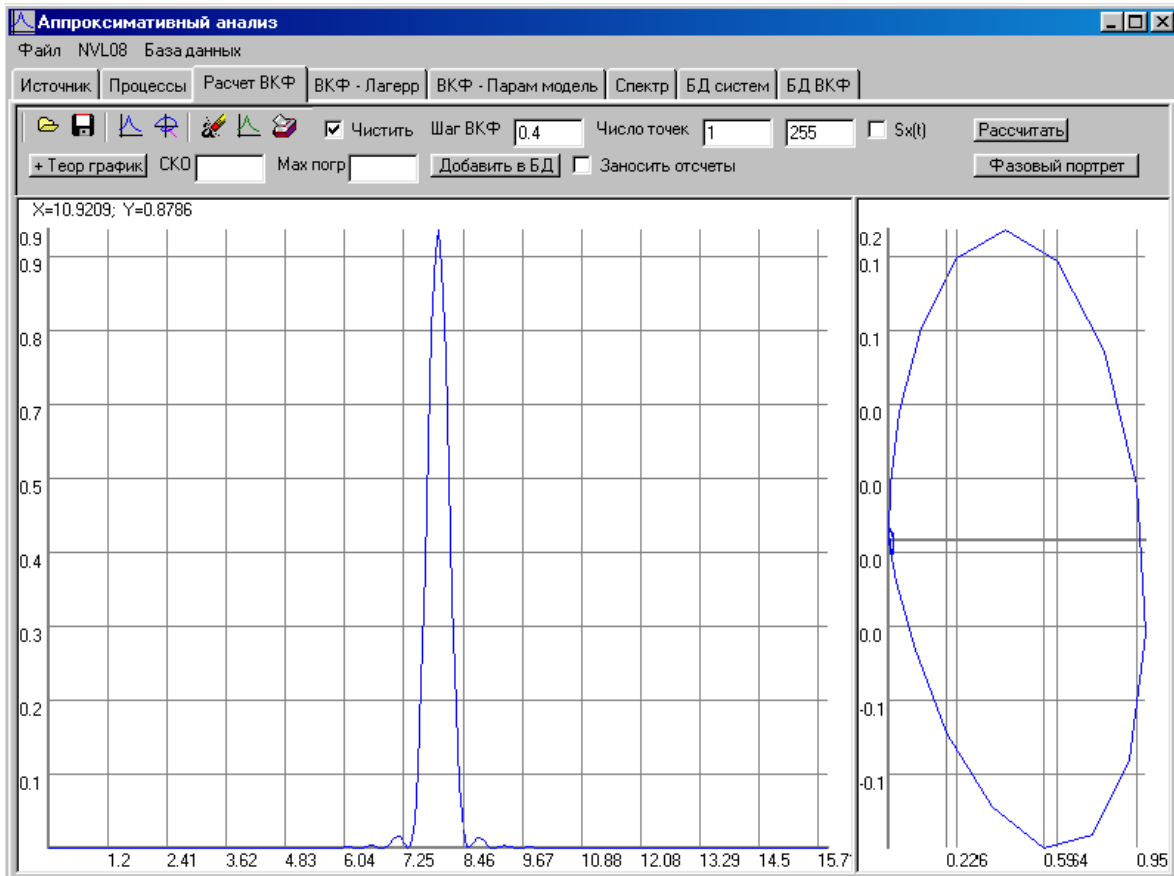


Рисунок 9.2. Аппроксимируемая функция

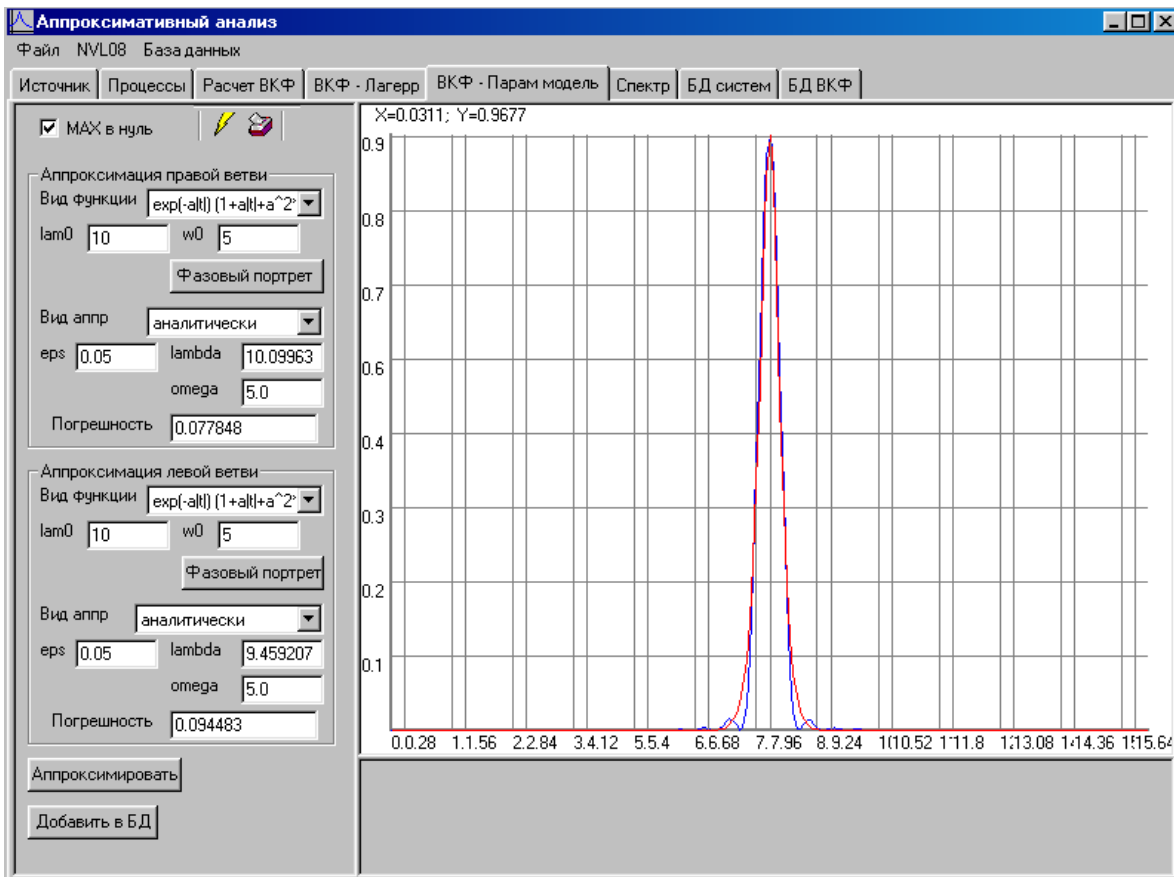


Рисунок 9.3. Аппроксимация функциями заданного вида

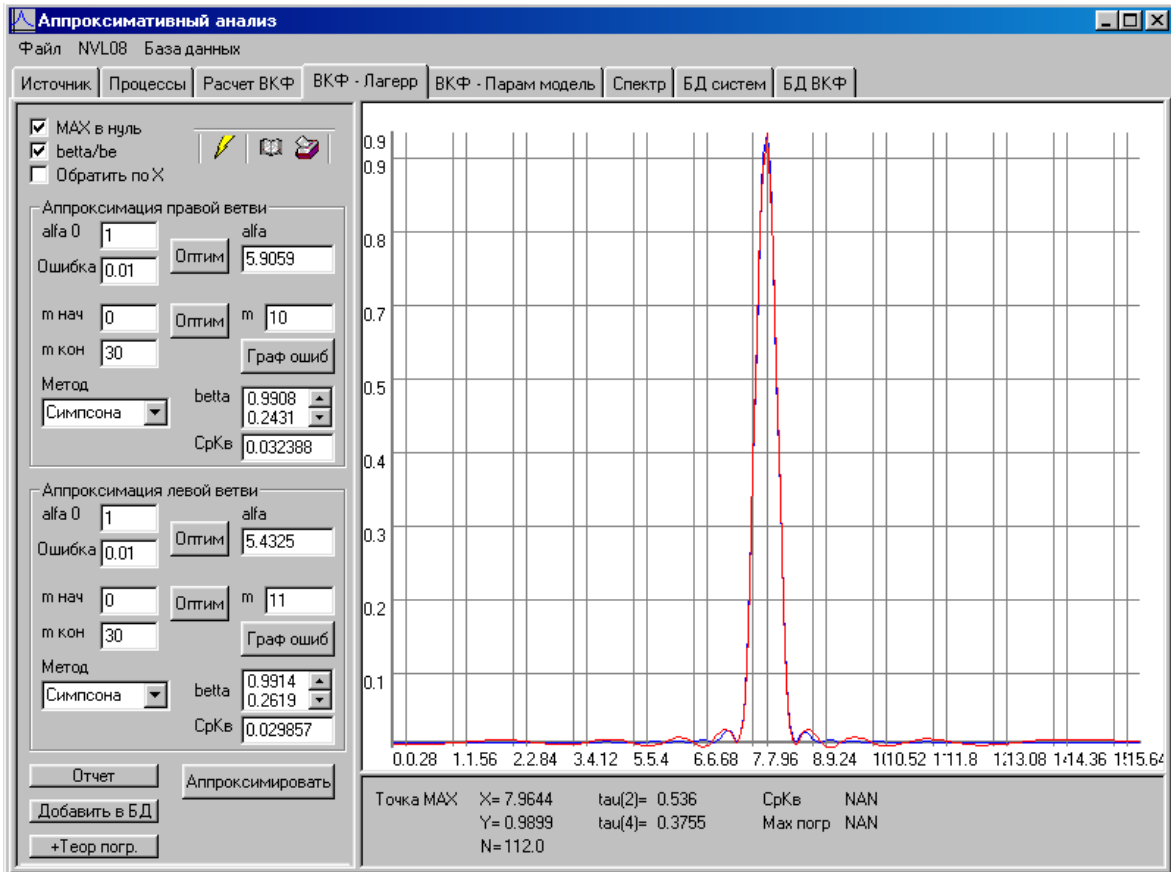


Рисунок 9.4. Аппроксимация ортогональными функциями Лагерра

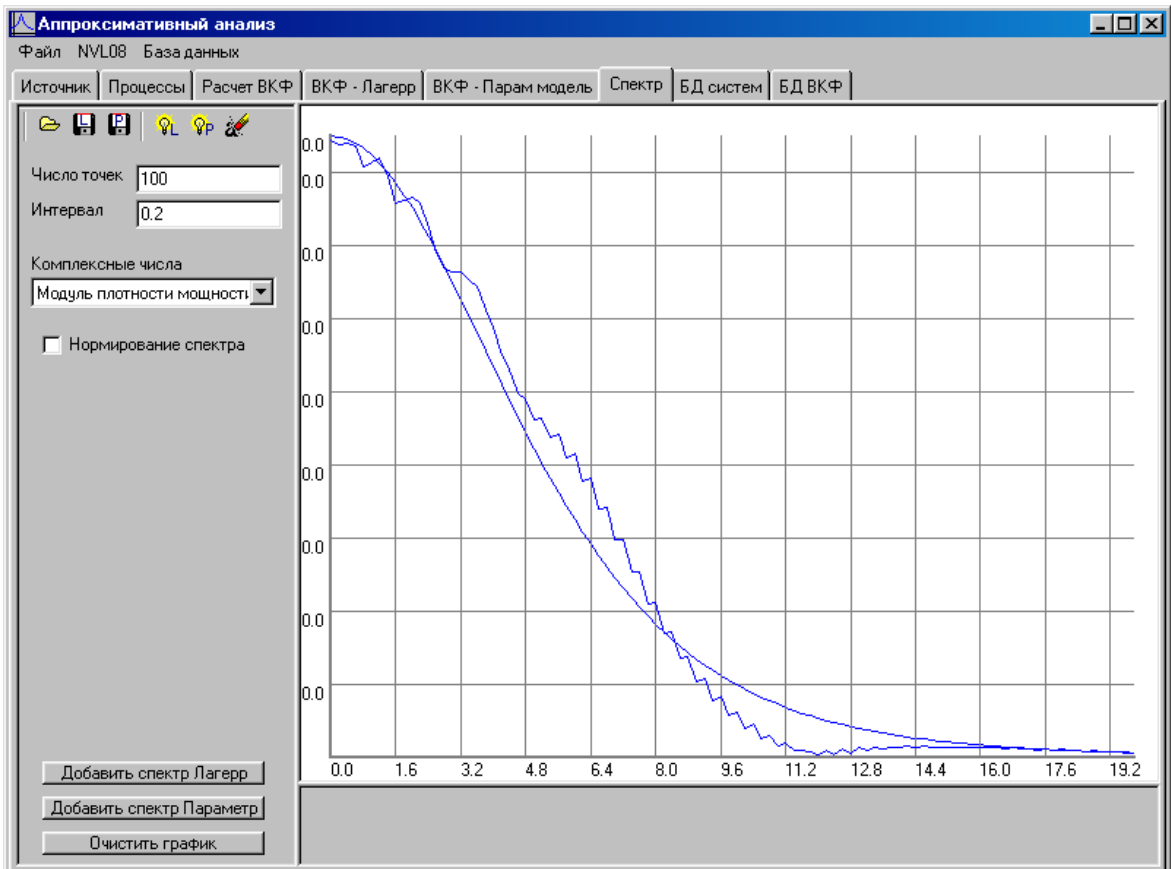


Рисунок 9.5. Модули спектральной плотности мощности

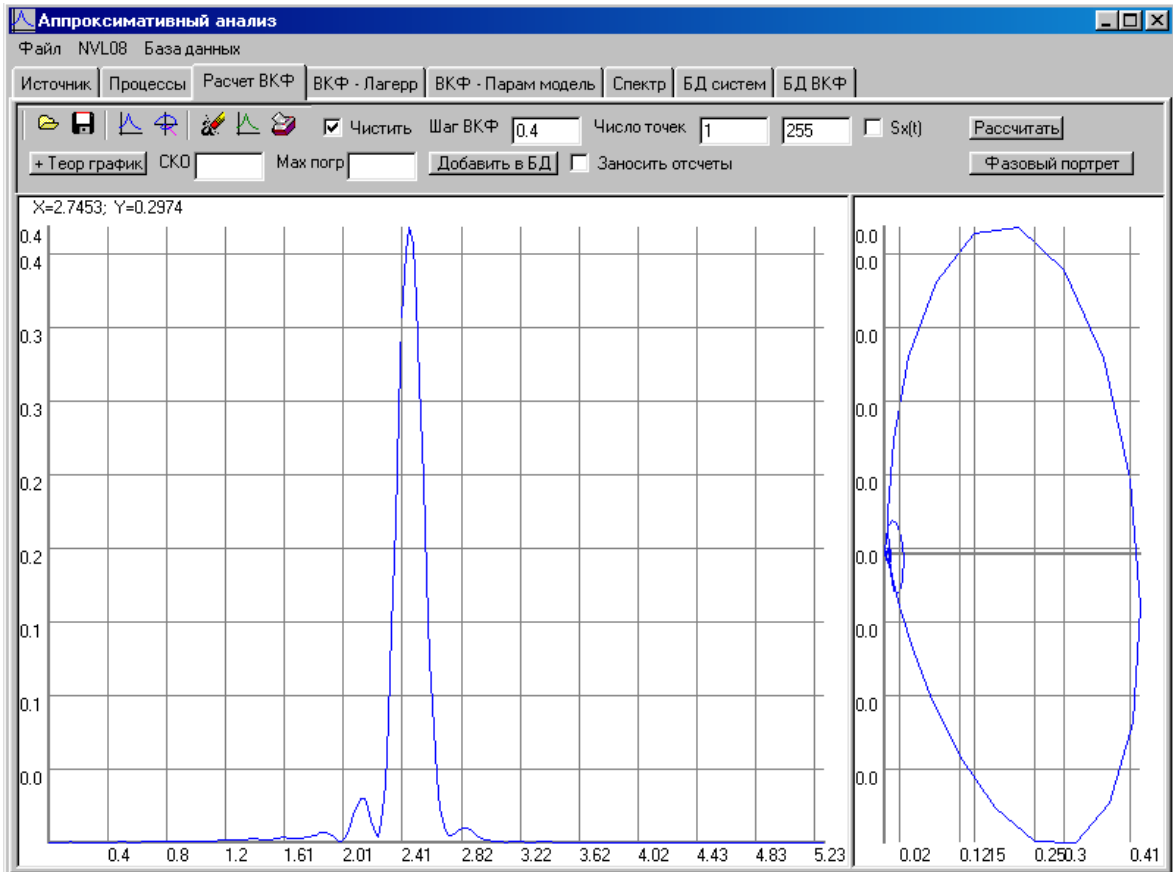


Рисунок 9.6. Аппроксимируемая функция (пример 2)

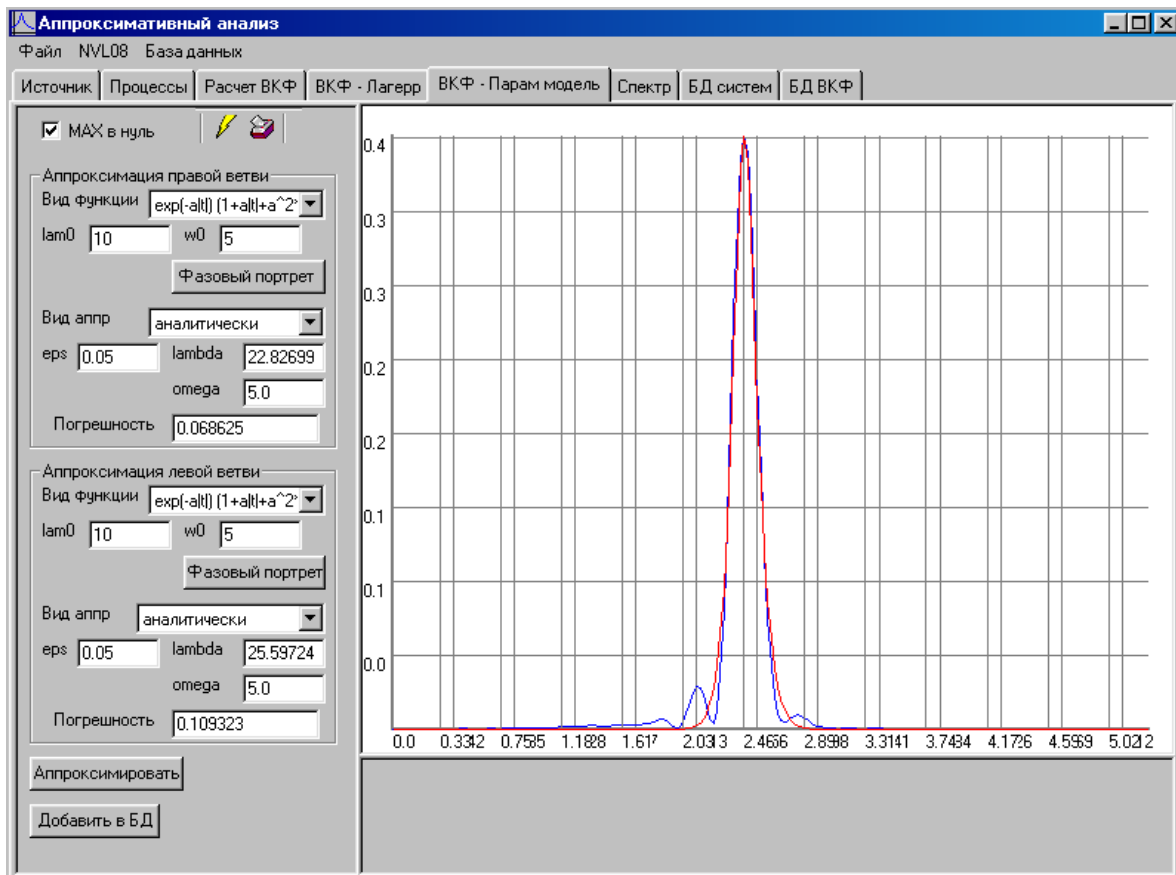


Рисунок 9.7. Аппроксимация функциями Лагерра (пример 2)

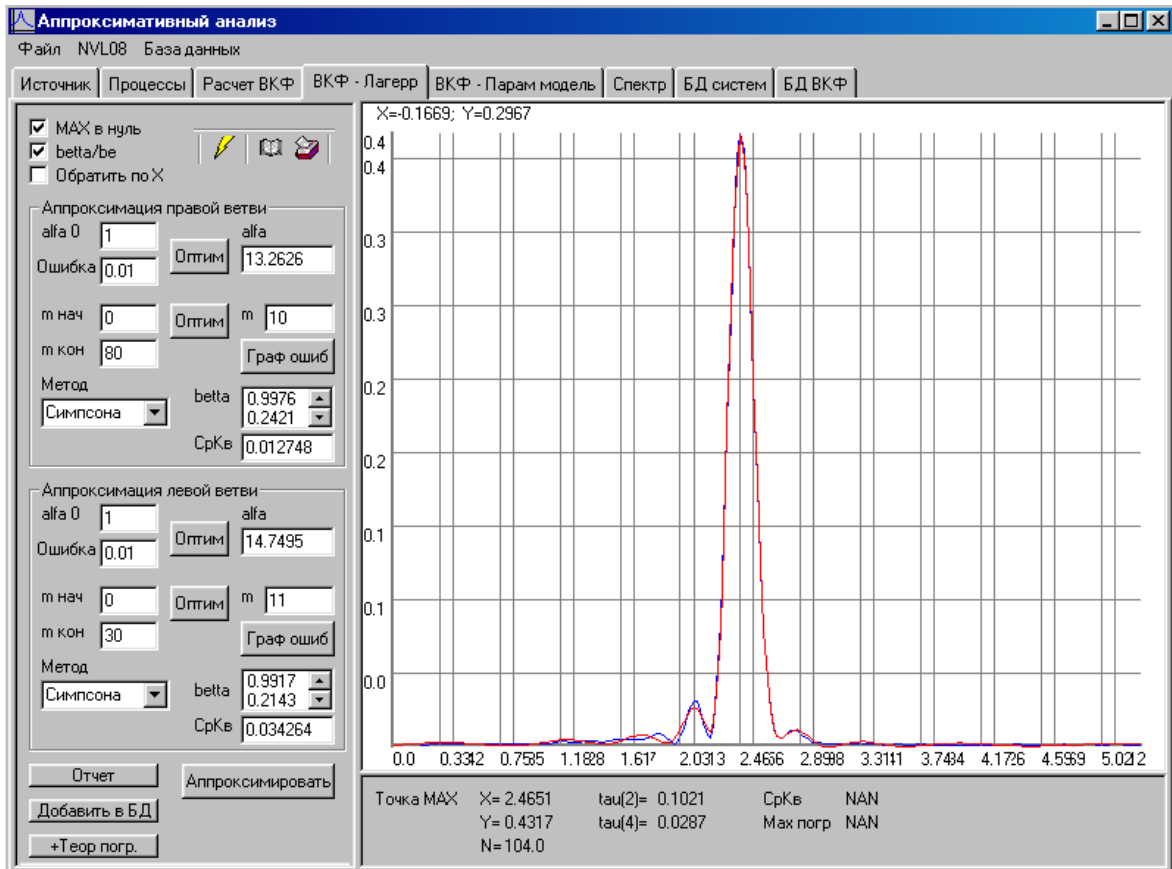


Рисунок 9.8. Аппроксимация функциями заданного вида (пример 2)

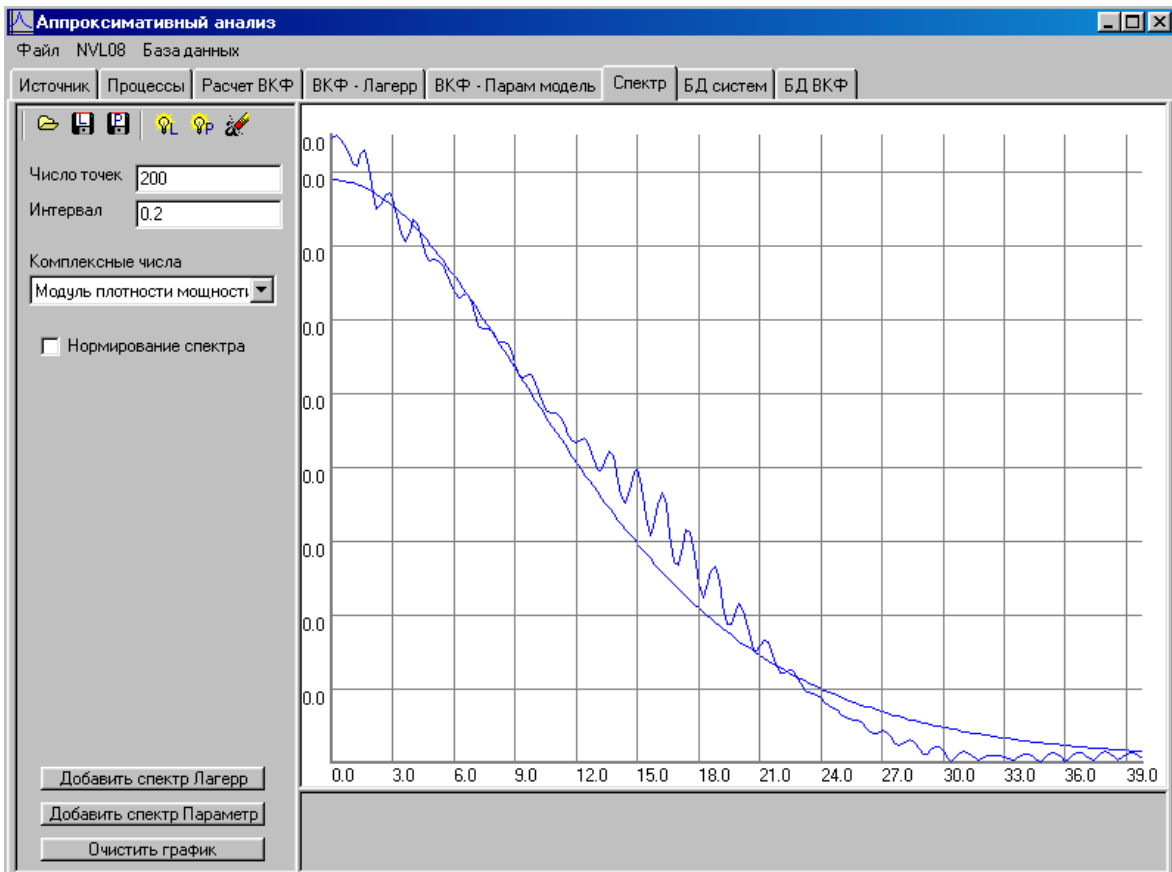


Рисунок 9.9. Модули спектральной плотности мощности (пример 2)

Результаты аппроксимации ортогональными функциями Лагерра
(интерпретация файла отчета)

Таблица 9.1

Эксперимент	1	2
	Right wing:	Right wing:
	alfa	alfa
α	5.9059	13.2626
	betta	betta
$\beta_{0,\Pi}$	0.990879	0.997665
$\beta_{1,\Pi}$	0.243135	0.242111
$\beta_{2,\Pi}$	-0.03205	-0.009848
$\beta_{3,\Pi}$	-0.115767	-0.097262
$\beta_{4,\Pi}$	-0.107133	-0.098377
$\beta_{5,\Pi}$	-0.06857	-0.069211
$\beta_{6,\Pi}$	-0.02587	-0.030672
$\beta_{7,\Pi}$	0.006909	-7.97E-4
$\beta_{8,\Pi}$	0.027949	0.018734
$\beta_{9,\Pi}$	0.038286	0.024096
$\beta_{10,\Pi}$	0.042234	0.023561
	Left wing	Left wing
	alfa	alfa
α	5.4325	14.7495
	betta	betta
$\beta_{0,\Lambda}$	0.991421	0.991763
$\beta_{1,\Lambda}$	0.261934	0.214394
$\beta_{2,\Lambda}$	-0.020403	0.02317
$\beta_{3,\Lambda}$	-0.11537	-0.106237
$\beta_{4,\Lambda}$	-0.116341	-0.107174
$\beta_{5,\Lambda}$	-0.082487	-0.100641
$\beta_{6,\Lambda}$	-0.040315	-0.050402
$\beta_{7,\Lambda}$	-0.005122	-0.010177
$\beta_{8,\Lambda}$	0.019218	0.025463
$\beta_{9,\Lambda}$	0.03231	0.040931
$\beta_{10,\Lambda}$	0.037568	0.043587
$\beta_{11,\Lambda}$	0.037587	0.035321
	MAX x,y,shift:	MAX x,y,shift:
τ_m	7.964444	2.465188
τ_m	0.989983	0.431741
m	112	104
	tau(2)	tau(2)
$\tau_{kxy}^{(2)}$	0.541491	0.236601
	tau(4)	tau(4)
$\tau_{kxy}^{(4)}$	0.383161	0.154083

9.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: файл с аппроксимируемой функцией или таблицу значений (график). В последнем случае необходимо создать файл, пользуясь описанием форматов файлов в приложении.
2. Аппроксимировать функцию ортогональными функциями Лагерра. Подобрать значения параметров, минимизируя среднеквадратическую погрешность аппроксимации. Создать файл отчета.
3. Аппроксимировать функцию параметрическими моделями. Определить наилучшую модель на основе результатов идентификации по фазовым портретам. В случае необходимости комбинировать методы подбора параметров (аналитический, конечно-разностный, Нелдера-Мида). При невозможности аппроксимации параметрическими моделями сделать соответствующие выводы.
4. По параметрам аппроксимирующих выражений определить преобразование Фурье от функции.
5. Оформить отчет.

9.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. Графики, иллюстрирующие аппроксимацию. В том числе привести графики неудачных результатов аппроксимации (в случае их наличия).
4. Выводы по работе.

9.4. Контрольные вопросы

1. В чем заключается специфика выбора вида модели и оценки ее параметров при аппроксимации взаимных корреляционных функций?
2. В чем заключается специфика аппроксимации взаимных корреляционных функций неэквидистантных временных рядов?
3. Какие данные необходимо сохранять при аппроксимации взаимных корреляционных функций ортогональными функциями Лагерра?
4. Для каких функций применимы разработанные алгоритмы аппроксимации? В каких случаях целесообразно использовать другие методы?

10. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Цель работы: ознакомление с подсистемой ввода/вывода, изучение особенностей передачи временных рядов с заданным видом корреляционной функции.

10.1. Содержание лабораторной работы

Лабораторная работа включает в себя:

- передачу процесса, прочитанного из файла и имеющего заданный вид корреляционной функции (формат файла указан в приложении П.8), через аналоговый канал;
- прием сгенерированного передатчиком сигнала в моменты времени, определяемые потоком событий;
- проверка стабильности времени реакции системы;
- проверка качества передачи временного ряда по числовым характеристикам процесса (матожидание, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса).

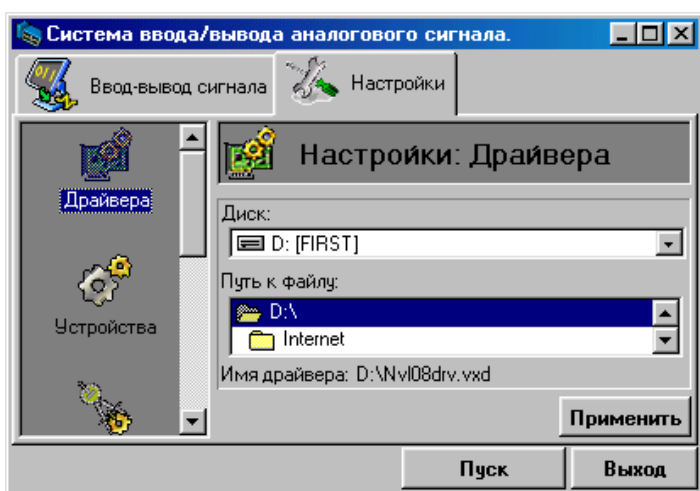


Рисунок 10.1. Настройка системы

Перед выполнением лабораторной работы производится подготовка подсистемы к передаче сигнала. Для чего с помощью «заглушки» соединяются выход ЦАП и вход АЦП. Порядок подготовки МФУ NVL08 описывается в 7 разделе. На вкладке, расположенной в верхней части экранной формы, выбирается страница **настроек системы**, где задается путь к файлу драйвера (см. рис. 10.1), определяются параметры устройства (см. рис. 10.2), производится градуировка АЦП (см. рис. 10.3).

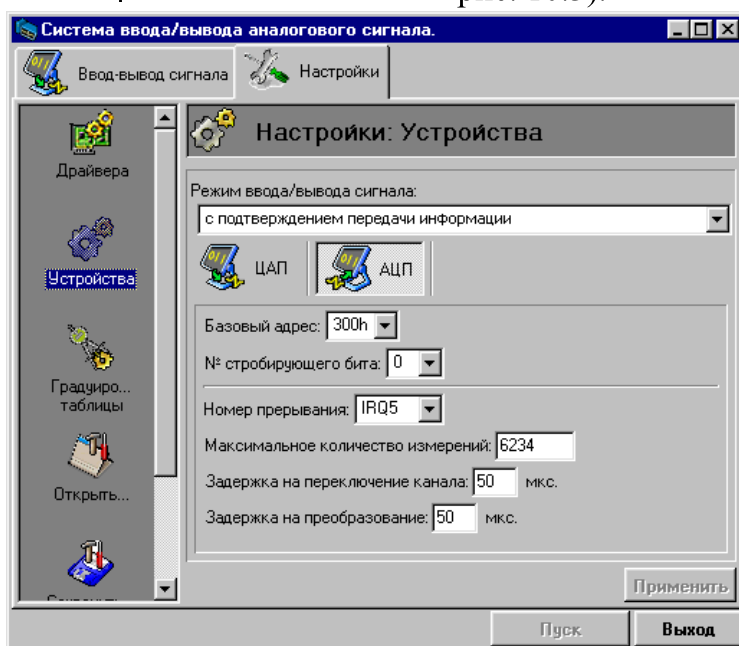


Рисунок 10.2. Определение параметров устройства

Учитывая, что лабораторная работа выполняется на одной ЭВМ, в качестве источника напряжения используется ЦАП. Так как характеристики ЦАП и АЦП близки к линейным, для получения градуировочной характеристики достаточно произвести два измерения при значениях уровня напряжения, близких к границам диапазона входных напряжений АЦП. В случае необходимости, градуировочную характеристику и настройки системы можно сохранить в файл, что позволит при последующих запусках системы не производить её повторной настройки.

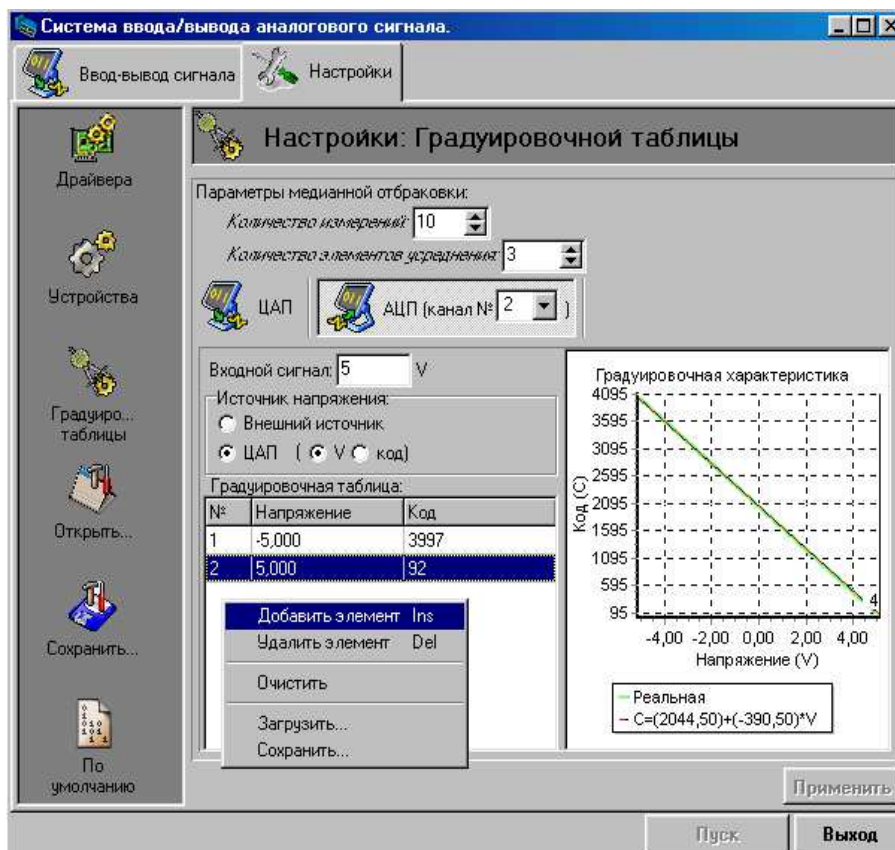


Рисунок 10.3. Градуировка АЦП

После того как система настроена, необходимо задать источник сигнала в **подсистеме вывода**. Источником является файл определенного в приложении П.8 формата. Для этого в списке «Источник» выбирается элемент «Открыть...». В появившемся диалоговом окне задается имя файла, после чего происходит его чтение и подготовка процесса к передаче через аналоговый канал.

Для приема сигнала в списке «Приемник» необходимо указать имя файла, на подвижной панели приемника задать и сгенерировать поток событий, указать параметры АЦП и коммутатора каналов.

После выполнения указанных действий необходимо нажатием кнопки «Пуск» запустить **сеанс приема/передачи**. По окончании приема сигнала подсистема определяет значения: максимального отклонения временных меток реального и идеального процессов - Δ , их среднеквадратическое отклонение - **СКО**, вычисляет **математическое ожидание**, **дисперсию**, **коэффициенты асимметрии** и **эксцесса** процесса. При этом у вычисленных характеристик указываются индексы **пер.** и **прин.** для приемника и передатчика соответственно. Все полученные результаты сводятся в таблицу 10.1.

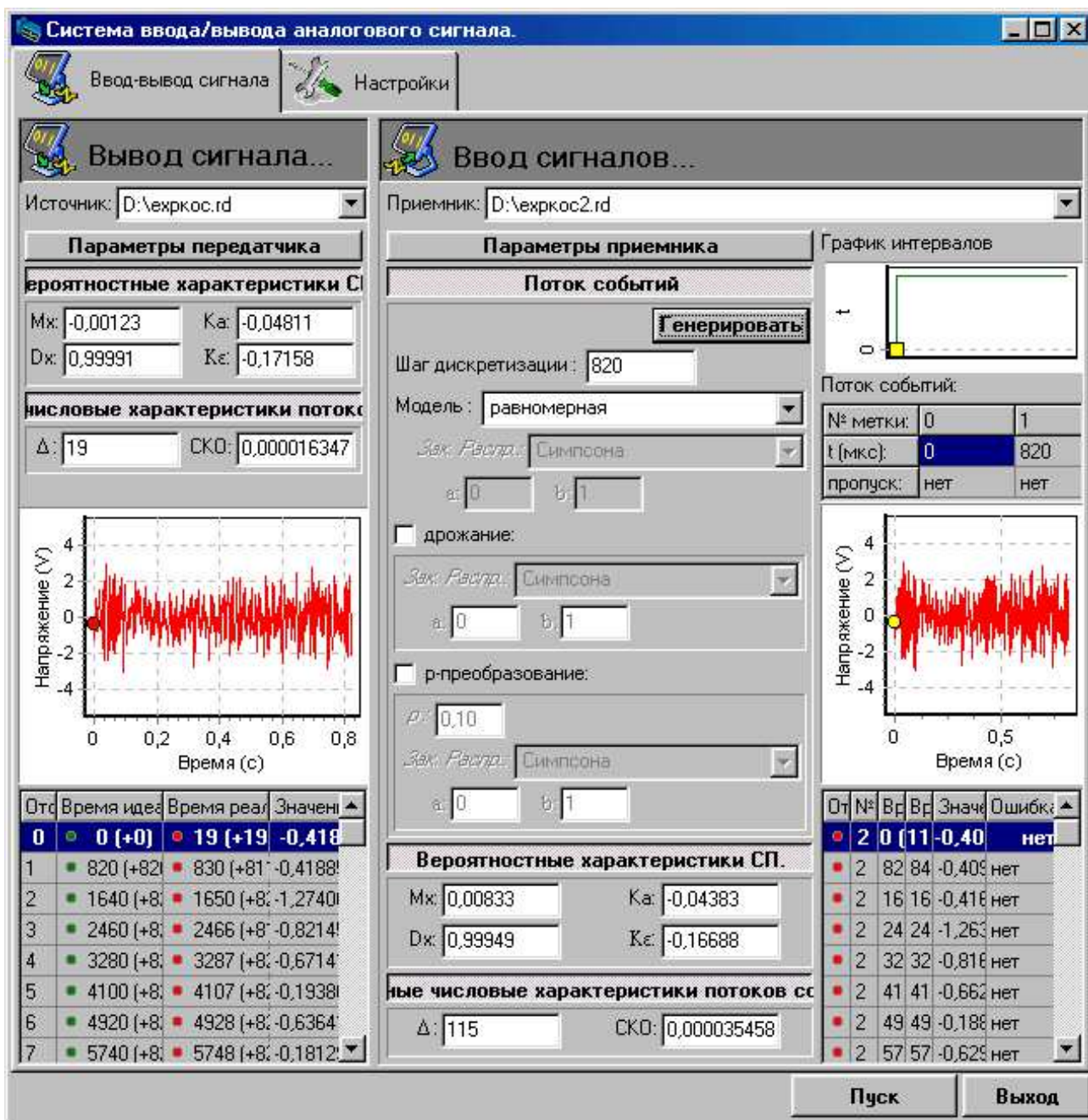


Рисунок 10.1. Ввод/вывод сигнала

Шаблон таблицы результатов измерений

Таблица 10.1

№ изме- рения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.}}$	$D_{x_{пер.}}$	$K_{а_{пер.}}$	$K_{ε_{пер.}}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин}}$	$D_{x_{прин.}}$	$K_{а_{прин}}$	$K_{ε_{прин}}$
1								
...								
29								

В таблице приняты следующие обозначения:

- Δ – максимальное отклонение между временными метками реального и идеального процессов;

- СКО – среднеквадратическое отклонение временных меток реального от временных меток идеального процесса;
- M_x – математическое ожидание процесса;
- D_x – дисперсия процесса;
- K_a – коэффициент асимметрии;
- K_ε – коэффициент эксцесса.

В работе необходимо произвести 29 экспериментов по передаче временных рядов через аналоговый канал и оценить погрешность принятых процессов. Результаты представляются в виде графиков погрешностей и СКО, вычисляется разность моментных характеристик принятого и переданного процессов.

Рассмотрим пример выполнения лабораторной работы со следующими исходными данными:

1. имя файла исходного временного ряда – «exrcos.rd»;
2. поток событий приемника:
 - шаг принудительной дискретизации - 100 мкс;
 - модель дискретизации – равномерная;
 - помехи отсутствуют.

Пример отчета

Таблица 10.2

№ изме- рения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.}}$	$D_{x_{пер.}}$	$K_{a_{пер.}}$	$K_{\varepsilon_{пер.}}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин}}$	$D_{x_{прин.}}$	$K_{a_{прин}}$	$K_{\varepsilon_{прин}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	36	0,00002	111	0,00004	-0,00965	0,00055	-0,00414	-0,00359
2	24	0,00002	111	0,00004	-0,00969	0,00052	-0,00438	-0,00388
3	22	0,00002	111	0,00004	-0,01198	-0,00556	-0,01312	-0,00692
4	21	0,00002	113	0,00004	-0,00946	0,00052	-0,00479	-0,00423
5	23	0,00002	112	0,00004	-0,00958	0,00015	-0,00458	-0,00429
6	32	0,00002	115	0,00004	-0,00973	0,00067	-0,00442	-0,00546
7	45	0,00002	114	0,00004	-0,00993	0,00015	-0,00522	-0,00424
8	33	0,00002	121	0,00003	-0,00951	0,00009	-0,00522	-0,00334
9	21	0,00002	116	0,00004	-0,00969	0,00076	-0,00509	-0,00394
10	22	0,00002	116	0,00004	-0,00966	0,00023	-0,00439	-0,00285
11	21	0,00002	111	0,00004	-0,00971	0,00046	-0,00418	-0,00530
12	26	0,00002	115	0,00005	-0,00980	0,00028	-0,00454	-0,00352
13	19	0,00002	112	0,00004	-0,00969	0,00059	-0,00466	-0,00316
14	34	0,00003	121	0,00003	-0,00755	-0,00355	-0,00098	-0,00264
15	31	0,00002	112	0,00004	-0,00966	0,00028	-0,00523	-0,00575
16	20	0,00002	114	0,00004	-0,00956	0,00050	-0,00411	-0,00406
17	20	0,00002	115	0,00004	-0,00961	0,00056	-0,00452	-0,00461
18	20	0,00002	116	0,00004	-0,00962	0,00067	-0,00425	-0,00322
19	24	0,00002	111	0,00004	-0,00946	0,00042	-0,00410	-0,00450

Продолжение таблицы 10.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	21	0,00002	112	0,00004	-0,00955	0,00044	-0,00447	-0,00435
21	25	0,00002	116	0,00004	-0,00953	0,00055	-0,00401	-0,00417
22	36	0,00002	113	0,00004	-0,00950	0,00068	-0,00432	-0,00383
23	21	0,00003	121	0,00003	-0,00736	-0,00355	-0,00106	-0,00151
24	36	0,00002	115	0,00006	-0,00967	0,00038	-0,00546	-0,00402
25	23	0,00002	112	0,00004	-0,00943	0,00008	-0,00507	-0,00424
26	19	0,00002	111	0,00004	-0,00951	0,00060	-0,00448	-0,00305
27	35	0,00002	110	0,00005	-0,00949	0,00053	-0,00453	-0,00486
28	22	0,00002	112	0,00004	-0,00946	0,00038	-0,00423	-0,00394
29	19	0,00002	115	0,00004	-0,00956	0,00042	-0,00428	-0,00470

Результаты эксперимента

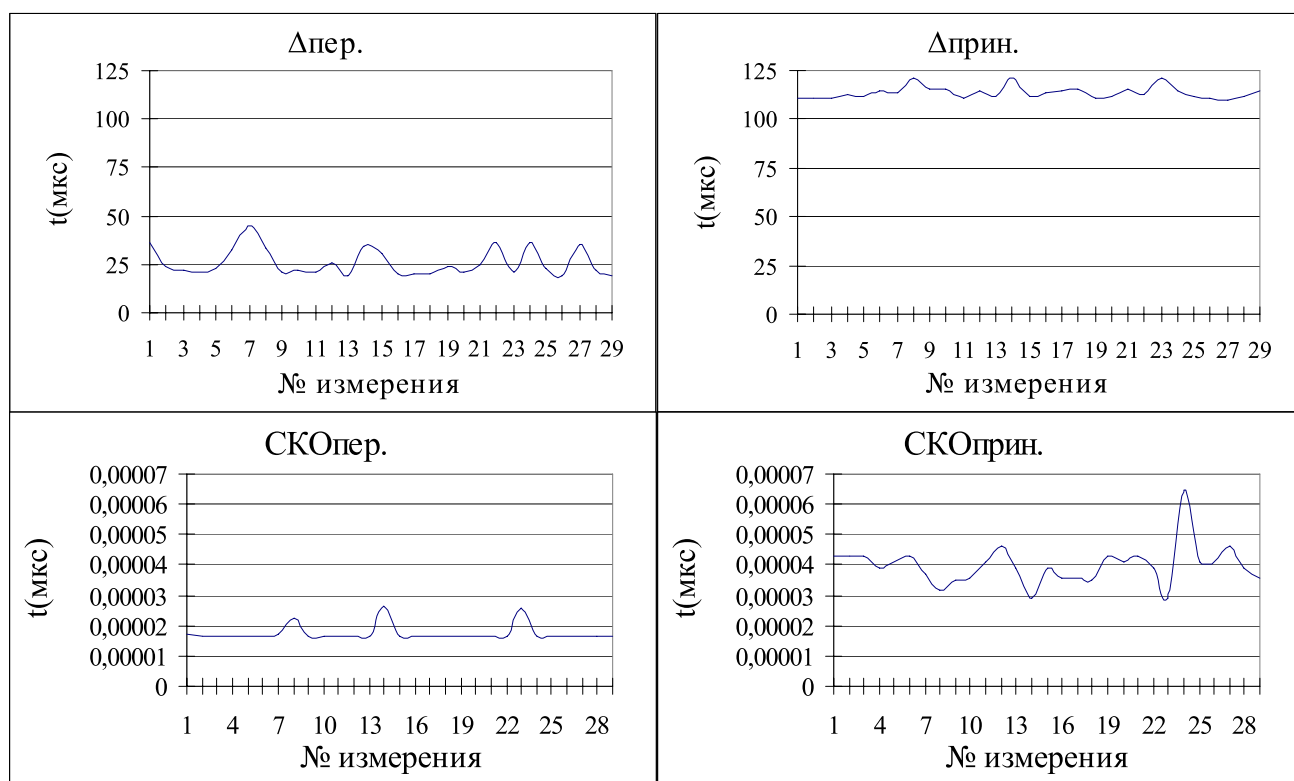


Рисунок 10.1. Максимальное отклонение приемника и передатчика

Из графиков, приведенных на рис. 10.1, видно, что максимальное отклонение реального от идеального времени изменяется незначительно. Причем СКО этого отклонения для произведенных экспериментов имеет отличия в четвертом знаке. Этот факт позволяет делать вывод о стабильности времени реакции системы.

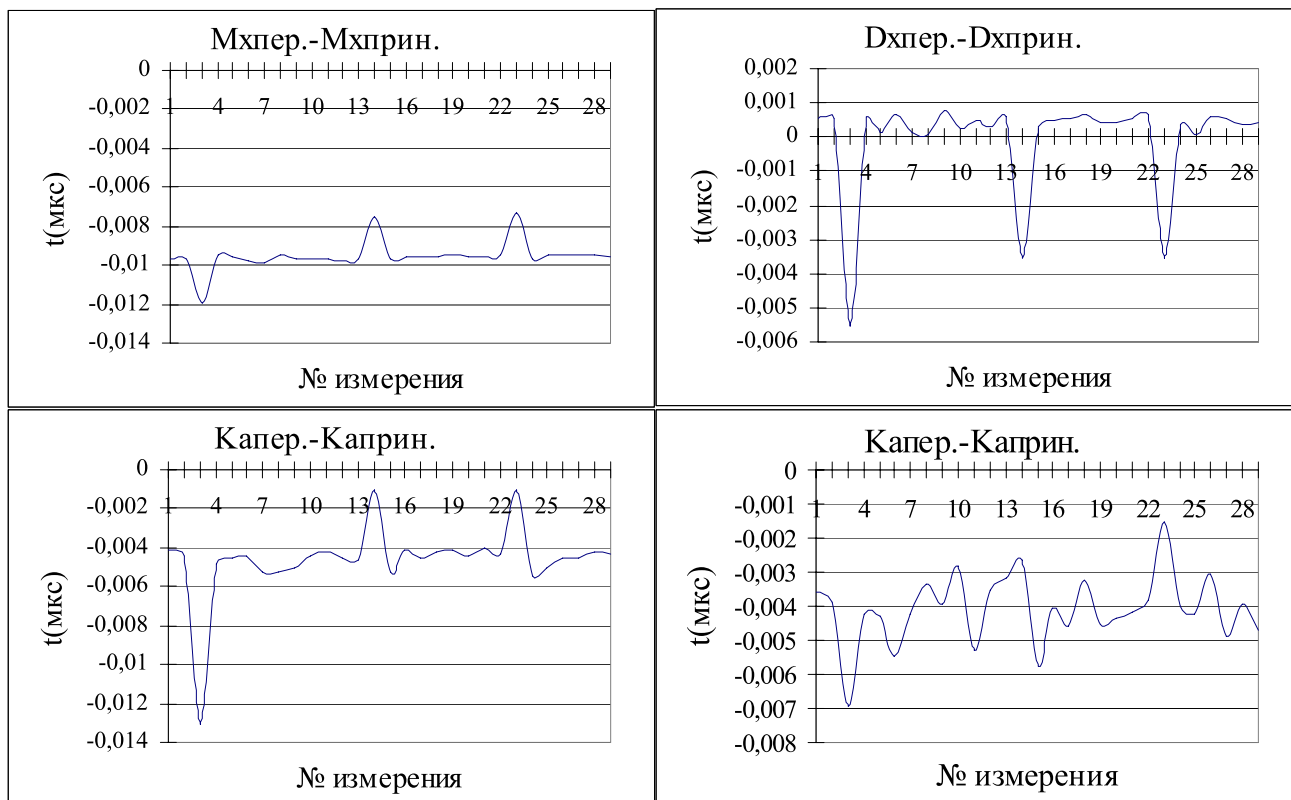


Рисунок 10.2. Разность моментных характеристик переданного и принятого процессов

На рис. 10.2 приведены графики разности моментных характеристик процессов.

Вычисленные по результатам имитационного моделирования значения математического ожидания и максимального отклонения разности моментных характеристик сведены в таблицу 10.3.

Таблица. 10.3

Разность моментных характеристик	M_x	Δ
$M_{x_{пер.}} - M_{x_{прин.}}$	-0,00954	-0,00736
$D_{x_{пер.}} - D_{x_{прин.}}$	-0,00004	0,00076
$K_{a_{пер.}} - K_{a_{прин.}}$	-0,00461	-0,00098
$K_{\epsilon_{пер.}} - K_{\epsilon_{прин.}}$	-0,00407	-0,00151

Из таблицы 10.3 видно, что максимальное расхождение разности моментных характеристик и их математическое ожидание имеют малые значения, что позволяет, использовать подсистему для передачи случайных процессов.

10.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание в виде файла с процессом, имеющим корреляционную функцию заданного вида, а также параметры потока событий приемника: модель дискретизации, вид помех, ЗР ПСП помех.
2. Подготовить МФУ NVL08 к передаче сигнала.

3. Настроить подсистему ввода сигнала.
4. Задать источник сигнала. Прочитать ВР из файла.
5. Задать приемник сигнала.
6. Сгенерировать поток событий с заданными в задании параметрами.
7. Запустить сеанс ввода/вывода аналогового сигнала через «заглушку».
8. Занести результаты измерения в таблицу.
9. Повторить пункты 7-8 29 раз.
10. Определить погрешность передачи временного ряда через «заглушку» (имитатор измерительного канала) методом имитационного моделирования.
11. Оформить отчет.

10.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. Результаты имитационного моделирования.
4. Вывод.

10.4. Контрольные вопросы

1. Зачем необходимо производить градуировку?
2. Нужно ли производить градуировку АЦП и ЦАП при использовании «заглушки»?
3. Сколько измерений достаточно произвести при градуировке АЦП и почему?
4. Какие характеристики измерительного канала необходимо определять при использовании метода имитационного моделирования?
5. Что представляет собой время реакции системы?

11. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КВАНТОВАНИЯ НА ОШИБКУ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕННОГО РЯДА

Цель работы: определение степени влияния параметров квантования АЦП на точностные характеристики модели измерительно-вычислительного канала.

11.1. Содержание лабораторной работы

Перед выполнением работы необходимо настроить подсистему. Последовательность действий по настройке описана в предыдущей лабораторной работе.

После того как система настроена, задается источник сигнала в **подсистеме вывода**. Для этого в списке «Источник» выбирается элемент «Открыть...». В появившемся диалоговом окне задается имя файла, после чего происходит его чтение и подготовка процесса к передаче через аналоговый канал.

Для приема сигнала в списке «Приемник» указывается имя файла, задаются параметры (такие как шаг принудительной дискретизации, модель дискретизации и ЗР используемой в ней ПСП, а также указываются характеристики помехи), генерируется поток событий, выбираются параметры АЦП и коммутатора каналов. Нажатием кнопки «Пуск» запускается **сеанс приема/передачи**, по окончании которого подсистема определяет значения: максимального отклонения временных меток реального и идеального процессов - Δ , их среднеквадратическое отклонение - **СКО**, вычисляет **математическое ожидание, дисперсию, асимметрию и эксцесс процесса**. При этом у вычисленных характеристик указываются индексы **пер.** и **прин.** для приемника и передатчика соответственно. Все полученные результаты сводятся в таблицу 11.1.

Шаблон таблицы результатов измерений

Таблица 11.1

№ изме- рения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.-}}$	$D_{x_{пер.-}}$	$Ka_{пер.-}$	$Ke_{пер.-}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин}}$	$D_{x_{прин}}$	$Ka_{прин}$	$Ke_{прин}$
1								
...								
29								

В таблице приняты следующие обозначения:

- Δ – максимальное отклонение между временными метками реального и идеального процессов;
- СКО – среднеквадратическое отклонение временных меток реального от временных меток идеального процесса;
- M_x – математическое ожидание процесса;
- D_x – дисперсия процесса;
- Ka – коэффициент асимметрии;
- Ke – коэффициент эксцесса.

При выполнении работы необходимо произвести 29 экспериментов по передаче временных рядов через аналоговый канал с различными значениями разрядности

АЦП. Построить зависимости матожидания и максимального отклонения разности моментных характеристик. По полученным результатам сделать вывод.

В работе для выяснения качества передачи процесса предлагается произвести моделирование для разрядностей АЦП 12, 10, 7.

Рассмотрим пример выполнения лабораторной работы со следующими исходными данными:

1. Имя файла исходного временного ряда – «expcos.rd»;
2. Поток событий приемника:
 - шаг принудительной дискретизации – 100 мкс;
 - модель дискретизации – равномерная;
 - помехи отсутствуют.

Пример отчета

Результаты измерений для АЦП с разрядностью, равной 12

Таблица 11.2

№ изме- рения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.-}}$	$D_{x_{пер.-}}$	$Ka_{пер.-}$	$К\varepsilon_{пер.-}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин}}$	$D_{x_{прин.}}$	$Ka_{прин}$	$К\varepsilon_{прин}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	36	0,000017	111	0,000043	-0,00965	0,00055	-0,00414	-0,00359
2	24	0,000017	111	0,000043	-0,00969	0,00052	-0,00438	-0,00388
3	22	0,000017	111	0,000043	-0,01198	-0,00556	-0,01312	-0,00692
4	21	0,000017	113	0,000039	-0,00946	0,00052	-0,00479	-0,00423
5	23	0,000017	112	0,000041	-0,00958	0,00015	-0,00458	-0,00429
6	32	0,000017	115	0,000043	-0,00973	0,00067	-0,00442	-0,00546
7	45	0,000017	114	0,000037	-0,00993	0,00015	-0,00522	-0,00424
8	33	0,000022	121	0,000032	-0,00951	0,00009	-0,00522	-0,00334
9	21	0,000016	116	0,000035	-0,00969	0,00076	-0,00509	-0,00394
10	22	0,000017	116	0,000036	-0,00966	0,00023	-0,00439	-0,00285
11	21	0,000017	111	0,000041	-0,00971	0,00046	-0,00418	-0,00530
12	26	0,000016	115	0,000046	-0,00980	0,00028	-0,00454	-0,00352
13	19	0,000016	112	0,000039	-0,00969	0,00059	-0,00466	-0,00316
14	34	0,000026	121	0,000029	-0,00755	-0,00355	-0,00098	-0,00264
15	31	0,000017	112	0,000039	-0,00966	0,00028	-0,00523	-0,00575
16	20	0,000017	114	0,000036	-0,00956	0,00050	-0,00411	-0,00406
17	20	0,000016	115	0,000035	-0,00961	0,00056	-0,00452	-0,00461
18	20	0,000016	116	0,000035	-0,00962	0,00067	-0,00425	-0,00322
19	24	0,000017	111	0,000043	-0,00946	0,00042	-0,00410	-0,00450
20	21	0,000017	112	0,000041	-0,00955	0,00044	-0,00447	-0,00435
21	25	0,000016	116	0,000043	-0,00953	0,00055	-0,00401	-0,00417
22	36	0,000017	113	0,000039	-0,00950	0,00068	-0,00432	-0,00383
23	21	0,000026	121	0,000029	-0,00736	-0,00355	-0,00106	-0,00151

Продолжение таблицы 11.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	36	0,000017	115	0,000064	-0,00967	0,00038	-0,00546	-0,00402
25	23	0,000017	112	0,000041	-0,00943	0,00008	-0,00507	-0,00424
26	19	0,000017	111	0,000041	-0,00951	0,00060	-0,00448	-0,00305
27	35	0,000017	110	0,000046	-0,00949	0,00053	-0,00453	-0,00486
28	22	0,000016	112	0,000039	-0,00946	0,00038	-0,00423	-0,00394
29	19	0,000016	115	0,000035	-0,00956	0,00042	-0,00428	-0,00470

Результаты измерений для АЦП с разрядностью, равной 10

Таблица 11.3

№ изме- рения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.}}$	$D_{x_{пер.}}$	$Ka_{пер.}$	$Ke_{пер.}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин}}$	$D_{x_{прин.}}$	$Ka_{прин}$	$Ke_{прин}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	20	0,000018	165	0,000094	-0,00537	0,00263	-0,00451	-0,00405
2	30	0,000017	162	0,000115	-0,00699	0,00473	-0,00589	-0,00928
3	20	0,000020	161	0,000111	-0,00589	0,00348	-0,00343	-0,00531
4	26	0,000018	161	0,000105	-0,00538	0,00304	-0,00508	-0,00648
5	28	0,000018	162	0,000109	-0,00563	0,00182	-0,00473	-0,00170
6	21	0,000017	172	0,000082	-0,00543	0,00257	-0,00500	-0,00419
7	20	0,000018	161	0,000103	-0,00549	0,00230	-0,00547	-0,00405
8	20	0,000017	163	0,000106	-0,00490	0,00785	0,00785	0,00432
9	21	0,000017	163	0,000107	-0,00945	-0,00077	-0,01106	-0,01907
10	23	0,000018	161	0,000109	-0,00644	0,00126	-0,00678	-0,00859
11	24	0,000017	163	0,000107	-0,00604	0,00212	-0,00571	-0,00543
12	26	0,000017	163	0,000107	-0,00608	-0,00043	-0,00636	0,00915
13	23	0,000019	165	0,000096	-0,00705	0,00122	-0,00320	0,00025
14	25	0,000017	163	0,000107	-0,00684	0,00365	-0,00523	-0,00426
15	19	0,000019	168	0,000096	-0,00608	0,00227	-0,00399	-0,00517
16	22	0,000018	164	0,000102	-0,00627	0,00214	-0,00477	-0,00583
17	18	0,000017	162	0,000107	-0,00633	0,00261	-0,00465	-0,00485
18	24	0,000020	164	0,000096	-0,00624	0,00205	-0,00409	-0,00383
19	21	0,000017	162	0,000107	-0,00506	0,00133	-0,00791	-0,00121
20	20	0,000018	162	0,000109	-0,00603	0,00089	-0,00407	-0,00010
21	19	0,000017	163	0,000107	-0,00669	0,00216	-0,00441	-0,00493
22	20	0,000018	162	0,000109	-0,00808	0,00062	-0,00360	0,00125
23	22	0,000017	163	0,000107	-0,00643	0,00120	-0,00709	-0,00467
24	22	0,000017	163	0,000107	-0,00612	0,00301	-0,00527	-0,00657
25	24	0,000017	163	0,000107	-0,00749	0,00366	-0,00395	-0,01024
26	19	0,000017	164	0,000127	-0,00990	0,06574	-0,00924	0,03350

Продолжение таблицы 11.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
27	25	0,000019	164	0,000096	-0,00689	0,00256	-0,00370	-0,00525
28	19	0,000018	162	0,000109	-0,00618	0,00249	-0,00466	-0,00371
29	24	0,000018	161	0,000103	-0,00569	0,00574	0,00700	0,02302

Результаты измерений для АЦП с разрядностью, равной 7

Таблица 11.4

№ изме- рения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.}}$	$D_{x_{пер.}}$	$Ka_{пер.}$	$Ke_{пер.}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин}}$	$D_{x_{прин.}}$	$Ka_{прин}$	$Ke_{прин}$
1	35	0,000018	162	0,000109	-0,04002	0,00829	-0,00423	-0,01004
2	22	0,000018	163	0,000109	-0,04346	-0,00318	-0,01800	-0,01430
3	21	0,000016	172	0,000080	-0,04297	0,00325	-0,00817	-0,00679
4	24	0,000018	166	0,000094	-0,04264	0,95850	-0,00558	-0,00476
5	23	0,000019	163	0,000099	-0,04182	0,00441	-0,00909	-0,01737
6	25	0,000019	164	0,000096	-0,04182	0,95932	-0,00920	-0,00530
7	25	0,000018	163	0,000109	-0,04313	0,00492	-0,00746	-0,00490
8	21	0,000019	164	0,000098	-0,04223	0,00180	-0,00641	-0,00839
9	20	0,000019	167	0,000096	-0,04256	0,00390	-0,00477	-0,00338
10	23	0,000019	162	0,000103	-0,04215	0,00347	-0,00945	-0,00838
11	19	0,000018	162	0,000103	-0,04191	0,00301	-0,00389	-0,00388
12	20	0,000017	172	0,000082	-0,04191	0,00274	-0,00859	-0,00458
13	22	0,000020	162	0,000111	-0,04191	0,00378	-0,00784	-0,00770
14	25	0,000020	164	0,000097	-0,04281	0,00193	-0,00684	-0,00496
15	22	0,000017	163	0,000107	-0,04133	0,00481	-0,00727	-0,00516
16	19	0,000017	164	0,000107	-0,04043	0,00594	-0,00732	-0,00887
17	19	0,000018	162	0,000108	-0,04199	0,00427	-0,00825	-0,00337
18	24	0,000019	165	0,000096	-0,04174	0,00398	-0,00796	-0,00412
19	23	0,000018	162	0,000109	-0,04207	0,00600	-0,01942	0,01324
20	24	0,000019	162	0,000101	-0,04363	-0,00267	-0,01898	-0,00868
21	21	0,000018	165	0,000094	-0,04109	0,00374	-0,00884	-0,00721
22	20	0,000019	168	0,000098	-0,04043	0,00559	-0,00838	-0,00697
23	19	0,000018	162	0,000109	-0,04060	0,00473	-0,00679	-0,00249
24	22	0,000017	163	0,000107	-0,04191	0,00356	-0,00456	0,00003
25	24	0,000019	165	0,000097	-0,04166	0,00354	-0,00771	-0,00566
26	25	0,000017	163	0,000107	-0,04150	0,00389	-0,00701	-0,00142
27	21	0,000019	164	0,000097	-0,04436	0,95678	-0,01792	-0,00732
28	25	0,000020	164	0,000097	-0,04133	0,00231	-0,00791	-0,00408
29	26	0,000017	162	0,000105	-0,04084	0,00284	-0,00581	-0,00555

Вычисленные по результатам имитационного моделирования значения матожидания и максимального отклонения разности моментных характеристик сведены в таблицу 11.5.

Таблица. 11.5

Разрядность АЦП	Разность моментных характеристик	Mx	Δ
12	$Mx_{пер.} - Mx_{прин.}$	-0,00954	-0,00736
	$Dx_{пер.} - Dx_{прин.}$	-0,00004	0,00076
	$Ka_{пер.} - Ka_{прин.}$	-0,00461	-0,00098
	$Ke_{пер.} - Ke_{прин.}$	-0,00407	-0,00151
10	$Mx_{пер.} - Mx_{прин.}$	-0,00643	-0,00490
	$Dx_{пер.} - Dx_{прин.}$	0,00462	0,06574
	$Ka_{пер.} - Ka_{прин.}$	-0,00445	0,00785
	$Ke_{пер.} - Ke_{прин.}$	-0,00198	0,03350
7	$Mx_{пер.} - Mx_{прин.}$	-0,04194	-0,04002
	$Dx_{пер.} - Dx_{прин.}$	0,10226	0,95932
	$Ka_{пер.} - Ka_{прин.}$	-0,00875	-0,00389
	$Ke_{пер.} - Ke_{прин.}$	-0,00560	0,01324

По значениям таблицы 11.5 строятся графики зависимости отклонений моментных характеристик переданного и принятого процессов от разрядности АЦП (см. рис. 11.1).

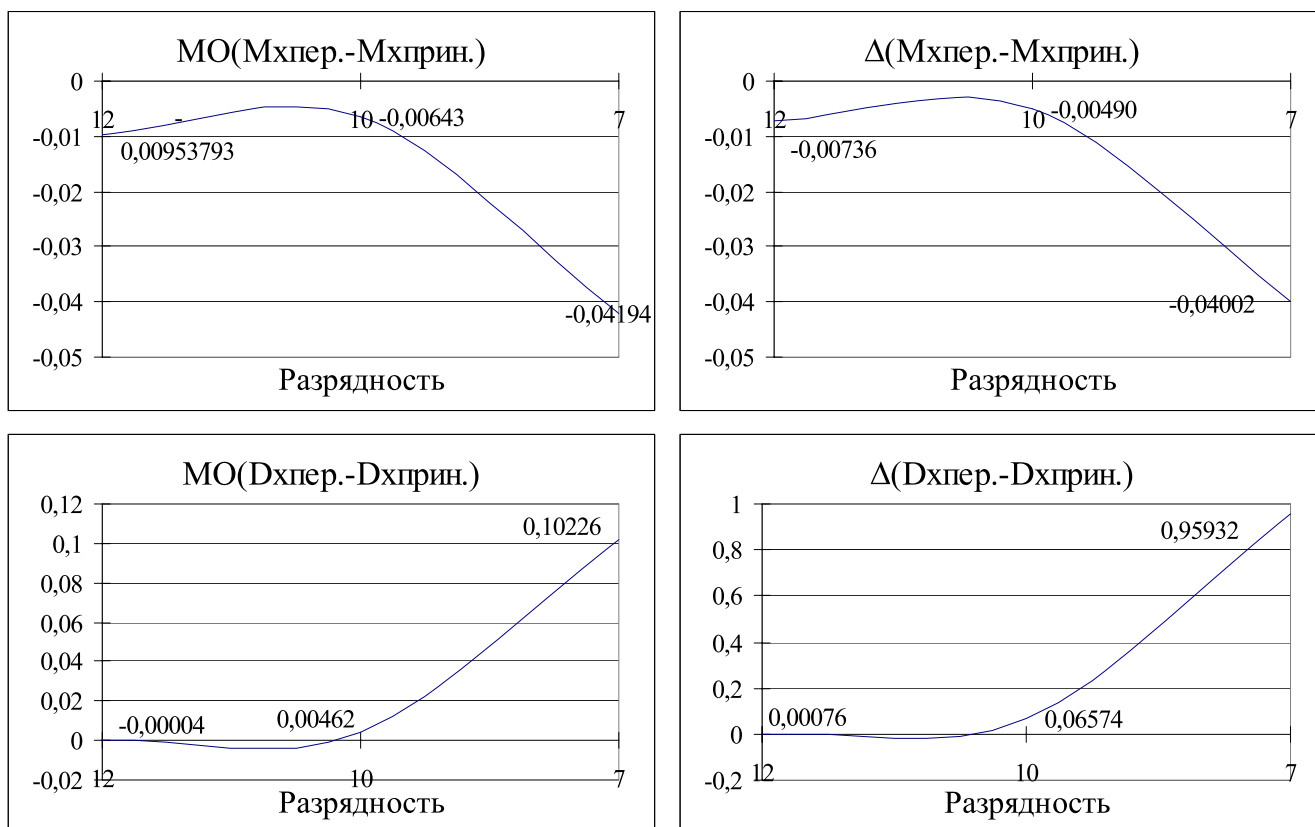


Рисунок 11.1. Матожидание и максимальное отклонение разности матожиданий и дисперсий

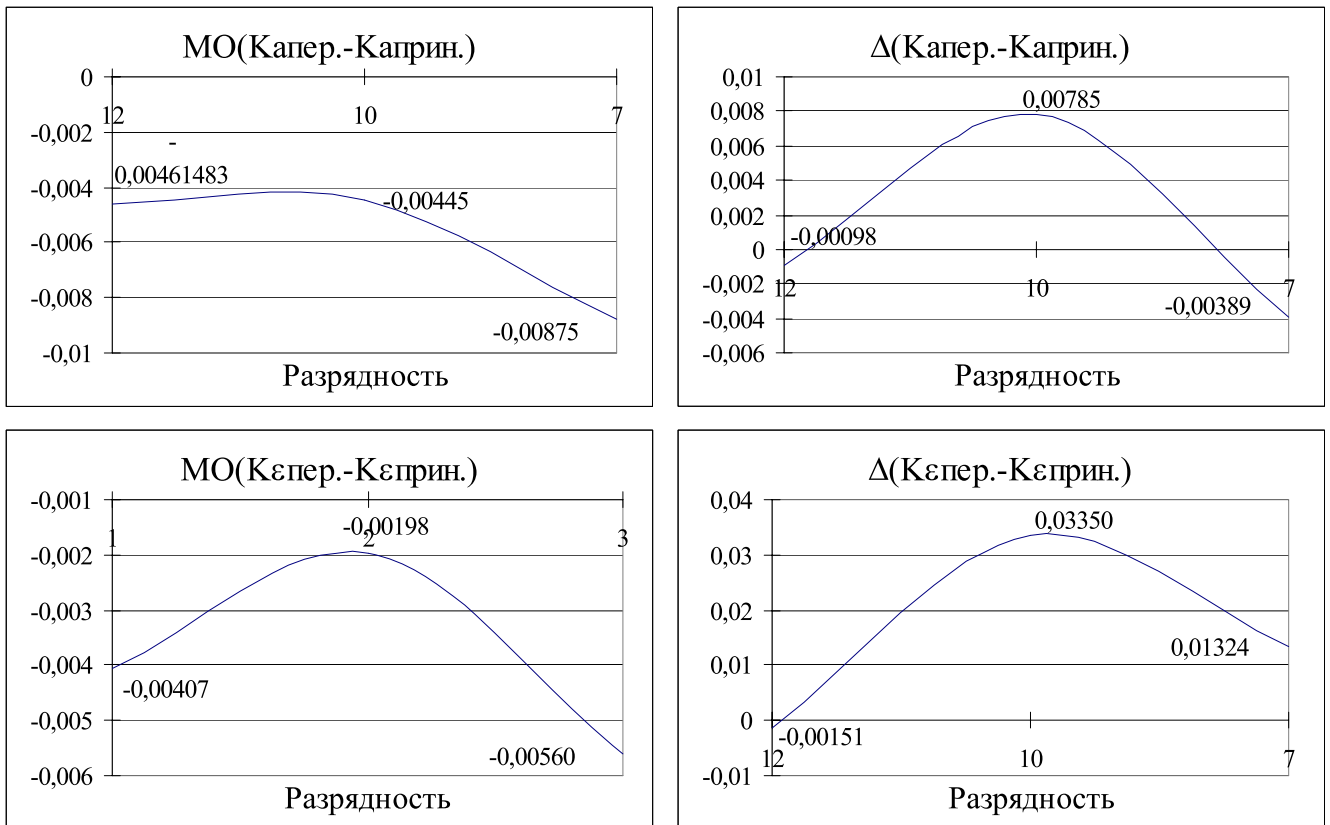


Рисунок 11.2. Матожидание и максимальное отклонение разности коэффициентов асимметрии и эксцесса

Из графиков, изображенных на рис. 11.1 и 11.2, видно, что при уменьшении разрядности АЦП математические ожидания и максимальные отклонения модуля разности дисперсий и матожиданий процессов увеличивается. Для коэффициентов асимметрии и эксцесса разность уменьшается при разрядности АЦП, равной 10, и увеличивается при 7.

11.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание в виде файла с процессом, имеющим корреляционную функцию заданного вида, а также параметры потока событий приемника: модель дискретизации, вид помех, ЗР ПСП помех.
2. Подготовить МФУ NVL08 к передаче сигнала.
3. Настроить подсистему ввода сигнала.
4. Задать источник сигнала. Прочитать ВР из файла.
5. Задать приемник сигнала.
6. Сгенерировать поток событий с заданными в задании параметрами.
7. Установить разрядность АЦП.
8. Запустить сеанс ввода/вывода аналогового сигнала через «заглушку».
9. Занести результаты измерения в таблицу.
10. Повторить пункты 7-9 29 раз.
11. Определить погрешность передачи временного ряда через «заглушку» (имитатор измерительного канала) методом имитационного моделирования.
12. Оформить отчет.

11.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. Результаты имитационного моделирования при различных значениях разрядности АЦП.
4. Выводы о влиянии числа уровней квантования на числовые характеристики процессов.

11.4. Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики АЦП.
2. Назовите основные характеристики ЦАП.
3. Назовите основные характеристики коммутатора.
4. Какие характеристики необходимо учитывать при анализе степени влияния квантования на качество передачи процесса?
5. Каким образом число уровней квантования влияет на точность передачи сигнала?

12. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ОШИБКУ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕННОГО РЯДА

Цель работы: определение степени влияния параметров дискретизации на точностные характеристики имитатора измерительно-вычислительного канала.

12.1 Содержание лабораторной работы

Перед выполнением работы необходимо настроить подсистему. Последовательность действий по настройке описана в лабораторной работе № 10.

После того как система настроена, задается источник сигнала в **подсистеме вывода**. Для этого в списке «Источник» выбирается элемент «Открыть...». В появившемся диалоговом окне задается имя файла, после чего происходит его чтение и подготовка процесса к передаче через аналоговый канал.

Для приема сигнала в списке «Приемник» указывается имя файла, задаются параметры (такие как шаг принудительной дискретизации, модель дискретизации и ЗР используемой в ней ПСП, а также указываются характеристики помехи), генерируется поток событий, выбираются параметры АЦП и коммутатора каналов. Нажатием кнопки «Пуск» запускается **сеанс приема/передачи**. По окончании подсистема определяет значения: максимального отклонения временных меток реального и идеального процессов - Δ , их среднеквадратическое отклонение - **СКО**, вычисляет **математическое ожидание, дисперсию, асимметрию и эксцесс процесса**. При этом у вычисленных характеристик указываются индексы **пер.** и **прин.** для приемника и передатчика соответственно. Все полученные результаты сводятся в таблицу 12.1.

Шаблон таблицы результатов измерений

Таблица 12.1

№ измерения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.}}$	$D_{x_{пер.}}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$		
1						
2						
...						
29						

В таблице приняты следующие обозначения:

- Δ – максимальное отклонение между временными метками реального и идеального процессов;
- **СКО** – среднеквадратическое отклонение временных меток реального от временных меток идеального процесса;
- M_x – математическое ожидание процесса;
- D_x – дисперсия процесса;
- K_a – коэффициент асимметрии;
- K_ε – коэффициент эксцесса.

При выполнении работы необходимо произвести 29 экспериментов по передаче временных рядов через аналоговый канал с различными значениями разрядности

АЦП. Построить зависимости матожидания и максимального отклонения разности моментных характеристик. По полученным результатам сделать вывод.

Рассмотрим пример выполнения лабораторной работы со следующими исходными данными:

1. Имя файла исходного временного ряда – «expcos.rd»;
2. Поток событий приемника:
 - шаг принудительной дискретизации – 100 мкс;

В лабораторной работе предлагается произвести анализ передачи процесса с различными потоками событий приемника. Параметры потоков указаны в таблице 12.2.

Потоки событий приемника при проведении экспериментов

Таблица 12.2

№	Модель	ЗР	a	b	«дрожание»			p-преобразование		
					ЗР	a	b	ЗР	α	β
1	равном.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	равном.	-	-	-	равном.	0	0.05	-	-	-
3	равном.	-	-	-	-	-	-	Вейбулла	1	1
4	адд.	равном.	0	1	-	-	-	-	-	-

Результаты измерений при равномерной дискретизации

Таблица 12.3

№ измерения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.}}$	$D_{x_{пер.}}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин}}$	$D_{x_{прин.}}$
	2	3	4	5	6	7
1	36	0,000017	111	0,000043	-0,00965	0,00055
2	24	0,000017	111	0,000043	-0,00969	0,00052
3	22	0,000017	111	0,000043	-0,01198	-0,00556
4	21	0,000017	113	0,000039	-0,00946	0,00052
5	23	0,000017	112	0,000041	-0,00958	0,00015
6	32	0,000017	115	0,000043	-0,00973	0,00067
7	45	0,000017	114	0,000037	-0,00993	0,00015
8	33	0,000022	121	0,000032	-0,00951	0,00009
9	21	0,000016	116	0,000035	-0,00969	0,00076
10	22	0,000017	116	0,000036	-0,00966	0,00023
11	21	0,000017	111	0,000041	-0,00971	0,00046
12	26	0,000016	115	0,000046	-0,00980	0,00028
13	19	0,000016	112	0,000039	-0,00969	0,00059
14	34	0,000026	121	0,000029	-0,00755	-0,00355
15	31	0,000017	112	0,000039	-0,00966	0,00028
16	20	0,000017	114	0,000036	-0,00956	0,00050
17	20	0,000016	115	0,000035	-0,00961	0,00056

Продолжение таблицы 12.3

1	2	3	4	5	6	7
18	20	0,000016	116	0,000035	-0,00962	0,00067
19	24	0,000017	111	0,000043	-0,00946	0,00042
20	21	0,000017	112	0,000041	-0,00955	0,00044
21	25	0,000016	116	0,000043	-0,00953	0,00055
22	36	0,000017	113	0,000039	-0,00950	0,00068
23	21	0,000026	121	0,000029	-0,00736	-0,00355
24	36	0,000017	115	0,000064	-0,00967	0,00038
25	23	0,000017	112	0,000041	-0,00943	0,00008
26	19	0,000017	111	0,000041	-0,00951	0,00060
27	35	0,000017	110	0,000046	-0,00949	0,00053
28	22	0,000016	112	0,000039	-0,00946	0,00038
29	19	0,000016	115	0,000035	-0,00956	0,00042

Результаты измерений при равномерной дискретизации и «дрожании»

Таблица 12.4

№ изме- рения	Передача		Прием		Mx _{пер.-}	Dx _{пер.-}
	$\Delta_{\text{пер.}}$	СКО _{пер.}	$\Delta_{\text{прин.}}$	СКО _{прин.}	Mx _{прин.}	Dx _{прин.}
1	2	3	4	5	6	7
1	28	0,000156	801	0,008190	-0,00795	0,02356
2	51	0,000162	812	0,008251	-0,00803	0,02506
3	23	0,000159	798	0,008188	-0,01106	0,02247
4	29	0,000161	812	0,008206	-0,01496	0,02485
5	33	0,000162	810	0,008236	-0,01156	0,02361
6	25	0,000160	816	0,008375	-0,01128	0,02659
7	28	0,000161	801	0,008191	-0,01350	0,01968
8	43	0,000162	812	0,008252	-0,00878	0,02355
9	35	0,000164	814	0,008281	-0,00690	0,02290
10	52	0,000161	799	0,008207	-0,01141	0,02290
11	20	0,000161	804	0,008235	-0,01076	0,01609
12	22	0,000163	798	0,008191	-0,01334	0,02371
13	22	0,000161	804	0,008250	-0,00592	0,02325
14	38	0,000163	813	0,008250	-0,00371	0,01786
15	28	0,000165	802	0,008208	-0,01231	0,02294
16	45	0,000165	803	0,008205	-0,00860	0,02509
17	28	0,000161	821	0,008250	-0,00863	0,01733
18	31	0,000164	815	0,008281	-0,00789	0,02418
19	24	0,000162	804	0,008266	-0,01041	0,02161
20	23	0,000163	812	0,008236	-0,01045	0,02463
21	24	0,000166	813	0,008267	-0,00781	0,02363

Продолжение таблицы 12.4

1	2	3	4	5	6	7
22	19	0,000158	801	0,008221	-0,00776	0,02258
23	38	0,000159	812	0,008236	-0,00678	0,02448
24	22	0,000166	805	0,008251	-0,00951	0,02360
25	22	0,000159	802	0,008207	-0,00796	0,02185
26	21	0,000163	814	0,008295	-0,01010	0,02670
27	20	0,000160	805	0,008266	-0,00689	0,02649
28	33	0,000163	803	0,008222	-0,01017	0,02439
29	24	0,000159	802	0,008208	-0,01531	0,02367

Результаты измерений при равномерной дискретизации с р-преобразованием

Таблица 12.5

№ изме- рения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.}}$	$D_{x_{пер.}}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин.}}$	$D_{x_{прин.}}$
1	23	0,000130	114	0,000288	0,00236	-0,00005
2	23	0,000192	117	0,000265	0,00242	0,00006
3	43	0,000139	115	0,000295	0,00210	-0,00002
4	32	0,000243	119	0,000201	0,00234	-0,00001
5	18	0,000131	116	0,000288	0,00248	-0,00001
6	23	0,000244	119	0,000199	0,00204	-0,00025
7	17	0,000134	114	0,000292	0,00241	-0,00010
8	31	0,000188	118	0,000267	0,00238	-0,00017
9	22	0,000136	114	0,000293	-0,00428	0,00057
10	49	0,000138	116	0,000294	-0,00524	0,00077
11	17	0,000136	114	0,000294	-0,00533	0,00067
12	29	0,000133	115	0,000290	-0,00722	0,00107
13	23	0,000134	114	0,000290	-0,00967	0,00075
14	43	0,000134	118	0,000291	-0,01018	0,00075
15	30	0,000231	118	0,000230	-0,01011	0,00079
16	42	0,000231	118	0,000231	-0,01012	0,00083
17	25	0,000138	113	0,000295	-0,00990	0,00075
18	25	0,000142	114	0,000298	-0,01022	0,00082
19	23	0,000133	114	0,000290	-0,01206	-0,00513
20	35	0,000137	115	0,000293	-0,01111	-0,00400
21	22	0,000137	115	0,000295	-0,01111	-0,00400
22	30	0,000241	120	0,000203	-0,01001	0,00063
23	43	0,000141	115	0,000297	-0,00962	0,00073
24	44	0,000140	114	0,000295	-0,01011	0,00091
25	18	0,000135	116	0,000293	-0,01048	0,00090
26	35	0,000229	119	0,000234	-0,01036	0,00077

Продолжение таблицы 12.5

1	2	3	4	5	6	7
27	44	0,000137	114	0,000293	-0,00974	0,00074
28	27	0,000137	114	0,000294	-0,01031	0,00091
29	24	0,000131	114	0,000288	-0,01000	0,00079

Результаты измерений при аддитивной дискретизации

Таблица 12.6

№ измерения	Передача		Прием		$M_{x_{пер.}}$	$D_{x_{пер.}}$
	$\Delta_{пер.}$	$СКО_{пер.}$	$\Delta_{прин.}$	$СКО_{прин.}$	$M_{x_{прин.}}$	$D_{x_{прин.}}$
1	29	0,00014	49391	1,00202	-0,00733	-0,00093
2	32	0,00023	49382	1,00187	-0,00727	-0,00074
3	31	0,00024	49390	1,00187	-0,0053	-0,00734
4	38	0,00019	49390	1,00195	-0,00702	-0,00093
5	42	0,00014	49394	1,00202	-0,00709	-0,0009
6	33	0,00021	49391	1,00193	-0,00726	-0,00112
7	20	0,00014	49390	1,00202	-0,00721	-0,00068
8	17	0,00014	49394	1,00202	-0,00707	-0,00073
9	38	0,00023	49382	1,00187	-0,00709	-0,0007
10	27	0,00014	49391	1,00202	-0,00719	-0,00076
11	24	0,00014	49392	1,00202	-0,00705	-0,0007
12	42	0,00023	49381	1,00187	-0,00723	-0,0008
13	21	0,00013	49394	1,00201	-0,00695	-0,00091
14	32	0,00024	49382	1,00186	-0,00716	-0,00106
15	37	0,00013	49390	1,00201	-0,00686	-0,00087
16	32	0,00025	49380	1,00181	-0,00721	-0,00044
17	19	0,00013	49393	1,00201	-0,00703	-0,00104
18	25	0,00014	49393	1,00202	-0,00948	-0,00664
19	56	0,00023	49381	1,00186	-0,00708	-0,00103
20	22	0,00023	49391	1,00186	-0,007	-0,00102
21	43	0,00014	49392	1,00202	-0,00695	-0,0009
22	27	0,00024	49391	1,00181	-0,00699	-0,00091
23	36	0,00025	49380	1,00181	-0,00661	-0,00091
24	46	0,00024	49379	1,00181	-0,00865	-0,0063
25	20	0,00013	49394	1,00201	-0,00648	-0,00101
26	26	0,00021	49393	1,00192	-0,00665	-0,0007
27	21	0,00013	49393	1,00201	-0,00651	-0,00056
28	29	0,00020	49390	1,00193	-0,00624	-0,00112
29	32	0,00023	49393	1,00187	-0,00665	-0,00074

Вычисленные по результатам имитационного моделирования значения матожидания и максимального отклонения разности моментных характеристик сведены в таблицу 12.7.

Таблица. 12.7

№ модели	Модель дискретизации	Разность моментных характеристик	Mx	Δ
1	Равномерная	$Mx_{пер.} - Mx_{прин.}$	-0,00954	-0,00004
		$Dx_{пер.} - Dx_{прин.}$	-0,00736	0,00076
2	Равномерная с «дрожанием»	$Mx_{пер.} - Mx_{прин.}$	-0,00965	0,02308
		$Dx_{пер.} - Dx_{прин.}$	-0,00371	0,02670
3	Равномерная с р-преобразованием	$Mx_{пер.} - Mx_{прин.}$	-0,00616	0,00002
		$Dx_{пер.} - Dx_{прин.}$	0,00248	0,00107
4	Аддитивная	$Mx_{пер.} - Mx_{прин.}$	-0,00706	-0,00147
		$Dx_{пер.} - Dx_{прин.}$	-0,00530	-0,00044

По значениям таблицы строятся графики зависимости отклонений моментных характеристик переданного и принятого процессов. (см. рис. 12.1).

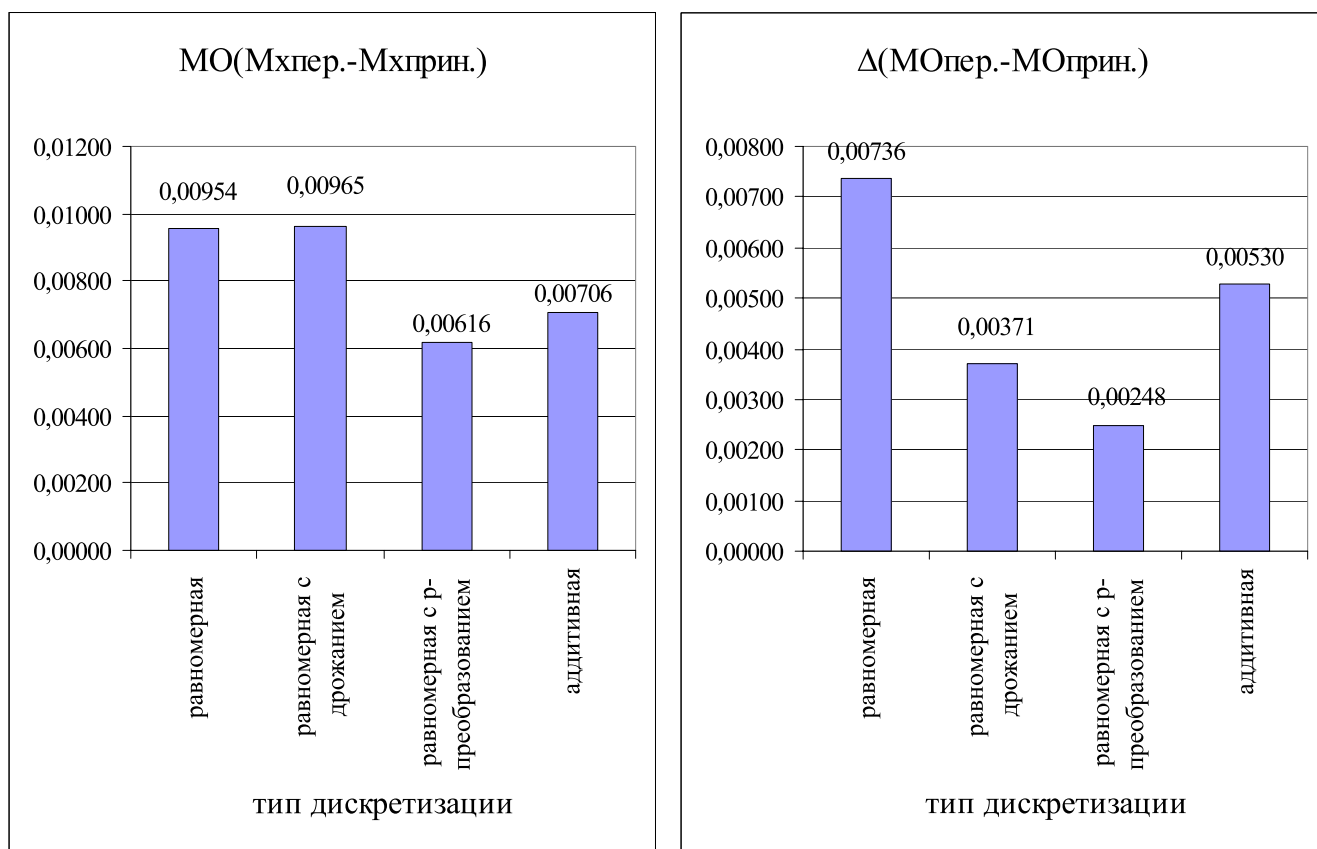


Рисунок 12.1. Матожидание и максимальное отклонение разности матожиданий переданного и принятого процессов

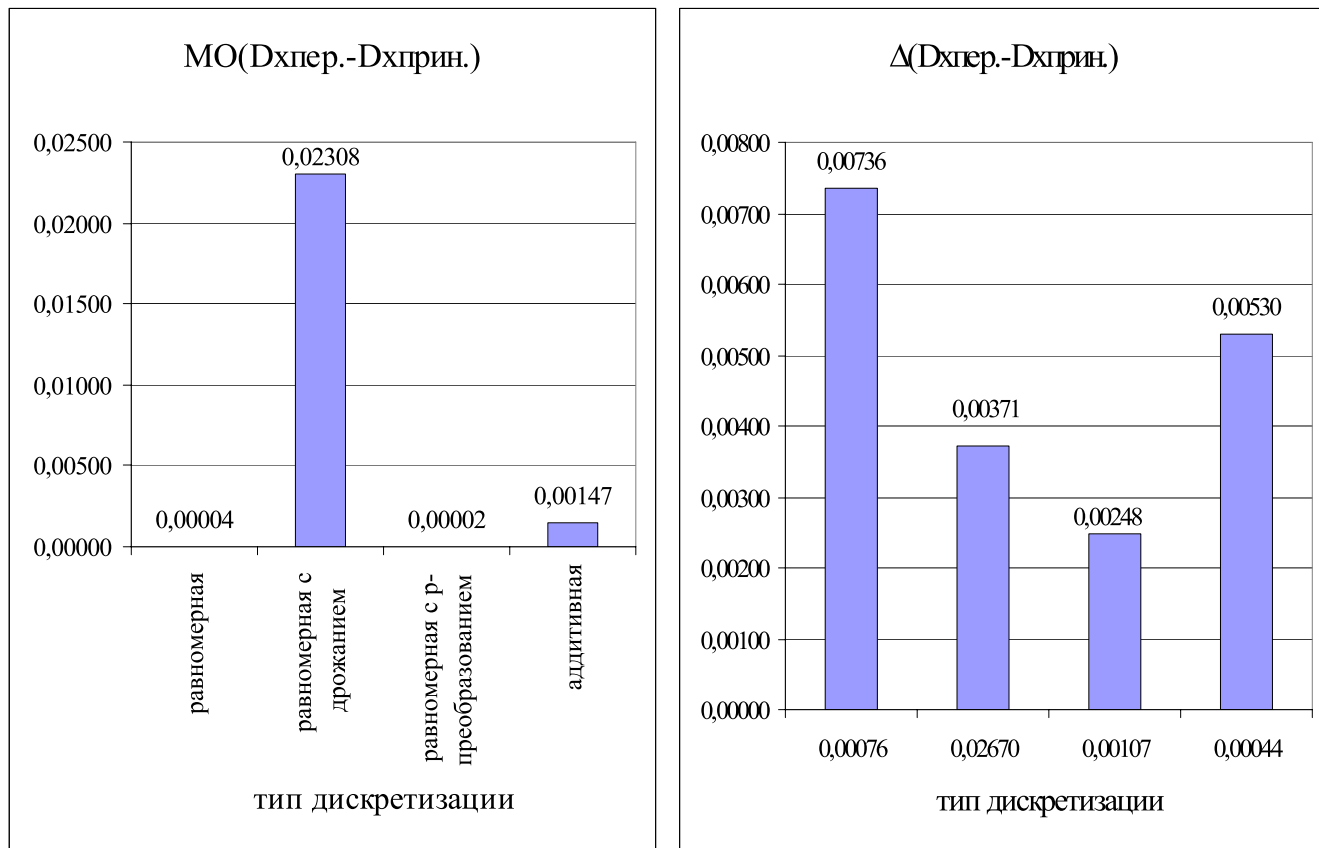


Рисунок 12.2. Матожидание и максимальное отклонение разности дисперсий переданного и принятого процессов

12.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание в виде файла с процессом, имеющим корреляционную функцию заданного вида, а также параметры потока событий приемника: модель дискретизации, вид помех, ЗР ПСП помех.
2. Подготовить МФУ NVL08 к передаче сигнала.
3. Настроить подсистему ввода сигнала.
4. Задать источник сигнала. Прочсть ВР из файла.
5. Задать приемник сигнала.
6. Установить параметры потока событий.
7. Сгенерировать поток событий.
8. Запустить сеанс ввода/вывода аналогового сигнала через «заглушку».
9. Занести результаты измерения в таблицу.
10. Повторить пункты 6-9 29 раз.
11. Определить погрешность передачи временного ряда через «заглушку» (имитатор измерительного канала) методом имитационного моделирования.
12. Оформить отчет.

12.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. Результаты имитационного моделирования при различных типах дискретизации приемника.
4. Выводы о влиянии помех на числовые характеристики процессов.

12.4. Контрольные вопросы

1. Какие характеристики необходимо учитывать при анализе степени влияния дискретизации на качество передачи процесса?
2. Каким образом дискретизация принимаемого процесса влияет на точность передачи сигнала?
3. Какие виды неэквидистантных временных рядов различают при анализе и обработке данных?

13. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Цель работы: изучение методов оценки корреляционных характеристик случайных процессов, получаемых на выходе измерительного канала.


13.1. Содержание лабораторной работы

В данной работе необходимо приобрести навыки автоматизированного анализа взаимных корреляционно-спектральных характеристик данных, получаемых при использовании АЦП и ЦАП. Эта и следующая работы основаны на применении автоматизированной подсистемы аппроксимативного анализа и подсистемы ввода/вывода. Данная работа подразумевает успешное выполнение предыдущих лабораторных работ.

В ходе выполнения лабораторной работы требуется оценить корреляционную функцию и спектральную плотность мощности случайного процесса, принимаемого на выходе измерительного канала. Для этого необходимо сгенерировать случайный процесс с заданной корреляционной функцией, преобразовать его в аналоговый сигнал (для этого перейти в подсистему ввода/вывода), принять аналоговый сигнал (два последних действия выполняются с использованием многофункционального устройства NVL08), выполнить цифро-аналоговое преобразование, включающее дискретизацию и квантование и оценить корреляционную функцию принятого случайного процесса в сравнении с корреляционной функцией переданного СП. Данная операция может быть произведена как с использованием двух ЭВМ в составе автоматизированного учебно-исследовательского комплекса (этому посвящена заключительная лабораторная работа), так и на одной ЭВМ с использованием «заглушки», соединяющей выход ЦАП со входом АЦП.

Особое внимание необходимо уделить выбору масштабирующего коэффициента при определении интервала дискретизации в ходе моделирования случайного процесса. Он характеризует длительность единичного интервала в мкс и задается, исходя из особенностей передачи данных через аналоговый канал с использованием NVL08. Интервал между отсчетами не должен быть менее 100 мкс, что сопоставимо со временем реакции системы.

Первым шагом лабораторной работы является моделирование случайного процесса (см. рисунок 13.1). Масштабирующий коэффициент задается в поле «Ед. врем.». При коэффициенте 1000 интервал дискретизации моделируемого процесса составит 400 мкс, что удовлетворяет требованиям системы ввода/вывода.

После генерации СП на странице 2 и нажатия на кнопку  осуществляется переход в подсистему ввода/вывода. Страница ввода/вывода состоит из двух панелей, первая из которых (левая) посвящена передаче сигнала. При проведении лабораторной работы на одной ЭВМ (с использованием «заглушки») нужно принять случайный процесс с использованием функциональных возможностей второй (правой) панели страницы. Для этого генерируется поток событий с интервалом дискретизации, указанным в поле «Шаг дискретизации». Шаг дискретизации передаваемого процесса указывается в левом верхнем углу левой панели и рекомендуется в качестве интервала дискретизации принимаемого процесса. Для выбранного варианта он равен 400.

Отметим, что перед передачей процесса необходимо осуществить настройку канала, описанную в части 2.

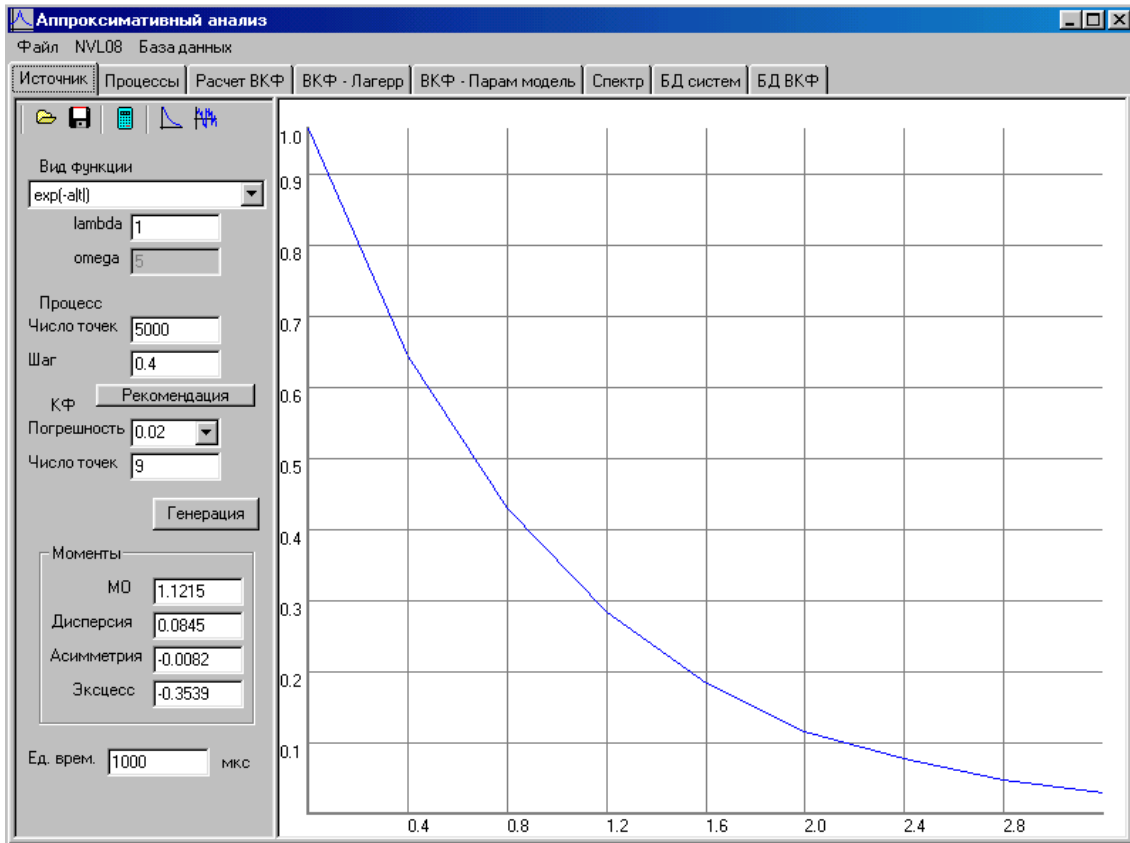


Рисунок 13.1. Генерирование случайного процесса с заданным видом КФ

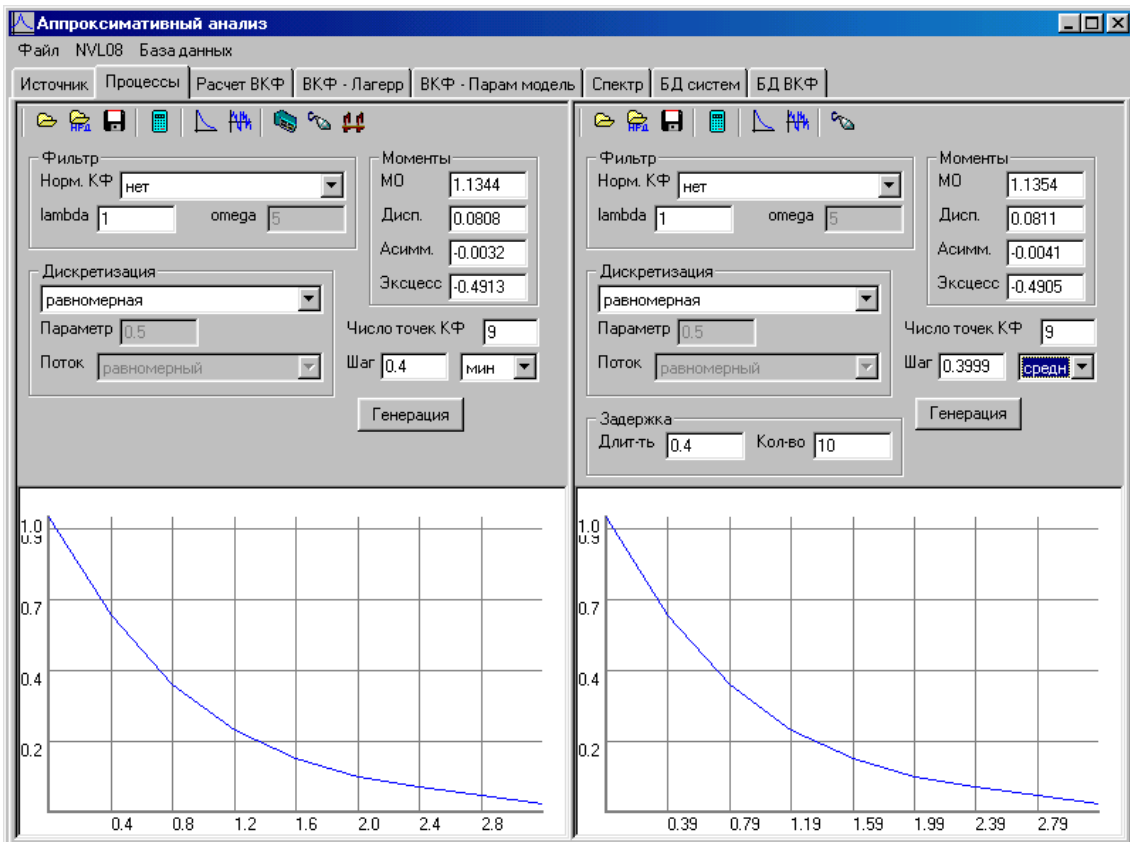


Рисунок 13.2. КФ передаваемого процесса (слева) и принятого (справа)

Передача сигнала производится после нажатия кнопки «Пуск». При больших интервалах дискретизации случайного процесса и большом числе отсчетов процесс передачи может занять некоторое время. При этом перехватываются все ресурсы компьютера. Прерывание передачи происходит по нажатию Esc.

Отметим, что в данном случае поправка на время преобразования ЦАП не была введена. В результате принятый процесс оказался задержан на интервал дискретизации (сравните выделенные строки в таблицах на рисунке 13.3). Подробное описание этого эффекта приведено в пункте 7.6.2.

После выхода в подсистему аппроксимативного анализа будет определена корреляционная функция принятого случайного процесса и отображена на панели 2, а

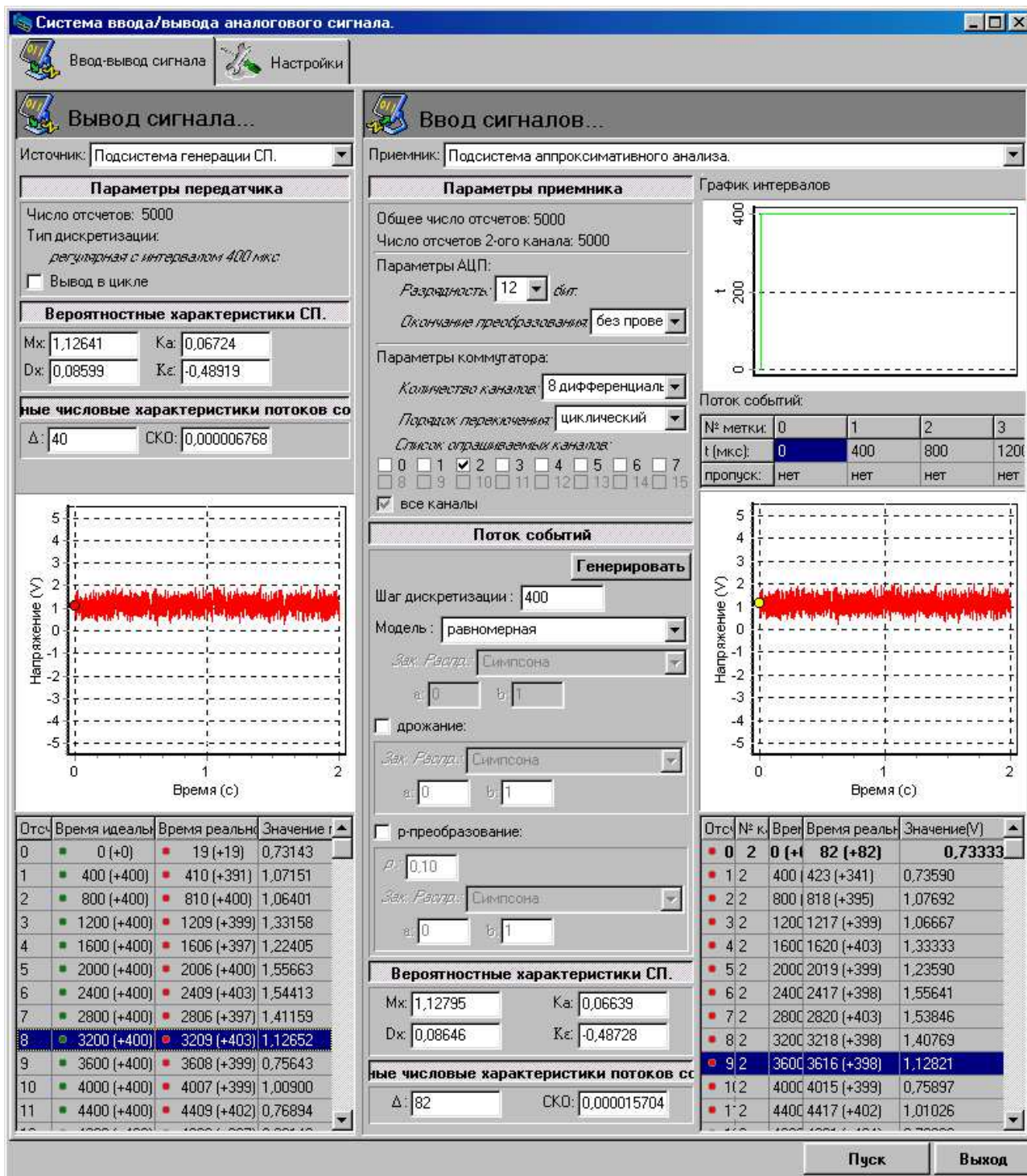


Рисунок 13.3. Передача случайного процесса

числовые характеристики – в полях сверху страницы. На странице 3 необходимо рассчитать взаимную корреляционную функцию.

Чтобы избежать задержки на интервал дискретизации, необходимо учесть время преобразования ЦАП и снимать сигнал после окончания переходного процесса. Для этого устанавливается ненулевое значение времени преобразования ЦАП, и чтение сигнала происходит с задержкой на эту величину.

В рассматриваемом примере после установки времени преобразования ЦАП, равного 100 мкс, принятый процесс оказался задержан (см. рисунок 13.4). Так как величина задержки меньше интервала дискретизации (400 мкс), использование алгоритма с АИИКФ позволяет определить взаимную корреляционную функцию двух

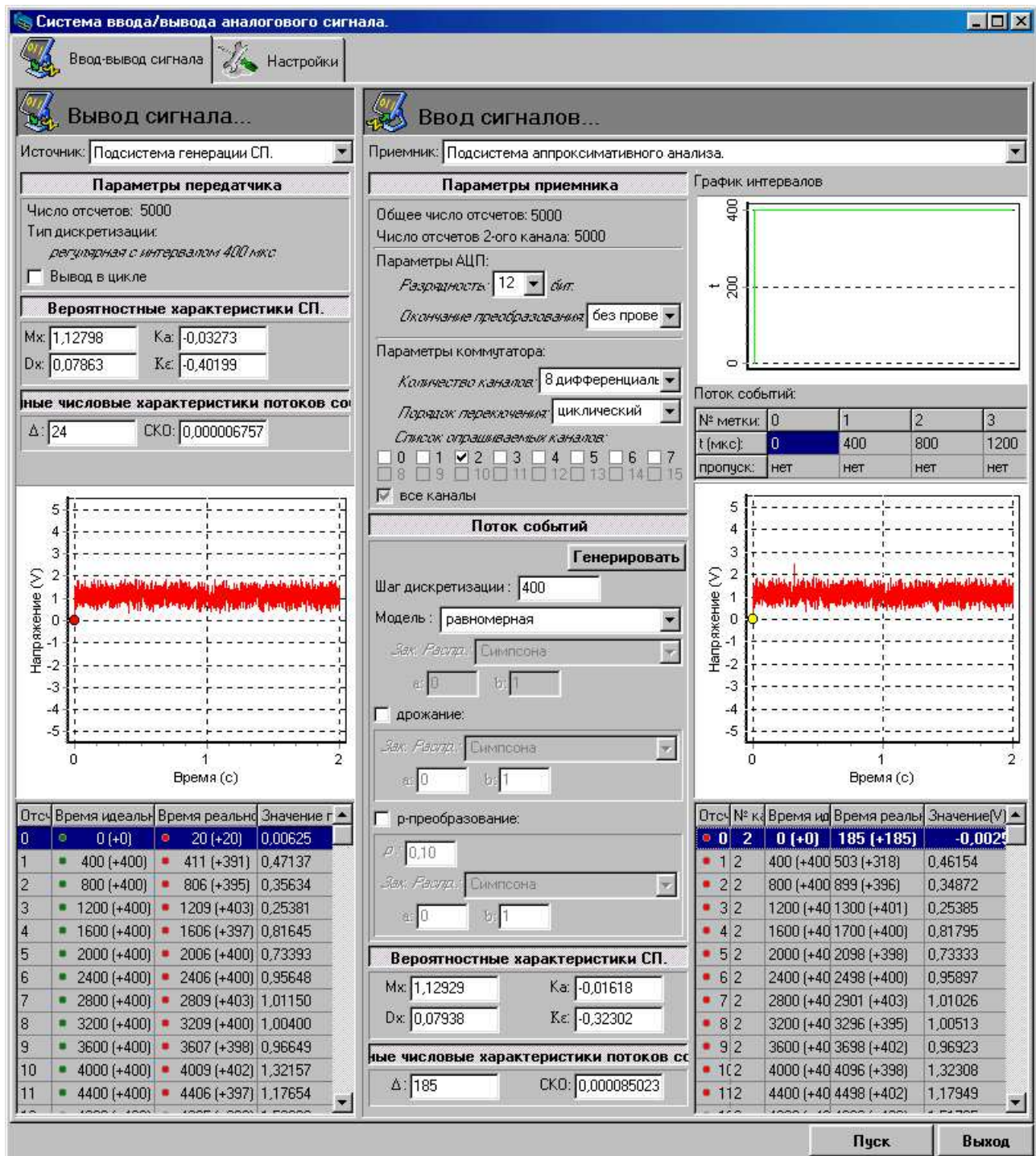


Рисунок 13.4. Передача случайного процесса с поправкой на время преобразования ЦАП

процессов и нивелировать влияние переходных процессов в ЦАП на оценку ВКФ. Взаимные корреляционные функции, полученные в двух описанных случаях, приведены на рисунке 13.5.

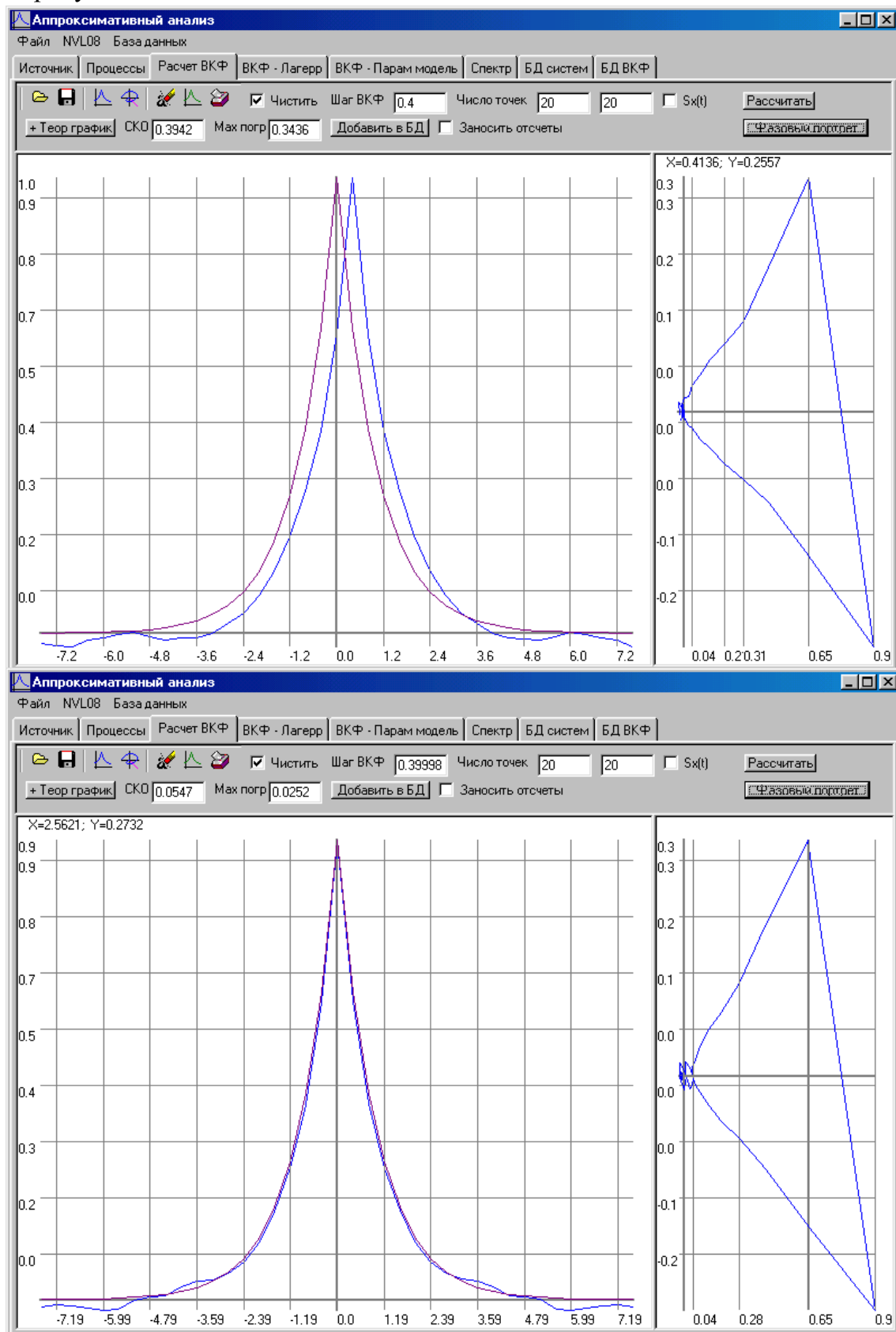


Рисунок 13.5. Взаимная корреляционная функция переданного и принятого процессов

В ходе выполнения лабораторной работы для заданного варианта необходимо установить нужные значения масштабирующего коэффициента и задержки на ЦАП. Требуется передать случайный процесс с помощью подсистемы ввода/вывода и построить взаимную корреляционную функцию переданного и принятого процессов.

Сгенерируем процесс с корреляционной функцией $e^{-|t|} \cos 5t$, пропущенного через фильтр $e^{-|t|}$, передадим его с помощью подсистемы ввода/вывода и оценим характеристики принятого процесса в сравнении с характеристиками переданного.

На рисунке 13.6 изображена передача случайного процесса в подсистеме ввода/вывода, на рисунках 13.7 – характеристики переданного и принятого процессов.

Система ввода/вывода аналогового сигнала.

Ввод-вывод сигнала | Настройки

Вывод сигнала... | **Ввод сигналов...**

Источник: Подсистема генерации СП. | Приемник: Подсистема аппроксимативного анализа.

Параметры передатчика

Число отсчетов: 5000
 Тип дискретизации: регулярная с интервалом 816 мкс
 Вывод в цикле

Вероятностные характеристики СП.

Мх: -2,40617 Ка: 0,37000
 Dx: 0,16073 Кс: 1,31573

Числовые характеристики потоков

Δ: 36 CKO: 0,000003369

Параметры приемника

Общее число отсчетов: 5000
 Число отсчетов 2-ого канала: 5000
 Параметры АЦП:
 Разрядность: 12 бит
 Окончание преобразования: без пров.

Параметры коммутатора:
 Количество каналов: 8 дифференциаль
 Порядок переключения: циклический
 Список спрашиваемых каналов:
 0 1 2 3 4 5 6 7
 8 9 10 11 12 13 14 15
 все каналы

Поток событий

Генерировать

Шаг дискретизации: 816
 Модель: равномерная
 Шаг. Распр.: Симпсона
 a: 0 b: 1
 дрожание:
 Шаг. Распр.: Симпсона
 a: 0 b: 1
 р-преобразование:
 A: 0,10
 Шаг. Распр.: Симпсона
 a: 0 b: 1

Вероятностные характеристики СП.

Мх: -2,41325 Ка: 0,37539
 Dx: 0,16094 Кс: 1,33045

Числовые характеристики потоков

Δ: 183 CKO: 0,000041652

График интервалов

Поток событий:

№ метки:	0	1	2
t (мкс):	0	816	1632
пропуск:	нет	нет	нет

Таблица 1 (вывод сигнала):

Отсчет	Время идеал	Время реаль	Знач
0	0 (+0)	19 (+19)	0,09
1	816 (+816)	829 (+810)	0,12
2	1632 (+816)	1639 (+810)	0,08
3	2448 (+816)	2455 (+816)	0,00
4	3264 (+816)	3270 (+815)	-0,05
5	4080 (+816)	4085 (+815)	-0,21
6	4896 (+816)	4902 (+817)	-0,41
7	5712 (+816)	5720 (+818)	-0,66
8	6528 (+816)	6535 (+815)	-0,97
9	7344 (+816)	7354 (+819)	-1,23
10	8160 (+816)	8166 (+812)	-1,45
11	8976 (+816)	8981 (+815)	-1,50

Таблица 2 (ввод сигнала):

Отсчет	№ канала	Время идеал
0	2	0 (+0)
1	2	816 (+816)
2	2	1632 (+816)
3	2	2448 (+816)
4	2	3264 (+816)
5	2	4080 (+816)
6	2	4896 (+816)
7	2	5712 (+816)
8	2	6528 (+816)
9	2	7344 (+816)
10	2	8160 (+816)
11	2	8976 (+816)

Пуск Выход

Рисунок 13.6. Подсистема ввода/вывода

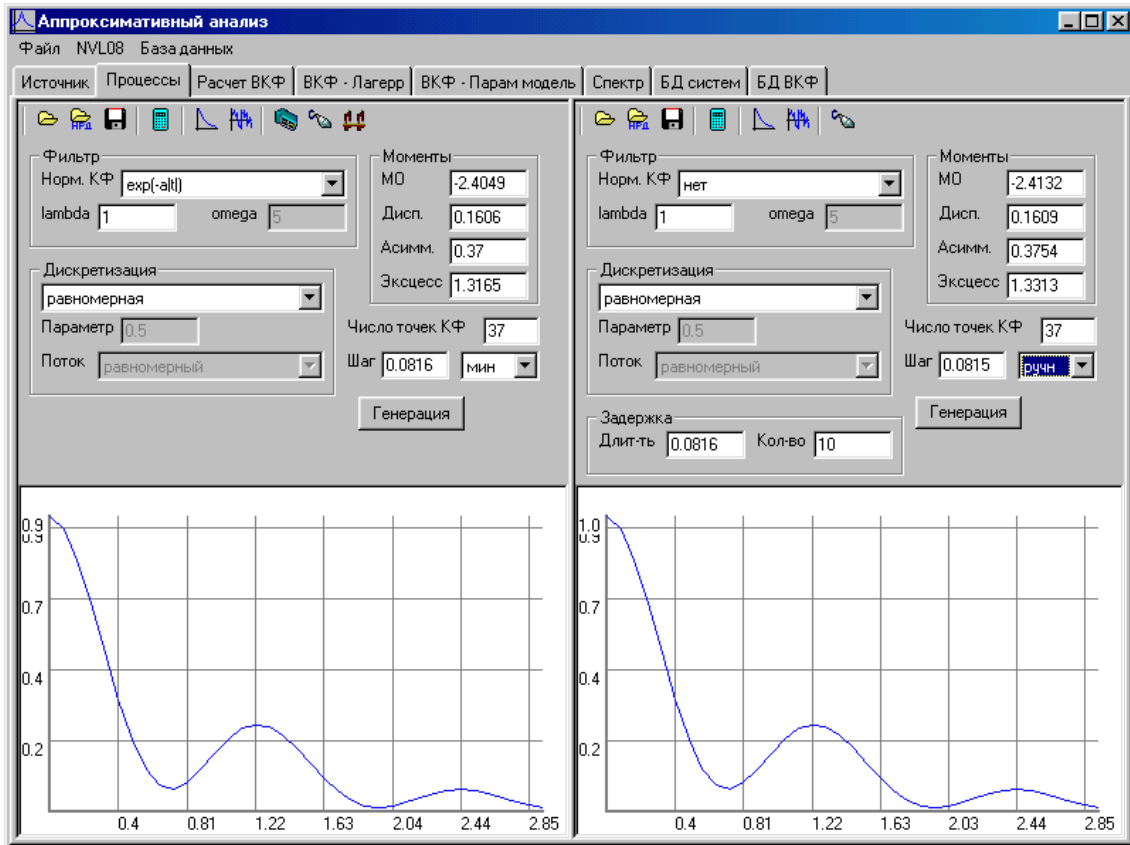


Рисунок 13.7. Характеристики процессов

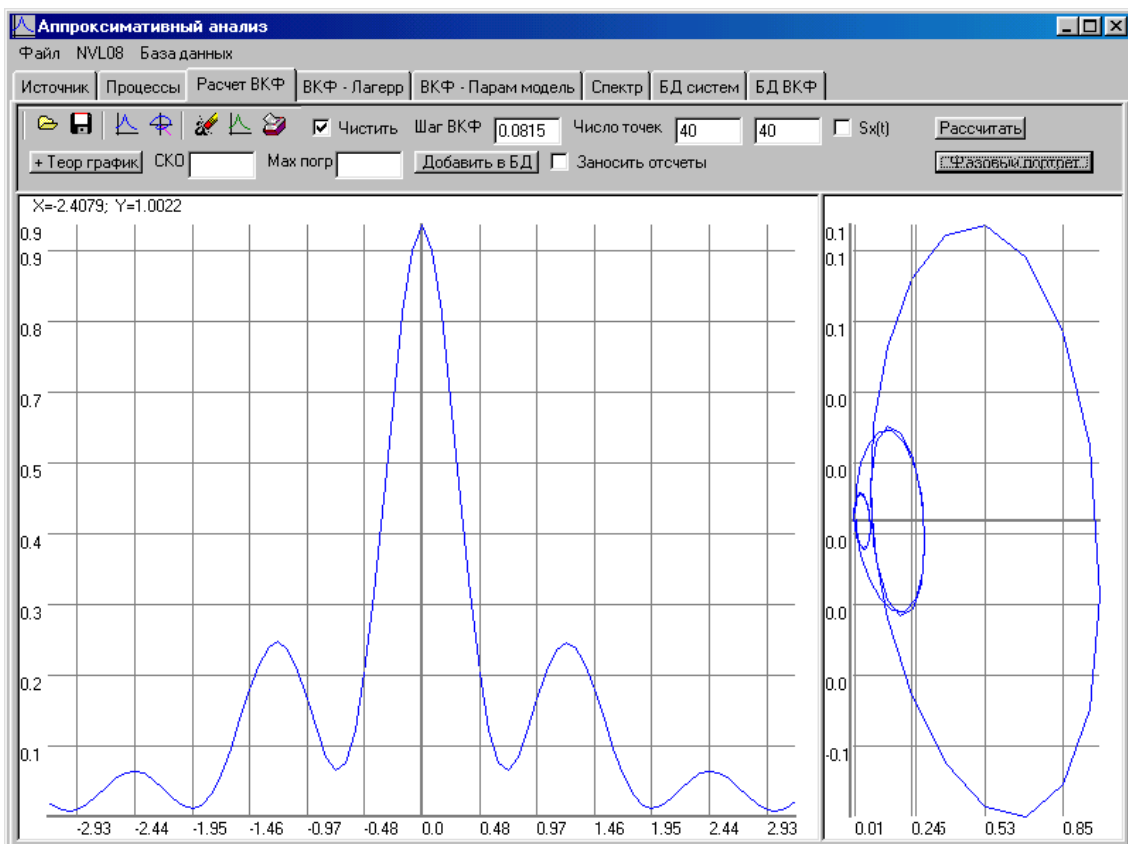


Рисунок 13.8. Взаимная корреляционная функция переданного и принятого процессов

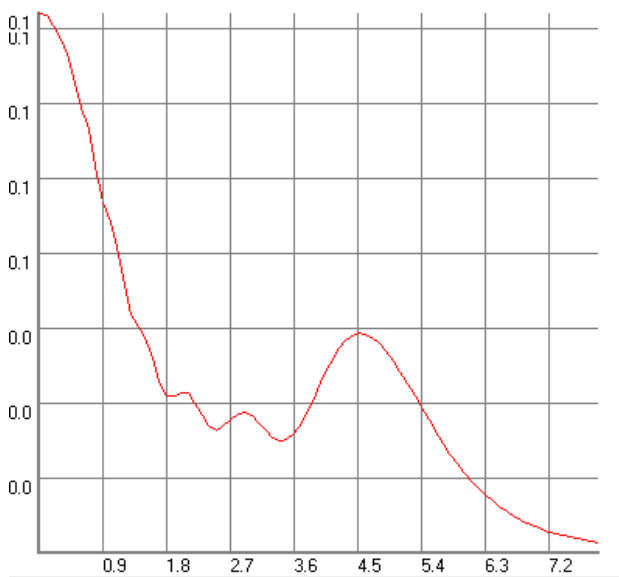


Рисунок 13.9. Модуль взаимной спектральной плотности мощности переданного и принятого СП

В завершение приведем корреляционные функции принятых процессов при различных значениях масштабирующего коэффициента. Показательно, что в случае, когда задержка на ЦАП меньше 100 мкс при заданном интервале дискретизации процесса, вид корреляционной функции теряется. Однако при определении нового интервала принудительной дискретизации (выборе в качестве него среднего расстояния между отсчетами), возможно восстановление вида корреляционной функции, как показано на рисунке 13.11.

По найденным аналитическим выражениям корреляционных функций и спектральных плотностей мощности возможно определение обобщенных корреляционно-спектральных характеристик (см. подразделы 3.2 и 5.3).

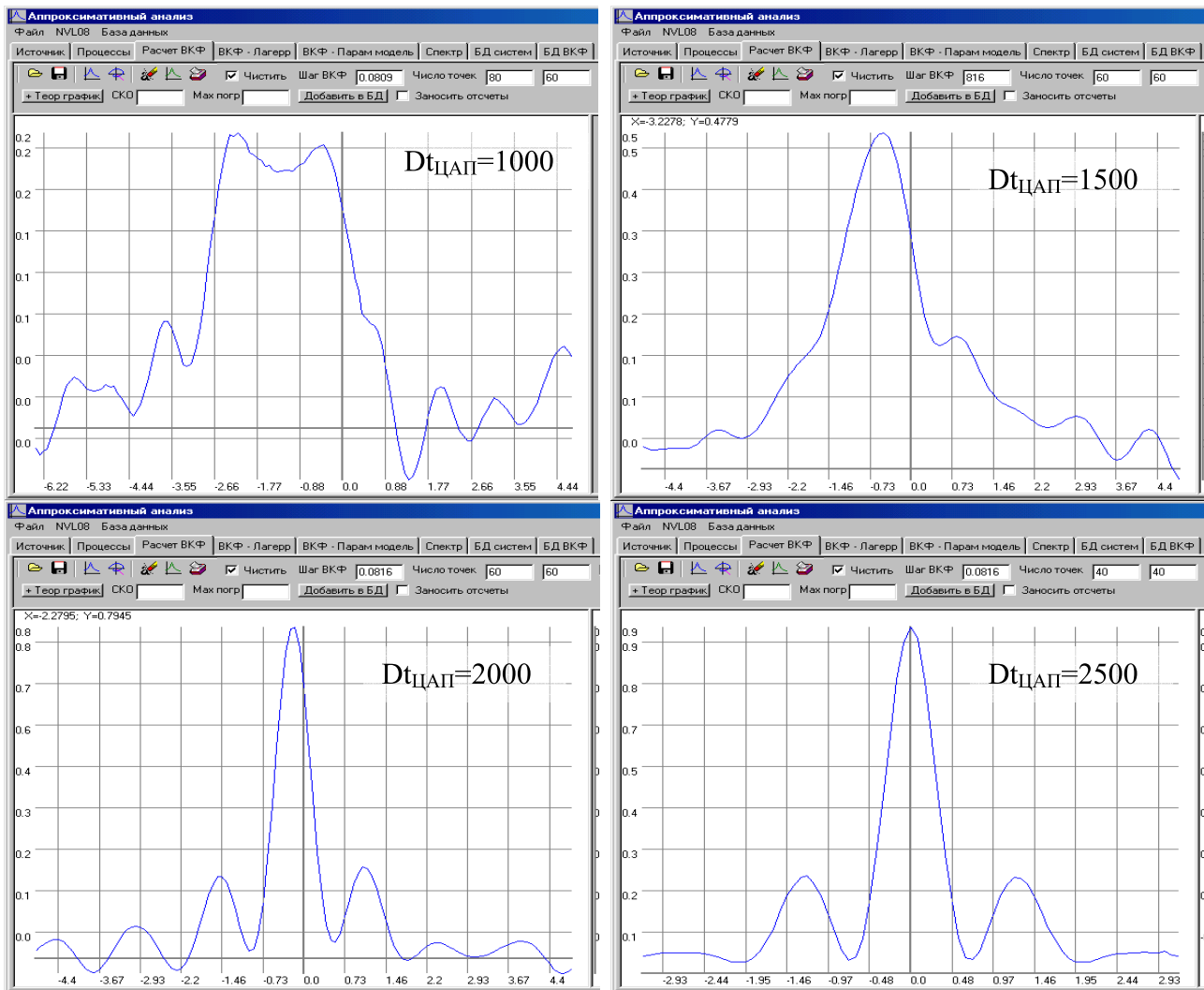


Рисунок 13.10. Корреляционные функции при разных значениях масштабирующего коэффициента

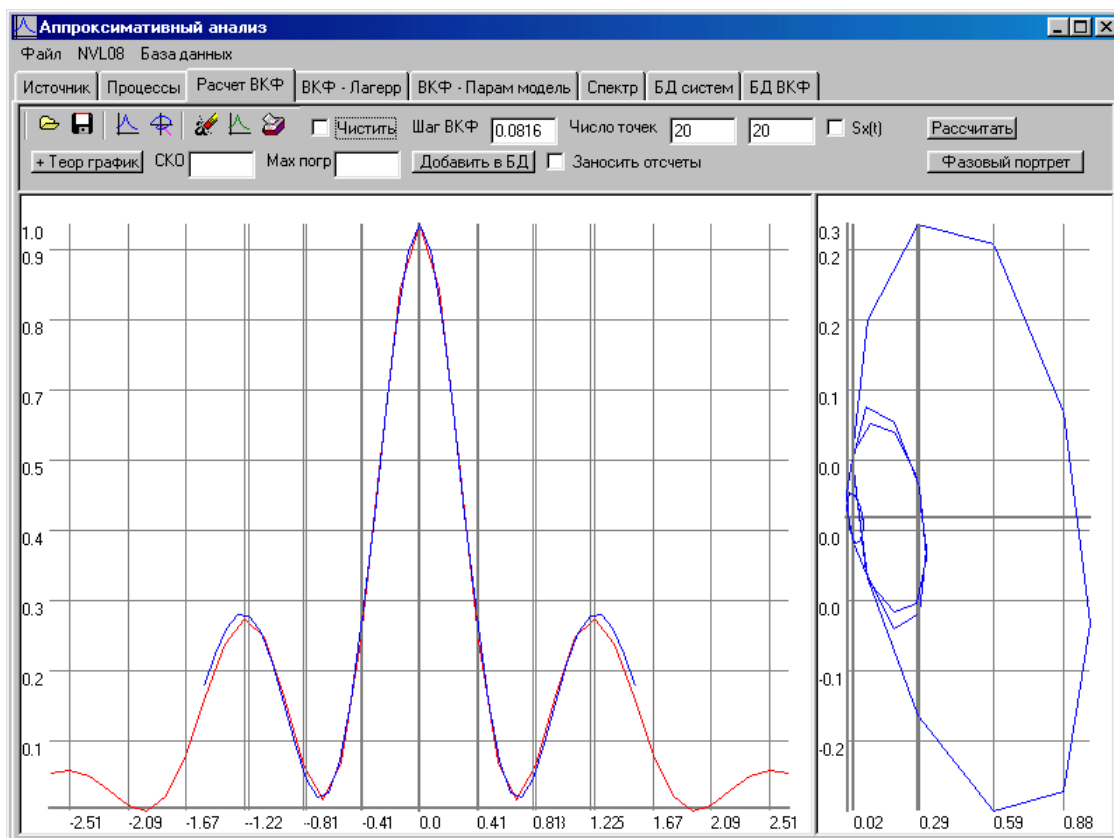


Рисунок 13.11. Автокорреляционные функции переданного и принятого процессов при масштабирующем коэффициенте 500

13.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: вид функций, параметры.
2. Определить интервал дискретизации.
3. Определить масштабирующий коэффициент.
4. Сгенерировать случайный процесс.
5. Прейти в подсистему ввода/вывода.
6. Произвести настройку канала приема/передачи.
7. Выбрать значение задержки на преобразование ЦАП.
8. Установить значение интервала дискретизации принимаемого процесса и сгенерировать поток.
9. Осуществить прием/передачу.
10. Оценить автокорреляционные функции переданного и принятого процессов.
11. Оценить взаимную корреляционную функцию.
12. Аппроксимировать полученные функции, построить спектры.
13. Оформить отчет.

13.3. Содержание отчета

1. Задание.
2. Цель работы.
3. График полученных корреляционных функций.
4. Графики спектров.

13.4. Контрольные вопросы

1. Почему происходит задержка принятого процесса при нулевом значении масштабирующего коэффициента?
2. Почему принимаемый процесс является неэквидистантным временным рядом?
3. Какой смысл взаимной корреляционной функции принятого и переданного процессов?
4. Какие характеристики необходимо сравнивать при анализе качества передачи случайного процесса при моделировании измерительного канала?
5. Назовите методы корреляционного анализа неэквидистантных временных рядов.
6. Какие характеристики относятся к обобщенным корреляционно-спектральным характеристикам?

14. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Цель работы: изучение принципов работы с измерительным каналом в ходе корреляционно-спектрального анализа.

14.1. Содержание лабораторной работы

Вычислительный комплекс имитационного моделирования измерительного канала состоит из двух ЭВМ, соединенных при помощи аналогового канала. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования осуществляются при помощи МФУ NVL08.

Перед началом работы в комплексе на каждом компьютере в выключенном состоянии устанавливаются МФУ NVL08, их выходы соединяются при помощи переходника. После включения на каждый компьютер устанавливается драйвер МФУ, и файлы автоматизированной системы.

Описание файлов и МФУ приведено в разделе 7.

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо:

- на одной ЭВМ (**ЭВМ-источнике**) сгенерировать случайный процесс с заданным видом корреляционной функции (см. рисунок 14.1), перейти в подсистему ввода/вывода и осуществить передачу процесса (см. рисунок 14.2);
- на второй ЭВМ (**ЭВМ-приемнике**) принять случайный процесс и оценить его характеристики;
- сравнить корреляционные функции и спектральные плотности мощности переданного и принятого процесса, а также оценить их взаимную корреляционную функцию. Спектральные плотности мощности можно построить, используя аппроксимирующие выражения.

Перед генерацией случайного процесса требуется установить значение масштабирующего коэффициента таким образом, чтобы интервал между отсчетами случайного процесса был не менее 100 мкс (см. лабораторную работу 13).

После перехода в систему ввода/вывода необходимо осуществить градуировку ЦАП передатчика (предварительно установив флажок «Внешний измеритель») **на ЭВМ-источнике** (см. рисунок 14.3) и АЦП приемника (установив флажок «Внешний источник») **на ЭВМ-приемнике** (см. рисунок 14.4). При заполнении градуировочных таблиц устанавливается сначала напряжение на ЦАП, затем на АЦП для каждой строки таблицы. Нажатием кнопки «Применить» осуществляется утверждение изменений.

Перед передачей данных **на ЭВМ-источнике** устанавливается задержка на преобразование ЦАП для устранения задержки случайного процесса на интервал дискретизации, связанная с продолжительностью переходного процесса при переключении (см. лабораторную работу 13). В поле «Приемник» нужно установить значение «Отсутствует».

Перед приемом данных **на ЭВМ-приемнике** необходимо сгенерировать поток событий приема отсчетов, уделив особое внимание интервалу дискретизации (требуется заполнить поле «Шаг дискретизации»). В общем случае этот шаг неизвестен и определяется опытным путем или на основе сведений об источнике информации. В данной лабораторной работе значение интервала дискретизации считается известным, так как задается при моделировании источника данных. При приеме данных в поле «Источник» нужно установить значение «Отсутствует».

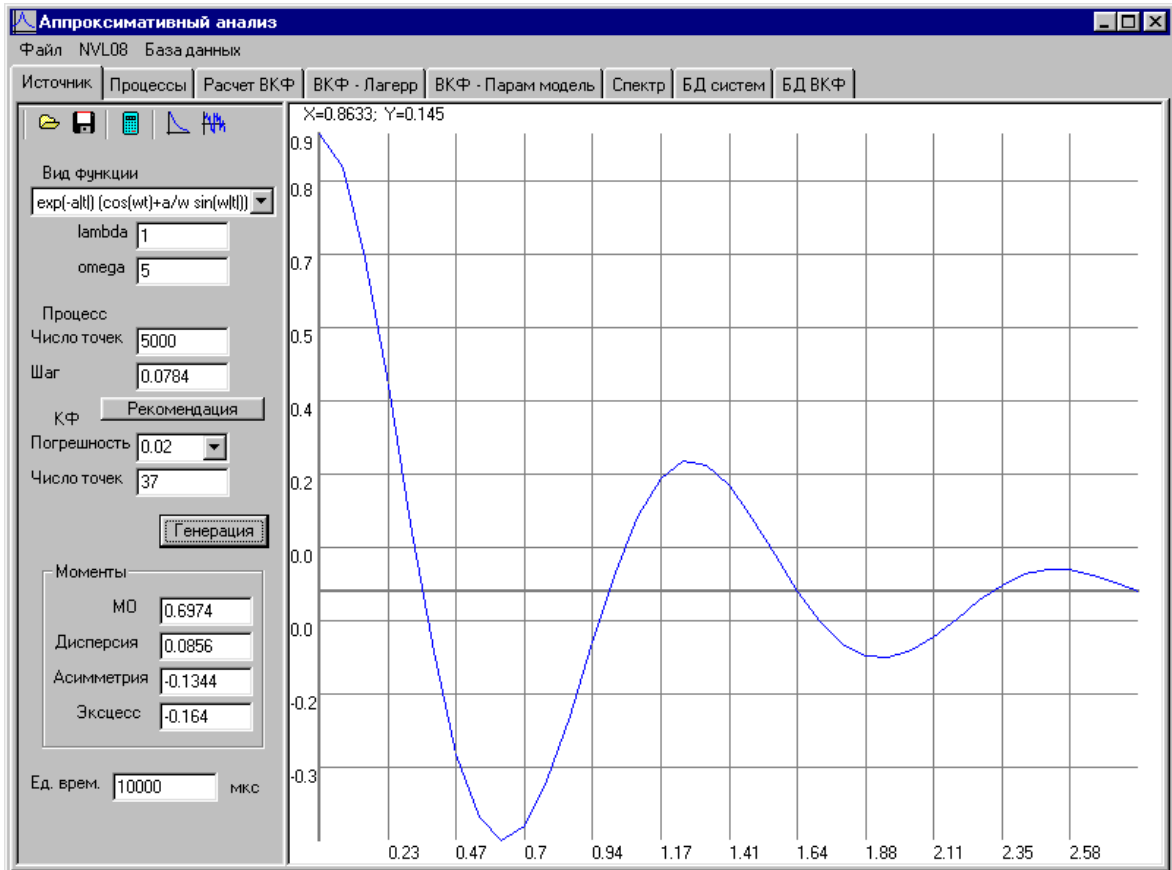


Рисунок 14.1. Корреляционная функция сгенерированного СП

Система ввода/вывода аналогового сигнала.

Ввод-вывод сигнала Настройки

Вывод сигнала... Ввод сигналов...

Источник: Подсистема генерации СП. Приемник: Отсутствует.

Параметры передатчика
Число отсчетов: 5000
Тип дискретизации: регулярная с интервалом 784 мкс
 Вывод в цикле

Вероятностные характеристики СП.
Мх: 0.69615 Ка: -0.13471

Параметры приемника
Общее число отсчетов: 0
Число отсчетов i-го канала: 0
Параметры АЦП: Разрядность: 12 бит. Окончание преобразования: без прове.
Параметры коммутатора: Количество каналов: 8 дифференциаль. Порядок переключения: циклический. Список обрабатываемых каналов: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 все каналы

Поток событий
Генерировать
Шаг дискретизации: 1
Модель: равномерная
Век. Разгд.: Симпсона
a: 0 b: 1
 дрожание:

График интервалов
Поток событий:
№ метки:
t (мкс):
пропуск:

Напряжение (V) 4 2 0 -2 -4
0 1 2 3 4
Время (с)

Отсч	Время идеальн	Время реально	Значение п
0	0 (+0)	27 (+27)	0.00875
1	784 (+784)	792 (+765)	0.05876
2	1568 (+784)	1576 (+784)	0.11628
3	2352 (+784)	2364 (+788)	0.18880
4	3136 (+784)	3142 (+778)	0.22881
5	3920 (+784)	3926 (+784)	0.26131
6	4704 (+784)	4716 (+790)	0.34884

Пуск Выход

Рисунок 14.2. Передача процесса

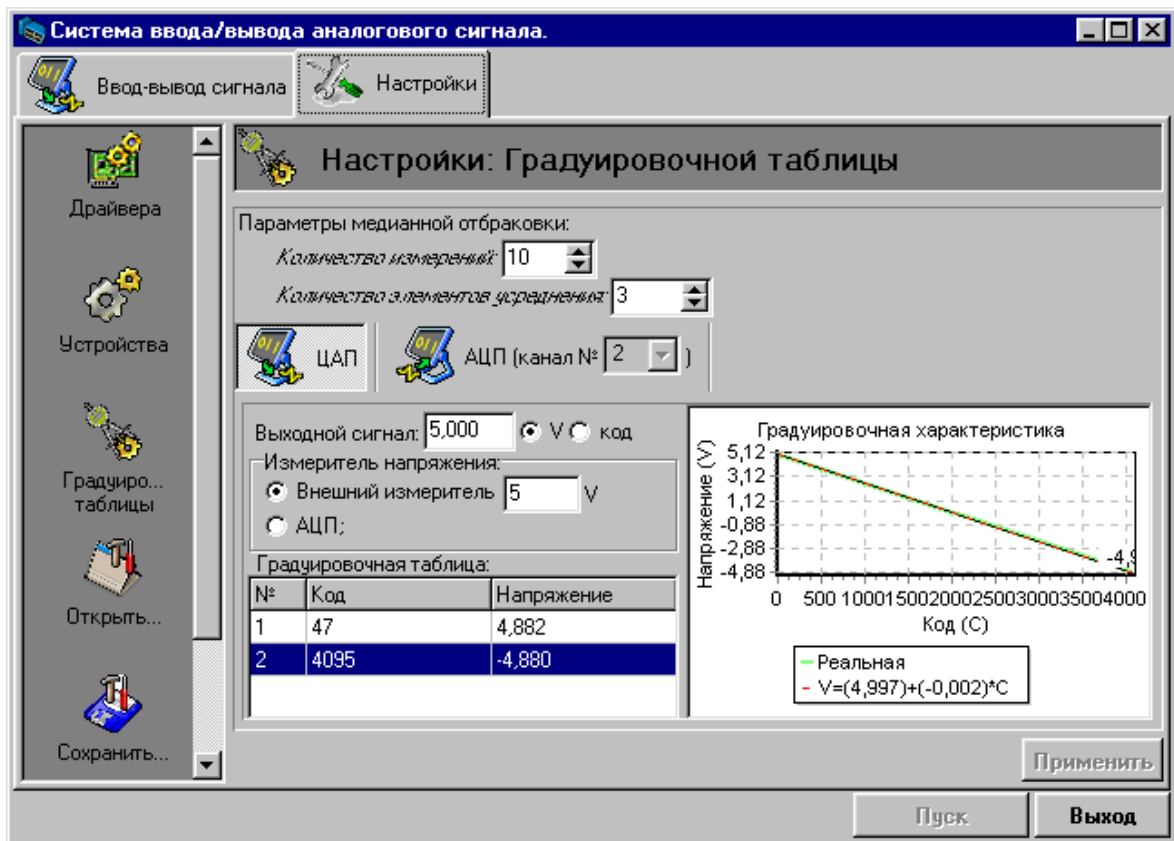


Рисунок 14.3. Градуировка ЦАП

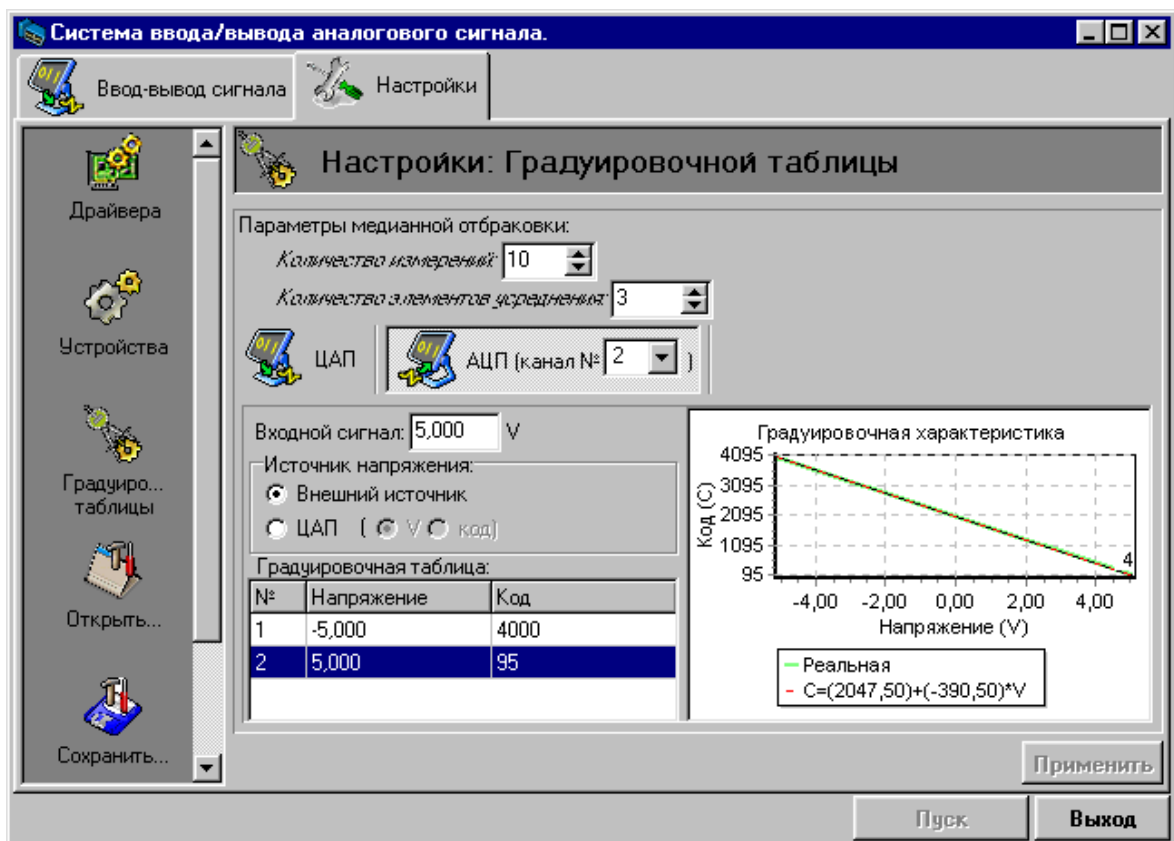


Рисунок 14.4. Градуировка АЦП

После генерирования потока событий необходимо осуществить собственно прием/передачу. Сначала нажимается кнопка «Пуск» на ЭВМ-приемнике, затем кнопка «Пуск» на ЭВМ-источнике.

После окончания передачи случайного процесса (см. рисунок 14.5) нажатием на кнопку «Выход» осуществляется переход в подсистему аппроксимативного анализа. Характеристики принятого случайного процесса будут отображены на правой панели страницы «Процессы» (см. рисунок 14.6). При выборе в качестве интервала принудительной дискретизации среднего значения среди расстояний между отсчетами второго процесса удастся построить корреляционную функцию. Также выбор интервала принудительной дискретизации при определении КФ принятого СП можно сделать на основе априорной информации о дискретизации передаваемого СП.

На рисунках 14.6–14.8 приведены результаты оценки автокорреляционных функций переданного и принятого процессов, их аппроксимации (функциями вида $e^{-\lambda|\tau|} \left(\cos \omega\tau + \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega|\tau| \right)$ с параметрами $\lambda=0.9663$; $\omega_0=5.0105$ для КФ передаваемого процесса и $\lambda=0.98$; $\omega_0=4.9536$ для КФ принятого процесса) и построения спектральной плотности мощности.

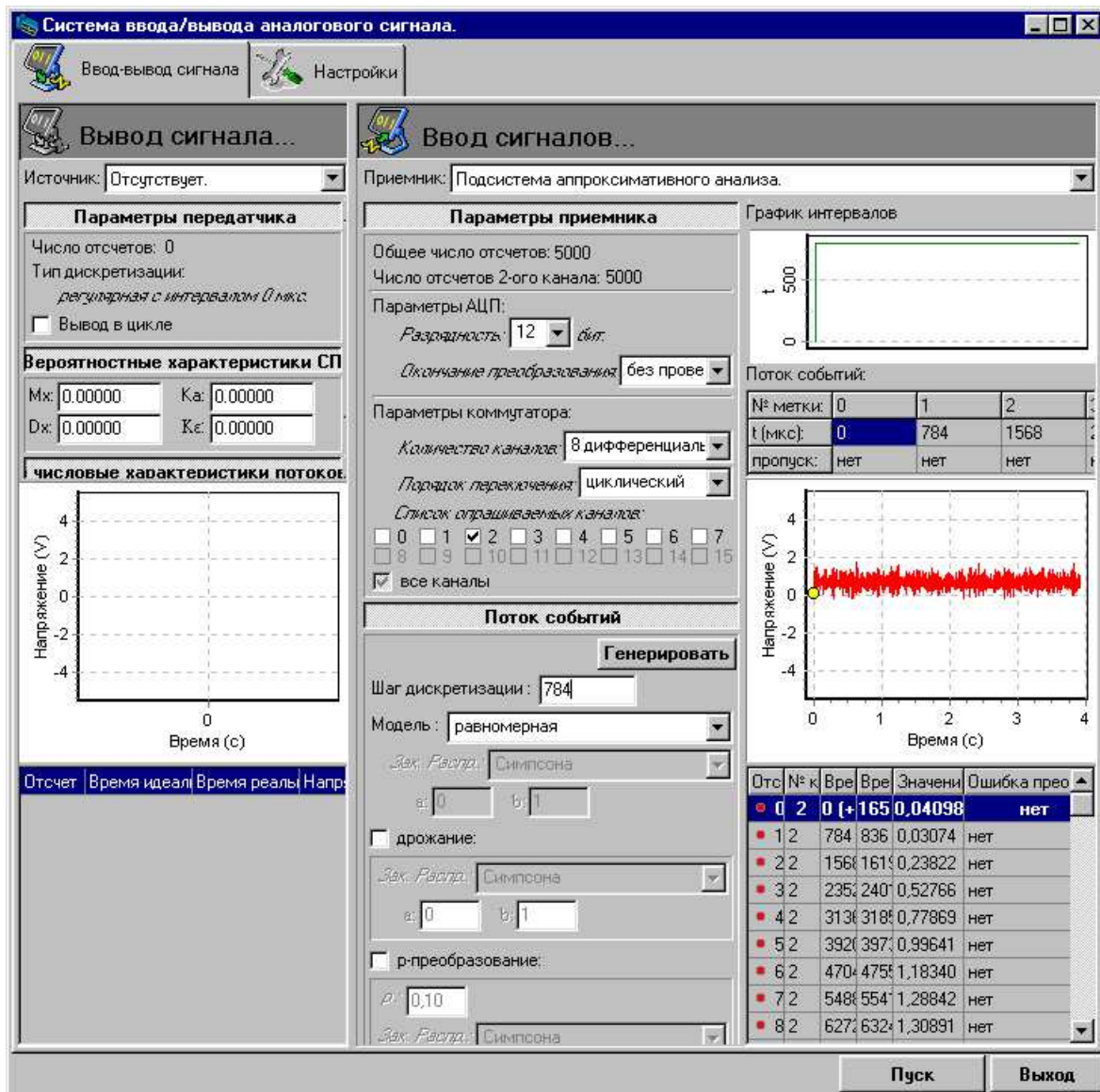


Рисунок 14.5. Прием процесса

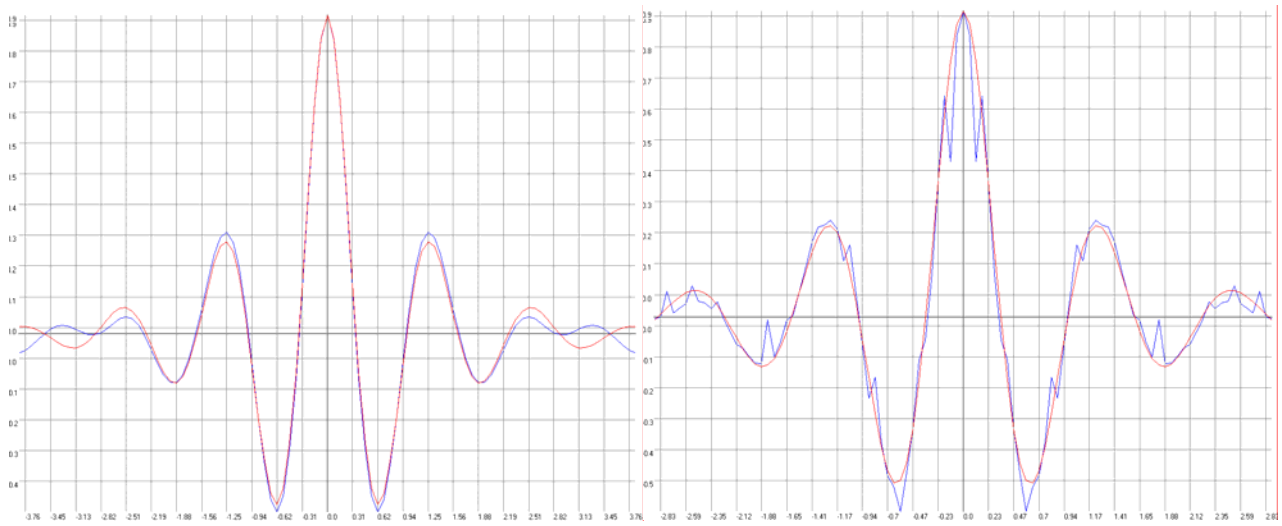


Рисунок 14.6. Корреляционные функции переданного и принятого процессов

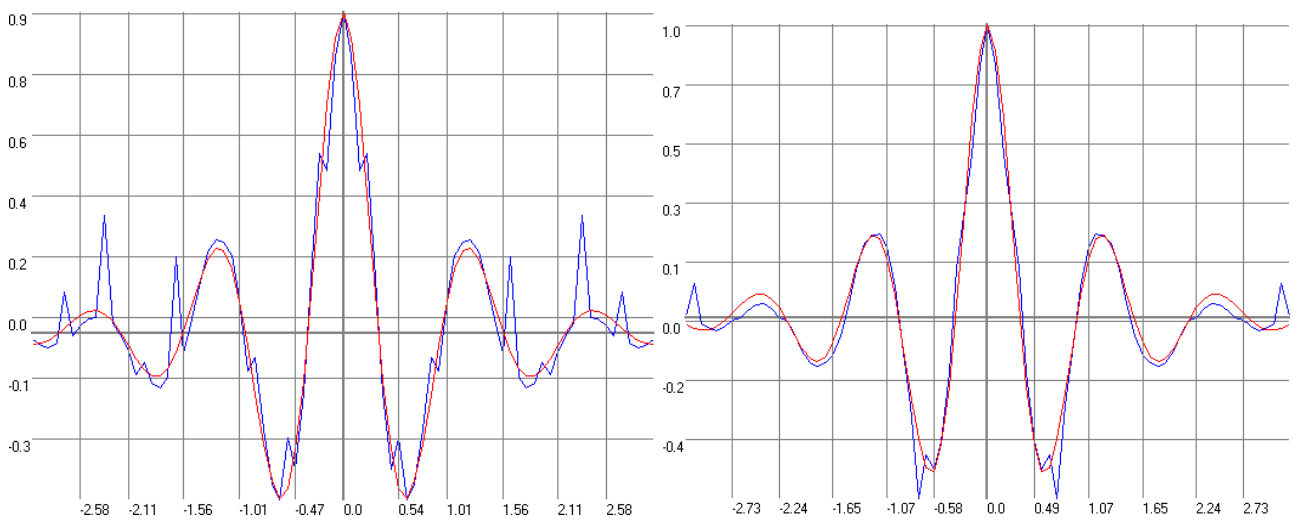


Рисунок 14.7. Корреляционные функции и принятого процесса при различных интервалах принудительной дискретизации

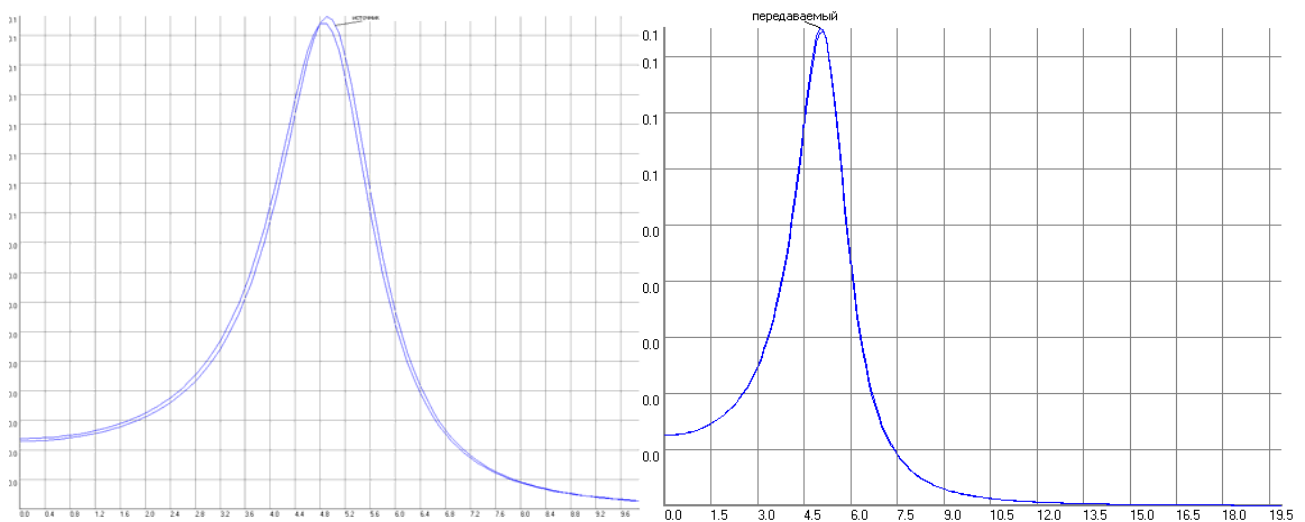


Рисунок 14.8. Спектры переданного и принятого процессов при различных интервалах принудительной дискретизации

14.2. Задание на самостоятельную работу

1. Получить задание: вид корреляционной функции, параметры.
2. Сгенерировать процесс на ЭВМ-источнике. Задать масштабирующий коэффициент.
3. Перейти в подсистему ввода/вывода на обеих ЭВМ.
4. Установить значения полей «Приемник» и «Источник».
5. Задать задержку на ЦАП ЭВМ-источника.
6. Осуществить градуировку ЦАП ЭВМ-источника.
7. Осуществить градуировку АЦП ЭВМ-приемника.
8. Установить шаг дискретизации на ЭВМ-приемнике.
9. Осуществить прием/передачу.
10. Оценить моменты и корреляционную функцию принятого НВР. Выбрать интервал принудительной дискретизации.
11. Оценить корреляционные функции переданного и принятого процессов.
12. Аппроксимировать корреляционные функции. Построить спектры по аппроксимирующим выражениям для переданного и принятого процессов.
13. Оформить отчет.

14.3. Содержание отчета

1. Вид функции, параметры, указанные в задании.
2. Результаты градуировки АЦП и ЦАП.
3. Корреляционные функции и спектральные плотности мощности переданного и принятого процессов.
4. Результаты испытаний, проведенных для различных значений масштабирующего коэффициента.

14.4. Контрольные вопросы

1. Для чего осуществляется градуировка АЦП и ЦАП?
2. Как оценить спектральную плотность мощности принятого процесса?
3. Для чего служит измерительный канал?
4. Назовите основные характеристики измерительного канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен широкий круг задач аппроксимативного анализа корреляционно-спектральных характеристик. Учитывая разнообразие случайных процессов, естественно, работу в этой области нельзя считать решенной в полной мере. Однако полученные результаты показывают перспективность данного подхода для решения разнообразных задач науки и техники, так как позволяют:

1. идентифицировать случайные процессы по виду корреляционной функции с использованием её фазового портрета;
2. получить аналитические выражения корреляционно-спектральных характеристик в виде параметрических моделей как при регулярной, так и при нерегулярной дискретизации, удобные для дальнейших исследований и хранения результатов, что особенно важно при большом объёме статистических испытаний;
3. без существенных вычислительных затрат определить обобщенные корреляционно-спектральные характеристики: интервалы корреляции, корреляционные моменты, эквивалентную ширину спектра мощности и т.д. – по параметрам модели;
4. в сомнительных случаях с помощью разработанной автоматизированной системы произвести аппроксимацию корреляционно-спектральных характеристик различными параметрическими моделями с использованием различных численных методов, включая аппроксимацию ортогональными функциями Лагерра;
5. за счёт встроенных подсистем имитации случайных процессов с заданными вероятностными характеристиками отладить и включить в системы новые алгоритмы аппроксимации;
6. сравнить результаты аппроксимации корреляционно-спектральных характеристик как при регулярной, так и при нерегулярной дискретизации случайных процессов;
7. за счёт визуализации имитации случайных процессов, идентификации и аппроксимации функциональных характеристик, использования ручного и автоматизированного режимов работы, применять автоматизированную систему в учебном процессе при подготовке специалистов по специальностям, связанным со статистической обработкой информации, автоматизацией научных исследований;
8. использовать автоматизированную систему для решения разнообразных задач науки и техники методом имитационного моделирования, а также обработки результатов экспериментальных исследований объектов различной природы. Т.е. предлагаемую систему можно использовать в качестве вспомогательной системы при выполнении лабораторных работ по другим курсам, например, связанным с испытаниями объектов авиационно-космической техники.

В предлагаемом лабораторном практикуме рассмотрены вопросы:

1. описания и моделирования случайных процессов с заданными вероятностными характеристиками, а также проверки качества моделирования с использованием фазовых портретов;
2. аппроксимативного анализа корреляционно-спектральных характеристик временных рядов параметрическими моделями и ортогональными функциями Лагерра, удовлетворяющими минимуму квадратической погрешности аппроксимации;
3. аппроксимативного анализа корреляционно-спектральных характеристик неэквидистантных временных рядов параметрическими моделями и ортогональными функциями Лагерра;

4. применения аналогового канала ввода/вывода и соответствующей подсистемы для моделирования и статистической обработки случайных процессов, что способствует улучшению наглядности при изучении базовых дисциплин.

Отметим, что предлагаемый перечень лабораторных работ отражает лишь опыт и точку зрения авторов и может быть существенно расширен как по номенклатуре работ, так и по количеству пунктов исследований в каждой работе.

На наш взгляд представляет практический интерес решение следующих задач аппроксимативного анализа:

1. расширение круга параметрических моделей для решения разнообразных научно-технических задач;
2. поиск и применение для определения параметров моделей новых численных методов, обладающих лучшей сходимостью;
3. поиск и исследование новых методов идентификации случайных процессов;
4. совершенствование автоматизированных систем для аппроксимативного анализа случайных процессов.

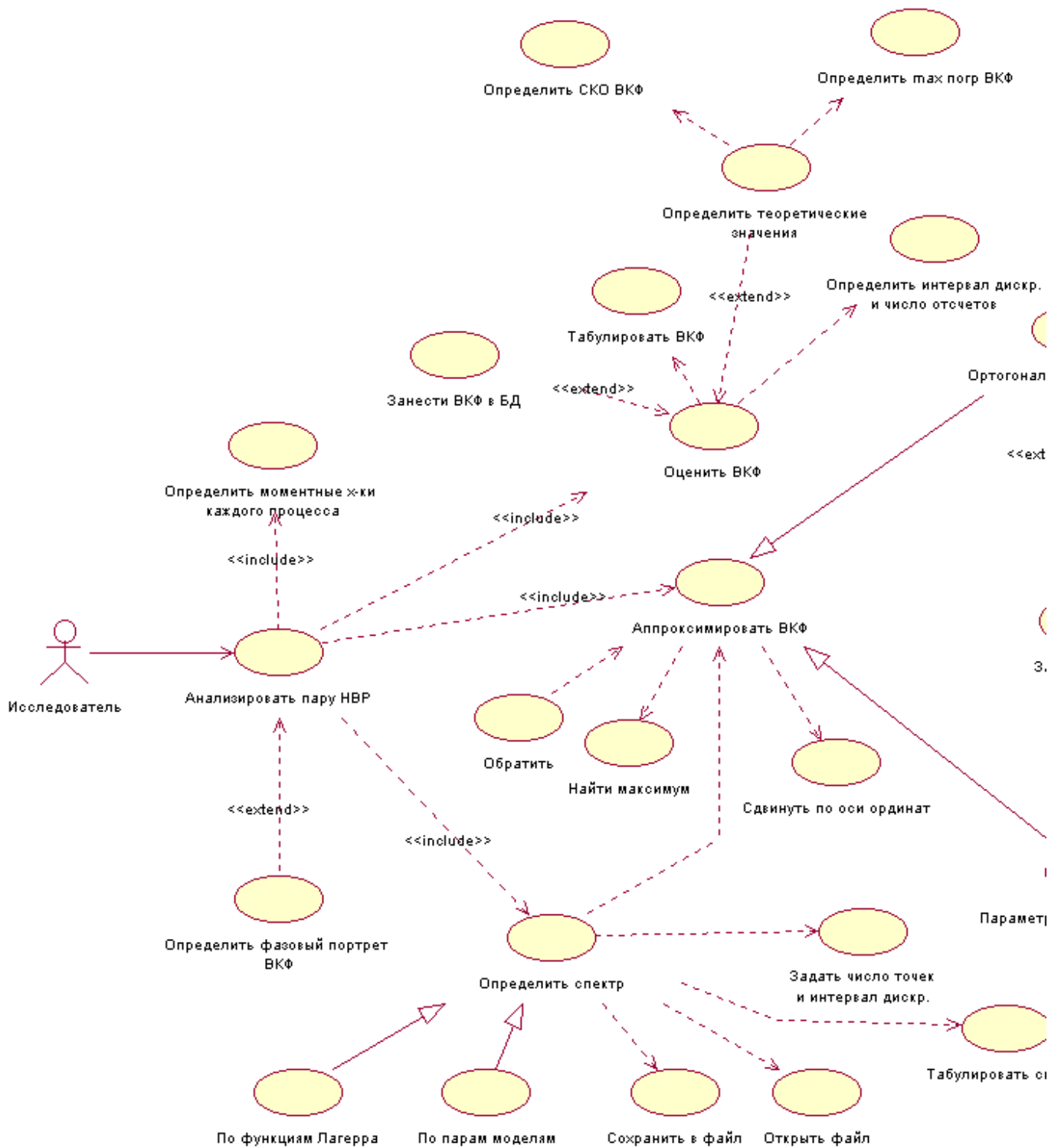
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированные системы научных исследований /Прохоров С.А., Фурсов В.А., Кривошеев А.О., и др.: НПЦ «Авиатор», Самара, 1995. - 137 с.
2. Адаптивные телеизмерительные системы /Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Долинов С.Н., Журавин Л.Г., Семенов Е.И., Фремке А.В./ Л.: Энергоатомиздат, 1981. - 246 с.
3. Артамонов Г.Т., Тюрин В.Д. Анализ информационно-управляющих систем со случайным интервалом квантования сигнала по времени. - М.: Энергия, 1977. - 112 с.
4. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: Учеб. пособие. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 600 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1969. - 576 с.
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1965. - 368 с.
7. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник – СПб: Питер, 2001. – 752 с.: ил.
8. Голд Б., Рейдер Ч. Цифровая обработка сигналов. – М.: Сов. Радио, 1973. - 368 с.
9. Гома Х. UML. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 704 с.: ил. (Серия «Объектно-ориентированные технологии в программировании»).
10. Горбачевич Е.Д. Коррелометры с аппроксимацией. - М.: Энергия, 1971. - 125с.
11. Горелов Г.В. Нерегулярная дискретизация сигналов. - М.: Радио и связь, 1982. - 256 с., ил. (стат. теория связи. Вып. 17).
12. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. - М.: Физматгиз, 1963. - 1100 с.
13. Грибанов Ю.И., Веселова Г.П., Андреев В.Н. Автоматические цифровые корреляторы. – М.: Энергия, 1971. – 240 с., ил.
14. Грибанов Ю.И., Мальков В.Л. Спектральный анализ случайных процессов. - М.: Энергия, 1974. - 240 с., ил.
15. Губарев В.В. Алгоритмы статистических измерений. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 272 с.
16. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1970.
17. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Ч.1. - М.: Мир, 1971. -320 с.
18. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Ч.2. - М.: Мир, 1972. -288 с.
19. Заездный А.М. Основы расчётов по статистической радиотехнике. – М.: Связь, 1969. - 447 с.
20. Кратцер А., Франц В. Трансцендентные функции. //Перевод с нем. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 466 с.
21. Курочкин С.С. Многоканальные счётные системы и коррелометры. – М.: Энергия, 1972. – 344 с., ил.
22. Леоненков А.В. Самоучитель UML – СПб.: БХВ - Петербург, 2001. – 304 с., ил.

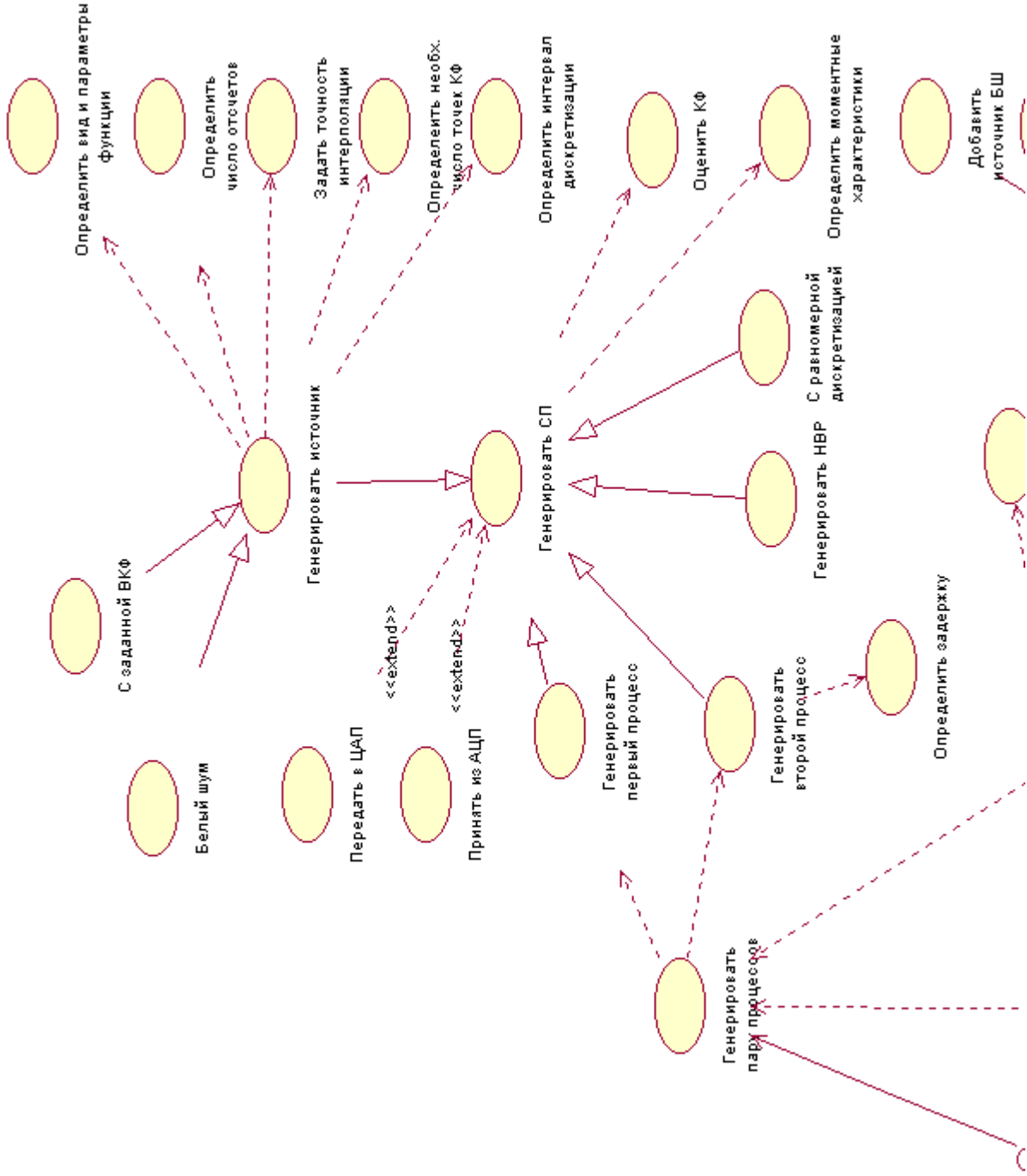
23. Методы нормирования метрологических характеристик, оценки и контроля характеристик погрешностей средств статистических измерений. РТМ 25 139-74//Минприбор. – 1974. – 76 с.
24. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. - М.: Энергия, 1972. - 456 с., ил.
25. Мирский Г.Я. Характеристика стохастической взаимосвязи и их измерения. - М.: Энергоиздат, 1982. – 319 с.
26. Никифоров А.Ф., Суслов С.К., Уваров В.Б. Классические ортогональные полиномы дискретной переменной. – М.: Наука, 1985.
27. Перспективные средства вычислительной техники и автоматизации для создания интеллектуальных АСНИ /Прохоров С.А., Дерябкин В.П., Кривошеев А.О. и др.: НПЦ «Авиатор», Самара, 1994. - 99 с.
28. Прохоров С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов. – 2-е изд., перераб. и доп./СНЦ РАН, 2001. - 380 с., ил.
29. Прохоров С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов/Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Уральск, 2001. - 329 с., ил.
30. Прохоров С.А. Математическое описание и моделирование случайных процессов/Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Уральск, 2001. 209 с., ил.
31. Прохоров С.А. Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум/Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Уральск, 2001. - 191 с., ил.
32. Прохоров С.А. Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум. – 2-е изд., перераб. и доп./СНЦ РАН, 2002. 277 с., ил.
33. Прохоров С.А. Прикладной анализ неэквидистантных временных рядов/Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Уральск, 2001.- 375 с., ил.
34. Прохоров С.А., Дегтярева О.А. Подсистема генерирования псевдослучайных последовательностей автоматизированной системы аппроксимативного анализа законов распределения//Вестник СГАУ. Серия: актуальные проблемы радиоэлектроники. – Самара, СГАУ, 2001. – С. 100-110.
35. Прохоров С.А., Иващенко А.В. Автоматизированная информационная система для аппроксимативного анализа взаимных корреляционно-спектральных характеристик// Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении. – Самара, СГАУ, 2001. – С. 135-141.
36. Прохоров С.А., Иващенко А.В. Автоматизированная система для аппроксимативного анализа взаимных корреляционно-спектральных характеристик временных рядов// Труды международного симпозиума «Надежность и качество», Пенза, 2002. -. С. 146-149.
37. Пугачёв В.С. Введение в теорию вероятностей. – М.: Наука, 1968. - 368 с.
38. Пугачёв В.С. Теория случайных функций. – М.: Физматиздат., 1962. – 884 с.
39. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Аппроксимативные методы анализа случайных процессов. - М.: Энергия, 1974. - 176 с., ил.
40. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. - М.: Сов. радио, 1968. - 256 с.
41. Техническое описание многофункционального устройства МФУ NVL08.
42. Тихомиров Ю.В. MS SQL Server 2000: разработка приложений. – СПб.: БХВ – Петербург, 2000. – 368 с., ил.
43. Цветков Э.И. Основы теории статистических измерений. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1982. - 256 с.

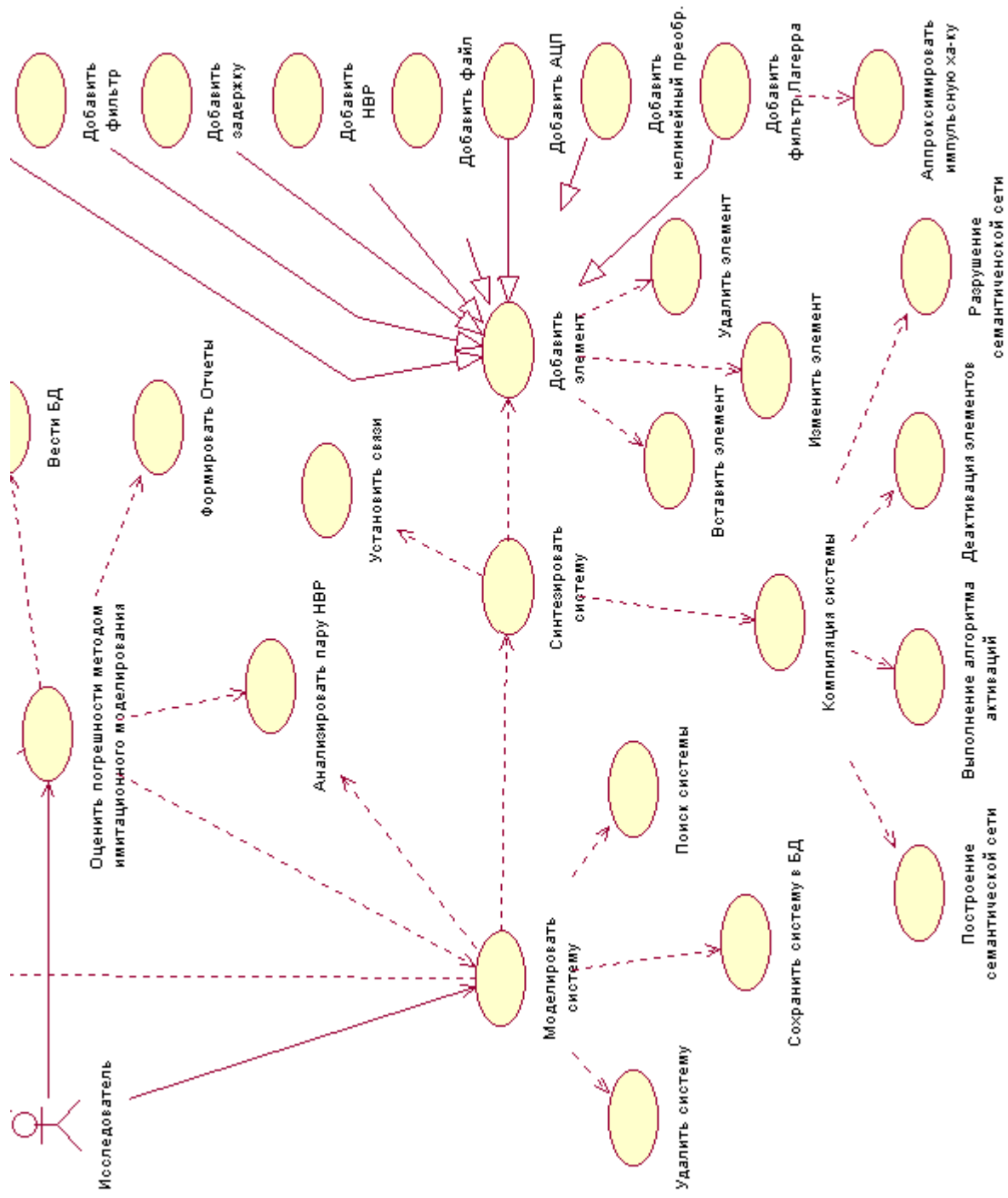
44. Чеголин П.М. Автоматизация спектрального и корреляционного анализа. – М.: Энергия, 1969. – 383 с.
45. Численные методы: Курс лекций/ А.Н. Коварцев. Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2000, 177 с.
46. Lampard D.G. A new Method of determining Correlation Function Stationary Time Series. “Proceedings of the Institution of Electrical Engineers”, vol. 102, part. C. March, 1955, London, № 1.
47. Prokhorov S. Manual for the Simulation of Random Processes and Dynamic Systems. - IRB.- Zagreb. - 1980. - 62 p.
48. Soucek B., Prokhorov S. Event - Train Correlation and Real - Time Microcomputer Systems//Microprocessing and Microprogramming. - vol. 11 (1983).- № 1. - North Holland Publishing Company. - P. 23-29.
49. Soucek B., Prokhorov S. Event-Train Correlator Based on Small Computers//Proceedings of the IV International Symp. «MIMI 80».- Budapest. - 1980. - P. 264-267.

Диаграммы вариантов использования подсистем аппроксимативного анализа



Продолжение приложения 1





Импульсные характеристики формирующих фильтров

Данное приложение иллюстрирует результаты (варианты взаимных корреляционных функций), получаемые при использовании двух фильтров и одного источника «белого шума». Всего выбрано 7 типовых видов фильтров. Для их различных комбинаций найдены аналитические выражения и построены графики.

В первой таблице приведены типовые фильтры $h(\tau)$ и корреляционные функции, получаемые на выходе фильтра при прохождении через него «белого шума».

Во второй таблице указаны аналитические выражения для взаимных корреляционных функций процессов, полученных при прохождении «белого шума» через пару фильтров. Они получены решением интеграла свертки для пары фильтров. Для уменьшения объема записи взаимная корреляционная функция $K_{xy}(\tau)$ разбита на две ветви $K_{xy}^{(1)}(\tau)$, определенной на $(0, \infty)$, и $K_{xy}^{(2)}(\tau)$, определенной на $(-\infty, 0)$. Так как $K_{xy}^{(2)}(\tau) = K_{yx}^{(1)}(-\tau)$, приведены отдельно выражения для правой и левой ветвей. В первом столбце указаны номера первого (i) и второго (j) фильтров. Во втором и третьем – параметры ВКФ $K_{xy}^{(ij)}(\tau) = k \cdot F(\tau) \cdot e^{-\alpha_2 \tau}$.

Далее приведены графики получаемых вариантов взаимных корреляционных функций при параметрах фильтров $\alpha = 1$; $\omega = 2$ и задержке второго процесса на 10 интервалов дискретизации.

i	$h(\tau)$	k	$K_x(\tau)$
1	$k\alpha e^{-\alpha\tau}$	$\sigma_x \sqrt{\frac{1}{\alpha\pi}}$	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|}$
2	$k\alpha^2 \tau e^{-\alpha\tau}$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\alpha\pi}}$	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$
3	$k\alpha e^{-\alpha\tau} (1 - \alpha\tau)$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\alpha\pi}}$	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 - \alpha|\tau|)$
4	$k\alpha^3 \tau^2 e^{-\alpha\tau}$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{3\alpha\pi}}$	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( 1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2 \tau^2}{3} \right)$
5	$k\alpha e^{-\alpha\tau} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} - \alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sigma_x \sqrt{\frac{1}{\alpha\pi}}$	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$

Продолжение приложения 2

6	$k\alpha \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}}{\omega_0} e^{-\alpha\tau} \sin \omega_0 \tau$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\alpha\pi}}$	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$
7	$k\alpha e^{-\alpha\tau} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sigma_x \sqrt{\frac{2}{\alpha\pi}}$	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$

ij	k	F	
11	$\frac{2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{\alpha_1 + \alpha_2}$	1	
22	$\frac{4\alpha_1\alpha_2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{(\alpha_1 + \alpha_2)^3}$	$(\alpha_1 + \alpha_2)\tau + 2$	
33	$\frac{-4\alpha_2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{(\alpha_1 + \alpha_2)^3}$	$\alpha_2(\alpha_1 + \alpha_2)\tau - 2\alpha_1$	
44	$\frac{8(\alpha_1\alpha_2)^2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{3(\alpha_1 + \alpha_2)^5}$	$(\alpha_1 + \alpha_2)^2\tau^2 + 6(\alpha_1 + \alpha_2)\tau + 12$	
55	$\frac{2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{11} + \omega_{12})^2)((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{11} - \omega_{12})^2)}$	$\left(\left(\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2} - \sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{01}^2} \right) (\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) - (\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) \right) + 2\sqrt{(\alpha_2^2 + \omega_{02}^2)(\alpha_1^2 + \omega_{01}^2)}(\alpha_1 + \alpha_2) + 2\alpha_1(\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) + 2\alpha_2(\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) \cos \omega_{02}\tau + \frac{1}{\omega_{02}} \left(\left(\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2} - \sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{01}^2} \right) (\alpha_2^2 + \omega_{02}^2 + \alpha_1^2 + \omega_{01}^2) + 2\alpha_1(\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) \right) + \sqrt{(\alpha_2^2 + \omega_{02}^2)(\alpha_1^2 + \omega_{01}^2)}(\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2 - \omega_{02}^2 - \alpha_2^2\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2(\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) - (\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2 + \omega_{02}^2)^2 \sin \omega_{02}\tau$	
66	$\frac{4\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{11}^2}\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{12}^2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{11} + \omega_{12})^2)((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{11} - \omega_{12})^2)}$	$2(\alpha_1 + \alpha_2) \cos \omega_{02}\tau + \left(\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2}{\omega_{02}} - \omega_{02} \right) \sin \omega_{02}\tau$	

Продолжение приложения 2

77	$\frac{4\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{11} + \omega_{12})^2\right)\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{11} - \omega_{12})^2\right)}$	$2\left(\alpha_2(\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) + \alpha_1(\alpha_2^2 + \omega_{02}^2)\right)\cos\omega_{02}\tau + \left(\frac{\omega_{02}(\alpha_1^2 + \omega_{01}^2)}{\omega_{02}} - \frac{\alpha_2^2\omega_{01}^2}{\omega_{02}} - \frac{(\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2 + \omega_{02}^2)^2}{\omega_{02}}\right)\sin\omega_{02}\tau$
12	$12\frac{4\alpha_1\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2}$	1
21	$4\alpha_2\frac{\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2}$	$(\alpha_1 + \alpha_2)\tau + 1$
13	$13\frac{2\alpha_2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2}$	1
31	$-2\frac{\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2}$	$(\alpha_2^2 + \alpha_1\alpha_2)\tau - \alpha_1$
14	$4\alpha_1\frac{\sqrt{6\alpha_1\alpha_2}}{3(\alpha_1 + \alpha_2)^3}$	1
41	$\frac{2\alpha_2\sqrt{6\alpha_1\alpha_2}}{3(\alpha_1 + \alpha_2)^3}$	$(\alpha_1 + \alpha_2)^2\tau^2 + 2(\alpha_1 + \alpha_2)\tau + 2$
15	$-2\frac{\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\left(\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_1^2} + \alpha_2\right)}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2\right)}$	1
51	$\frac{-2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{02}^2\right)}$	$\left(\alpha_1 + \sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2}\right)\cos\omega_{02}\tau + \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\omega_{02}}\left(\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2} - \alpha_2\right) - \omega_{02}\right)\sin\omega_{02}\tau$
16	$2\frac{\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_1^2}}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2\right)}$	1
61	$2\frac{\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_2^2}}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2\right)}$	$\cos\omega_{02}\tau + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\omega_{02}}\sin\omega_{02}\tau$

Продолжение приложения 2

17	$\frac{2\alpha_2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{\left((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2\right)}$	1	
71	$\frac{2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{\left((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{02}^2\right)}$	$\alpha_1 \cos \omega_{02} \tau - \left(\frac{\alpha_2}{\omega_{02}} (\alpha_1 + \alpha_2) - \omega_{02} \right) \sin \omega_{02} \tau$	
23	$\frac{4\alpha_2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{(\alpha_1+\alpha_2)^3}$	$\alpha_2(\alpha_1+\alpha_2)\tau + (\alpha_2-\alpha_1)$	
32	$\frac{4\alpha_1\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{(\alpha_1+\alpha_2)^3}$	$\alpha_2(\alpha_1+\alpha_2)\tau + (\alpha_2-\alpha_1)$	
24	$\frac{8\alpha_1^2\alpha_2\sqrt{3\alpha_1\alpha_2}}{3(\alpha_1+\alpha_2)^4}$	$(\alpha_1+\alpha_2)\tau + 3$	
42	$\frac{4\alpha_1\alpha_2^2\sqrt{3\alpha_1\alpha_2}}{3(\alpha_1+\alpha_2)^4}$	$(\alpha_1+\alpha_2)^2\tau + 4(\alpha_1+\alpha_2) + 6$	
25	$\frac{2\alpha_2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{\left((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2\right)^2}$	$\sqrt{(\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2} + \omega_{01} \left(\alpha_2 + \sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2} \right) \tau + 2(\alpha_1+\alpha_2) \sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2} - \alpha_1^2 + \alpha_2^2 - \omega_{01}^2$	
52	$\frac{2\alpha_1\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{\left((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{02}^2\right)^2}$	$\left(2(\alpha_1+\alpha_2) \sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2} + \alpha_1^2 - \omega_{02}^2 - \alpha_2^2 \right) \cos \omega_{02} \tau + \left(\sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2} \frac{(\alpha_1+\alpha_2)^2 - \omega_{02}^2}{\omega_{02}} + \omega_{02} (2\alpha_1+\alpha_2) + \frac{\alpha_2}{\omega_{02}} (\alpha_1+\alpha_2)^2 \right) \sin \omega_{02} \tau$	
26	$\frac{4\alpha_2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2}}{\left((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2\right)^2}$	$\left((\alpha_1+\alpha_2)^2 + \omega_{02}^2 \right) \tau + 2(\alpha_1+\alpha_2)$	
62	$\frac{4\alpha_1\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2}}{\left((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{02}^2\right)^2}$	$\left(2(\alpha_1+\alpha_2) \right) \cos \omega_{02} \tau + \left(\frac{(\alpha_1+\alpha_2)^2}{\omega_{02}} - \omega_{02} \right) \sin \omega_{02} \tau$	

Продолжение приложения 2

27	$\frac{4\alpha_2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2)^2}$	$\alpha_2((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2)\tau + \alpha_2^2 - \alpha_1^2 - \omega_{01}^2$
72	$\frac{4\alpha_1\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{02}^2)^2}$	$(\alpha_1^2 - \alpha_2^2 - \omega_{02}^2)\cos\omega_{02}\tau - \left(\omega_{02}(2\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{\alpha_2}{\omega_{02}}(\alpha_1 + \alpha_2)^2\right)\sin\omega_{02}\tau$
34	$\frac{-8\alpha_1\sqrt{3\alpha_1\alpha_2}}{3(\alpha_1 + \alpha_2)^4}$	$\alpha_2(\alpha_1 + \alpha_2)\tau + 2\alpha_2 - \alpha_1$
43	$\frac{4\alpha_2\sqrt{3\alpha_1\alpha_2}}{3(\alpha_1 + \alpha_2)^4}$	$\alpha_2(\alpha_1 + \alpha_2)^2\tau^2 + 2(\alpha_2^2 - \alpha_1^2)\tau + 2(\alpha_2 - 2\alpha_1)$
35	$\frac{2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2)^2}$	$\alpha_2((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2)(\alpha_2 + \sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{01}^2})\tau + (\alpha_2^2 - \alpha_1^2 - \omega_{01}^2)\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{01}^2} + 2\alpha_2(\alpha_2^2 + \alpha_1^2 + \omega_{01}^2)$
53	$\frac{2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{02}^2)^2}$	$\left(\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2}(\omega_{02}^2 + \alpha_2^2 - \alpha_1^2) + 2\alpha_1(\omega_{02}^2 + \alpha_2(\alpha_1 + \alpha_2))\right)\cos\omega_{02}\tau + \left(\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2}(\omega_{02}(2\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{\alpha_2}{\omega_{02}}(\alpha_1 + \alpha_2)^2) - \frac{(\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2 + \omega_{02}^2)^2}{\omega_{02}}\right)\sin\omega_{02}\tau$
36	$\frac{-4\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{01}^2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2)^2}$	$\alpha_2((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2)\tau + \alpha_2^2 - \alpha_1^2 - \omega_{01}^2$
63	$\frac{4\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{02}^2)^2}$	$(\omega_{02}^2 + \alpha_2^2 - \alpha_1^2)\cos\omega_{02}\tau + \left(\omega_{02}(2\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{\alpha_2}{\omega_{02}}(\alpha_1 + \alpha_2)^2\right)\sin\omega_{02}\tau$
37	$\frac{4\alpha_2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2)^2}$	$-\alpha_2((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2)\tau + 2(\alpha_1^2 + \alpha_1\alpha_2 + \omega_{01}^2)$
73	$\frac{4\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}{((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{02}^2)^2}$	$2\alpha_1(\omega_{02}^2 + \alpha_2(\alpha_1 + \alpha_2))\cos\omega_{02}\tau + \left(\omega_{02}\alpha_1^2 - \frac{(\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2 + \omega_{02}^2)^2}{\omega_{02}}\right)\sin\omega_{02}\tau$

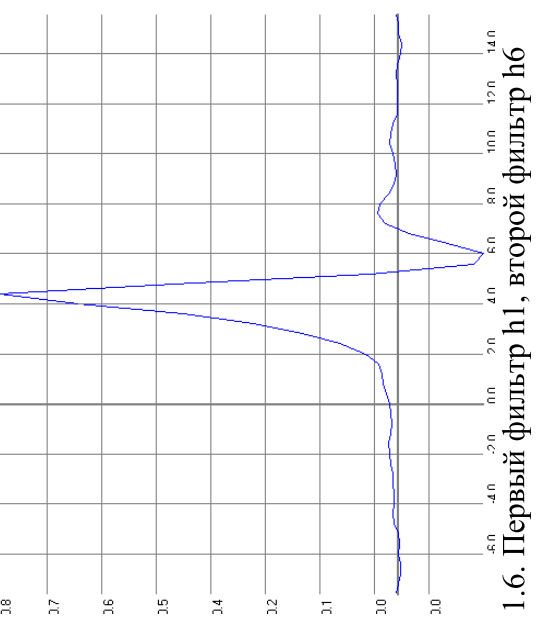
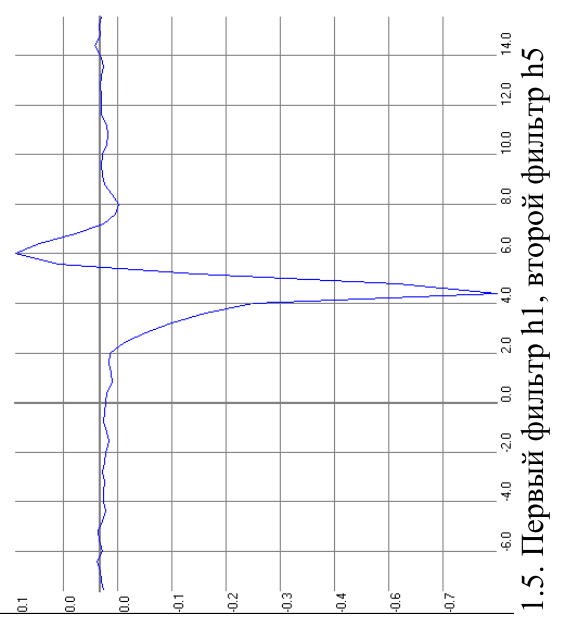
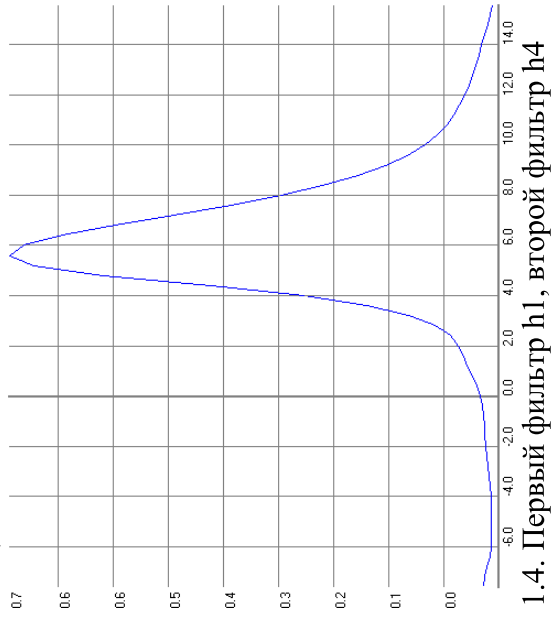
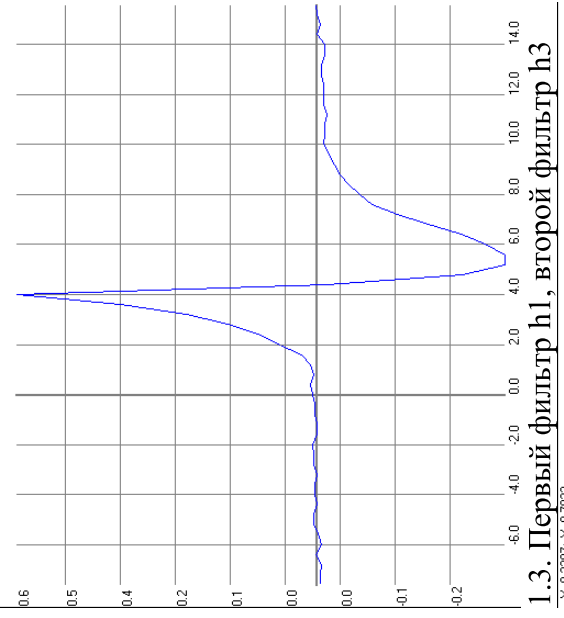
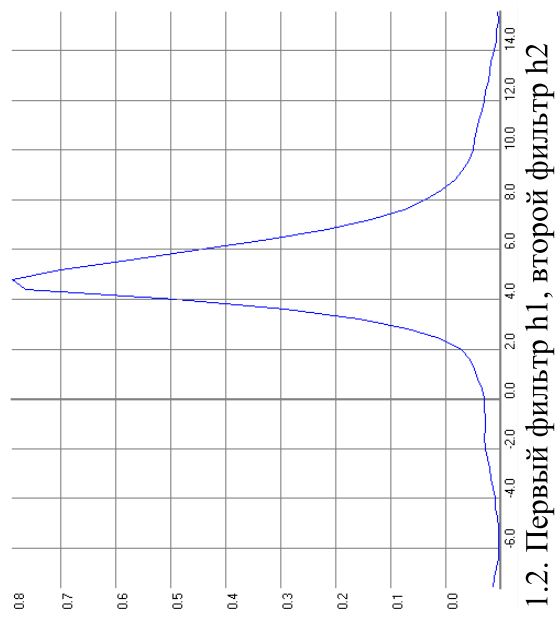
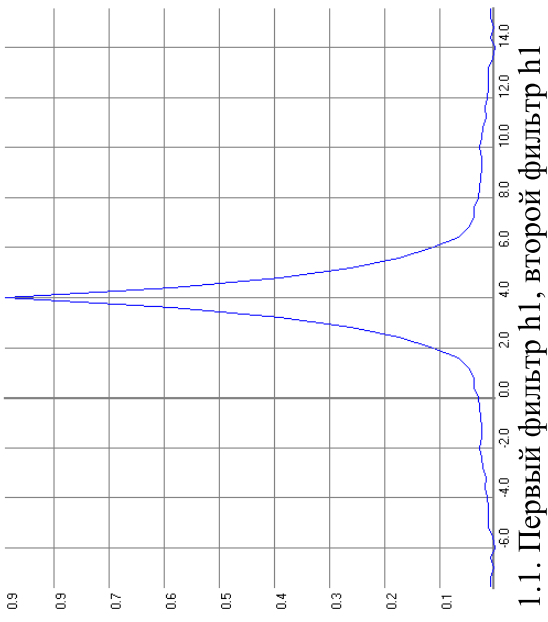
Продолжение приложения 2

45	$\frac{2\alpha_2\sqrt{6\alpha_1\alpha_2}}{3((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)^3}$	$((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)^2(\alpha_2+\sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2})\tau^2+2((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)(2(\alpha_1+\alpha_2)\sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2}-\alpha_1^2-\omega_{01}^2+\alpha_2^2)\tau+2(\sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2}(3(\alpha_1+\alpha_2)^2-\omega_{01}^2)+\alpha_2^3-\alpha_1^2+\omega_{01}^2)(2\alpha_1+3\alpha_2)$
54	$\frac{-4\alpha_1\sqrt{6\alpha_1\alpha_2}}{3((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{02}^2)^3}$	$(\sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2}(\omega_{02}^2-3(\alpha_1+\alpha_2)^2)+\omega_{02}^2(3\alpha_1+2\alpha_2)+(\alpha_1+\alpha_2)^2(2\alpha_2-\alpha_1))\cos\omega_{02}\tau+\frac{1}{\omega_{02}}((\alpha_1+\alpha_2)\sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2}(3\omega_{02}^2-(\alpha_1+\alpha_2)^2)+\alpha_1^3\alpha_2+(\alpha_2^2+\omega_{02}^2)(3\alpha_1^2+3\alpha_1\alpha_2+\alpha_2^2-\omega_{02}^2))\sin\omega_{02}\tau$
46	$\frac{4\alpha_2\sqrt{3\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2}}{3((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)^3}$	$((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)\tau^2+4(\alpha_1+\alpha_2)((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)\tau+2(3(\alpha_1+\alpha_2)^2-\omega_{01}^2)$
64	$\frac{8\alpha_1\sqrt{3\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2}}{3((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{02}^2)^3}$	$(3(\alpha_1+\alpha_2)^2-\omega_{02}^2)\cos\omega_{02}\tau+\frac{(\alpha_1+\alpha_2)}{\omega_{02}}((\alpha_1+\alpha_2)^2-3\omega_{02}^2)\sin\omega_{02}\tau$
47	$\frac{4\alpha_2\sqrt{3\alpha_1\alpha_2}}{3((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)^3}$	$\alpha_2((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)\tau^2+2((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)(\alpha_2^2-\alpha_1^2-\omega_{01}^2)\tau+2(\alpha_2^3-(\alpha_1^2+\omega_{01}^2)(2\alpha_1+3\alpha_2))$
74	$\frac{8\alpha_1\sqrt{3\alpha_1\alpha_2}}{3((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{02}^2)^3}$	$(\alpha_1^3-(\alpha_1^2+\omega_{02}^2)(3\alpha_1+2\alpha_2))\cos\omega_{02}\tau+\left(\omega_{02}^3-3\alpha_1\omega_{02}(\alpha_1+\alpha_2)-\frac{\alpha_2}{\omega_{02}}(\alpha_1+\alpha_2)^3\right)\sin\omega_{02}\tau$
56	$\frac{-2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2}}{((\alpha_1+\alpha_2)^2+(\omega_{01}+\omega_{02})^2)((\alpha_1+\alpha_2)^2+(\omega_{01}-\omega_{02})^2)}$	$2(\alpha_1+\alpha_2)\sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2}+(\alpha_1^2+\omega_{01}^2)-(\alpha_2^2+\omega_{02}^2)\cos\omega_{02}\tau+\left(\frac{\sqrt{\alpha_2^2+\omega_{02}^2}}{\omega_{02}}((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2-\omega_{02}^2)-\omega_{02}(2\alpha_1+\alpha_2)-\frac{\alpha_2}{\omega_{02}}((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)\right)\sin\omega_{02}\tau$
65	$\frac{-2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2}}{((\alpha_1+\alpha_2)^2+(\omega_{01}+\omega_{02})^2)((\alpha_1+\alpha_2)^2+(\omega_{01}-\omega_{02})^2)}$	$2(\alpha_1+\alpha_2)\sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2}-(\alpha_1^2+\omega_{01}^2)+(\alpha_2^2+\omega_{02}^2)\cos\omega_{02}\tau+\left(\frac{\sqrt{\alpha_1^2+\omega_{01}^2}}{\omega_{02}}((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2-\omega_{02}^2)+\omega_{02}(2\alpha_1+\alpha_2)+\frac{\alpha_2}{\omega_{02}}((\alpha_1+\alpha_2)^2+\omega_{01}^2)\right)\sin\omega_{02}\tau$

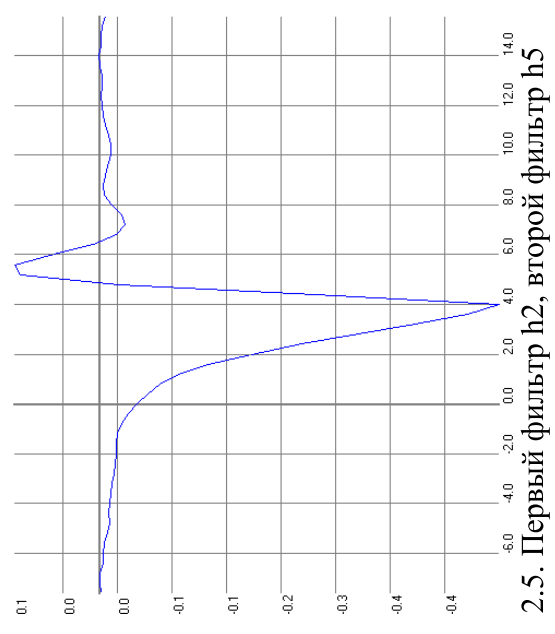
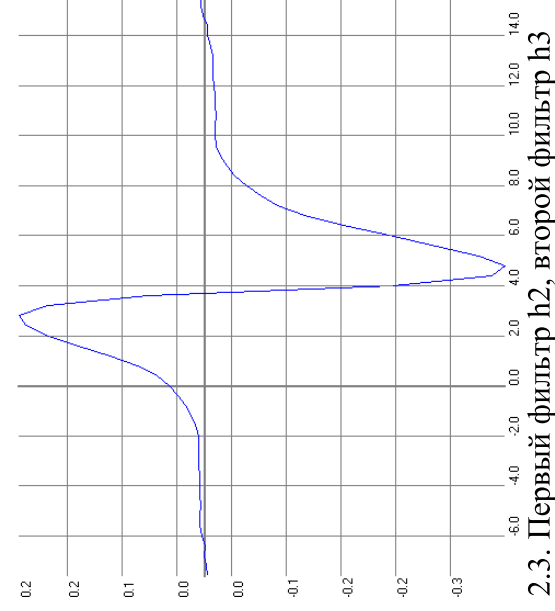
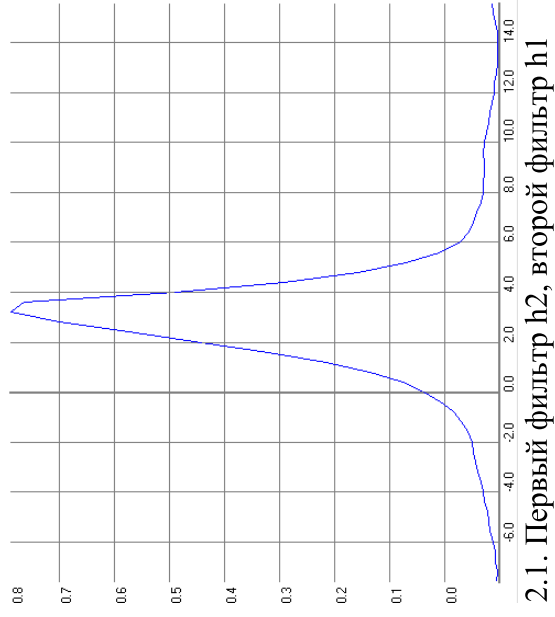
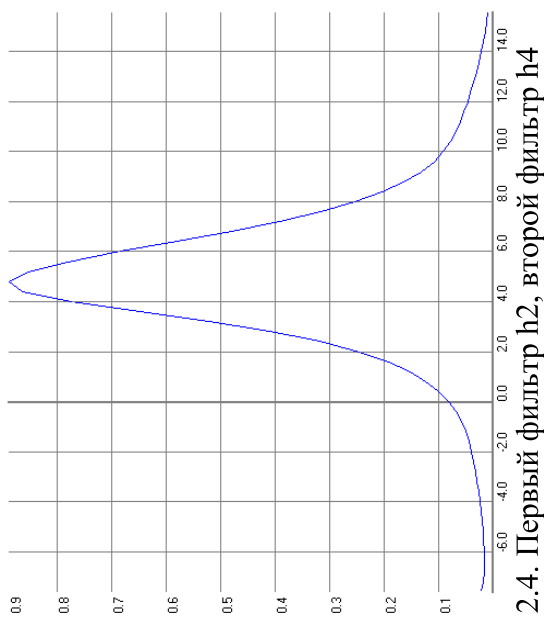
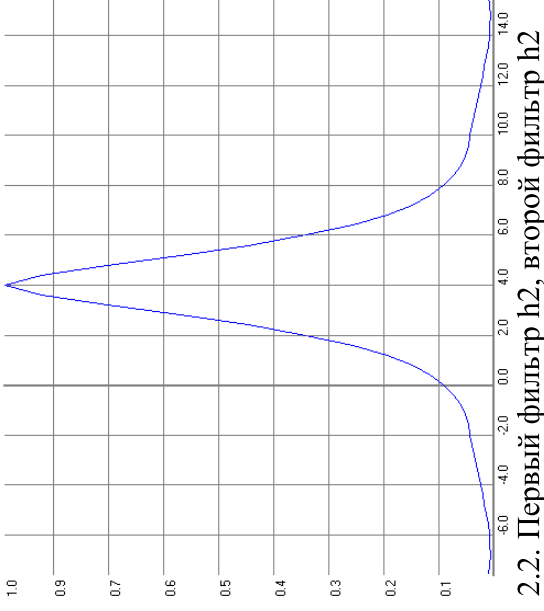
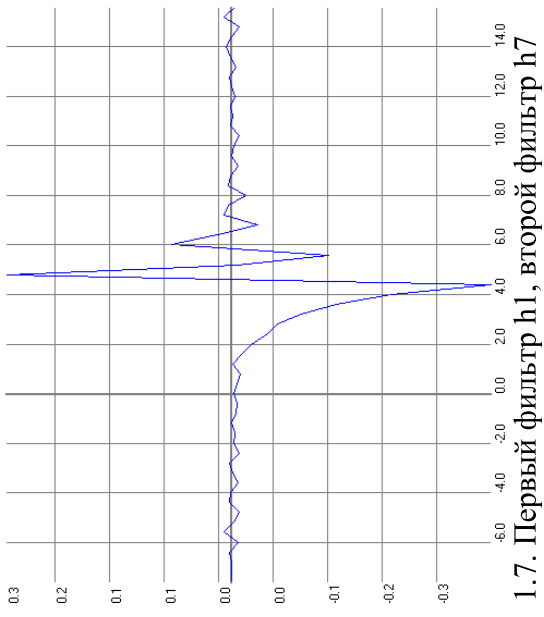
Продолжение приложения 2

57	$\frac{2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{01} + \omega_{02})^2\right)\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{01} - \omega_{02})^2\right)}$	$\left(\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{01}^2} \left((\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) - (\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) \right) + 2\alpha_2 (\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) + 2\alpha_1 (\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) \right) \cos \omega_{02} \tau +$ $\left(- \frac{\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{01}^2}}{\omega_{02}} (\alpha_2 (\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2 - \omega_{02}^2) + 2\alpha_1 \omega_{02}^2 \right) +$ $\omega_{02} (\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) - \frac{1}{\omega_{02}} (\alpha_2^2 \omega_{01}^2 - (\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2^2 + \omega_{02}^2)^2) \right) \sin \omega_{02} \tau$
75	$\frac{2\sqrt{2\alpha_1\alpha_2}}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{01} + \omega_{02})^2\right)\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{01} - \omega_{02})^2\right)}$	$\left(\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2} \left((\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) - (\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) \right) + 2\alpha_2 (\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) + 2\alpha_1 (\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) \right) \cos \omega_{02} \tau +$ $\left(\frac{\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2}}{\omega_{02}} (\alpha_2 (\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2 + \omega_{02}^2) + 2\alpha_1 \omega_{02}^2 \right) +$ $\omega_{02} (\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) - \frac{1}{\omega_{02}} (\alpha_2^2 \omega_{01}^2 - (\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2^2 + \omega_{02}^2)^2) \right) \sin \omega_{02} \tau$
67	$\frac{4\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_2^2 + \omega_{02}^2}}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{01} + \omega_{02})^2\right)\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{01} - \omega_{02})^2\right)}$	$\left((\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) - (\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) \right) \cos \omega_{02} \tau + \left(\omega_{02} (2\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{\alpha_2}{\omega_{02}} \left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2 \right) \right) \sin \omega_{02} \tau$
76	$\frac{-4\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\sqrt{\alpha_1^2 + \omega_{01}^2}}{\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{01} + \omega_{02})^2\right)\left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_{01} - \omega_{02})^2\right)}$	$\left((\alpha_2^2 + \omega_{02}^2) - (\alpha_1^2 + \omega_{01}^2) \right) \cos \omega_{02} \tau + \left(\omega_{02} (2\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{\alpha_2}{\omega_{02}} \left((\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \omega_{01}^2 \right) \right) \sin \omega_{02} \tau$

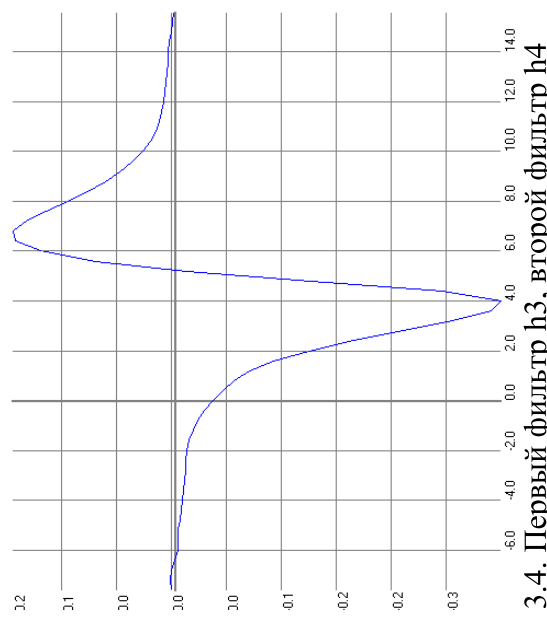
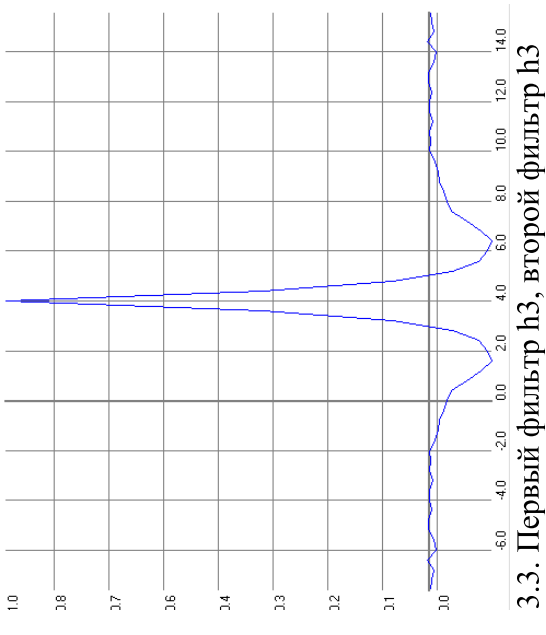
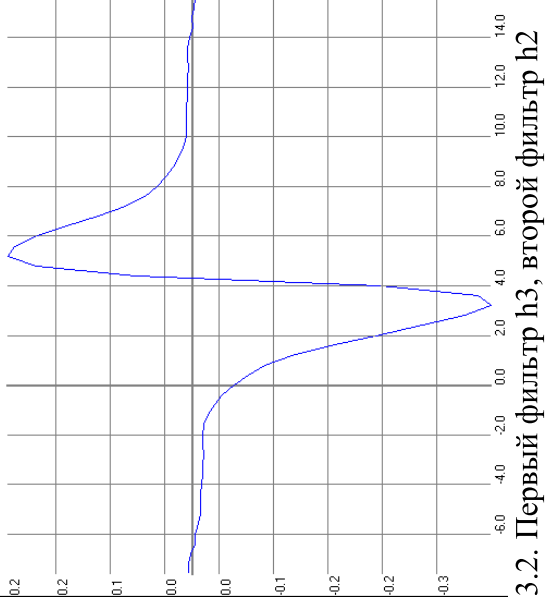
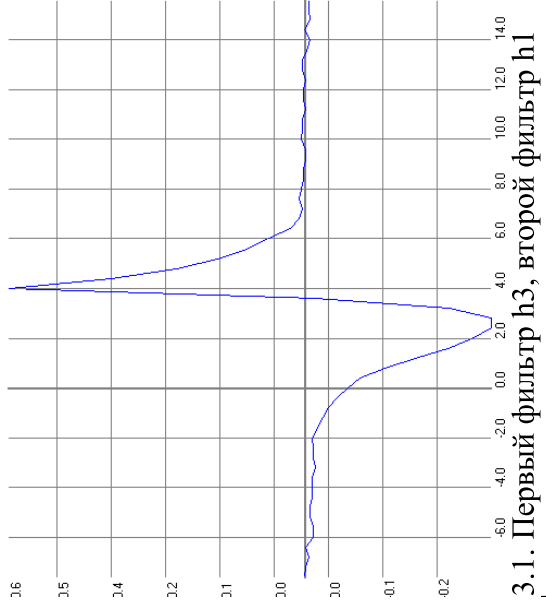
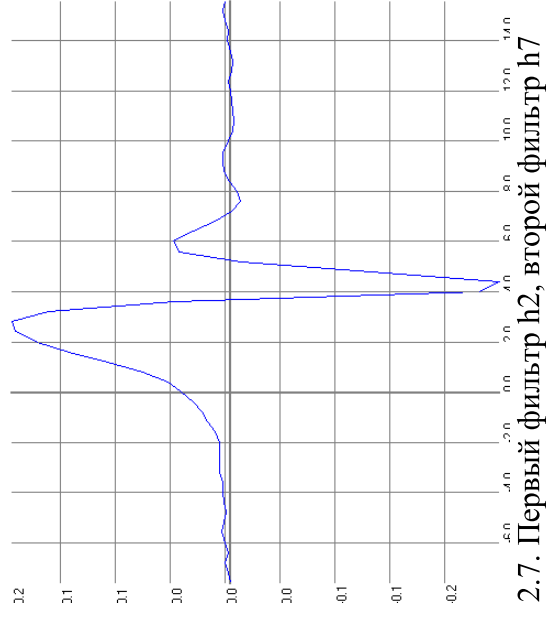
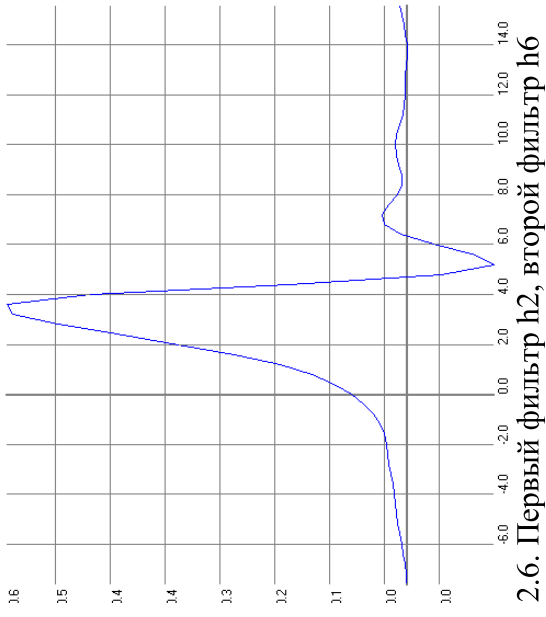
Графики взаимных корреляционных функций



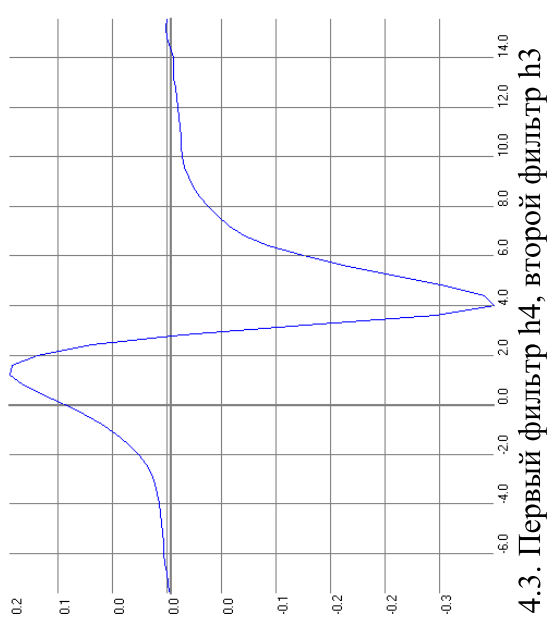
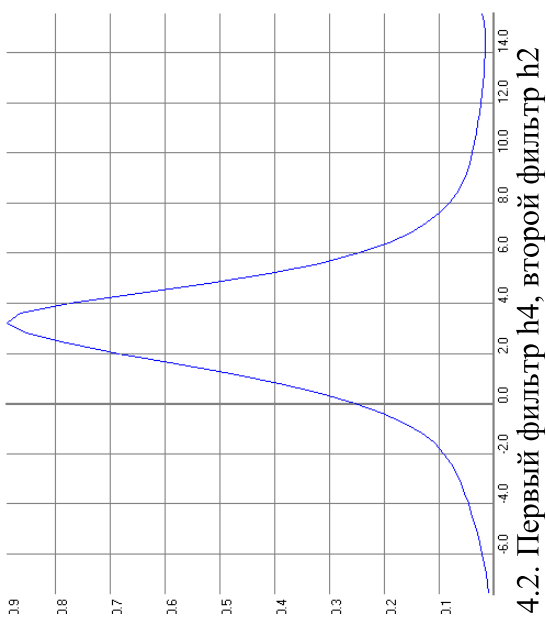
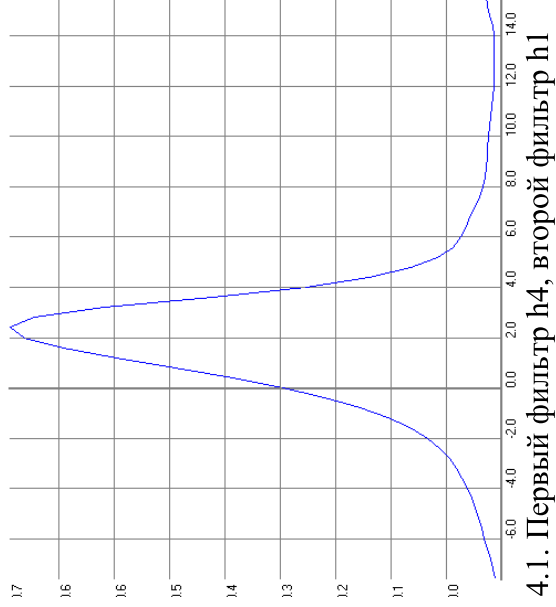
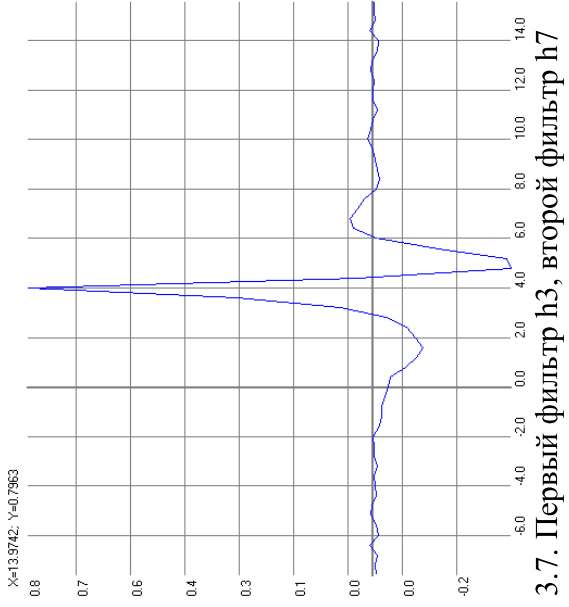
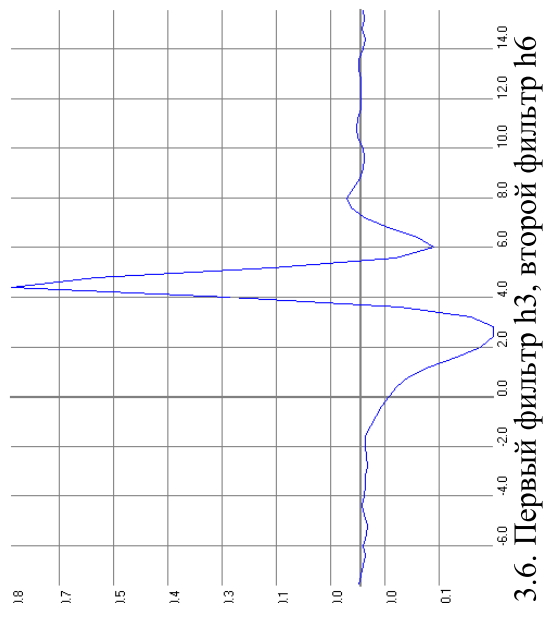
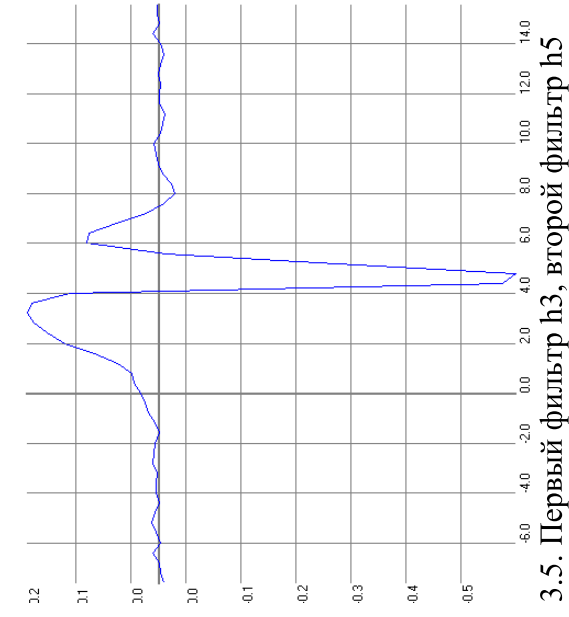
Продолжение приложения 3



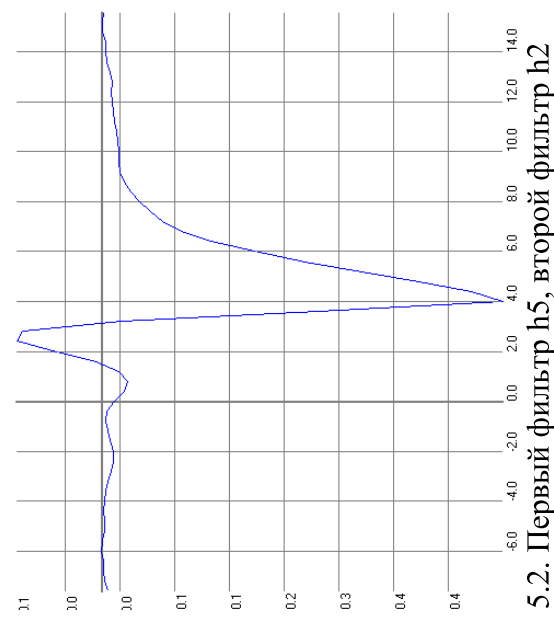
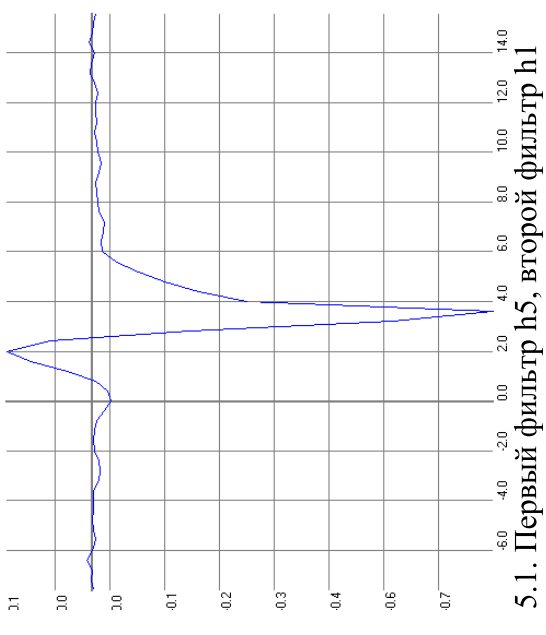
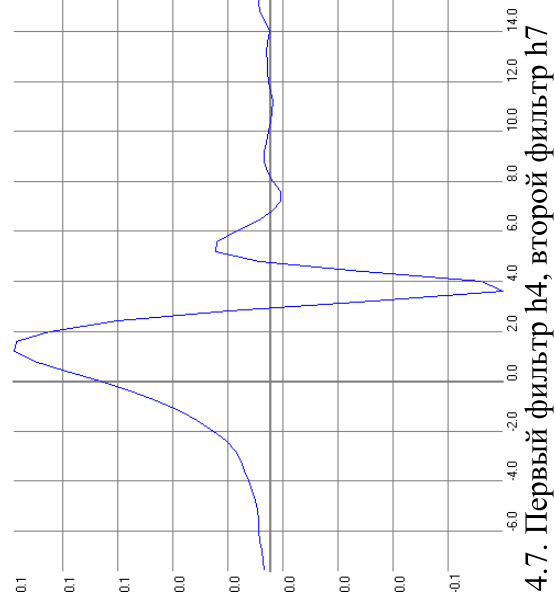
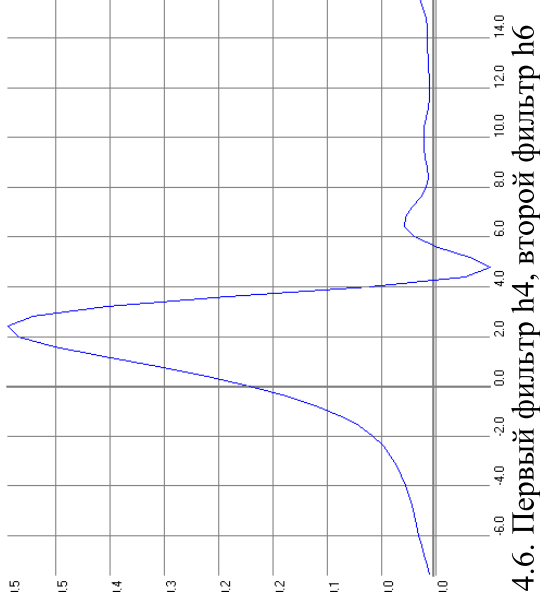
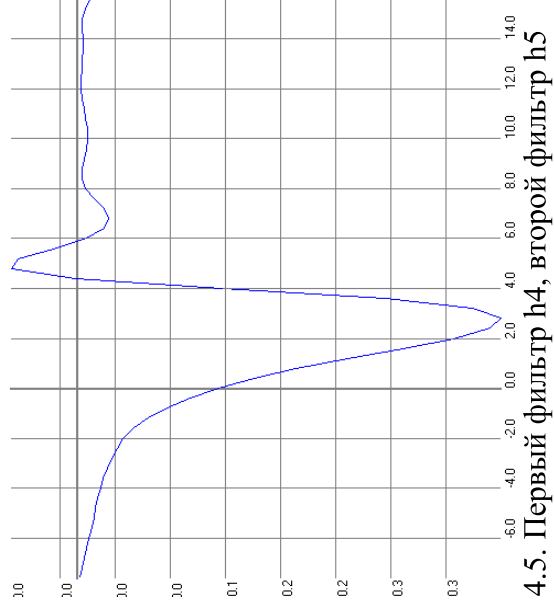
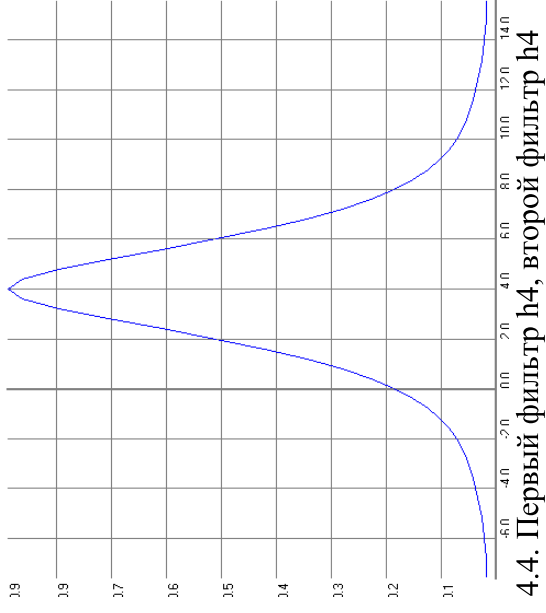
Продолжение приложения 3



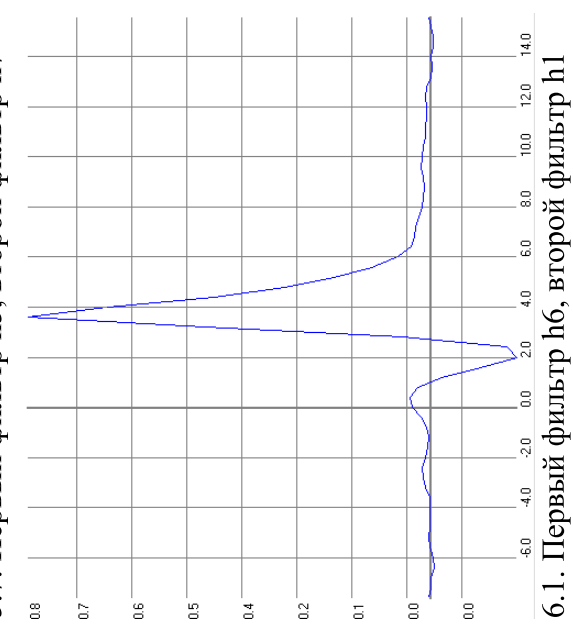
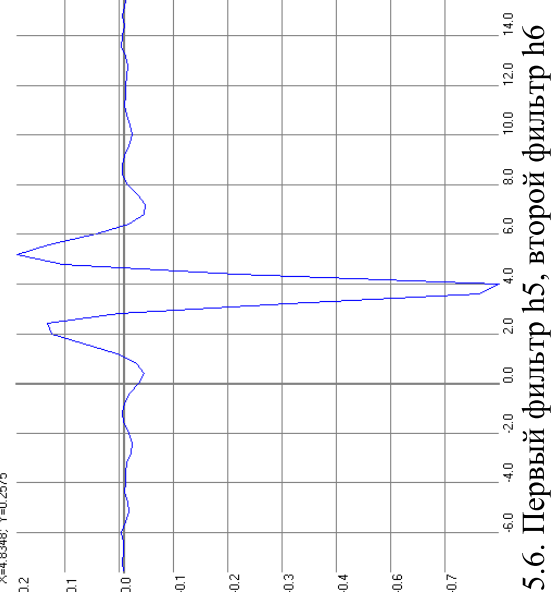
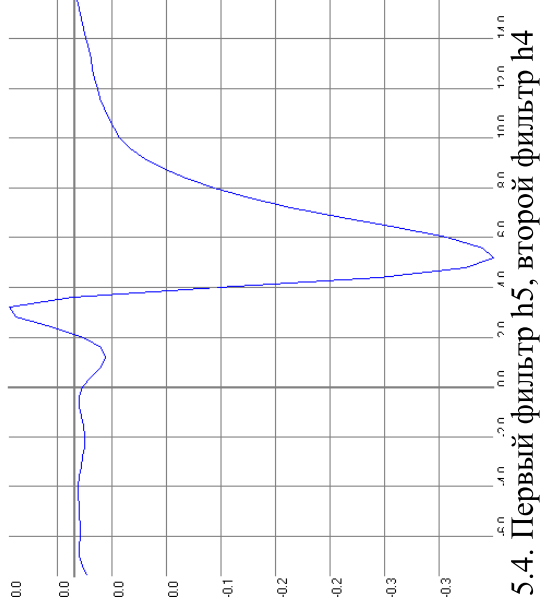
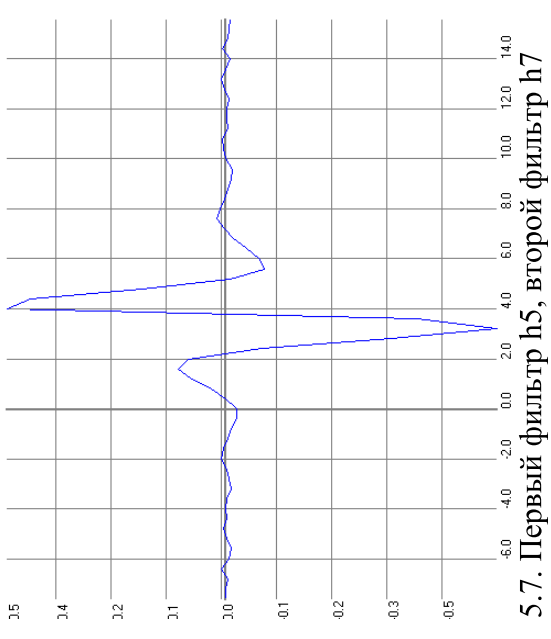
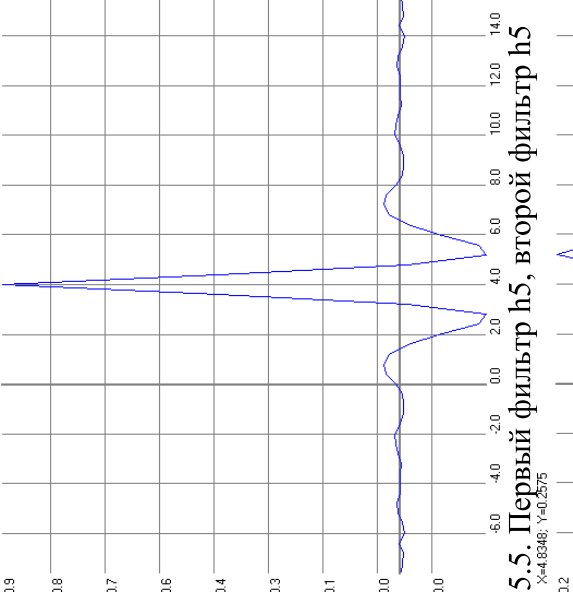
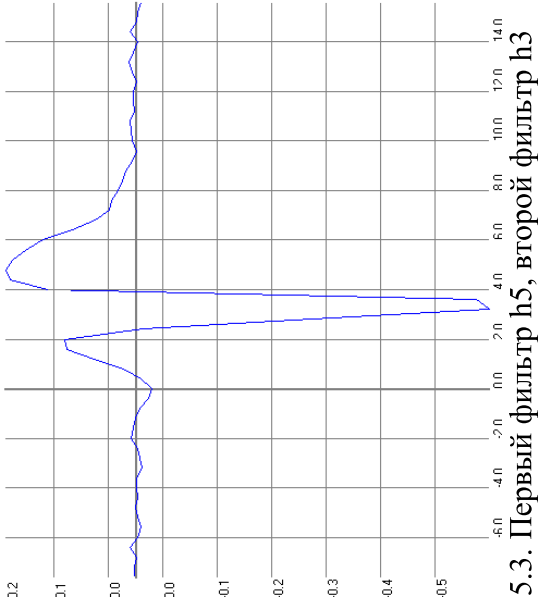
Продолжение приложения 3



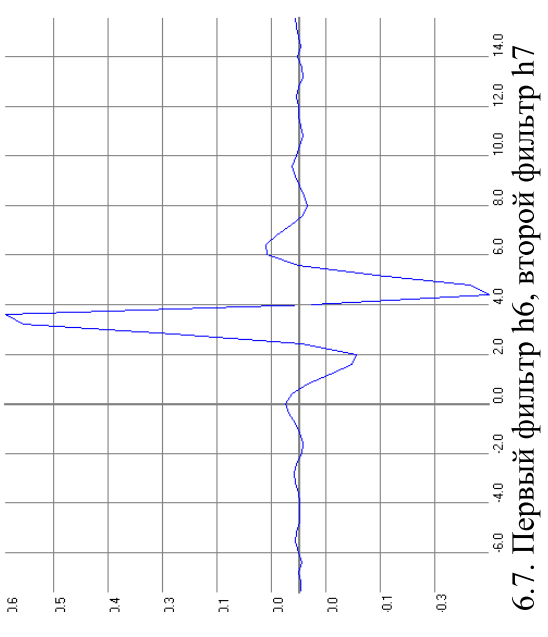
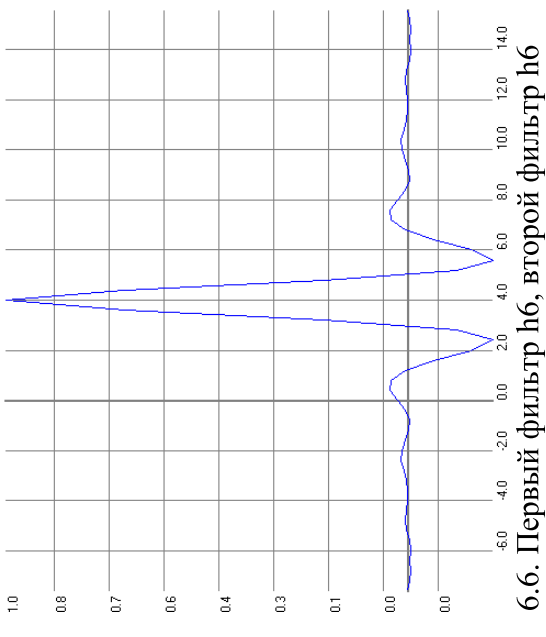
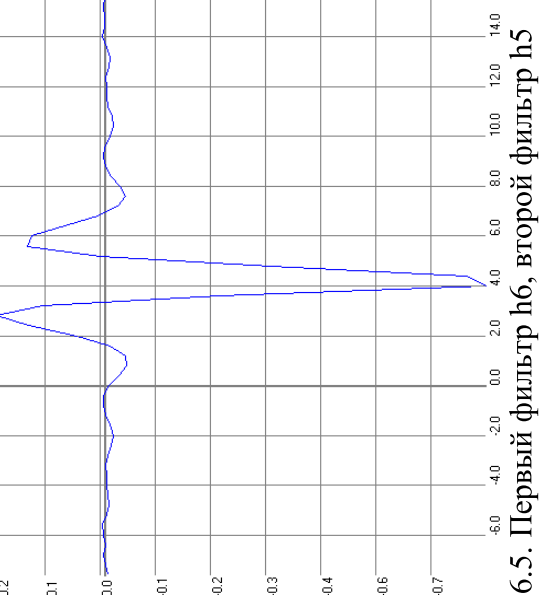
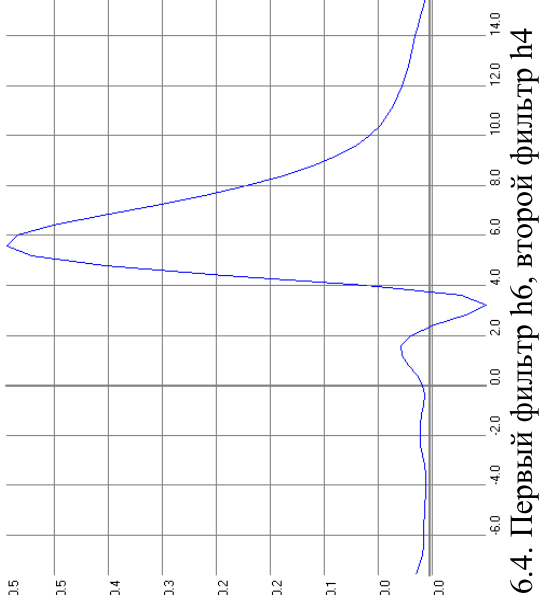
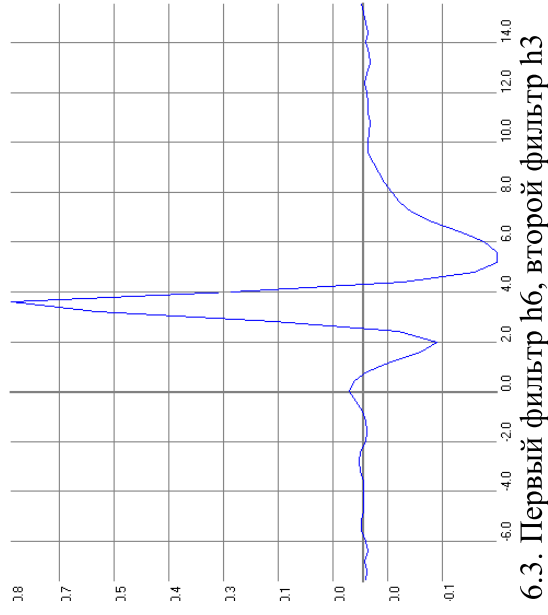
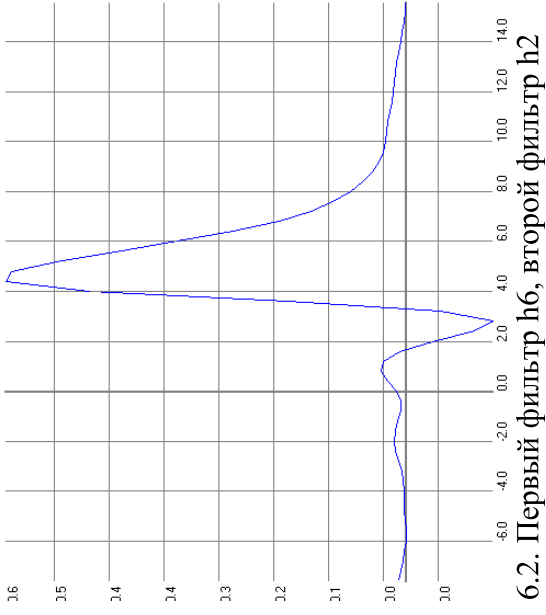
Продолжение приложения 3



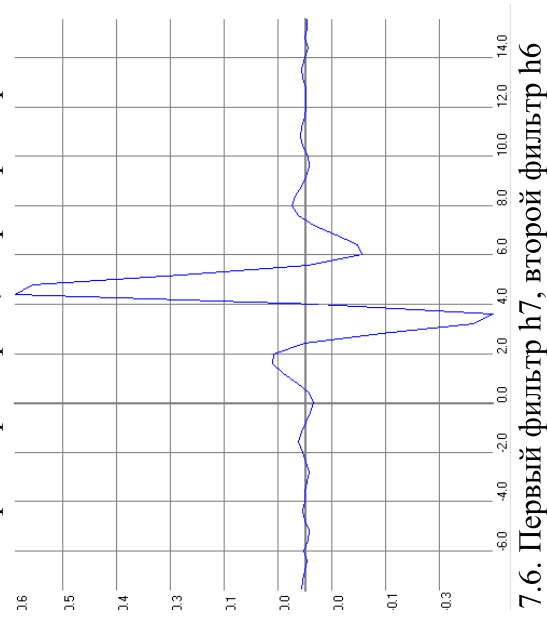
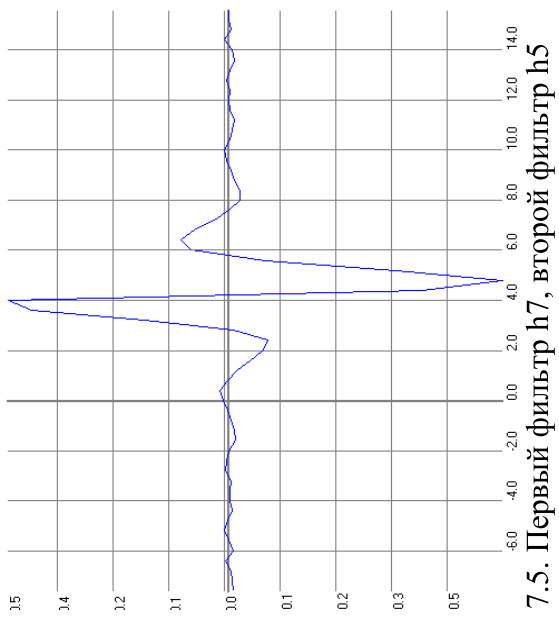
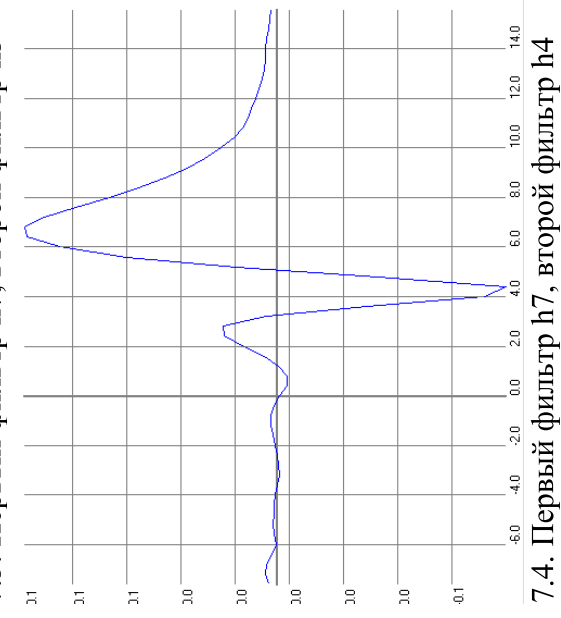
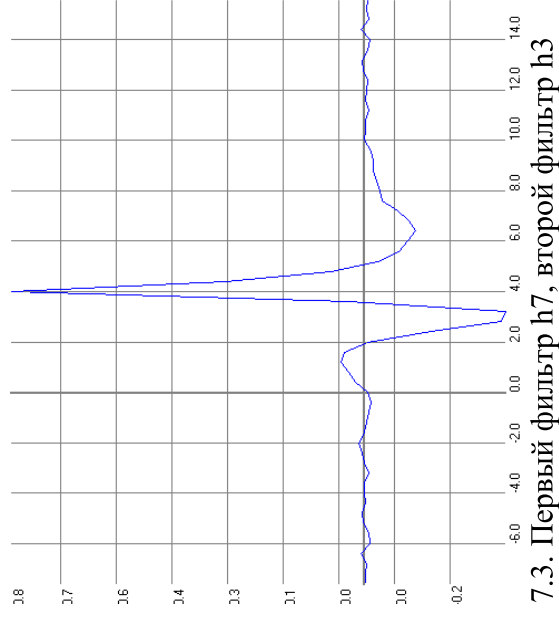
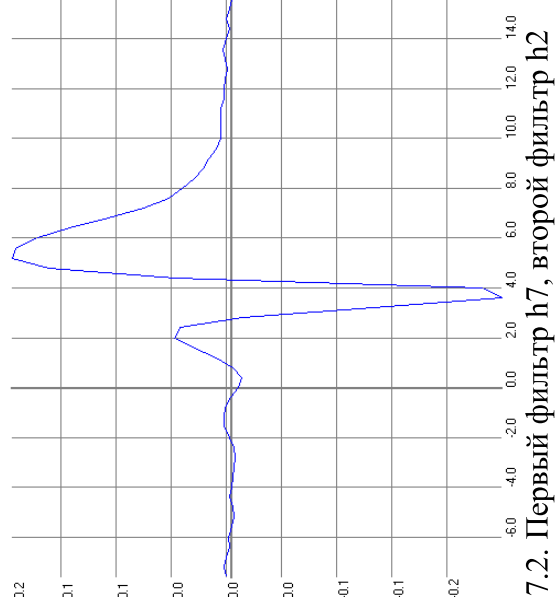
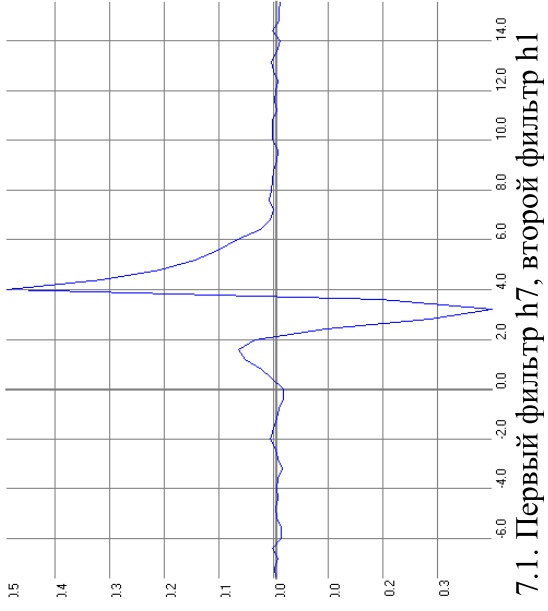
Продолжение приложения 3

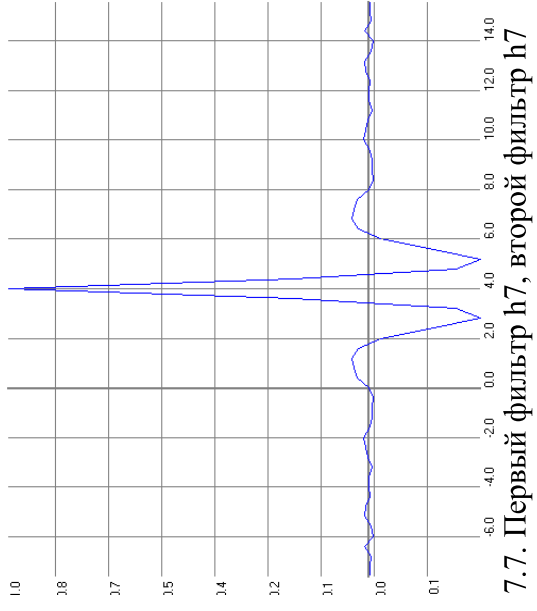


Продолжение приложения 3



Продолжение приложения 3





Параметрические модели корреляционных функций

На рис. П.4.1 графики соответствуют (сверху вниз): $\rho_{x4}(\tau)$ (ряд 1), $\rho_{x2}(\tau)$ (ряд 2), $\rho_{x1}(\tau)$ (ряд 3), $\rho_{x3}(\tau)$ (ряд 4).

На рис. П.4.2 и далее верхняя кривая соответствует модели $\rho_{6x}(\tau) = e^{-\lambda|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right)$, средняя - $\rho_{5x}(\tau) = e^{-\lambda|\tau|} \cos \omega_0 \tau$, нижняя - $\rho_{7x}(\tau) = e^{-\lambda|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right)$.

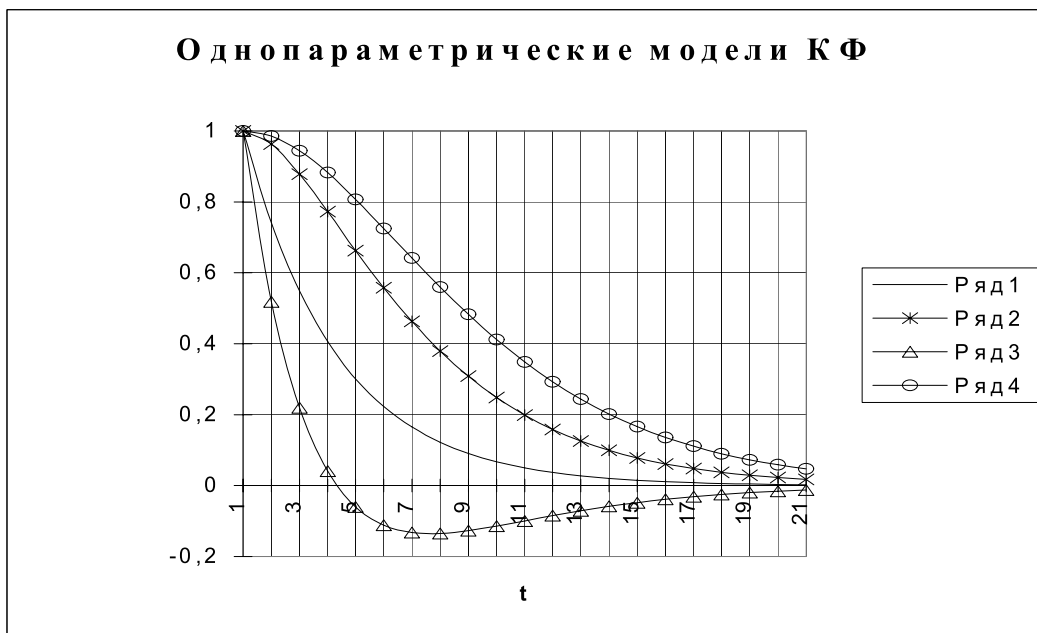


Рисунок П.4.1

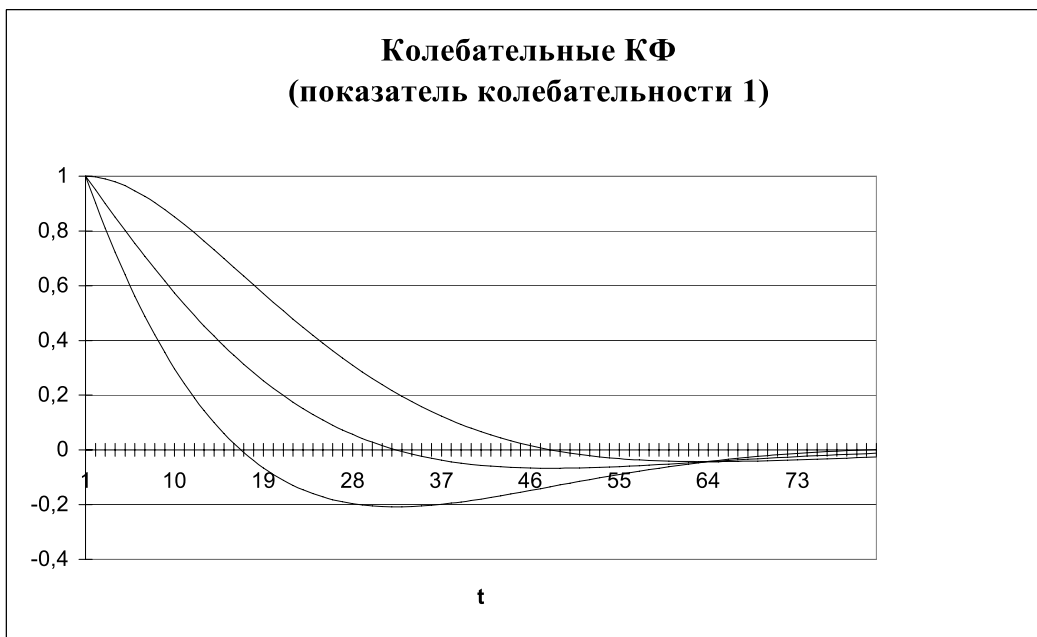


Рисунок П.4.2

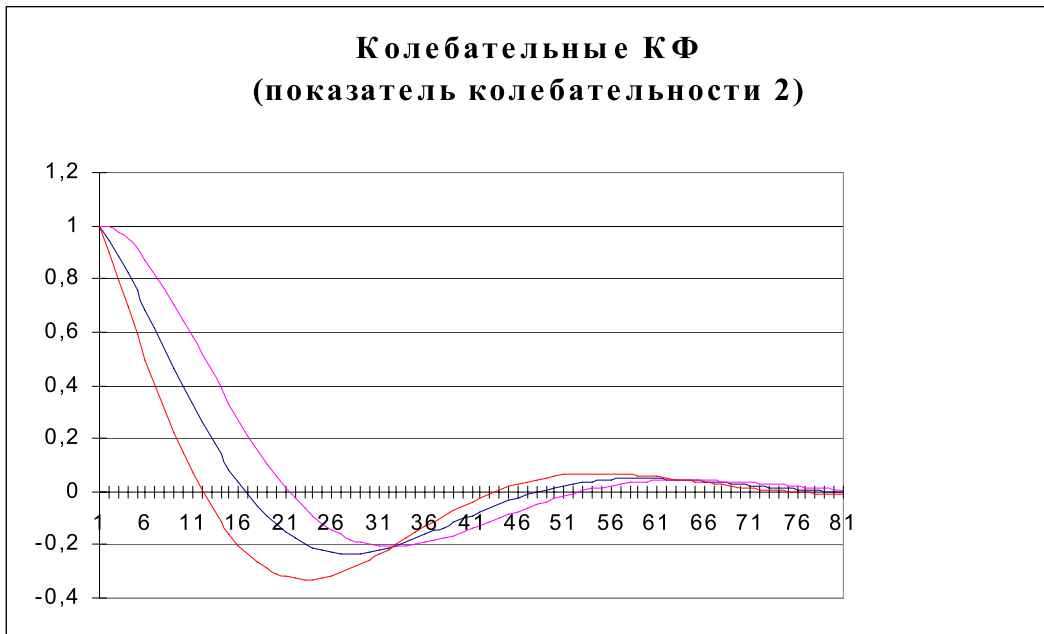


Рисунок П.4.3

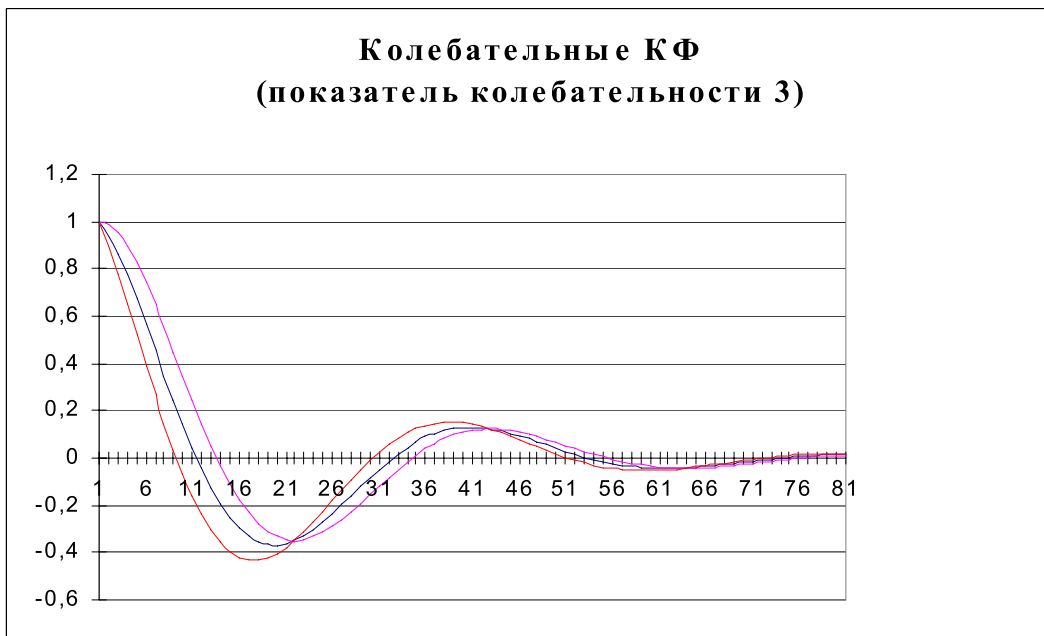


Рисунок П.4.4

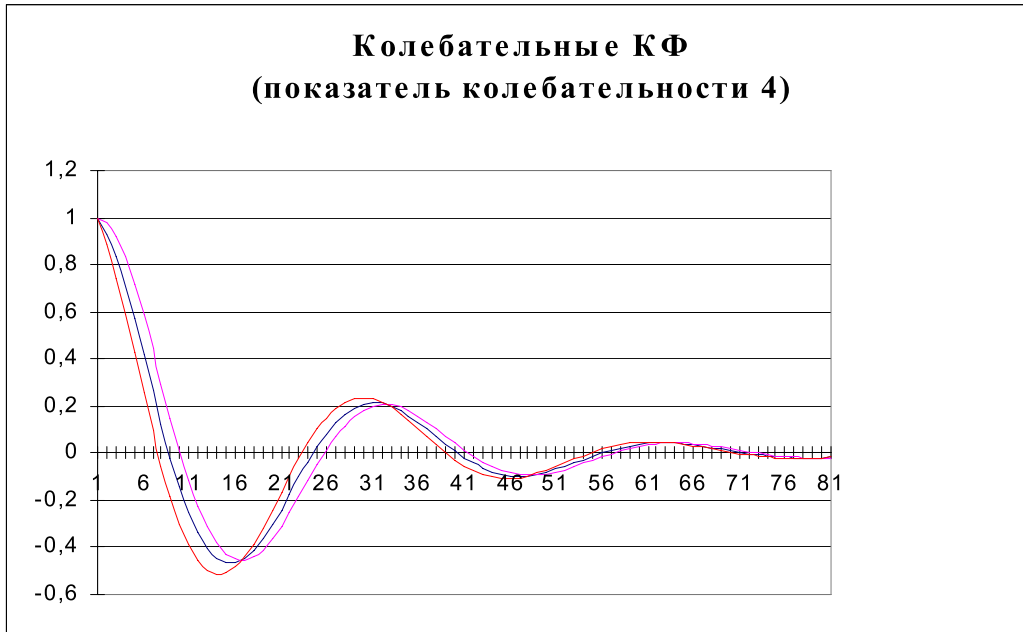


Рисунок П.4.5

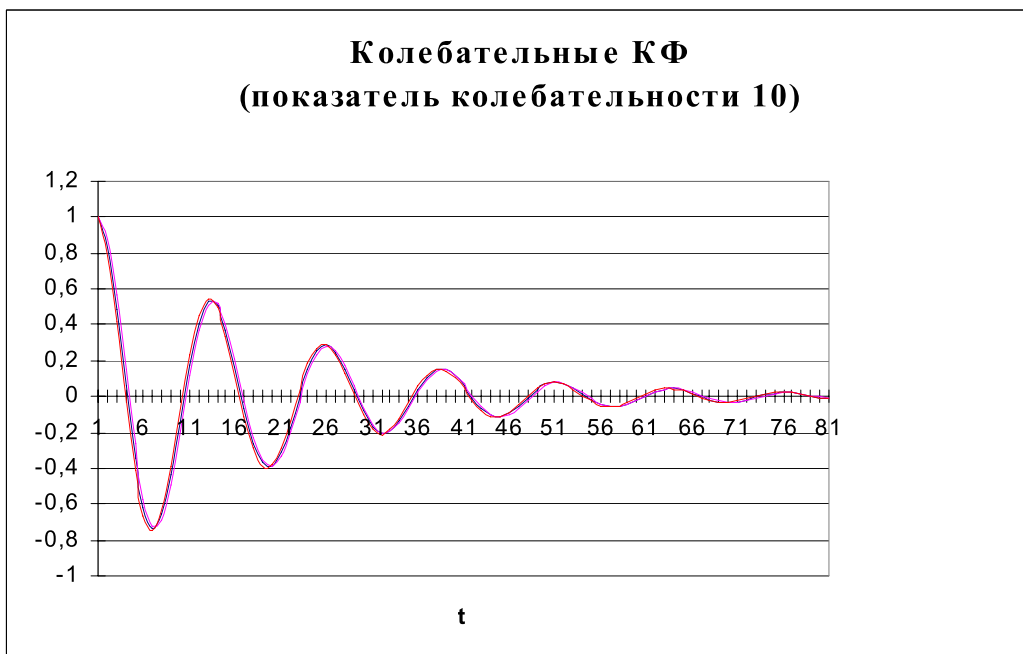


Рисунок П.4.6

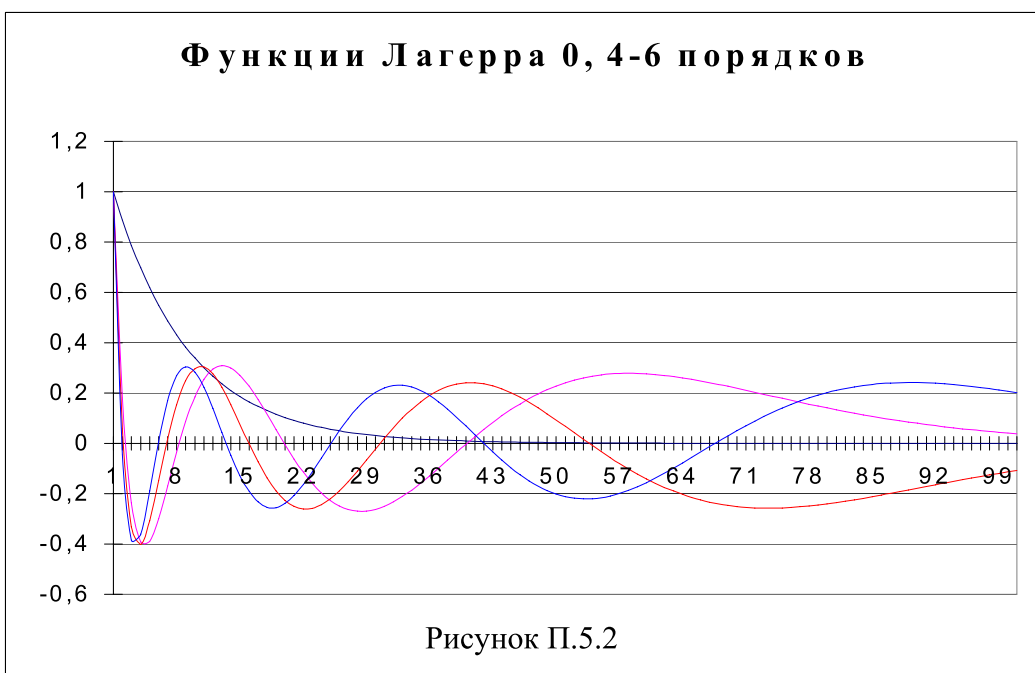
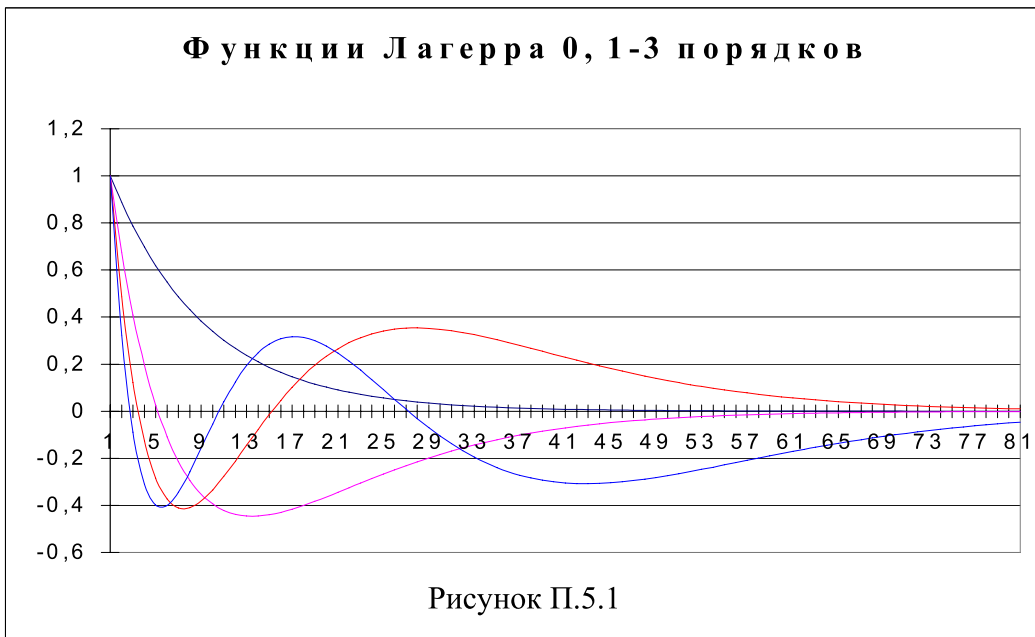
Ортогональные функции Лагерра

Ортогональные функции Лагерра, определяемые выражением

$$L_k(\tau) = \sum_{s=0}^k \frac{k!}{(k-s)!} \frac{(-\alpha\tau)^s}{(s!)^2} e^{-\alpha\tau/2},$$

удовлетворяют следующему свойству: $\int_0^{\infty} L_k(\tau) L_n(\tau) d\tau = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq n; \\ \frac{1}{\alpha}, & \text{при } k = n. \end{cases}$

Вид первых 6 ортогональных функций Лагерра приведен ниже.



Обобщенные спектральные характеристики

№	$K_x(\tau)$	ω_0	$S_x(\omega_0)$
1	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|}$	0	$\frac{\sigma_x^2}{\pi\alpha}$
2	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 + \alpha|\tau|)$	0	$\frac{2\sigma_x^2}{\pi\alpha}$
3	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (1 - \alpha|\tau|)$	α	$\frac{\sigma_x^2}{2\pi\alpha}$
4	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( 1 + \alpha|\tau| + \frac{\alpha^2 \tau^2}{3} \right)$	0	$\frac{8\sigma_x^2}{3\pi\alpha}$
5	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau$	$\sqrt{2\omega_0 \sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} - (\omega_0^2 + \alpha^2)}$	$\frac{\sigma_x^2 \alpha}{\pi} \left\{ \frac{\alpha^2 + \omega_0^2 + \omega_0^2}{\left[\alpha^2 + (\omega_0 - \omega_0)^2 \right]^2} \left[\alpha^2 + (\omega_0 + \omega_0)^2 \right] \right\}$
6	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$	$\frac{2\sigma_x^2 \alpha}{\pi} \frac{\alpha^2 + \omega_0^2}{\left[\alpha^2 + \left(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} - \omega_0 \right)^2 \right] \left[\alpha^2 + \left(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} + \omega_0 \right)^2 \right]}$
7	$\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau \right)$	$\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2}$	$\frac{2\sigma_x^2 \alpha}{\pi} \frac{\alpha^2 + \omega_0^2}{\left[\alpha^2 + \left(\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} - \omega_0 \right)^2 \right] \left[\alpha^2 + \left(\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} + \omega_0 \right)^2 \right]}$

Продолжение приложения 6

№	$\Delta\omega'_3 = \frac{\sigma_x^2}{2S_x(\omega_3)}$	$\Delta\omega'_3 = \omega_3 + \frac{\Delta\omega'_3}{2}$
1	$\frac{\pi\alpha}{2}$	$\frac{\pi\alpha}{2}$
2	$\frac{\pi\alpha}{4}$	$\frac{\pi\alpha}{4}$
3	$\pi\alpha$	$\frac{\alpha(2+\pi)}{2}$
4	$\frac{3\pi\alpha}{16}$	$\frac{3\pi\alpha}{16}$
5	$\frac{\pi[\alpha^2 + (\omega_3 - \omega_0)^2][\alpha^2 + (\omega_3 + \omega_0)^2]}{2\alpha(\alpha^2 + \omega_3^2 + \omega_0^2)}$	$\omega_3 + \frac{\pi[\alpha^2 + (\omega_3 - \omega_0)^2][\alpha^2 + (\omega_3 + \omega_0)^2]}{4\alpha(\alpha^2 + \omega_3^2 + \omega_0^2)}$
6	$\frac{\pi[\alpha^2 + (\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} - \omega_0)^2][\alpha^2 + (\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} + \omega_0)^2]}{4\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}$	$+\frac{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} + \pi[\alpha^2 + (\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} - \omega_0)^2][\alpha^2 + (\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} + \omega_0)^2]}{8\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}$
7	$\frac{\pi[\alpha^2 + (\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} - \omega_0)^2][\alpha^2 + (\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} + \omega_0)^2]}{4\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}$	$+\frac{\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} + \pi[\alpha^2 + (\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} - \omega_0)^2][\alpha^2 + (\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} + \omega_0)^2]}{8\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}$

**Форматы файлов настройки
подсистемы ввода/вывода аналоговых сигналов**

Название параметра	Размер поля, бит	Значение по умолчанию
Идентификатор файла настройки	32	0x0800
Режимы работы устройства	8	0
Номер базового адреса АЦП	8	0
Номер прерывания	8	0
Номер бита приема информации	8	0
Максимальное количество отсчетов АЦП	32	10000
Задержка на переключение каналов, мкс	32	50
Задержка на преобразование сигнала в АЦП, мкс	32	50
Задержка на преобразование сигнала в ЦАП, мкс	32	50
Номер базового адреса ЦАП	8	0
Номер бита передачи информации	8	0
Количество измерений медианой отбраковки	8	1
Количество элементов усреднения медианой отбраковки	8	1
Номер градуировочного канала	8	2
Количество символов в строке «Имя драйвера»	16	12
Строка «Имя драйвера»	–	«NVL08drv.VxD»
Количество символов в строке «Имя файла градуировочной таблицы АЦП»	16	0
Строка «Имя файла градуировочной таблицы АЦП»	–	NULL
Количество символов в строке «Имя файла градуировочной таблицы ЦАП»	16	0
Строка «Имя файла градуировочной таблицы ЦАП»	–	NULL

Замечание:

При загрузке системы используется файл настроек с именем «NVL08.set». Если файла с таким именем нет в текущем каталоге, система выдает предупреждение и использует значения по умолчанию.

Формат файла градуировочной характеристики АЦП

Название параметра	Размер поля, бит
Идентификатор файла (значение поля – 0x0801)	32
Значение напряжения 1-ой точки градуировочной зависимости	32
Код АЦП 1-ой точки градуировочной зависимости	16
...	...
Значение напряжения N-ой точки градуировочной зависимости	32
Код АЦП N-ой точки градуировочной зависимости	16

Замечание:

Файл, содержащий градуировочную таблицу АЦП, должен иметь расширение *.ADC. Идентификатор файла должен содержать значение - 0x0801.

Формат файла градуировочной характеристики ЦАП

Название параметра	Размер поля, бит
Идентификатор файла (значение поля – 0x0802)	32
Код ЦАП 1-ой точки градуировочной зависимости	16
Значение напряжения 1-ой точки градуировочной зависимости	32
...	...
Код ЦАП N-ой точки градуировочной зависимости	16
Значение напряжения N-ой точки градуировочной зависимости	32

Замечание:

Файл, содержащий градуировочную таблицу ЦАП, должен иметь расширение *.DAC. Идентификатор файла должен содержать значение - 0x0802.

Формат вводимых и выводимых файлов

Процесс с регулярной дискретизацией *rd	Процесс с нерегулярной дискретизацией *nrd	ВКФ с регулярной дискретизацией *txt	Спектральная плотность мощности (парам. модели) *txt	Спектральная плотность мощности (Лагерра) *txt	Параметры ортогональных функций Лагерра *txt
M	M_j	$J_{\max, \Pi}$	$\Delta\omega$	$\Delta\omega$	α_{Π}
Δt	$x(1)$	$J_{\max, \Lambda}$	ω_3	ω_3	$\beta_{0, \Pi}$
$x(1)$	...	$\Delta\tau$	$S_x(\omega_3)$	$S_x(\omega_3)$	...
...	...	$\rho_{x, \Pi}(1)$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_3$	$\beta_{m1, \Pi}$
...	$x(M_j)$	...	$S_x(1)$	$S_x(1)$	α_{Λ}
...	$t(1)$	$\rho_{x, \Pi}(J_{\max, \Pi})$	$S_x(2)$	$S_x(2)$	$\beta_{0, \Lambda}$
...	...	$\rho_{x, \Lambda}(1)$	...	...
...
...	...	...	...	...	$\beta_{m2, \Lambda}$
...	...	...	...	...	τ_m
...	...	...	...	...	$\rho_{x \text{уmax}}$
...	...	...	...	...	m
...	...	...	...	...	$\tau_k^{(2)}$
$x(M)$	$t(M_j)$	$\rho_{x, \Lambda}(J_{\max, \Lambda})$	$S_x(N)$	$S_x(N)$	$\tau_k^{(4)}$

**С.А. Прохоров, А.В. Иващенко, А.В. Графкин;
Под ред. С.А. Прохорова**

Автоматизированная система
корреляционно-спектрального анализа
случайных процессов

Компьютерный набор и верстка:
С.А. Прохоров, А.В. Иващенко, А.В. Графкин
Лицензия ЛР № 040910 от 10.08.98.

Подписано в печать 6.01.2003 г.
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 28.
Тираж 500 экз. Заказ № 5.

Отпечатано в типографии ТОО «ЭКСПО»
417000, г. Уральск, пр. Ленина, 244/1.