

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

А. Д. ПОЗДНЯКОВ

ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО
И АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО
СИГНАЛА

Практикум



Владимир 2021

УДК 621.396
ББК 32.884
П47

Рецензенты:

Доктор технических наук
профессор кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. П. Крылов

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой радиотехники и радиосистем
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
О. Р. Никитин

Кандидат технических наук
руководитель проектной группы АО «КОБРА»
С. И. Кучин

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Поздняков, А. Д.
П47 Интерполяционные алгоритмы определения параметров непрерывного и амплитудно-модулированного сигнала : практикум / А. Д. Поздняков ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 92 с. – ISBN 978-5-9984-1272-1.

Рассмотрены алгоритмы и программы компьютерного моделирования методов восстановления и оценки параметров радиосигналов по ограниченному массиву дискретных отсчетов, позволяющие определить области их рационального использования и оценить влияние на точность определения параметров различных факторов, таких как разрядность АЦП, уровень шумов, объем выборки, вид накладываемого окна, нелинейные искажения сигнала и др.

Предназначен для подготовки магистрантов в области проектирования внешних и встроенных систем самоконтроля, диагностики и мониторинга, а также компьютерных измерительных и испытательных систем различного назначения. Рекомендуется для магистрантов всех форм обучения по направлениям 11.04.01 – Радиотехника и 11.03.02 – Информационные технологии и системы связи. Может быть полезен для специалистов в области проектирования компьютерных контрольно-измерительных и испытательных систем различного назначения.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 13. Ил. 42. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.396
ББК 32.884

ISBN 978-5-9984-1272-1

© ВлГУ, 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Определение параметров гармонического сигнала является одним из самых распространенных видов измерений в радиотехнике, технике связи и электронике. Оперативная оценка частоты, сдвига фазы и среднеквадратического значения короткого квазипериодического сигнала необходима при испытаниях радиоэлектронной аппаратуры, в цифровой осциллографии, в системах радиолокации, телеметрии и навигации. Для оценки параметров радиосигнала по нескольким его периодам современные РЭА комплектуются встроенными вычислительными и аппаратно-программными средствами цифровой обработки сигналов мониторинга, самоконтроля и самодиагностики.

Высокие темпы развития вычислительных технологий привели к созданию виртуальных приборов, которые можно с успехом применять во встроенных системах контроля, а также в средствах мониторинга РЭА. Использование процедур комплексной цифровой обработки данных в ВП позволяет решать задачи встроенного контроля на программно-алгоритмическом уровне с использованием встроенного вычислителя, обеспечивающего заданные требования по точности, быстродействию и аппаратному составу ВСК.

Программные средства должны обеспечить решение задач:

- обработки массива дискретных значений в соответствии с доступными алгоритмами и принятыми моделями;
- восстановления оцифрованных сигналов с минимальными искажениями в промежуточных между отсчетами точках;
- комплексной оценки параметров сигналов, в том числе частоты и СКЗ при анализе гармонических немодулированных сигналов; коэф-

фициента (глубины) модуляции, частоты несущего и модулирующего сигналов при анализе АМ и АМП колебаний;

- принятия решения по результатам анализа.

Встраиваемые одноплатные компьютеры, быстродействующие микроконтроллеры и программируемые логические интегральные схемы позволяют с наименьшими аппаратными затратами обеспечить высокое быстродействие, точность и достоверность получаемой информации о параметрах сигналов и состоянии аппаратуры. Все большее число задач решается не на аппаратном, а на алгоритмическом и программном уровнях.

Все методы функционального контроля на основе ЦОС можно разделить на группы: работающие во временной области сигналов, работающие в частотной области и комбинированные. Методы ЦОС в частотной области, как правило, используют алгоритмы быстрого преобразования Фурье, для которых погрешность определения параметров сигнала при малом числе периодов сигнала и объеме выборки $N < 32$ резко возрастает. Использование сглаживающих оконных функций повышает их точность, однако уровень погрешности остается в диапазоне десятков и единиц процентов.

В практикуме рассмотрены алгоритмы ЦОС во временной области с использованием методов интегрирования и интерполяции. Представлен комплекс программ для моделирования и оптимизации параметров ЦОС при исследованиях и инженерных расчетах параметров радиосигналов по ограниченному массиву данных, позволяющий выбирать временное сглаживающее окно, частоту дискретизации, объем выборочных данных и коэффициент интерполяции. Программы моделирования созданы аспирантом кафедры РТ и РС А. А. Руфовым под руководством автора издания.

Исследовательская практическая работа № 1

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИГНАЛА ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ПО ДИСКРЕТНЫМ ОТСЧЕТАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКОН И ИНТЕРПОЛЯЦИИ

1.1. Цели исследований

1. Изучение видов окон и программы моделирования восстановления гармонического сигнала по ограниченному массиву дискретных отсчетов.

2. Исследование особенностей восстановления сигнала без сглаживающей оконной функции (в прямоугольном окне) при изменении числа отсчетов, длительности сигнала, числа интервалов интерполяции и других факторов.

1.2. Использование окон при восстановлении сигнала во временной области

По теореме Котельникова сигнал может быть полностью восстановлен по дискретным, одинаково расположенным отсчетам, если частота выборки, по крайней мере, вдвое больше самой высокой частоты этого сигнала. Если в пределах окна выборки укладывается нецелое число периодов сигнала, то на границах этого окна будут разрывы, которые приводят к появлению дополнительных спектральных компонент в частотной области, известных как спектральная утечка, или растекание спектра. Эффект растекания из-за неопределенности положения максимума спектральной функции приводит к погрешности измерения параметров даже строго синусоидального сигнала. Для минимизации влияния спектральной утечки в начале и конце окна выборки сигнал сглаживают путем его плавного уменьшения до нуля. Сглаживание временной последовательности заключается в умножении всех отсчетов сигнала на весовые коэффициенты специальной функции,

называемой «окном». Имеется большое разнообразие окон, отличающихся по параметрам разрешающей способности, степени сглаживания, влияния на отношение сигнал/шум и т. д. Наиболее часто при решении практических задач используются окна Хэмминга (Hamming), Ханна (Hann), Кайзера (Kaiser), Блэкмана (Blackman), Flat Top, а также комбинированные: Кайзера-Бесселя (Kaiser-Bessel), Блэкмана-Харриса (Blackman-Harris) и др. Известны также окна: гауссово, треугольное, синусоидальное, Чебышева, Тьюки и др. Если на последовательность отсчетов не накладывается никакая сглаживающая функция, то такое окно называют прямоугольным (Uniform). Некоторые оконные функции представлены в таблице. На рис. 1.1 – 1.3 приведены графики окон, сигналов с наложением окна и исходного гармонического сигнала. Для лучшего представления окна приведены 12 периодов сигнала и 600 точек отсчета.

Окно	Весовая функция сглаживания $u_w(t)$
Прямоугольное	1
Синусоидальное	$\sin\left(\frac{2\pi t}{N}\right)$
Ханна	$0,5 - 0,5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{N}\right)$
Хэмминга	$\omega(n) = 0,53836 - 0,46164 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$
Блэкмана	$0,42 - 0,5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{N}\right) + 0,08 \cdot \cos\left(\frac{4\pi t}{N}\right)$
Наталла	$a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{N}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi t}{N}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi t}{N}\right)$ $a_0 = 0,35577; a_1 = 0,48741; a_2 = 0,14423; a_3 = 0,01260$

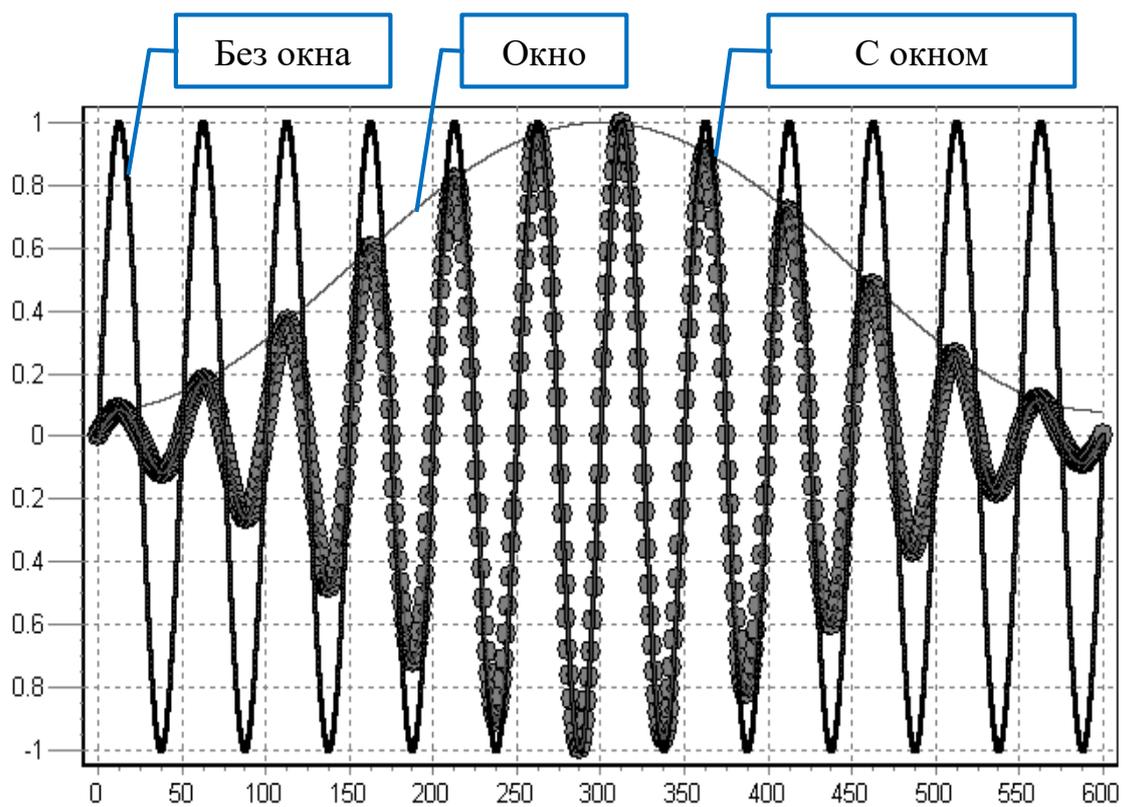


Рис. 1.1. Сигналы исходный и с наложением окна Хэмминга

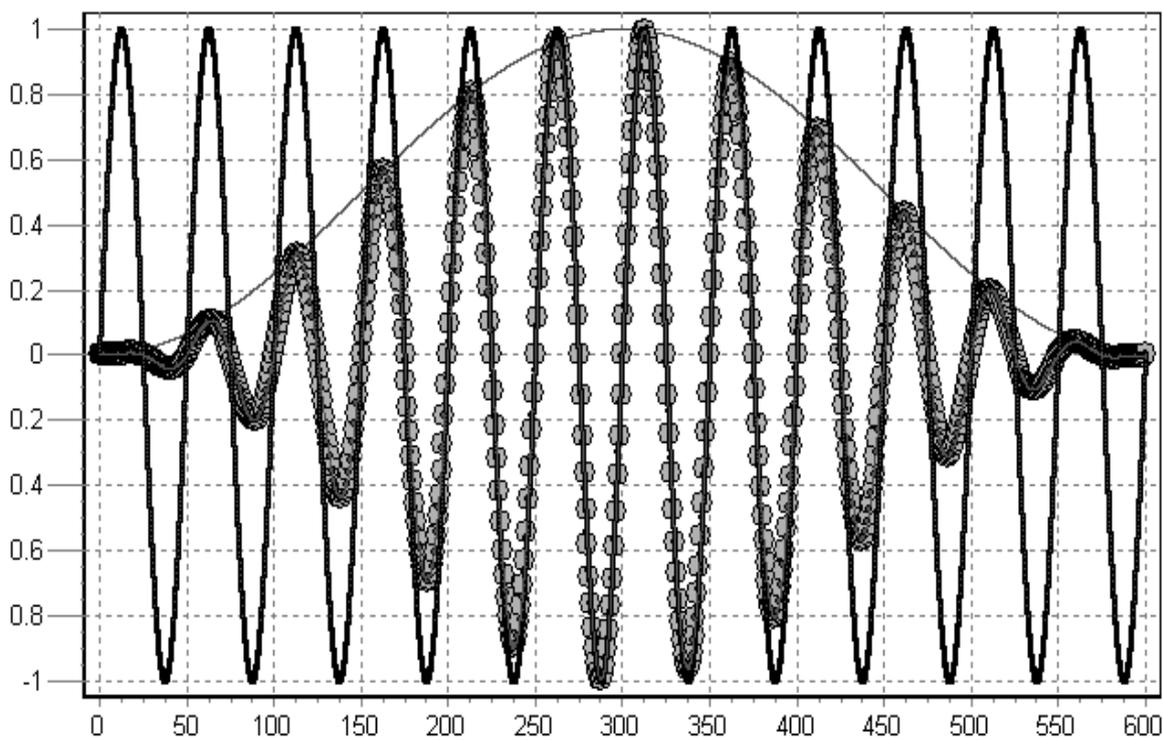


Рис. 1.2. Сигналы исходный и с наложением окна Ханна

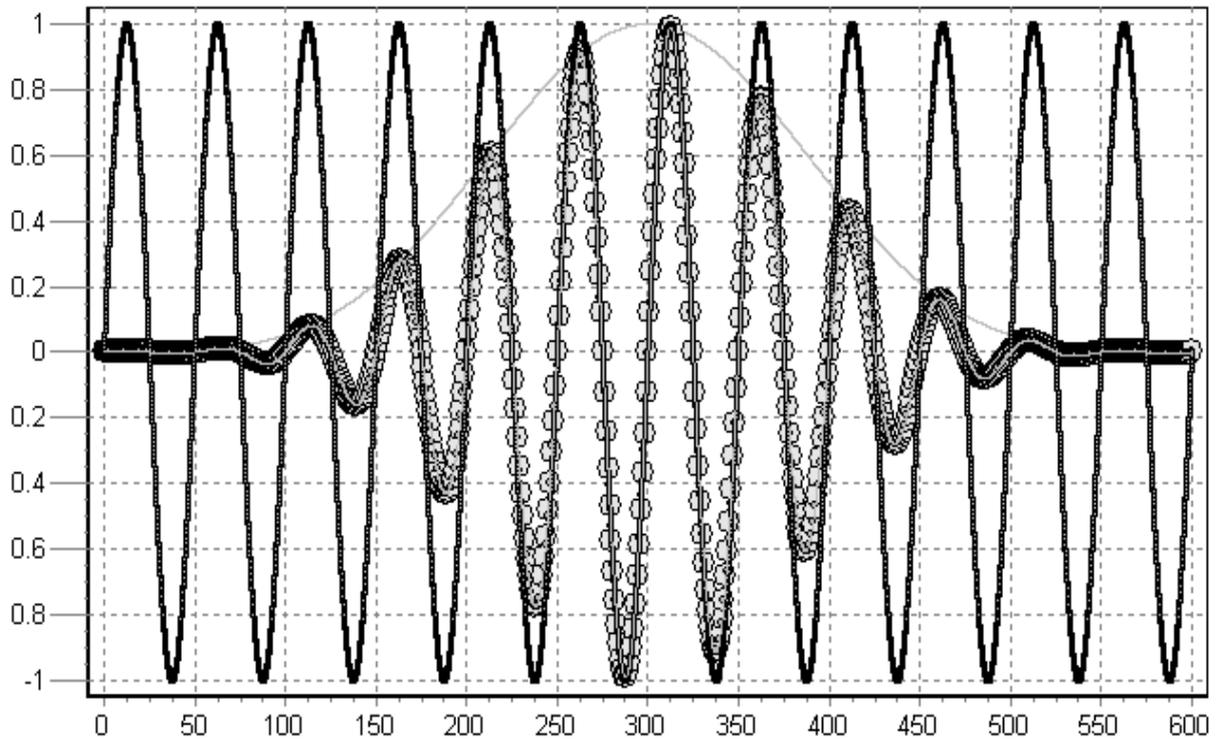


Рис. 1.3. Сигналы исходный и с наложением окна Наталла

1.3. Стратегия выбора окна

Каждое окно имеет собственные характеристики, и различные окна используются для разных приложений.

- Если сигнал содержит частотные компоненты с сильной помехой, отдаленные от частоты, представляющей интерес, выбирается окно с наибольшей скоростью спада характеристики.
- Если имеются сильные сигналы помехи около частоты, представляющей интерес, выбирается окно с низким максимальным уровнем боковых лепестков.
- Если представляющая интерес частота содержит два или более сигналов, очень близких друг к другу, то в этом случае лучше выбрать окно с очень узким главным лепестком.
- Если амплитудная точность одной частотной компоненты более важна, чем размещение компонент по частоте, то следует выбрать окно с широким главным лепестком.

Если спектр сигнала узкий или широкий в полосе частот, то можно использовать прямоугольное окно. Если временная выборка содержит нецелое число периодов, то частотная характеристика окна

сдвинута от центра главного лепестка на величину разности между частотной компонентой сигнала и частотными компонентами ДПФ. Этот сдвиг заставляет боковые лепестки проявиться в спектре. Смещение главного лепестка относительно центра приведет к тому, что в него попадет несколько спектральных компонент сетки частот ДПФ, и это вызывает амплитудные искажения основной компоненты сигнала. Характеристики боковых лепестков окна непосредственно влияют на степень наложения компонент соседних частот друг на друга. В частности, фронт бокового лепестка сильного синусоидального сигнала может перекрыть фронт главного лепестка соседнего более слабого синусоидального сигнала, изменив таким образом спектральный состав компонент.

Особенности конкретных окон:

- Прямоугольное окно имеет самый узкий лепесток, а окна Ханна и Flat Top обеспечивают расширение.
- Окно Flat Top имеет более широкий главный лепесток, чем другие.
- Окно Kaiser-Bessel является лучшим решением для минимизации спектральной утечки на границах окна выборки.
- Окно Хэмминга минимизирует спектральную утечку от одного компонента до другого на близко расположенных частотных компонентах.
- Окно Ханна имеет хорошее частотное разрешение и приведенную спектральную утечку. Оно удовлетворительно в 95 % случаев.
- Если характер сигнала неизвестен, но нужно применить окно, то следует выбрать окно Ханна.
- Окно Flat Top имеет хорошую амплитудную точность, широкий главный лепесток, но недостаточное частотное разрешение и большую спектральную утечку.
- Окно Flat Top имеет более низкий максимальный уровень боковых лепестков, чем окно Ханна, но окно Ханна имеет более быструю скорость спада характеристики.
- Прямоугольное окно целесообразно использовать в случае, когда сигнал представляет собой широкополосный белый шум или основные гармонические составляющие анализируемой последовательности совпадают с сеткой частот ДПФ.

1.4. Восстановление сигнала при малом числе отсчетов в прямоугольном окне и интерполяции $\sin(x)/x$

На рис. 1.4 представлено восстановление сигнала без промежуточных точек интерполяции между отсчетами, а на рис. 1.5 – с двумя точками интерполяции по Котельникову функцией $\sin(x)/x$.

Приведенные графики показывают, что при отношении частоты дискретизации к частоте сигнала 4,3 благодаря интерполяции с делением на 3 гармонический сигнал достаточно хорошо восстанавливается.

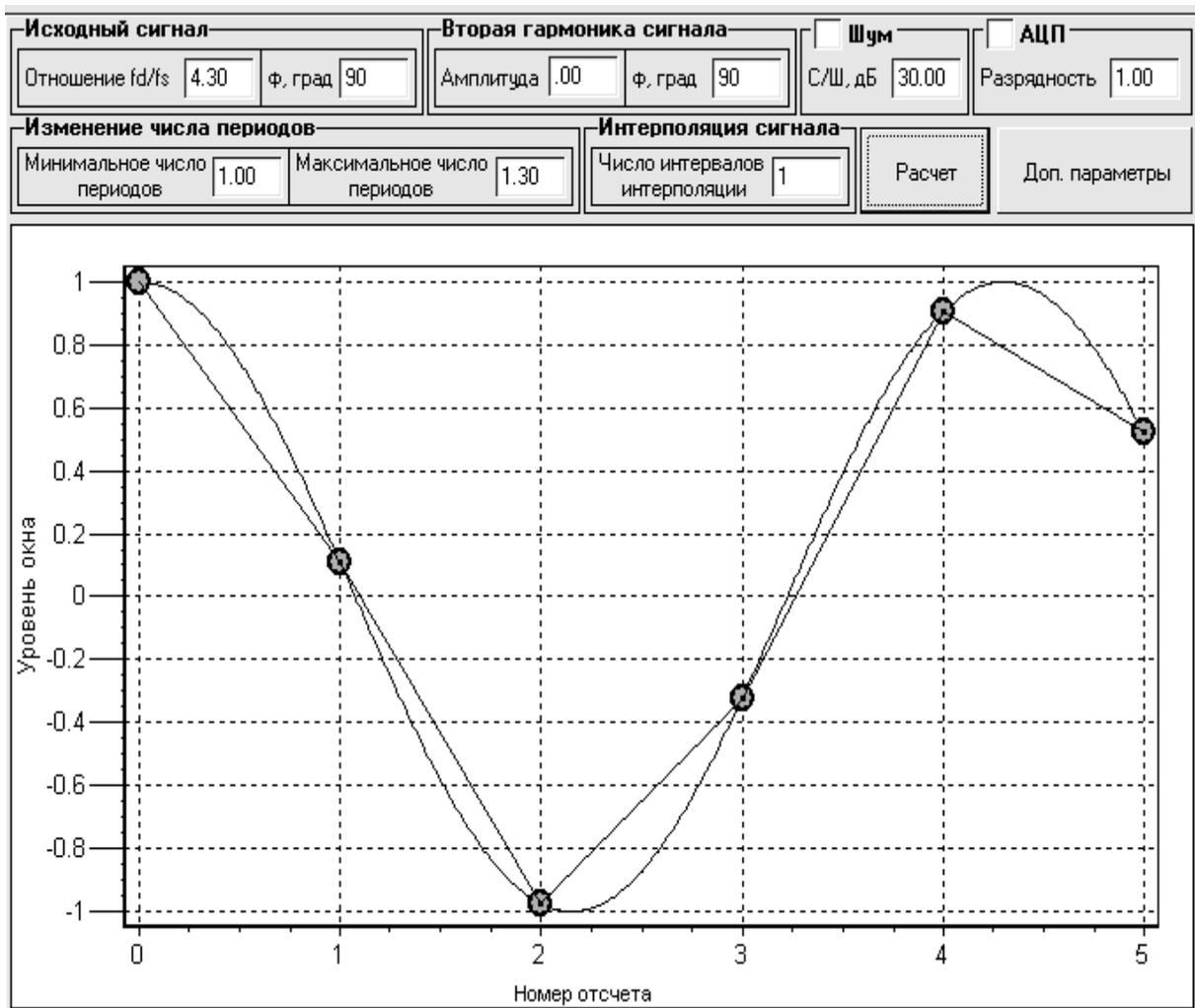


Рис. 1.4. Восстановление без интерполяции

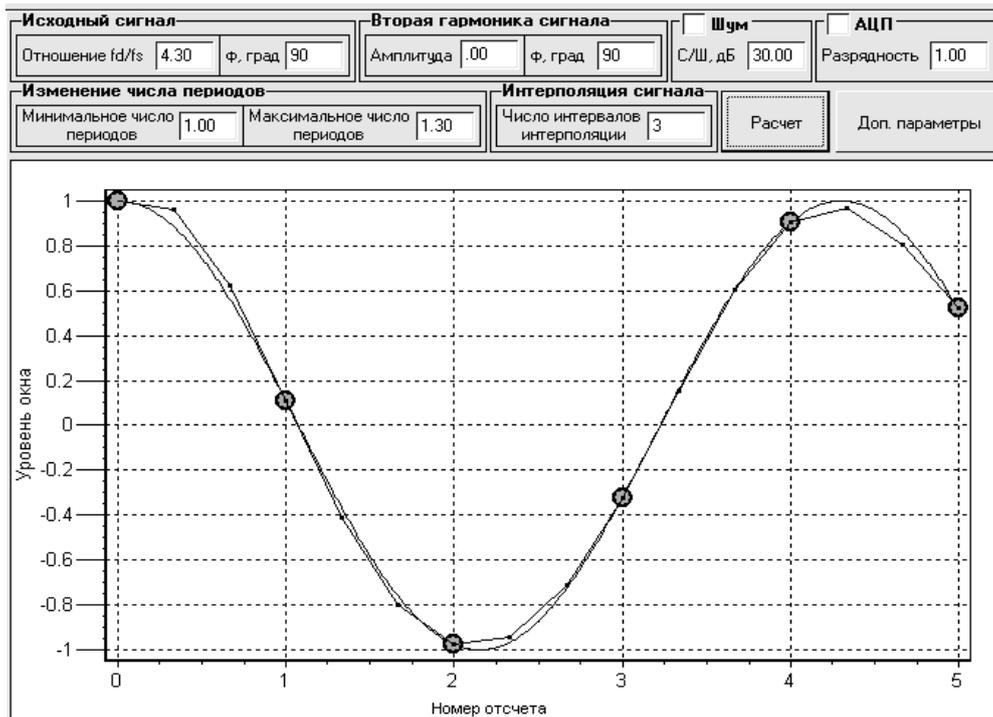


Рис. 1.5. Интерполяция функцией $\sin(x)/x$ с делением на 3

На рис. 1.6 показано восстановление гармонического сигнала при необоснованном завышении числа отсчетов и числа интервалов интерполяции.

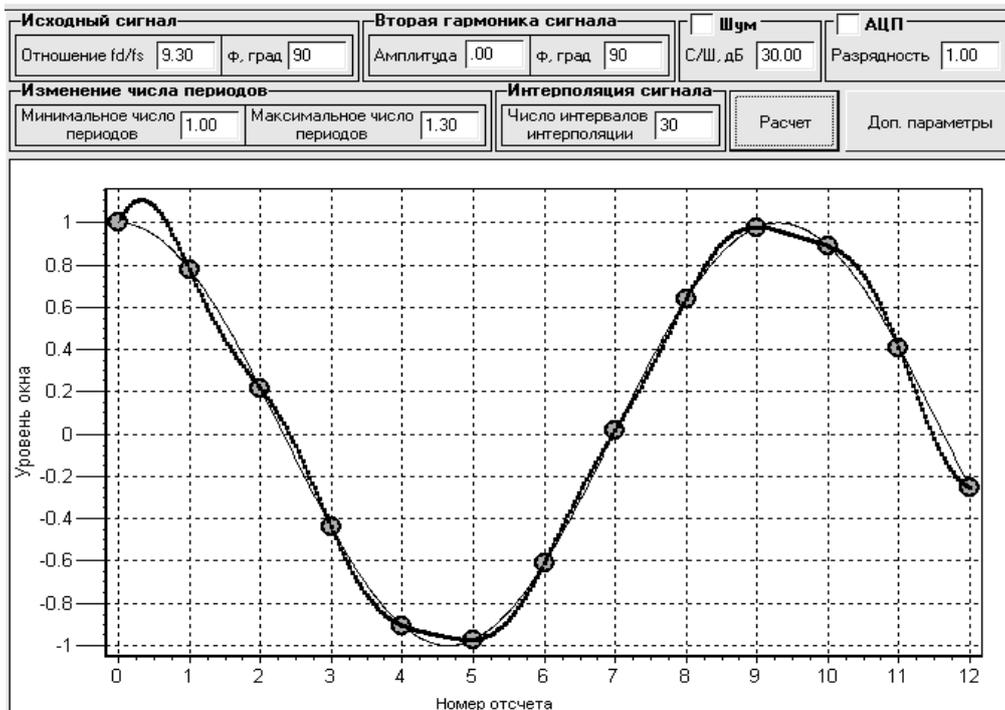


Рис. 1.6. Интерполяция с делением на 30

На рис. 1.7 показано, что при наличии второй гармоники качественное восстановление достигается для отношения частоты дискретизации к частоте сигнала 9,3 с делением на 5. На рис. 1.8 приведено восстановление при отношении сигнал/шум (С/Ш) 10 дБ.

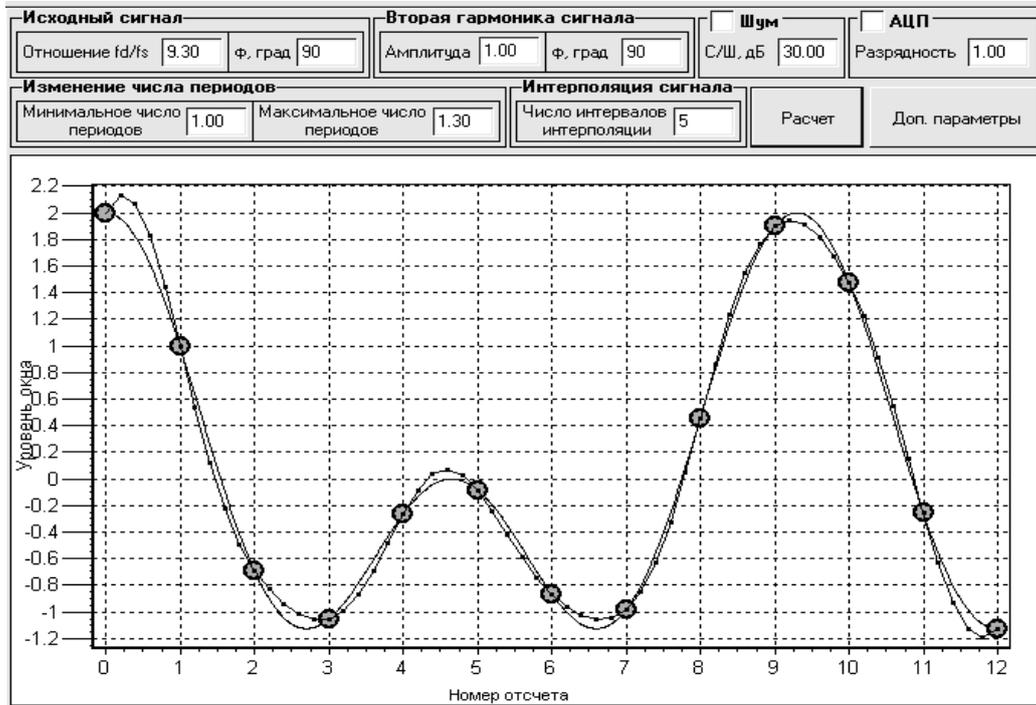


Рис. 1.7. Сигнал со второй гармоникой

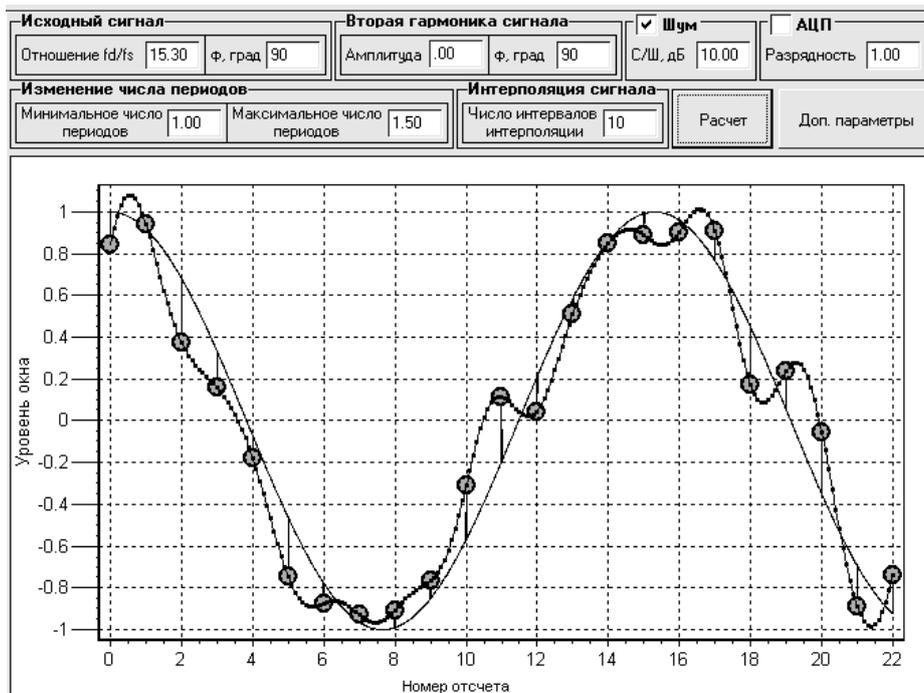


Рис. 1.8. Интерполяция с делением на 10 при С/Ш = 10 дБ

При отсутствии шумов наибольшие искажения сигнала возникают в области начальной фазы сигнала 90° . При наличии шумов нет смысла делать много отсчетов на периоде при большом числе интервалов интерполяции.

1.5. Работа с программой

Основное меню программы моделирования приведено на рис. 1.9, оно разбито на шесть блоков: "Исходный сигнал", "Вторая гармоника сигнала", "Шум", "АЦП", "Изменение числа периодов" и "Интерполяция сигнала".

В блоке "*Исходный сигнал*" расположены поля для ввода значения начальной фазы первой гармоники сигнала и отношения частоты дискретизации к частоте сигнала.

В блоке "*Вторая гармоника сигнала*" расположены поля для ввода значений уровня и начальной фазы.

В блоке "*Изменение числа периодов*" задаются минимальное и максимальное число периодов сигнала, по которым организован соответствующий цикл работы.

В блоке "*Интерполяция сигнала*" расположено поле, в котором задается требуемый объем выборок.

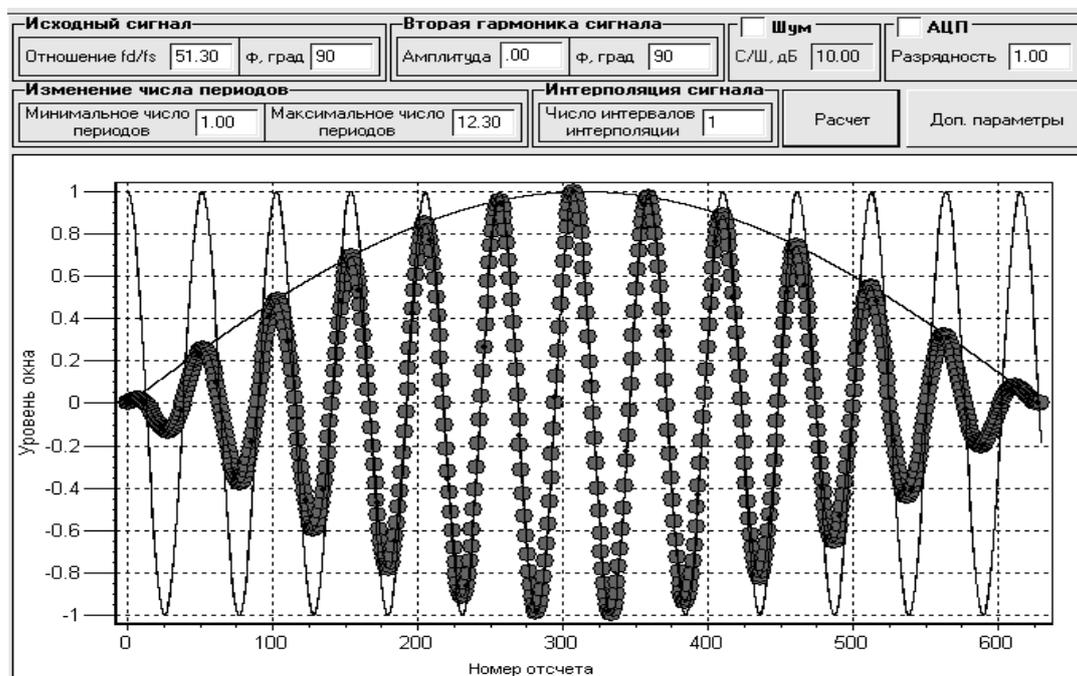


Рис. 1.9. Синусоидальное окно

В основном меню находятся кнопки "Расчет", "Дополнительные параметры" и область для вывода графиков.

Меню дополнительных параметров, как и основное меню, состоит из блоков: "*Оконные функции*", "*Дополнительные графики*". В блоке "*Оконные функции*" реализовано шесть оконных функций: прямоугольное и синусоидальное окно, окна Ханна, Хэмминга, Блэкмана, Наталла.

1.6. Подготовка к выполнению исследований

При подготовке необходимо:

- изучить пользовательский интерфейс, его органы управления;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования.

1.7. Экспериментальные исследования

Программа позволяет исследовать, как влияют на форму сигнала следующие факторы и условия работы:

1. Наличие высших гармоник в спектре сигнала:

- сигнал без гармоник;
- вторая гармоника 1 – 10 % от первой;
- вторая гармоника близка или больше первой.

2. Начальные фазы первой и второй гармоник сигнала:

- одинаковые, например 0, 45, 90°;
- со сдвигом 45, 90, 180°.

3. Число периодов сигнала:

- малое 1 – 2,5;
- среднее 3 – 7;
- большое – свыше 10.

4. Число интервалов интерполяции:

- малое 2 – 5;
- среднее 8 – 12;
- большое – свыше 20.

5. Отношение частоты дискретизации к частоте сигнала:

- малое целое и дробное от 2 до 7;
- среднее дробное от 8 до 12;
- большое – свыше 20.

6. Отношение сигнал/шум: 30, 20, 10, 3 и 0 дБ.

7. Вид оконной функции: Ханна, Хэмминга, Блэкмана, Наталла, прямоугольное и синусоидальное.

Программа позволяет исследовать как отдельное, так и комплексное влияние на форму сигнала различных факторов и условий работы.

1.8. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные данные.
- Рекомендации и выводы по всем пунктам работы.

1.9. Контрольные вопросы к защите

1. При каких условиях сигнал может быть полностью восстановлен по дискретным отсчетам с равномерным шагом?
2. Что такое спектральная утечка, или растекание спектра?
3. Что называют временным «окном»?
4. Какие окна вы знаете? Каковы их особенности?
5. Как расположены спектральные компоненты для целого числа периодов сигнала?
6. Как сдвигается частотная характеристика окна от центра главного лепестка, если временная выборка содержит нецелое число периодов?
7. К чему приводит смещение главного лепестка относительно центра?
8. Какими параметрами характеризуются окна?
9. Как оценить мощность сигнала и шумов?
10. Поясните практические результаты исследований.
11. Какие окна имеют узкий главный лепесток?
12. Какие окна имеют широкий главный лепесток?
13. Какие окна имеют низкий уровень боковых лепестков?

Исследовательская практическая работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ СИГНАЛА МЕТОДОМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ВО ВРЕМЕННОМ ОКНЕ

2.1. Цели исследований

1. Изучение алгоритма работы программы моделирования и ее пользовательского интерфейса.
2. Типовые исследования погрешности оценки среднеквадратического значения сигнала для различных окон и интервалов интегрирования без учета погрешности дискретизации.
3. Исследование погрешности оценки среднеквадратического значения сигнала для комплексного влияния совокупности факторов.

2.2. Метод интегрирования

В соответствии с математическим определением СКЗ используется метод интегрирования. По определению СКЗ сигнала $u(t)$ с периодом T_c может быть представлено в виде следующего выражения:

$$U_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} u^2(t) dt} .$$

При дискретизации периодического сигнала с применением аналого-цифрового преобразования получаем массив цифровых отсчетов с постоянным шагом оцифровки.

При расчетах интеграл заменяется суммой и СКЗ вычисляется приближенно. Для периода дискретизации T_d и числа точек отсчета на одном периоде сигнала $N = T/T_d$ получим выражение

$$U_{S.RMS} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N u_i^2 T_d} \quad \text{или} \quad U_{S.RMS} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2} .$$

Если сумма определена на нецелом числе периодов сигнала, то возникает значительная методическая погрешность, которую можно уменьшить, если наложить на сигнал сглаживающее окно и ввести весовой поправочный коэффициент. При этом уровень остаточной погрешности будет зависеть от вида выбранной сглаживающей функции.

СКЗ сигнала определяется как ограниченная сигналом площадь, усредненная на интервале времени τ . Очевидно, что значение СКЗ истинно при $\tau \rightarrow \infty$. Для гармонического колебания среднее значение площади не зависит от числа периодов. Значение СКЗ таких сигналов может быть получено усреднением за время $\tau = kT$, где $k = 0,5, 1, \dots$; T – период оцениваемого сигнала $u(t)$. Для нецелого числа полупериодов величину методической погрешности можно значительно уменьшить, если наложить на сигнал сглаживающее окно и ввести весовой поправочный коэффициент k_w . При этом уровень остаточной погрешности будет зависеть от вида выбранной сглаживающей функции.

Повышение точности при комплексном определении параметров радиосигнала путем алгоритмических измерений является одной из важнейших задач ЦОС в системах встроенного контроля РЭА. Развитие компьютерных технологий позволяет решать задачи ЦОС на программном уровне с высокой точностью и достоверностью получаемой информации. Развитие алгоритмических методов оценки параметров восстановленных сигналов по массиву дискретных значений обеспечивает гибкость, надежность, низкую стоимость и высокое быстродействие. Использование персонального компьютера для управления ходом эксперимента позволяет создавать специализированные системы измерения параметров радиосигналов. С помощью современных алгоритмов ЦОС можно с меньшими затратами адаптировать созданные измерительные комплексы различной сложности к изменяющимся задачам при автоматизированном управлении и удаленной передаче результатов.

Применение ЦОС позволяет существенно снизить требования к аппаратной части. С целью повышения достоверности и точности измерений могут использоваться алгоритмы косвенных измерений по формулам и процедурам, недоступным при аппаратной реализации, но легко производимым программными средствами. Цифровые методы обеспечивают минимальную погрешность обработки, высокую достоверность выходных результатов и функциональную гибкость программно-аппаратных средств.

2.3. Алгоритм

Рассмотрим алгоритм измерения СКЗ гармонического сигнала с оценкой погрешности, обусловленной ограниченной длительностью интегрирования и наличием 2-й и 3-й гармоник. В моделирующей про-

грамме организованы циклы по диапазону и шагу изменения длительности интегрирования сигнала, шагам изменения фазы отдельно для 1, 2, и 3-й гармоник.

Алгоритм содержит следующие шаги:

1. Выбор параметров сигнала:

- $m_{S.min}$ и $m_{S.max}$ – минимальное и максимальное число периодов исследуемого сигнала основной частоты с амплитудой $A_1 = 1$;
- A_2 и A_3 – относительные уровни 2-й и 3-й гармоник, а φ_1 , φ_2 и φ_3 – соответственно начальные фазы 1, 2 и 3-й гармоник сигнала.

2. Формирование массива данных $X_S[t]$ исходного гармонического сигнала $u(t)$ при длительности $t = m_{S.min}$

$$u(t) = \sin(2\pi f_s t + \varphi_1) + A_2 \sin(4\pi f_s t + \varphi_2) + A_3 \sin(6\pi f_s t + \varphi_3).$$

3. Формирование массива данных выбранной оконной функции $X_W[t]$. Если окон несколько, то последовательно определяется массив для каждого окна $X_{W1}[t]$, $X_{W2}[t]$ и так далее до $X_{WR}[t]$, где R – число окон.

4. Формирование массива данных $X_P[t]$, соответствующего наложению окна на интерполированный сигнал, т. е. $X_P[t] = X_W[t]X_{INT}[t]$. Если сглаживающих функций несколько, то формируются массивы $X_{P1}[t]$, $X_{P2}[t]$ и так далее до $X_{PR}[t]$.

5. Определение среднеквадратического сигнала $U_{V.RMS}$ методом интегрирования

$$U_{S.RMS} = \sqrt{\frac{1}{m_{S.min}} \int_0^{m_{S.min}} X_P^2[t] dt}.$$

6. Формирование массива данных $X_{RMS}[\Delta_{RMS}]$ и погрешности оценки среднеквадратического значения

$$\Delta_{RMS} = \frac{k_W U_{V.RMS} - U_{RMS}}{U_{RMS}} 100 \% = \left(k_W \frac{U_{V.RMS}}{U_{RMS}} - 1 \right) 100 \%.$$

Здесь U_{RMS} соответствует истинному значению СКЗ сигнала $u(t)$;

k_W – поправочный коэффициент, учитывающий спад сигнала к краям окна.

7. Истинное СКЗ определяется по амплитудам всех гармоник сигнала

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1^2 + A_2^2 + A_3^2}{2}}.$$

8. Выполнение циклов по всем переменным и индикация результатов.

2.4. Программа моделирования

На рис. 2.1 изображен интерфейс программы, предназначенной для моделирования алгоритма определения среднеквадратического значения сигнала методом интегрирования. В программе реализован специализированный программируемый комплекс виртуальных приборов, содержащий генератор полигармонического сигнала, вольтметр и осциллограф.

На экране отображаются текущие параметры работы алгоритма, наборы сигналов (оцифрованный, восстановленный, интерполированный, окно и др.) и семейства погрешностей для прямоугольного окна и окна Ханна. Основное меню разбито на шесть блоков: "Начальная фаза основного сигнала", "Изменение числа периодов", "Погрешность", "Вторая гармоника сигнала", "Третья гармоника сигнала" и "Вывод графиков".

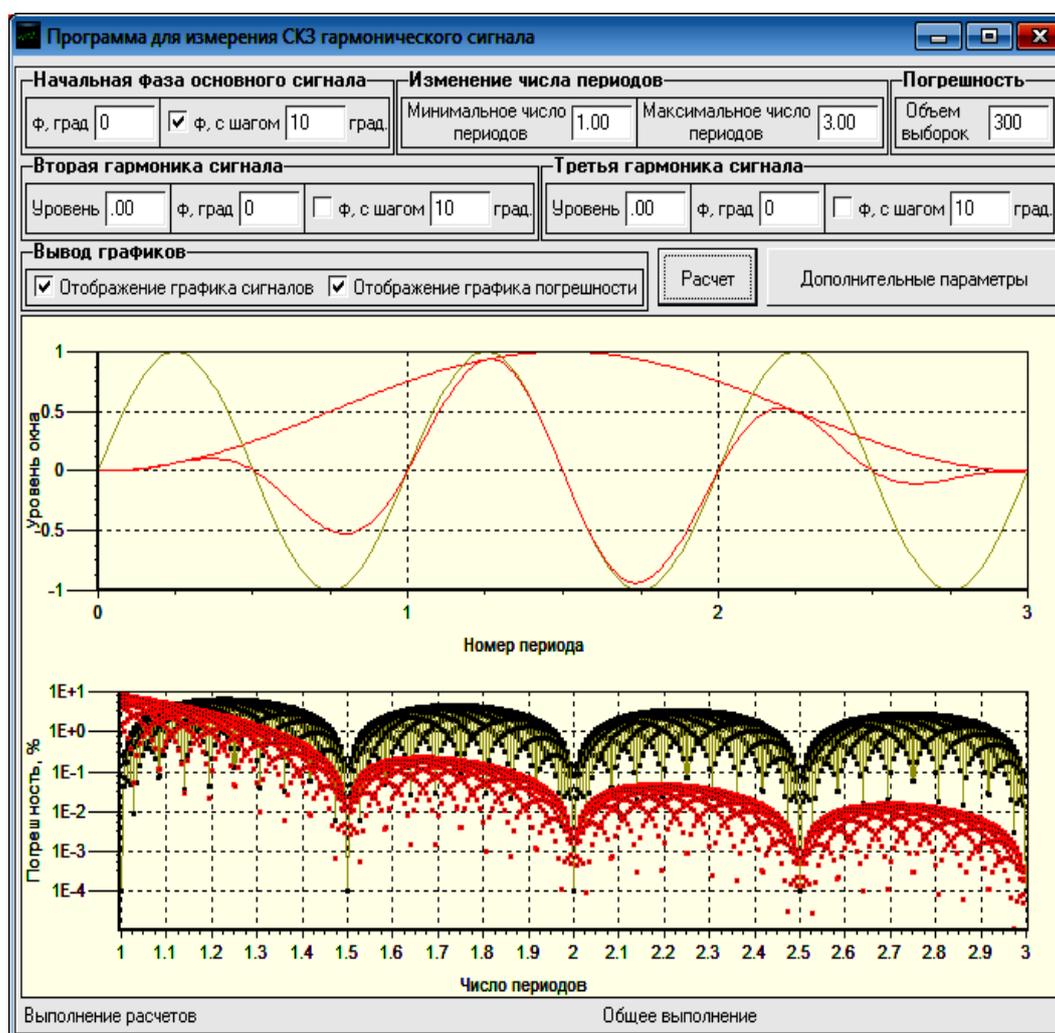


Рис. 2.1. Интерфейс программы моделирования алгоритма определения СКЗ сигнала методом интегрирования

В блоке "Начальная фаза основного сигнала" расположены поля для ввода значения начальной фазы основного сигнала и шага ее изменения. При активном поле "ф, с шагом" на экран выводятся семейства кривых, соответствующих изменению начальной фазы сигнала в пределах $[0; 360]^\circ$ с возможностью задания шага.

В блоке "Изменение числа периодов" задаются минимальное и максимальное число периодов сигнала, по которым организован соответствующий цикл. На рис. 2.2 показаны результаты моделирования для диапазона периодов $[1,5; 2]T$.

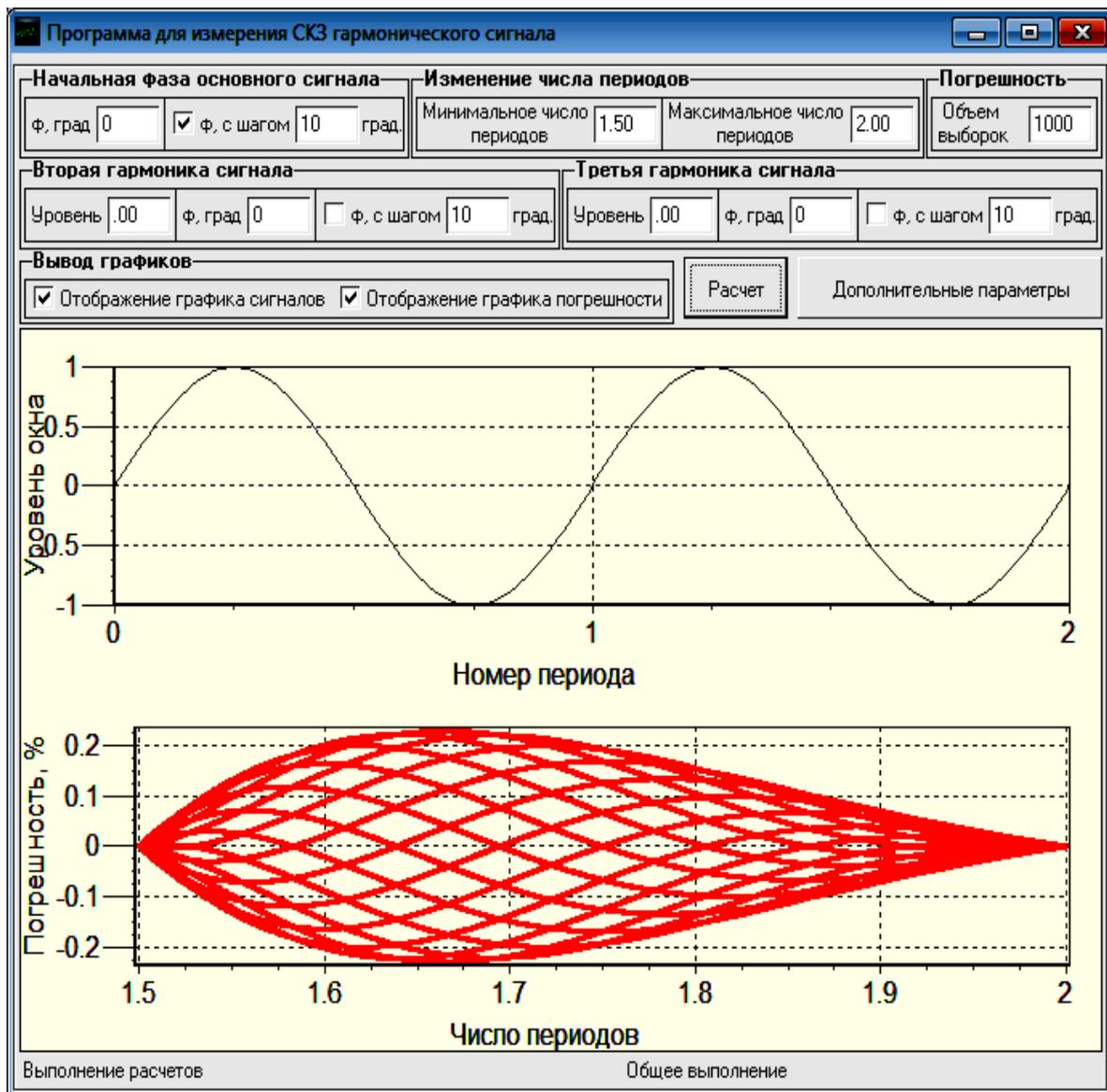


Рис. 2.2. Графики погрешности в линейном масштабе для окна Ханна и интервала оценки $[1,5; 2]T$

В блоке "Погрешность" расположено поле, в котором задается требуемый объем выборки. Чем больше вводимое значение, тем точнее будут отображаемые результаты, но тем большее число точек обрабатывается при построении семейств графиков погрешностей.

В блоке "Вторая гармоника сигнала" расположены поля для ввода уровня, начальной фазы и шага второй гармоники. При активном поле "φ, с шагом" в данном блоке на экран выводятся семейства кривых, соответствующих изменению начальной фазы второй гармоники сигнала в пределах $[0; 360]^\circ$ с возможностью задания шага.

В блоке "Третья гармоника сигнала" расположены поля для ввода уровня, начальной фазы и шага третьей гармоники. При активном поле "φ, с шагом" в данном блоке на экран выводятся семейства кривых, соответствующих изменению начальной фазы третьей гармоники сигнала в пределах $[0; 360]^\circ$ с возможностью задания шага.

Блок "Вывод графиков" позволяет выбрать нужное отображение графиков. Активное поле "Отображение графика сигналов" выводит на экран сигналы. Активное поле "Отображение графика погрешности" выводит на экран графики погрешностей. Если активны оба поля, то выводятся графики и сигналов, и погрешностей, иначе – только выбранные графики.

На основном меню находятся кнопки "Расчет" и "Дополнительные параметры" и области для вывода графиков. Если результаты погрешности имеют широкий диапазон значений, то встроенный *zoom* позволяет увеличить рабочую область, не повторяя эксперимент.

Меню дополнительных параметров, как и основное меню, также состоит из блоков "Оконные функции", "Отображение графиков", "Масштаб" и "Начальная фаза" (рис. 2.3).

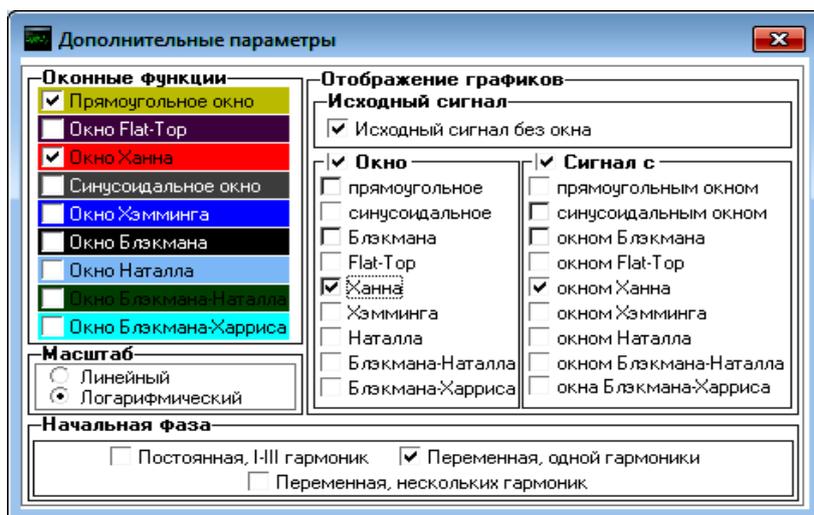


Рис. 2.3. Меню дополнительных параметров

В блоке "Начальная фаза" реализованы вычисления по выбранным параметрам: по одной переменной (активное поле "Постоянная I-III гармоник"), цикл по одной переменной (активное поле "Переменная, одной гармоник") и цикл по нескольким переменным (активное поле "Переменная, нескольких гармоник"). Программа позволяет строить графики при изменении начальных фаз гармоник (рис. 2.4).

В блоке "Оконные функции" реализовано 9 оконных функций: прямоугольное и синусоидальное окна, окна Ханна, Хэмминга, Блэкмана, Flat-Top, Наталла, Блэкмана-Харриса и Блэкмана-Наталла. Чем больше активных окон, тем больше построенных кривых погрешностей будет на графике.

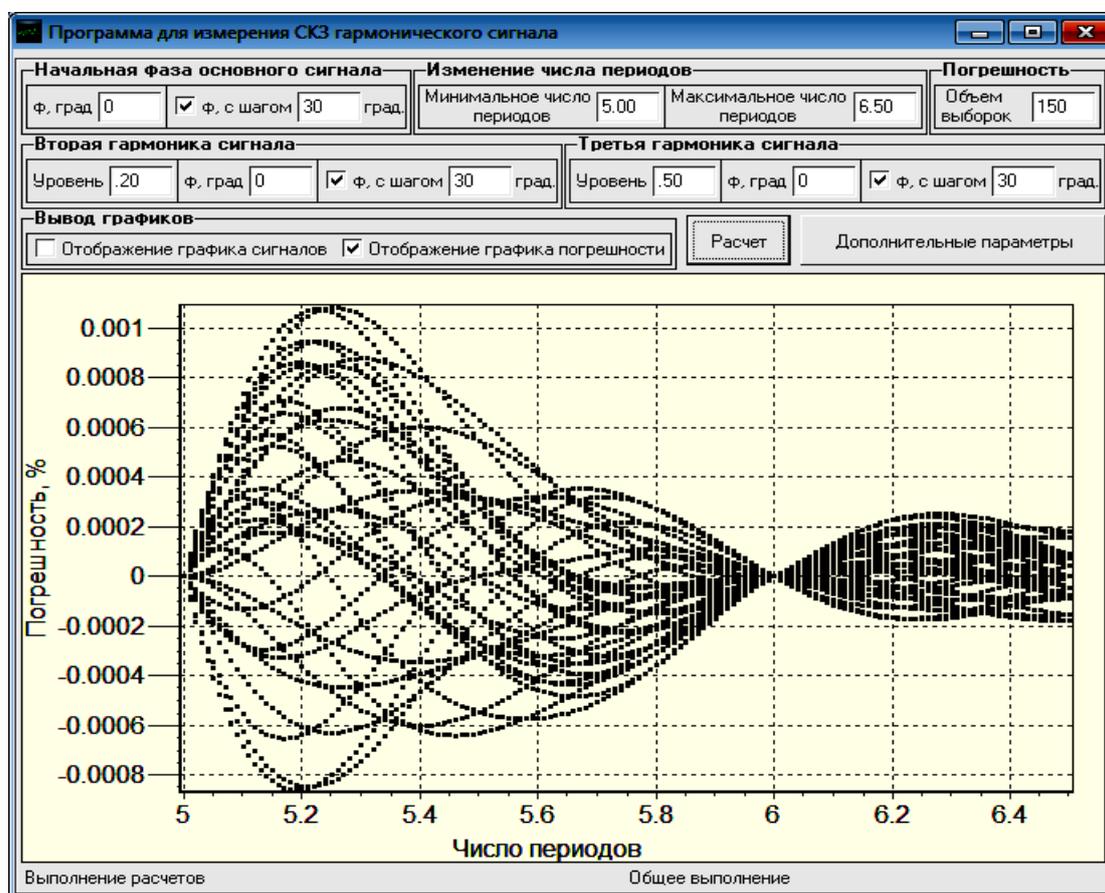


Рис. 2.4. Погрешности при изменении начальных фаз гармоник

В блоке "Отображение графиков" реализованы графики исходного сигнала (блок "Исходный сигнал"), графики выбранной оконной функции (блок "Окно") и графики сигнала с наложенным окном (блок "Сигнал с"). Активные графики будут показаны при нажатии на кнопку "Расчет".

Блок "Масштаб" позволяет задать вид отображения сигнала в линейном или логарифмическом масштабе. Последнее целесообразно, если динамический диапазон изменения методической погрешности более 10^2 .

2.5. Влияние вида оконной функции

Прямоугольное окно не обеспечивает сглаживания, оставляя сигнал неизменным. Погрешность Δ_{RMS} представлена семейством кривых, каждая из которых соответствует определенному значению начальной фазы сигнала. В локальных минимумах (узлах) интервал времени интегрирования равен целому числу полупериодов сигнала. Между узлами расположены локальные максимумы погрешности (пучности).

Если выбрать время интегрирования кратным половине периода нельзя, то величина методической погрешности оценки СКЗ гармонического сигнала на коротких интервалах достигает единиц процентов. Чтобы без сглаживающего окна получить погрешность меньше 0,3 %, нужно более 25 периодов сигнала, а для погрешности 0,1 % требуется более 80 периодов. На рис. 2.5 – 2.6 приведены графики в виде зон, в которых может оказаться погрешность для разных начальных фаз и вида оконной функции.

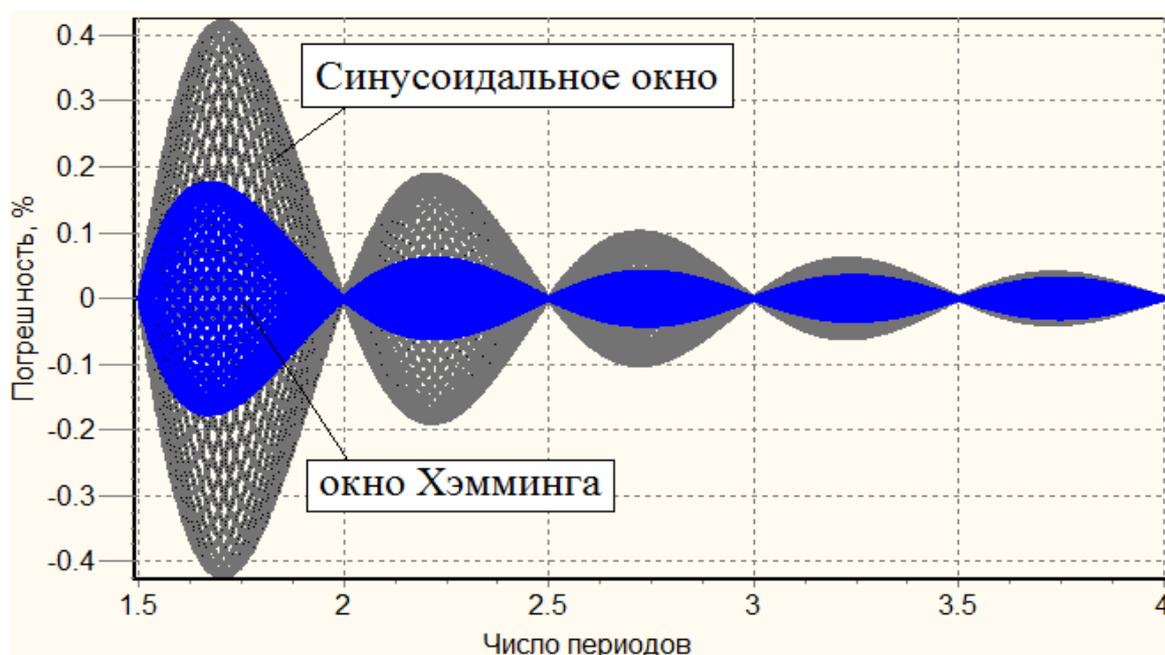


Рис. 2.5. Погрешности оценки СКЗ гармонического сигнала в линейном масштабе для синусоидального окна и окна Хэмминга

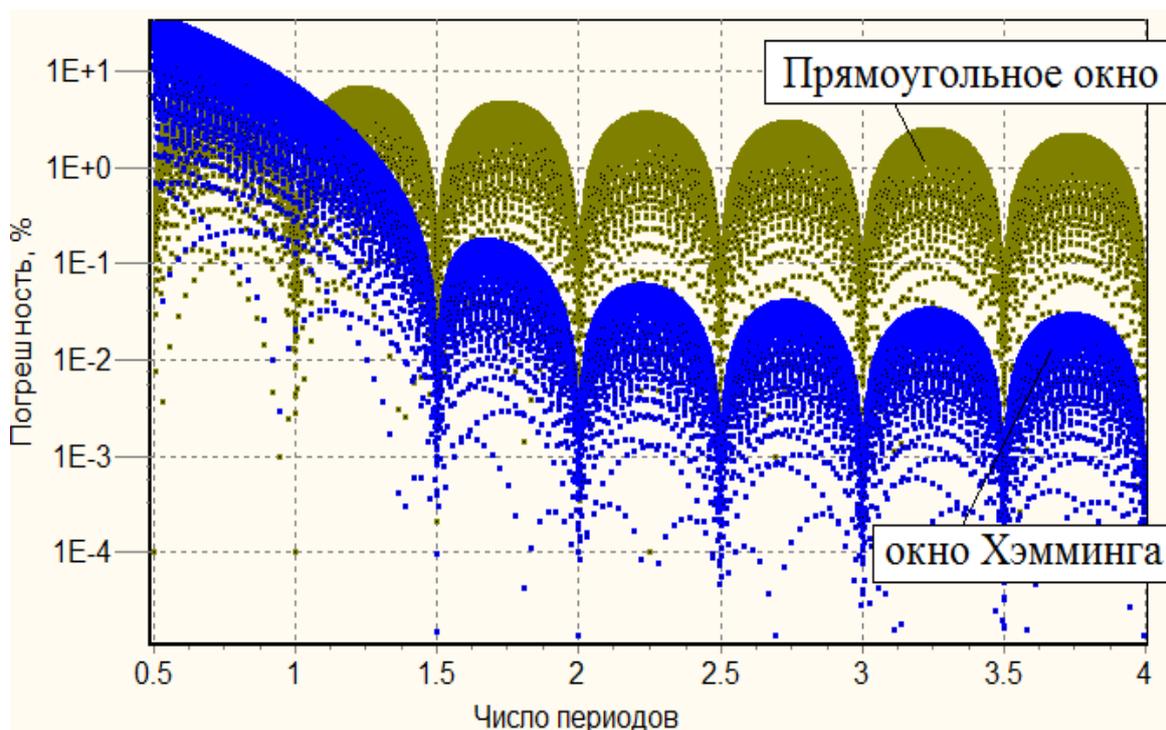


Рис. 2.6. Погрешности оценки СКЗ гармонического сигнала в логарифмическом масштабе для прямоугольного окна и окна Хэмминга

Сглаживающие окна (Хэмминга, Ханна и др.) уменьшают спектральную утечку и позволяют существенно снизить погрешности при увеличении времени интегрирования до $(1,5 - 3,5)T$. Для удобства работы в диапазоне числа периодов сигнала по выбору используется линейный или логарифмический масштаб оценки погрешности.

2.6. Подготовка к выполнению исследований

При подготовке необходимо:

- изучить методы измерения СКЗ гармонического сигнала;
- изучить алгоритм работы программы, а также пользовательский интерфейс, его возможности и органы управления;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования.

2.7. Типовые исследования погрешности оценки СКЗ сигнала для различных окон и интервалов интегрирования

Программа позволяет исследовать влияние следующих факторов:

- начальных фаз первой, второй и третьей гармоник сигнала;
- соотношения амплитуд первой, второй и третьей гармоник;
- объема выборок;
- числа периодов интегрирования;
- вида окна (Ханна, Блэкмана и др.);
- параметров циклов с выбором шагов изменения фаз первой, второй и третьей гармоник;
- совокупности влияющих на точность факторов.

Интерес представляют погрешности оценки СКЗ с выбором рабочих интервалов интегрирования без учета, а также с учетом влияния одного или нескольких факторов. Для определения границ работоспособности следует задаться допустимыми значениями погрешности при однофакторном и многофакторном моделировании с учетом реальных возможностей современной РЭА. Влияние вида окна и интервала интегрирования T можно оценить путем выбора допустимой границы максимальной погрешности нахождения СКЗ на уровне 1 – 5 %, выполнив экспериментальные исследования и заполнив табл. 2.1. Аналогично можно поступить с оценкой влияния нелинейных искажений по 2-й и 3-й гармоникам, заполнив соответственно табл. 2.2 и 2.3.

Таблица 2.1

Окно	Модуль максимальной погрешности для интервала T , %						
	[0,5-1]	[1-1,5]	[1,5-2]	[2-2,5]	[2,5-3]	[3-3,5]	[3,5-4]
Прямоугольное							
Синусоидальное							
Ханна							
Хэмминга							
Блэкмана							
Наталла							

Таблица 2.2

Окно	Погрешность для уровня 2-й гармоники, %					Погрешность без гармоник, %
	1	2	5	10	20	
Прямоугольное						
Синусоидальное						
Ханна						
Хэмминга						
Блэкмана						
Наталла						

Таблица 2.3

Окно	Погрешность для уровня 3-й гармоники, %					Погрешность без гармоник, %
	1	2	5	10	20	
Прямоугольное						
Синусоидальное						
Ханна						
Хэмминга						
Блэкмана						
Наталла						

2.8. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики и таблицы.
- Рекомендации и выводы по всем пунктам работы.

2.9. Контрольные вопросы к защите

1. При каких условиях сигнал может быть полностью восстановлен по дискретным отсчетам с равномерным шагом?
2. Что такое спектральная утечка, или растекание спектра?
3. Что называют временным «окном»?
4. Какие окна вы знаете и каковы их особенности?
5. Когда применяют прямоугольное окно?
6. Как расположены спектральные компоненты для целого числа периодов сигнала?

7. Как сдвигается частотная характеристика окна от центра главного лепестка, если временная выборка содержит нецелое число периодов?
8. К чему приводит смещение главного лепестка относительно центра?
9. Как оценить мощность сигнала и шумов?
10. Поясните алгоритм оценки среднеквадратического значения.
11. Как найти амплитудное значение гармонического сигнала?
12. Поясните практические результаты исследований.
13. Как зависит погрешность оценки СКЗ сигнала от длительности выборки?
14. Как зависит погрешность оценки СКЗ сигнала от объема выборки?
15. Как зависит погрешность оценки СКЗ сигнала от уровня 2-й гармоники?
16. Как зависит погрешность оценки СКЗ сигнала от уровня 3-й гармоники?
17. Дайте рекомендации оценки среднеквадратического значения идеального гармонического сигнала с известной частотой и длительностью $0,5$ и $1,5T$.
18. Дайте рекомендации оценки СКЗ гармонического сигнала с неизвестной частотой и ожидаемой длительностью от $1,4$ до $2,2T$ и от $2,1$ до $3,4T$.
19. Дайте рекомендации оценки СКЗ гармонического сигнала с известной частотой длительностью $1,5$ и $3,0T$ при наличии искажений только по 2-й гармонике, только по 3-й гармонике, по 2-й и 3-й гармоникам.

Исследовательская практическая работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ ДИСКРЕТИЗИРОВАННОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И ИНТЕГРИРОВАНИЯ

3.1. Цели исследований

1. Изучение пользовательского интерфейса и алгоритма работы программы определения СКЗ сигнала.

2. Исследование погрешности оценки СКЗ сигнала для различных окон и интервалов интегрирования с учетом погрешности дискретизации и интерполяции.

3. Исследование погрешности оценки СКЗ сигнала для комплексного влияния совокупности факторов.

3.2. Восстановление сигнала функцией $\sin x/x$

Одним из важнейших направлений цифровой обработки является уменьшение погрешности восстановления периодических сигналов короткой длительности (1 – 5 периодов) при малом числе дискретных отсчетов. В частности, задачи оценки СКЗ коротких квазипериодических сигналов решаются в цифровой осциллографии, звуковой и радиолокации, телеметрии и навигации, мониторинге и испытаниях электронных средств. При этом широко используется метод интегрирования в соответствии с математическим определением среднеквадратического значения.

При малом числе дискретных отсчетов величину методической погрешности оценки СКЗ короткого гармонического сигнала можно уменьшить путем восстановления промежуточных точек между дискретными отсчетами, т. е. путем интерполяции.

Линейная интерполяция является самым простым, но в то же время и самым неточным решением, поскольку геометрически такая интерполяция представляет собой ломаную линию. Чуть более гладкий вид имеют сигналы, восстановленные по кубическим многочленам Бесселя и сплайнам Акимы. Точность этих методов значительно лучше линейной интерполяции, но уступает точности восстановления рядом Котельникова.

В 1933 году В. А. Котельников сформулировал теорему и доказал, что произвольный сигнал, спектр которого не содержит частот выше F_B , может быть полностью восстановлен, если известны отсчетные значения этого сигнала, взятые через равные промежутки времени $0,5T_B = 1/2F_B$.

Интерполяция функцией $\sin c(x) = \sin x/x$ выступает следствием теоремы Котельникова, она успешно реконструирует сигнал, если учитываются все отсчеты. Для определения возможностей интерполяции рядом Котельникова используем моделирующую программу, позволяющую выбирать вид окна, число периодов сигнала, число отсчетов на

период, начальную фазу и шаг изменения фазы сигнала, коэффициент деления каждого интервала дискретных отсчетов.

Алгоритм определения СКЗ сигнала, восстановленного функцией $\sin x/x$, позволяет выбирать сглаживающую оконную функцию (синусоидальную, Ханна, Хэмминга, Блэкмана и Наталла).

3.3. Алгоритм программы моделирования

Выполняются следующие шаги:

1. Задание и инициализация переменных:

n – число отсчетов, приходящихся на один период сигнала; $m_{S.min}$ и $m_{S.max}$ – минимальное и максимальное число периодов оцифрованного сигнала; φ_S – начальная фаза сигнала; z_{INT} – коэффициент деления интервала времени между отсчетами (для $z_{INT} = 1$ интерполяции нет); SNR – отношение сигнал/шум в децибелах; A_G и φ_G – соответственно амплитуда и начальная фаза второй гармоники сигнала.

2. Формирование массива данных $X_S[t]$ гармонического аналогового сигнала $u(t)$ по формуле $u(t) = \sin(2\pi f_S t + \varphi_S) + A_G \sin(4\pi f_S t + \varphi_G)$. Длительность формирования составляет $t = m_{S.min} \cdot n$.

3. Формирование массива данных $X_D[k]$ оцифрованного сигнала в точках $k = 1, 2, \dots, m_{S.min} \cdot n$. Если $m_{S.min} \cdot n$ не является целым числом, то вычисление массива данных $X_D[k]$ осуществляется до ближайшего целого значения $ent(m_{S.min} \cdot n)$.

4. Расчет значений и формирование массива шумовой составляющей $X_{SNR}[k]$ по случайному закону распределения

$$X_{SNR}[k] = [2 \cdot Random - 1] 10^{SNR/20}, \quad \text{где } k \in [1; ent(m_{S.min} \cdot n)].$$

В среде Delphi7 оператор *Random* генерирует случайное число в диапазоне $[0; 1]$. Для формирования как положительных, так и отрицательных значений в диапазоне $[-1; 1]$ необходимо заменить функцию *Random* на $2 \cdot Random - 1$. Множитель $10^{SNR/20}$ позволяет перейти от значений, заданных в децибелах, к значениям в относительных единицах.

5. Формирование массива данных $X_V[t]$ восстановленного сигнала $u_V(t)$ с помощью ряда Котельникова

$$u_V(t) = \sum_{k=0}^{ent(m_S \cdot n)} \left\{ [X_D[k] + X_{SNR}[k]] \frac{\sin[\pi(t-k)]}{\pi(t-k)} \right\}.$$

Значения элементов массива $X_V[t]$ представляют собой сумму сигнала и шума в точках $k = 1, 2, \dots, (m_{S,\min} \cdot n - 1), m_{S,\min} \cdot n$.

6. Поиск промежуточных точек интерполяции с шагом $\tau_{INT} = \Delta t / z_{INT}$, где Δt – расстояние между соседними отсчетами.

7. Формирование массива данных $X_{INT}[\tau_{INT}]$ сигнала $u_{INT}(\tau_{INT})$ с учетом интерполяции

$$u_{INT}(\tau_{INT}) = \sum_{k=0}^{ent(m_S \cdot n)} \left\{ \left[X_D[k] + X_{SNR}[k] \right] \frac{\sin[\pi(\tau_{INT} - k)]}{\pi(\tau_{INT} - k)} \right\}.$$

8. Формирование массива данных оконной функции $X_W[t]$. Если окон несколько, то последовательно определяется массив для каждого окна $X_{W1}[t], X_{W2}[t]$ и так далее до $X_{WR}[t]$, где R – общее количество окон.

9. Формирование массива данных $X_P[t]$, соответствующих наложению окна на интерполированный сигнал, т. е. $X_P[t] = X_W[t] X_{INT}[t]$. Если сглаживающих функций несколько, то формируются массивы $X_{P1}[t], X_{P2}[t]$ и так далее до $X_{PR}[t]$.

10. Определение среднеквадратического сигнала $U_{V,RMS}$ методом интегрирования

$$U_{V,RMS} = \sqrt{\frac{1}{m_{S,\min} \cdot n} \int_0^{m_{S,\min} \cdot n} X_P^2[\tau_{INT}] d\tau_{INT}}.$$

11. Формирование массива данных $X_{RMS}[U_{RMS}]$, соответствующих погрешности оценки среднеквадратического значения:

$$\Delta_{RMS} = \frac{k_W U_{V,RMS} - U_{RMS}}{U_{RMS}} 100 \% = \left(k_W \frac{U_{V,RMS}}{U_{RMS}} - 1 \right) 100 \%.$$

Здесь k_W – весовой коэффициент оконной функции, определяемый экспериментально; U_{RMS} – истинное значение СКЗ сигнала $u(t)$

$$U_{RMS} = 0,5(1 + A_G^2)^{1/2}.$$

12. Организация циклов по выбранным параметрам, вывод результатов расчетов на экран.

Программа позволяет строить семейство графиков для заданных значений начальной фазы. Изменяя число периодов сигнала, отсчетов на период, коэффициент деления и уровень второй гармоники, можно провести сравнительный анализ влияния дискретизации и эффективности интерполяции гармонического сигнала для базового прямоугольного окна и сглаживающих окон.

На рис. 3.1 представлены исходный (1) и восстановленные сигналы (2а и 2б) на коротком интервале $1,5T$ при 7 отсчетах и $KД = 10$. Точки отсчетов большие, а точки интерполяции – малые. Для снижения погрешности оценки СКЗ используют сглаживающие оконные функции, целое число периодов сигнала и интерполяцию рядом Котельникова.

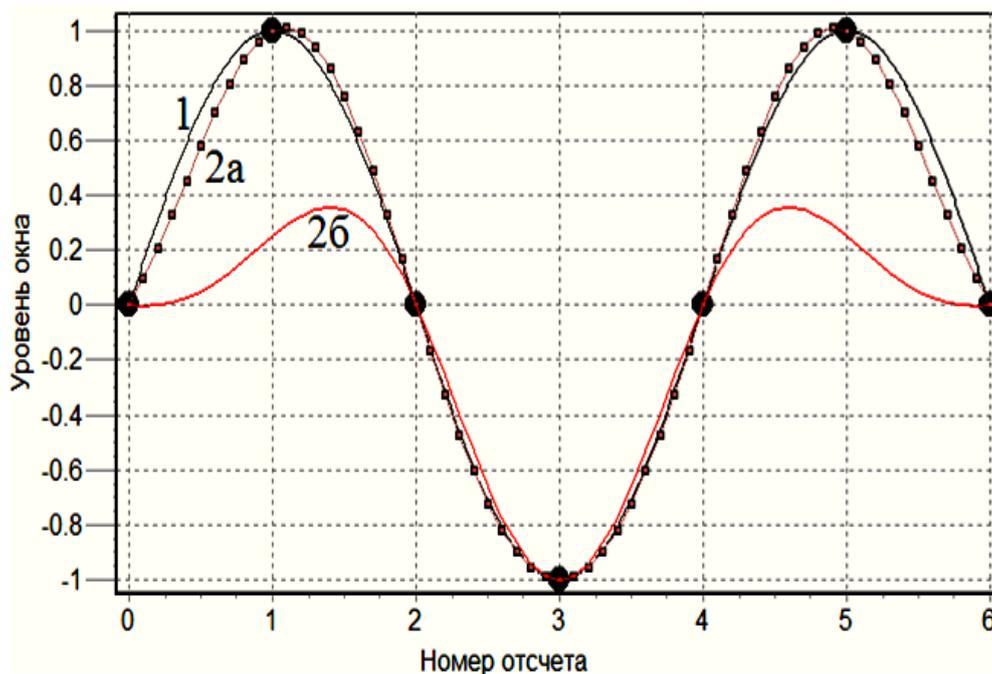


Рис. 3.1. Исходный (1) и восстановленные сигналы:
2а – без окна при $KД = 10$; 2б – с окном Ханна (интервал $1,5T$)

Погрешность Δ_{RMS} может быть представлена семейством линий, каждая из которых соответствует определенному значению начальной фазы сигнала (рис. 3.2). В локальных минимумах (узлах) интервал времени интегрирования равен целому числу, кратному полупериоду сигнала. Между узлами расположены локальные максимумы погрешности (пучности).

Не только оконная функция и интервал оценки оказывают влияние на оценку СКЗ сигнала, влияет также число интервалов интерполяции и отношение f_D / f_s . Увеличение количества промежуточных точек позволяет снижать погрешность лишь до определенного уровня. Темным фоном на рис. 3.3 в центральной части вдоль оси числа периодов показана зона минимальной теоретической методической погрешно-

сти. Влияние 2-й гармоники приводит к увеличению погрешности в узловых средних точках числа периодов (1,5; 2,5; ...) (рис. 3.4). К такому же результату, но только в области малых значений погрешности приводят шумы. Чем меньше значение погрешности, тем больше влияет отношение сигнал/шум (рис. 3.5).

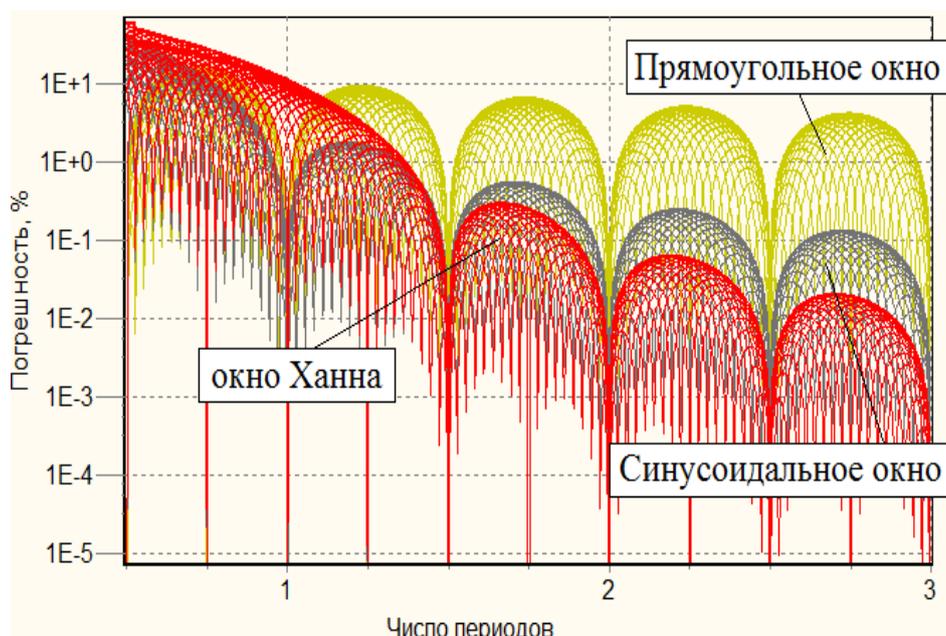


Рис. 3.2. Погрешности оценки СКЗ сигнала для разных окон

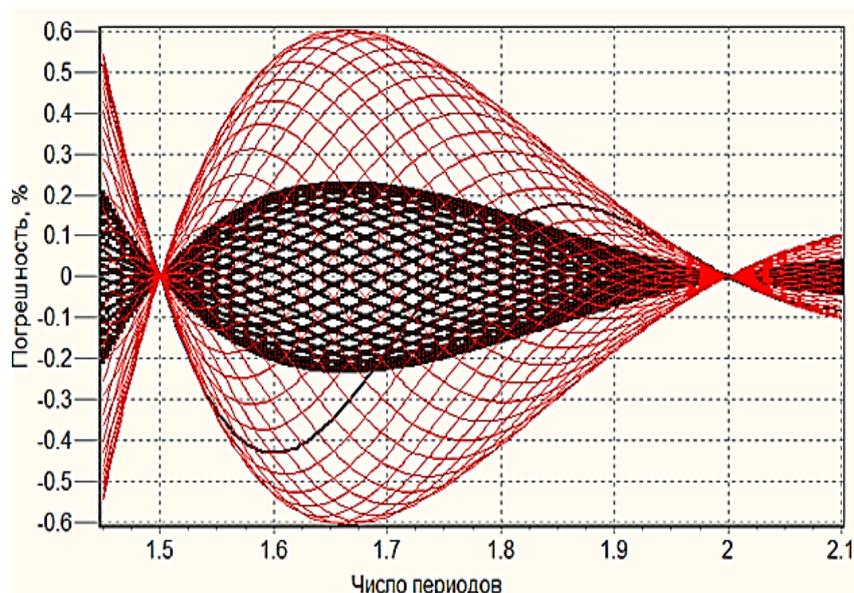


Рис. 3.3. Погрешность оценки СКЗ сигнала для окна Ханна при КД = 10 и минимальная методическая погрешность

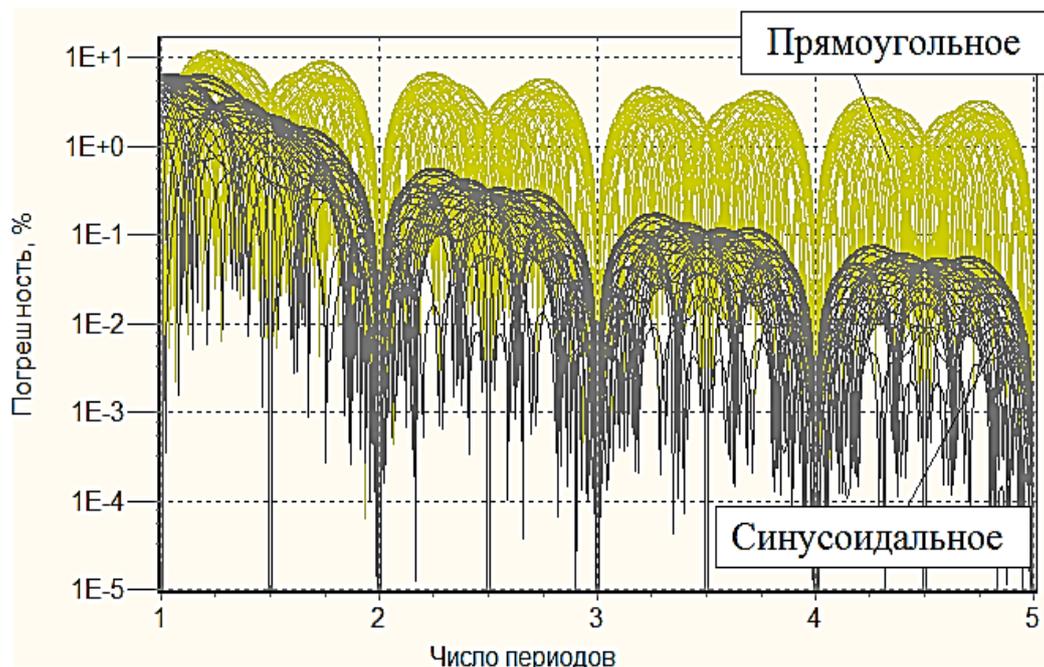


Рис. 3.4. Погрешности измерения СКЗ сигнала (3,8 точек на период) при уровне 2-й гармоники 10 % по отношению к первой

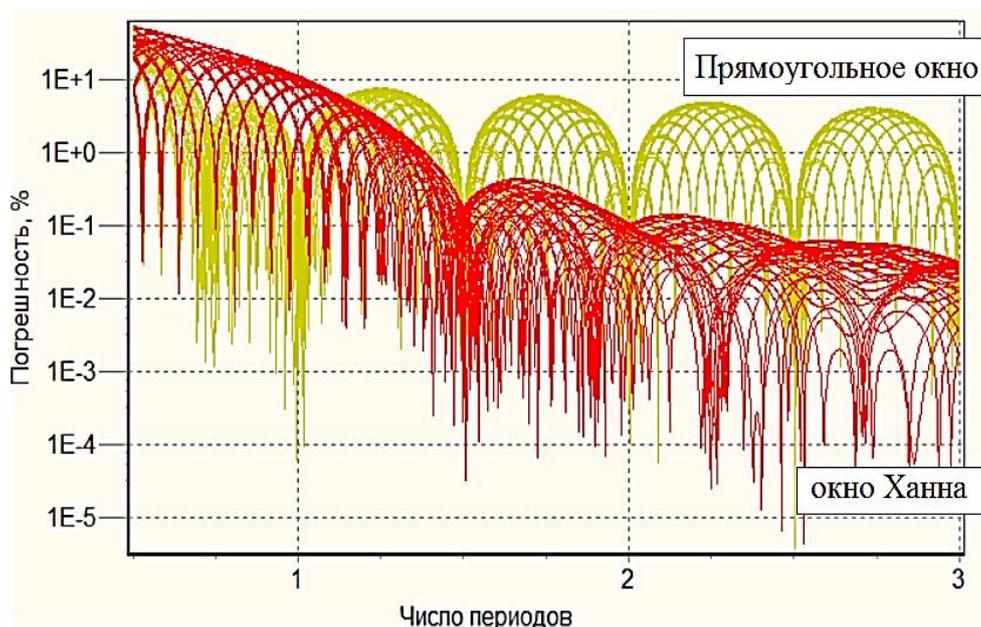


Рис. 3.5. Влияние уровня шума 20 дБ на погрешность оценки СКЗ

3.4. Программа моделирования

На рис. 3.6 изображен интерфейс программы, предназначенной для моделирования алгоритма определения СКЗ короткой реализации восстановленного сигнала.

На экране отображаются текущие параметры работы, сигналы (оцифрованный, восстановленный, интерполированный и др.) и семейства погрешностей.

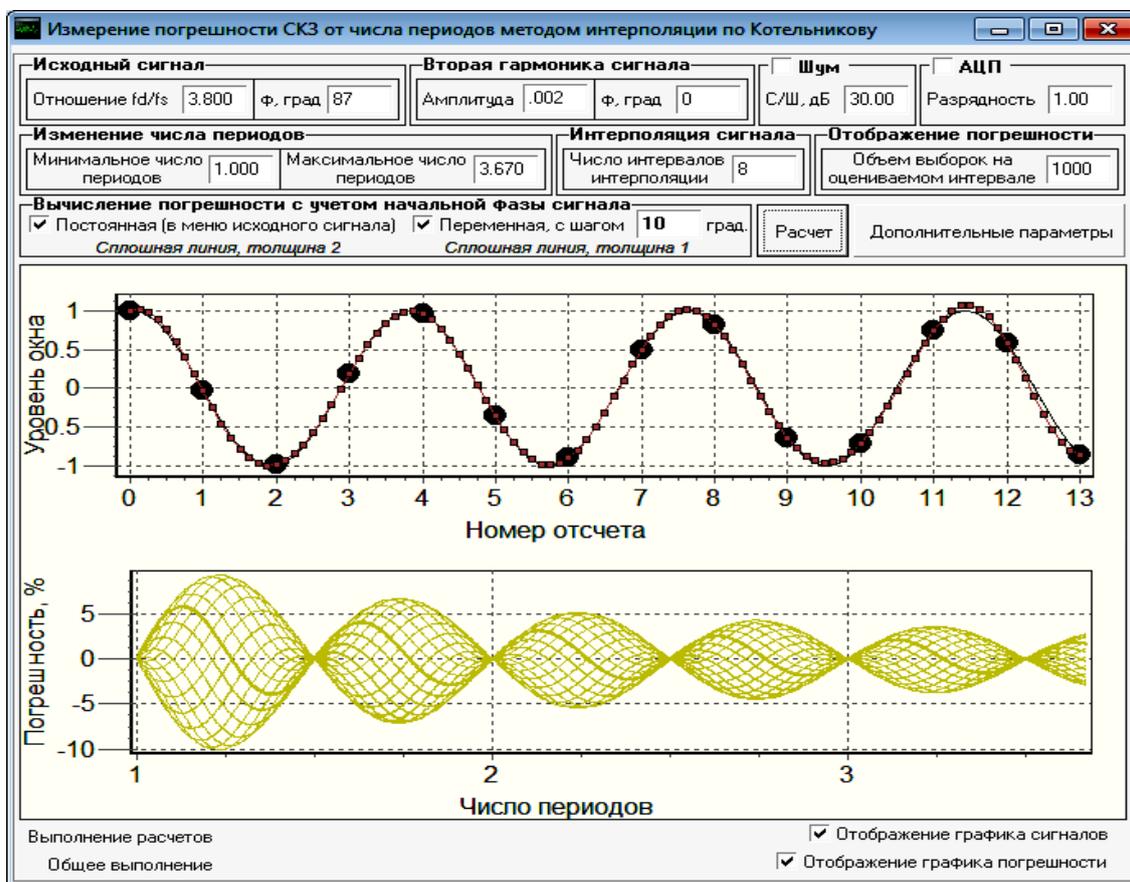


Рис. 3.6. Программа моделирования алгоритма определения СКЗ методом интегрирования и интерполяции

Основное меню разбито на 8 блоков: "Исходный сигнал", "Вторая гармоника сигнала", "Шум", "АЦП", "Изменение числа периодов", "Интерполяция сигнала", "Отображение погрешности" и "Вычисление погрешности с учетом начальной фазы сигнала".

В блоке "Исходный сигнал" расположены поля для ввода f_D/f_s (числа дискретных отсчетов на период) и начальной фазы сигнала. Отношение f_D/f_s не обязательно должно быть целым числом, оно вводится с точностью до третьего знака после запятой.

В блоке "Вторая гармоника сигнала" расположены поля для ввода значений уровня A_2 и начальной фазы φ_2 второй гармоники (рис. 3.7). Уровень второй гармоники задается с точностью до третьего знака после запятой.

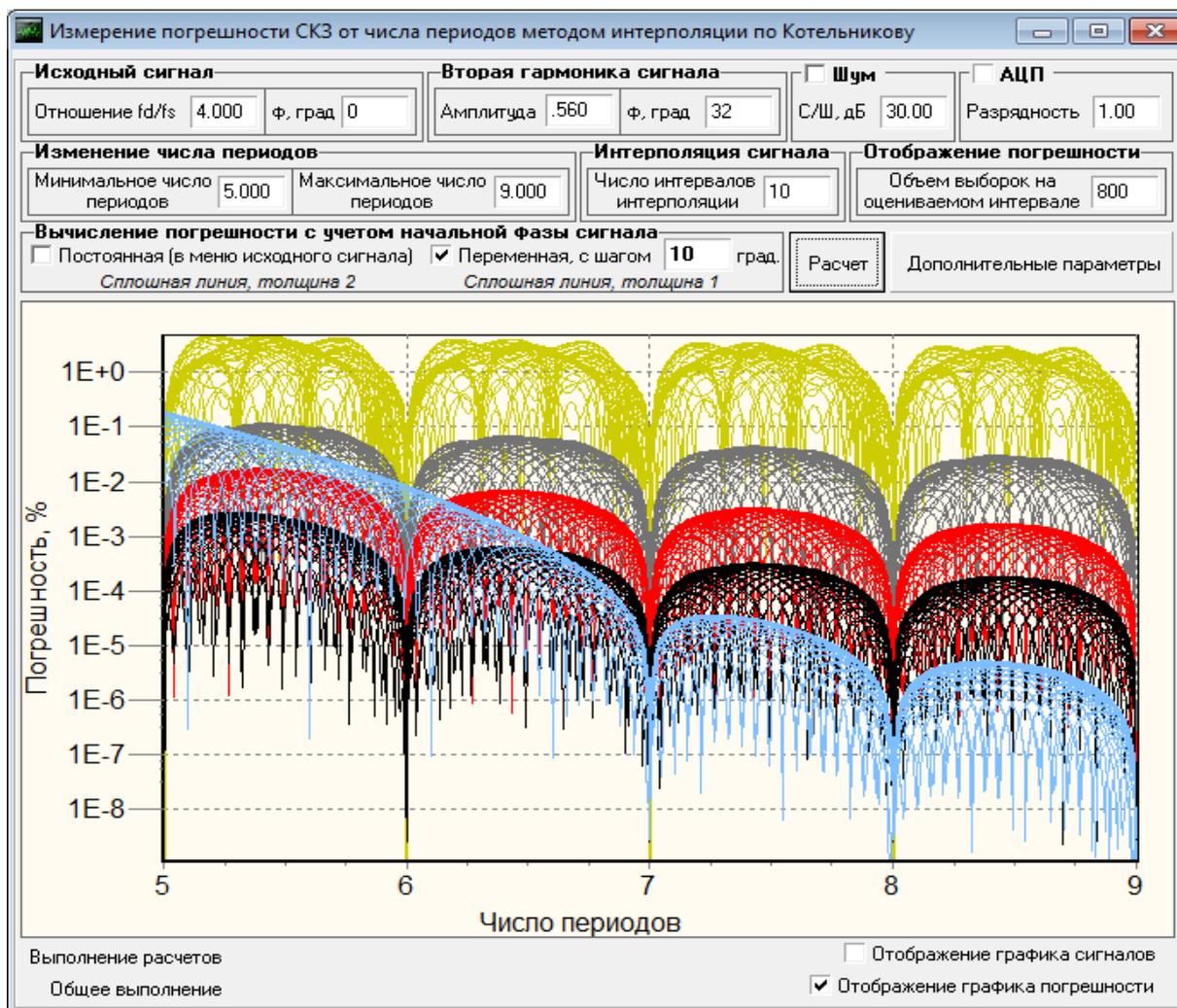


Рис. 3.7. Результаты моделирования для $A_2 = 0,56$ и $\varphi_2 = 32^\circ$

Блоки "Шум" и "АЦП" позволяют задавать соответственно отношение сигнал/шум в децибелах и разрядность АЦП. Изменения этих параметров можно увидеть не только на графиках погрешности, но и на графиках основного сигнала.

В блоке "Изменение числа периодов" задаются минимальное и максимальное числа периодов сигнала, по которым организован соответствующий цикл. От введенных значений зависит интервал интегрирования.

В блоке "Интерполяция сигнала" задается коэффициент деления между дискретными отсчетами, влияющими на результат, и вид интерполированного сигнала.

В блоке "Отображение погрешности" расположено поле, в котором задается требуемый объем выборок. Чем больше вводимое значение,

тем точнее будут отображаемые результаты, но тем большее число точек обрабатывается при построении семейств кривых погрешностей.

В блоке "*Вычисление погрешности с учетом начальной фазы сигнала*" расположены поля для ввода значения начальной фазы и опционального шага ее изменения. При активном поле "Постоянная (в меню основного сигнала)" моделирование производится для одного значения начальной фазы, задаваемой в меню исходного сигнала. На графике данная кривая будет отображаться более толстой линией. При активном поле "Переменная с шагом" моделирование циклическое для значений начальных фаз в диапазоне $[\varphi_s; 360]^\circ$.

В основном меню находятся кнопки "Расчет" и "Дополнительные параметры" и области для вывода графиков. Если результаты погрешности имеют широкий диапазон значений, то встроенный *zoot* позволяет увеличить рабочую область, не повторяя эксперимент.

Меню дополнительных параметров (рис. 3.8), как и основное меню, также состоит из блоков "Масштаб", "Дополнительные графики", "Метод интегрирования" и блоков для шести окон (прямоугольного, синусоидального, Ханна, Хэмминга, Блэкмана и Наталла).

В блоке "*Оконные функции*" реализовано 9 оконных функций: прямоугольная, синусоидальная, Ханна, Хэмминга, Блэкмана, Flat-Top, Наталла, Блэкмана-Харриса и Блэкмана-Наталла. Для выбранных активных окон строятся графики погрешностей, оконной функции, исходного и восстановленного сигналов, оцифрованного сигнала для минимального и максимального числа отсчетов, методической погрешности.

В блоке "*Дополнительные графики*" реализованы графики исходного, оцифрованного, восстановленного и интерполированного сигналов, а также график на выходе АЦП. Активные графики будут показаны при нажатии на кнопку "Расчет".

Блок "*Масштаб*" позволяет задать вид отображения сигнала в линейном или логарифмическом масштабе. Последнее целесообразно, если динамический диапазон изменения методической погрешности может достигать значений $10^3 - 10^6$.

В блоке "*Метод интегрирования*" представлены методы Симпсона, трапеций и прямоугольников.

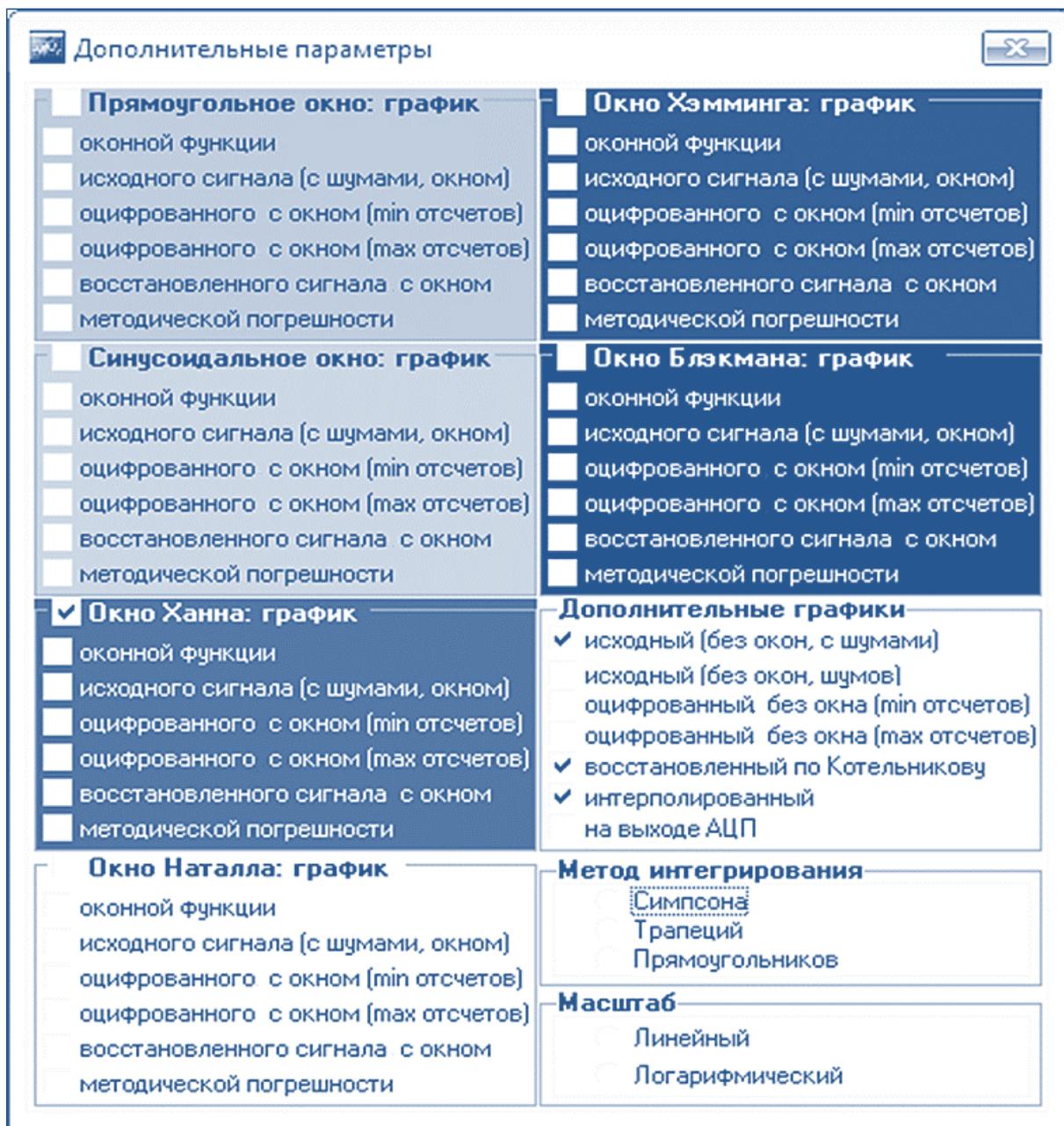


Рис. 3.8. Меню дополнительных параметров

3.5. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям осуществляется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить методы измерения СКЗ гармонического сигнала;
- изучить пользовательский интерфейс, все его возможности и органы управления;
- составить план экспериментальных исследований;

- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;

- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования.

3.6. Экспериментальные исследования

1. Апробация работы программы моделирования и ее пользовательского интерфейса

Апробируются блоки управления "Начальная фаза основного сигнала", "Изменение числа периодов", "Погрешность", "Вторая гармоника сигнала", "Третья гармоника сигнала" и "Вывод графиков".

Приобретаются практические навыки работы.

2. Выполнение типовых исследований погрешности оценки СКЗ сигнала с оценкой влияния:

- вида оконной функции;
- отношения частот дискретизации и сигнала (f_D/f_s);
- начальных фаз и амплитуд первой и второй гармоник сигнала;
- отношения сигнал/шум;
- числа оцениваемых периодов и интервалов интерполяции.

Для оценки методических погрешностей и влияния 2-й и 3-й гармоник сигнала измеряется модуль максимальной погрешности для различных отношений f_D/f_s с использованием табл. 3.1 – 3.3.

Таблица 3.1

Окно	Модуль максимальной погрешности для интервала T , %						
	[0,5; 1]	[1; 1,5]	[1,5; 2]	[2; 2,5]	[2,5; 3]	[3; 3,5]	[3,5; 4]
Прямоугольное							
Синусоидальное							
Ханна							
Хэмминга							
Блэкмана							
Наталла							

Таблица 3.2

Окно	Погрешность для уровня 2-й гармоники, %					
	0	1	2	5	10	20
Прямоугольное						
Синусоидальное						
Ханна						
Хэмминга						
Блэкмана						
Наталла						

Таблица 3.3

Окно	Погрешность для уровня 3-й гармоники, %					
	1	2	5	10	20	50
Прямоугольное						
Синусоидальное						
Ханна						
Хэмминга						
Блэкмана						
Наталла						

3. Исследование погрешности оценки СКЗ сигнала для комплексного влияния совокупности факторов (по выбору студентов).

Выберите комбинацию наиболее влияющих факторов и исследуйте границы максимальной погрешности для реальных условий работы.

3.7. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики и таблицы.
- Рекомендации и выводы по всем пунктам работы.

3.8. Контрольные вопросы к защите

1. Что называют временным окном?
2. Когда применяют прямоугольное окно?
3. Как расположены частотные компоненты для целого числа периодов сигнала?
4. Какими параметрами характеризуют окна?
5. Как оценить мощность сигнала и шумов?
6. Поясните алгоритм оценки среднеквадратического значения.
7. Как найти амплитудное значение гармонического сигнала?
8. Как зависит погрешность оценки СКЗ сигнала от длительности выборки?
9. Как зависит погрешность оценки СКЗ сигнала от объема выборки?
10. Как зависит погрешность оценки СКЗ сигнала от 2-й гармоники?
11. Как зависит погрешность оценки СКЗ сигнала от 3-й гармоники?
12. Что дает использование линейного и логарифмического масштаба?
13. Дайте рекомендации оценки СКЗ идеального гармонического сигнала с известной частотой и длительностью $0,5$ и $1,5T$.
14. Дайте рекомендации оценки СКЗ гармонического сигнала с неизвестной частотой и ожидаемой длительностью от $1,4$ до $2,2T$ и от $2,1$ до $3,4T$.
15. Дайте рекомендации оценки СКЗ гармонического сигнала с известной частотой длительностью $1,5$ и $3,0T$ при наличии искажений только по 2-й гармонике, только по 3-й гармонике, по 2-й и 3-й гармоникам.
16. Какие метрологические характеристики может обеспечить исследуемый виртуальный прибор?

Исследовательская практическая работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗИРОВАННОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ ДВУХТАКТНОЙ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

4.1. Цели исследований

1. Изучение пользовательского интерфейса и алгоритма работы программы моделирования.
2. Типовые исследования погрешности оценки частоты сигнала для различных окон и интервалов интегрирования с учетом погрешности дискретизации и интерполяции.
3. Исследование погрешности оценки частоты сигнала при комплексном влиянии нескольких факторов.

4.2. Методы интерполяции при измерении частоты сигнала

При использовании АЦП в процессе обработки данных можно учесть информацию о мгновенных значениях сигнала в каждой точке и за счет этого повысить помехозащищенность, быстродействие и точность измерений. Для этого можно использовать линейную интерполяцию между ближайшими дискретными отсчетами и усреднять результаты по совокупности измерений частоты, выполненных на нескольких уровнях начального и конечного монотонных интервалов, пригодных для вычислений.

Для линейной интерполяции между точками с координатами $(t_{N0}; U_{N0})$ и $(t_{N1}; U_{N1})$ интервал времени kT_C , равный целому числу k периодов сигнала T_C , можно вычислить по формуле

$$kT_C = NT_D + T_D \frac{U_0 - U_{N0}}{U_{N1} - U_{N0}}.$$

Здесь $N = \text{ent}(kT_D / T_C)$ – целое число отсчетов мгновенных значений сигнала, укладываемых в интервале времени kT_D ; U_0 – мгновенное значение из массива дискретных значений, полученных на начальном участке изменения сигнала; U_{N0} и U_{N1} – ближайшие к U_0 сверху и снизу мгновенные значения, выбранные из массива дискретных данных, полученных на конечном участке исследуемого сигнала (рис. 4.1).

Метод одноуровневой интерполяции может быть использован для измерения частоты сигнала с помощью ПК в том случае, если в процессе получения мгновенных значений не было заметного влияния помех. Когда помехами и шумами пренебречь нельзя, следует провести измерение частоты на нескольких уровнях, как показано на рис. 4.2, и затем усреднить результаты. При современных вычислительных возможностях ПК время, затрачиваемое на обработку данных, составит лишь незначительную долю от времени оцифровки нескольких периодов низкочастотного сигнала.

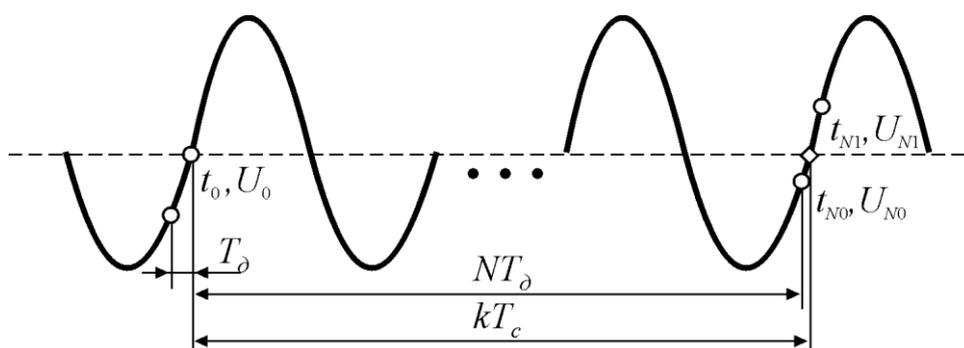


Рис. 4.1. Мгновенные отсчеты при одноуровневой интерполяции

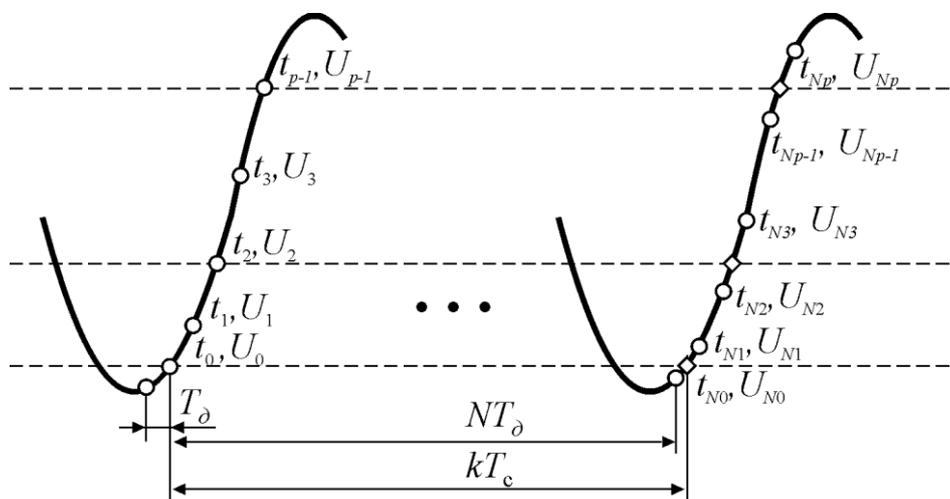


Рис. 4.2. Массив отсчетов при многоуровневой интерполяции

Предварительную обработку массива данных следует осуществлять для поиска плавных участков роста и спада периодического сигнала или на передних и задних фронтах импульсов. Например, можно искать участки плавного приращения или убывания отсчетов мгновенных значений.

4.3. Моделирование алгоритма измерения частоты методом многоуровневой интерполяции

Алгоритм предназначен для измерения частоты сигнала путем вычисления среднего значения периода сигнала по совокупности его дискретных отсчетов, полученных с помощью аналого-цифрового преобразователя методом многоуровневой интерполяции. В нормированном виде измеряется отношение частот сигнала и дискретизации $f_s/f_D = 1/n$, а также максимальная относительная погрешность оценки центральной частоты f_s . В данном алгоритме не требуется применения оконных функций, поскольку все вычисления проводятся только по данным восстановленного сигнала.

Программа моделирования содержит следующие шаги:

1. Инициализация переменных:

n – число отсчетов, приходящихся на один период несущего сигнала;

m_s – число периодов несущего сигнала;

φ_s – начальная фаза несущего сигнала в градусах;

z_{INT} – коэффициент деления интервала времени между отсчетами (для $z_{INT} = 1$ интерполяции нет);

SNR – отношение сигнал/шум в децибелах;

$M_{нач}$ и $m_{кон}$ – номера начального и конечного оцениваемого периода;

A_G и φ_G – амплитуда и начальная фаза 2-й гармоники;

q – общее количество уровней.

2. Формирование сигнала $u_s(t)$ и массива данных $X_s[t]$, где $t \in [0; m_s \cdot n]$. Сигнал $u_s(t)$ формируется по формуле $u_s(t) = \sin(2\pi f_s t + \varphi_s)$.

3. Формирование массива данных оцифрованного сигнала $X_D[k]$ по данным п. 2, где $t \in [1; m_s \cdot n]$. Если значение $m_s \cdot n$ является нецелым числом, то вычисление массива данных $X_D[k]$ осуществляется до округленного целого значения $ent(m_s \cdot n)$.

4. Расчет значений и формирование массива шумовой составляющей $X_{SNR}[k]$ по случайному закону распределения

$$X_{SNR}[k] = [2 \cdot \text{Random} - 1] 10^{-SNR/20}, \quad \text{где } k \in [1; ent(m_s \cdot n)].$$

Оператор `Random` генерирует случайное число в диапазоне $[0; 1]$. Для формирования как положительных, так и отрицательных значений

в диапазоне $[-1; 1]$ необходимо заменить функцию *Random* на $2 \cdot \text{Random} - 1$. Множитель позволяет перейти от значений, заданных в децибелах, к значениям в относительных единицах.

5. Формирование массива данных $X_V[t]$ восстановленного сигнала $u_V(t)$ с помощью ряда Котельникова

$$u_V(t) = \sum_{k=0}^{\text{ent}(m_S \cdot n)} \left\{ \left[X_D[k] + X_{SNR}[k] \right] \frac{\sin[\pi(t-k)]}{\pi(t-k)} \right\}.$$

Значения элементов массива $X_V[t]$ представляют собой сумму сигнала и шума в точках $k = 1, 2, \dots, (m_{S,\text{min}} \cdot n - 1), m_{S,\text{min}} \cdot n$.

6. Поиск промежуточных точек интерполяции, шаг между которыми определяется как $\tau_{INT} = \Delta t / z_{INT}$, где Δt – расстояние между соседними дискретными отсчетами.

7. Формирование массива данных $X_{INT}[\tau_{INT}]$ сигнала $u_{INT}(\tau_{INT})$ с учетом интерполяции

$$u_{INT}(\tau_{INT}) = \sum_{k=0}^{\text{ent}(m_S \cdot n)} \left\{ \left[X_D[k] + X_{SNR}[k] \right] \frac{\sin[\pi(\tau_{INT} - k)]}{\pi(\tau_{INT} - k)} \right\}.$$

8. Нахождение точек, расположенных снизу и сверху относительно нулевого уровня.

9. Определение частоты методом многоуровневой интерполяции.

10. Линейная интерполяция между элементами $U_m[i]$ и $U_{Nm}[i]$.

$$\Delta_F = \Delta_F + \frac{\Delta T_{w.f}}{q} \frac{U_m[i] - U_{Nm}[i]}{U_{Nm}[i+1] - U_{Nm}[i]}.$$

11. Определение отношения частот дискретизации и восстановленного сигнала по формуле $(f_D / f_S)_V = T_N / T_V$ и значения относительной погрешности оценки частоты $\Delta(f_D / f_S)_V = [(f_D / f_S)_V - n] / n \cdot 100 \%$.

Представленные в алгоритме формулы используются для определения отношения частоты дискретизации к частоте восстановленного сигнала с использованием ряда Котельникова. Погрешность оценки отношения f_D / f_S зависит от различных параметров: числа отсчетов на периоде n , числа периодов m_S , начальной фазы φ_S , интервалов интерполяции z_{INT} , числа уровней, отношения сигнал/шум.

При определении частоты важными будут зависимости погрешности от числа отсчетов на периоде, которые могут быть представлены

в линейном или логарифмическом масштабе. Погрешность оценки отношения f_D / f_S зависит от выбора рабочих "фронтов", которые можно смещать к краям для увеличения базы измерения или к центру для уменьшения влияния искажений в начале и конце интервала восстановления сигнала (рис. 4.3). Влияет также выбор растущих или спадающих фронтов. Правильный выбор позволяет получить значение частоты с методической погрешностью от $10^{-8}\%$ при 6 – 10 отсчетах на периоде.

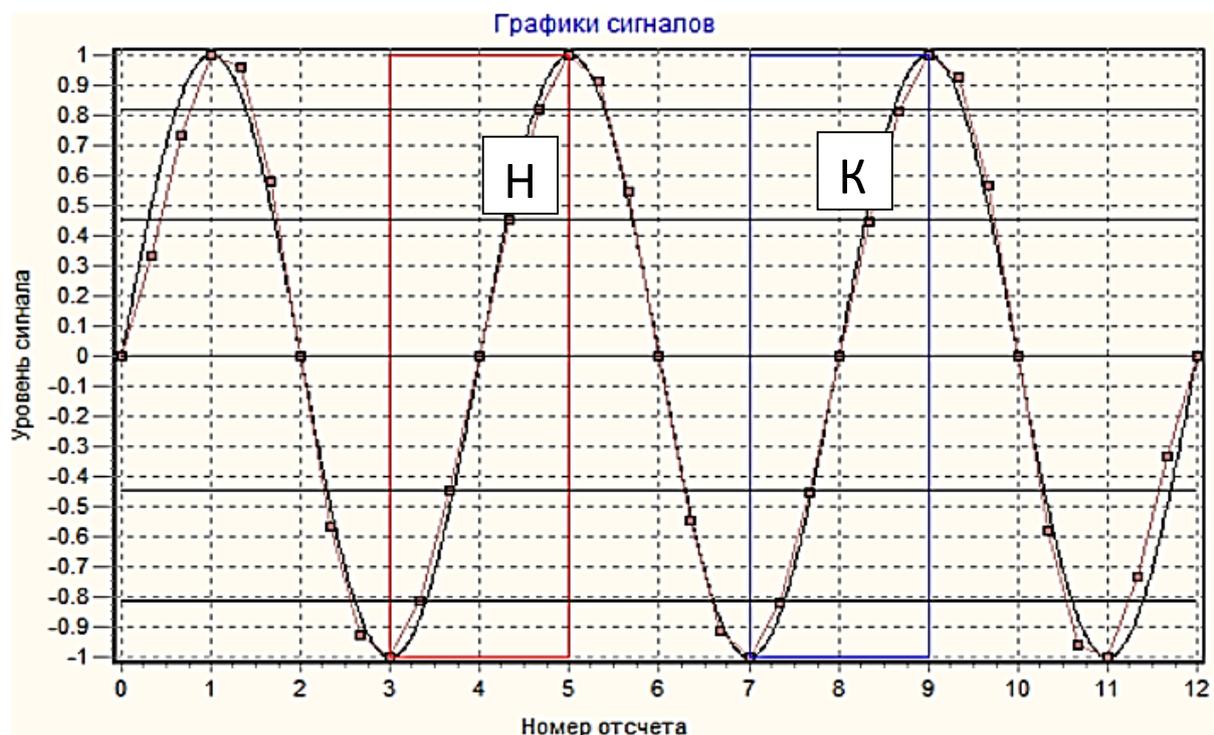


Рис. 4.3. Начальный (Н) и конечный (К) участки роста сигнала со сдвигом на период

Отношение С/Ш и коэффициент интерполяции напрямую оказывают влияние на погрешности: при увеличении С/Ш и числа интервалов погрешность оценки частоты уменьшается.

Оценка частоты может быть осуществлена только в условиях влияния малых уровней шумов, когда отношение С/Ш > 30 дБ и более (рис. 4.4). При больших шумах погрешность резко возрастает.

Число периодов сигнала также влияет на изменение погрешности: при увеличении числа периодов погрешность оценки частоты уменьшается. Уменьшение погрешности при смещении в центр объясняется уменьшением влияния искажений на краях восстановленного сигнала.

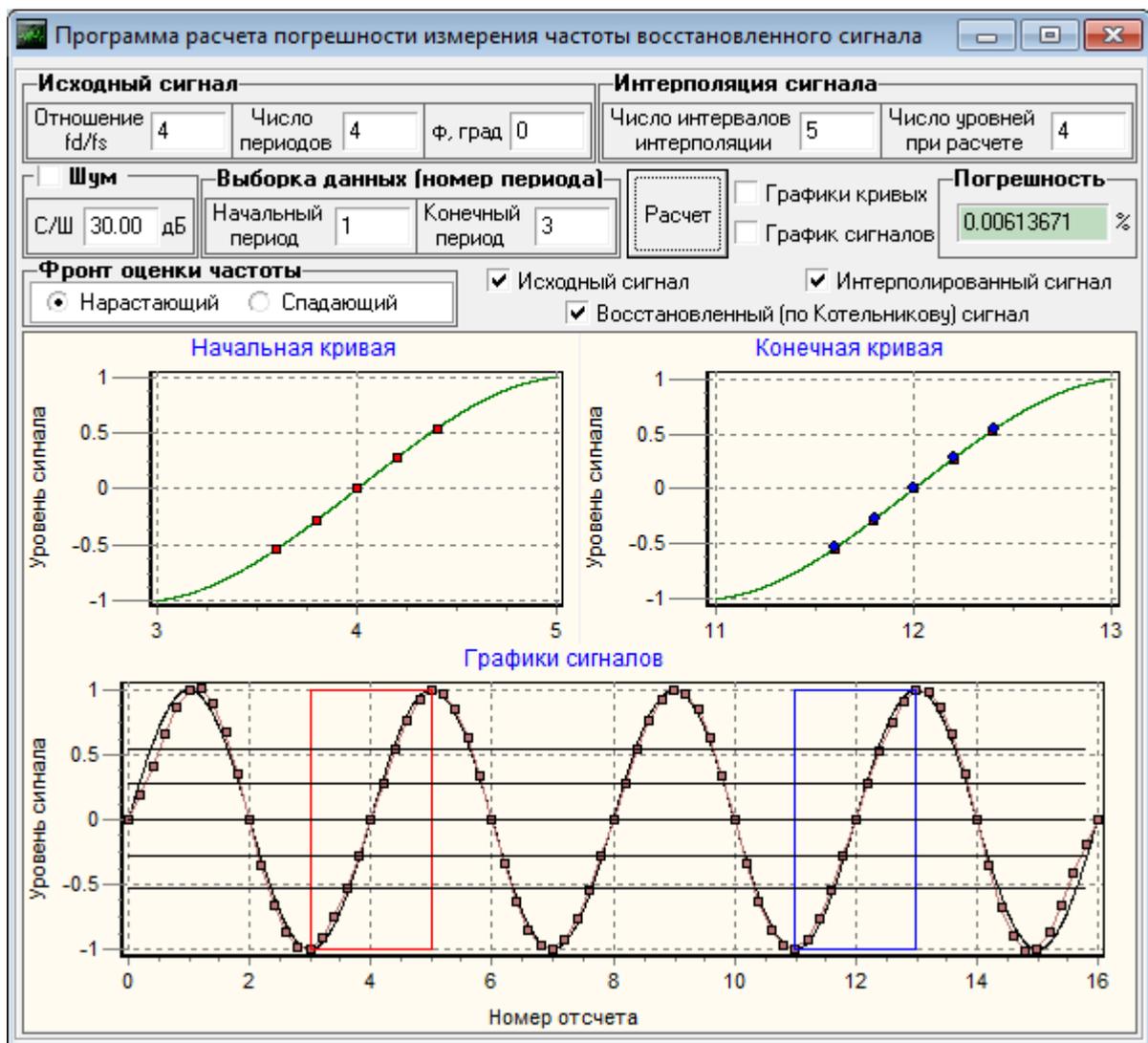


Рис. 4.4. Программа моделирования определения частоты сигнала методом многоуровневой интерполяции

На рис. 4.4 и 4.5 изображены рабочие окна программы, моделирующей алгоритм определения частоты методом многоуровневой интерполяции. На экране отображаются текущие параметры работы алгоритма, сигналы (исходный, восстановленный, интерполированный) и погрешность.

Основное меню разбито на 5 блоков: "Исходный сигнал", "Интерполяция сигнала", "Фронт оценки частоты", "Шум" и "Выборка данных (номер периода)". Кроме этого имеется дополнительный блок "Погрешность" – вывод результатов моделирования в процентах.

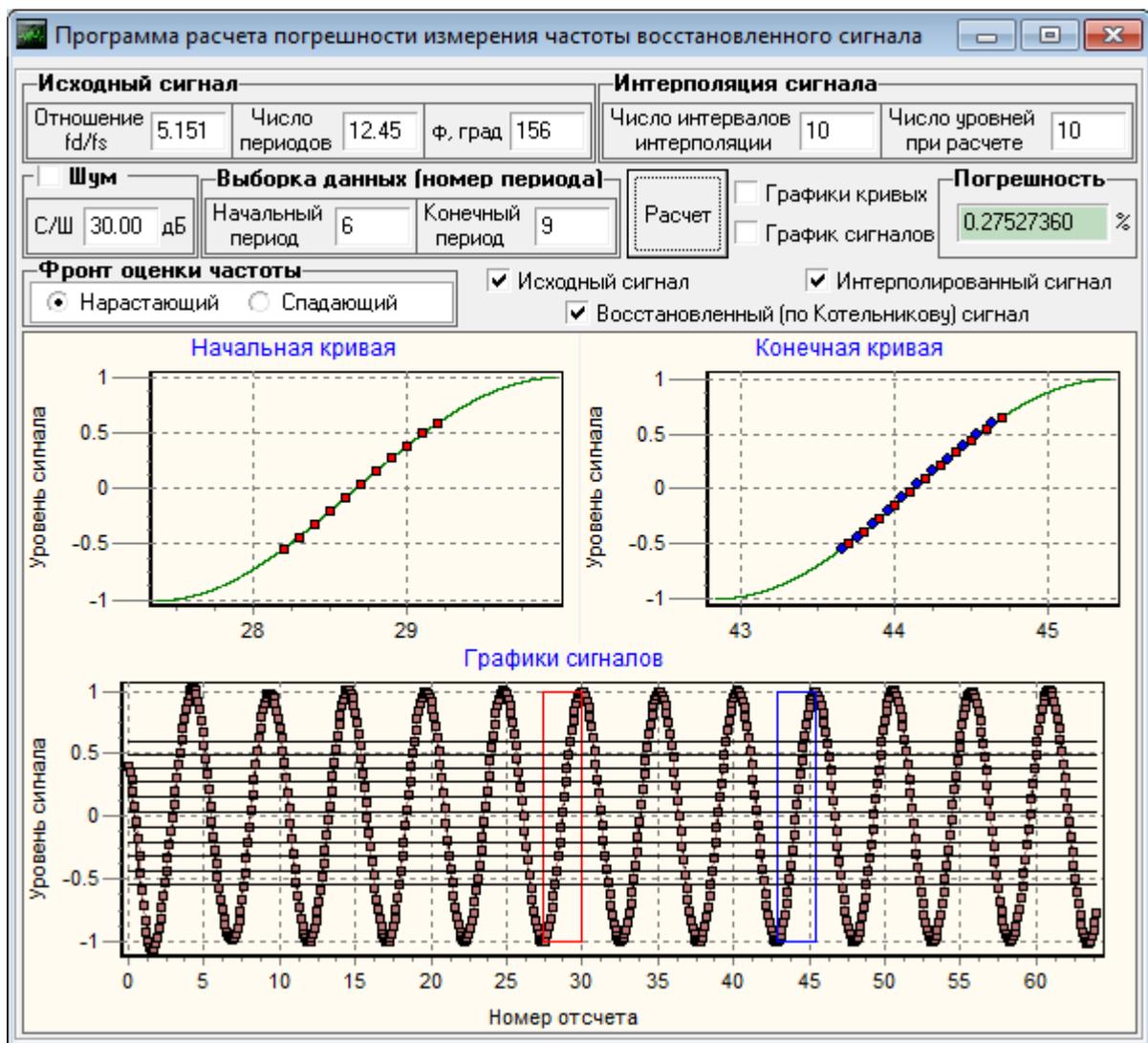


Рис. 4.5. Результаты моделирования для $f_D/f_s = 5,151$, 12,45 периодов и $\varphi_s = 136^\circ$

В блоке "Исходный сигнал" расположены поля для ввода отношения частот дискретизации и сигнала f_D/f_s (числа дискретных отсчетов), числа периодов и значения начальной фазы сигнала. Отношение f_D/f_s и число периодов не обязательно должно быть целым числом, оно вводится с точностью до третьего знака после запятой. Например, результаты моделирования для $f_D/f_s = 5,151$, 12,45 периодов и начальной фазы $\varphi_s = 156^\circ$ показаны на рис. 4.5.

В блок "Интерполяция сигнала" заносят значения числа интервалов интерполяций и числа уровней при расчете значений погрешности. Число уровней соответствует числу выделенных точек в областях "Начальная кривая" и "Конечная кривая" соответственно, а также

числу изображаемых горизонтальных линий в области "Графики сигналов". Эти линии необходимы для определения границ диапазона, в котором расположены используемые при расчете точки интерполяции.

Блок "Фронт оценки частоты" позволяет выбрать нарастающий и спадающий фронты (рис. 4.6).

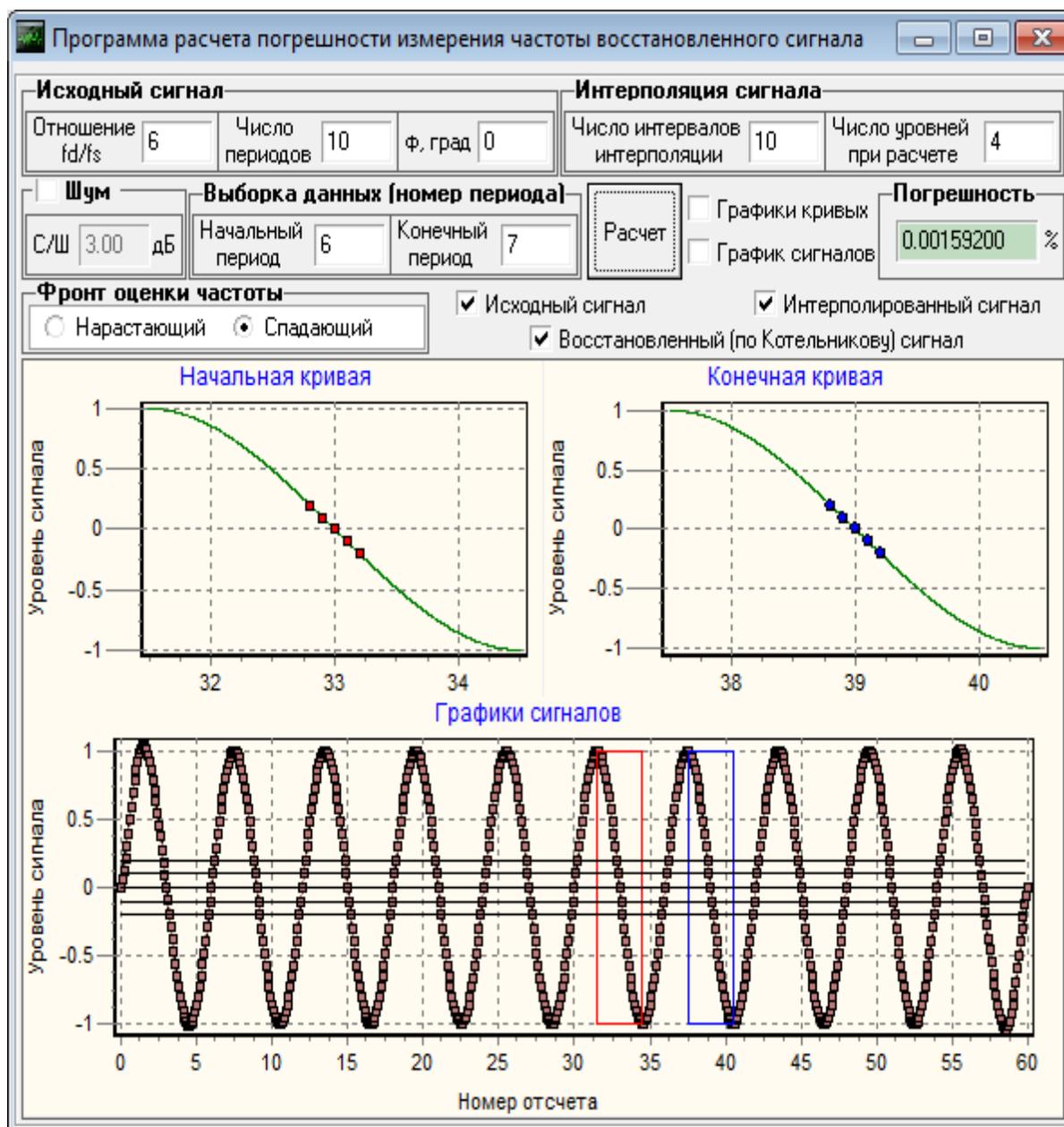


Рис. 4.6. Оценка частоты для спадающего фронта

Блок "Шум" позволяет задавать отношение сигнал/шум в децибелах.

Блок "*Выборка данных (номер периода)*" содержит поля для ввода оцениваемого номера периода. В зависимости от введенных значений смещаются две прямоугольные области на графике сигнала:

- область, соответствующая номеру начального периода;
- область, соответствующая номеру конечного периода.

В основном меню находятся кнопки "Расчет", "Дополнительные параметры" и области для вывода графиков. Если результаты погрешности имеют широкий диапазон значений, то встроенный *zoom* позволяет увеличить рабочую область, не повторяя эксперимент. Кроме этого имеется опциональный вывод графиков исходного, интерполированного и восстановленного сигналов. Активное поле "Графики кривых" позволяет выводить только графики начальной и конечной кривых, а поле "График сигналов" – только графики вышеуказанных сигналов.

4.4. Программа моделирования

На экране отображаются текущие параметры работы алгоритма, наборы сигналов (оцифрованный, восстановленный, интерполированный, окно) и семейства погрешностей.

Основное меню разбито на 5 блоков: "Исходный сигнал", "Интерполяция сигнала", "Шум", "*Выборка данных (номер периода)*" и "Фронт оценки частоты". Кроме этого имеется дополнительный блок "Погрешность" – вывод результатов моделирования в процентах.

В блоке "*Исходный сигнал*" расположены поля для ввода отношения частот дискретизации и сигнала f_D / f_S (числа дискретных отсчетов), числа периодов и значения начальной фазы сигнала. Отношение f_D / f_S и число периодов не обязательно должны быть целым числом, они вводятся с точностью до третьего знака после запятой.

В блоке "*Интерполяция сигнала*" для расчета погрешности устанавливаются значения числа интервалов интерполяций и числа уровней. Число уровней соответствует числу однотонных точек в областях "Начальная кривая" и "Конечная кривая" соответственно, а также числу изображаемых горизонтальных линий в области "Графики сигналов". Эти линии необходимы для определения границ диапазона, в котором расположены используемые при расчете точки интерполяции.

Блок "*Выборка данных (номер периода)*" содержит поля для ввода выбранных номеров периода при расчете частоты. В зависимости от

введенных значений показано расположение двух участков возрастания сигнала, между которыми определяется период искомой частоты: красного цвета – область, соответствующая номеру начального периода, и синего цвета – область, соответствующая номеру конечного периода.

Блок "*Фронт оценки частоты*" позволяет выбрать нарастающий и спадающий фронты.

На основном меню находятся кнопки "Расчет", "Дополнительные параметры" и области для вывода графиков. Если результаты погрешности имеют широкий диапазон значений, то встроенный *zoom* позволяет увеличить рабочую область, не повторяя эксперимент. Кроме этого имеется опциональный вывод графиков исходного, интерполированного и восстановленного сигналов. Активное поле "Графики сигналов" позволяет выводить только графики начальной и конечной кривых, а поле "График сигналов" – только графики вышеуказанных сигналов.

4.5. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить пользовательский интерфейс, все его возможности и органы управления;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования.

4.6. Экспериментальные исследования

1. Типовые исследования погрешности оценки частоты сигнала

Программа позволяет строить графики сигналов (исходный, восстановленный, интерполированный), а также задавать и оценивать влияние следующих параметров и условий работы:

- отношение частот дискретизации и сигнала;

- число периодов сигнала;
- начальную фазу сигнала;
- число уровней интерполяции;
- число интервалов интерполяции;
- требуемое отношение сигнал/шум;
- рабочий фронт сигнала – нарастающий или спадающий.

Методические погрешности оценивают при средних и крайних положениях начального и конечного периодов расчета, для целых и дробных значений f_D / f_S и периодов (интервалов выборки отсчетов) (табл. 4.1, 4.2).

Также исследуются погрешности в зависимости от уровня шума и начальной фазы сигнала для разного числа уровней (от 2 до 20), предполагаемых в диапазоне от $-0,6$ до $+0,6$.

Таблица 4.1

Число периодов	Погрешность при $f_D / f_S = 3$ для числа интервалов интерполяции						
	3	5	7	10	15	20	30
2 – 2,5							
4 – 4,5							
8 – 8,5							
12 – 12,5							
16 – 16,5							
20 – 20,5							

Таблица 4.2

Число периодов	Погрешность при $f_D / f_S = var$ для числа интервалов интерполяции						
	2,7	3,0	3,3	4,4	5,5	7,7	10,3
2 – 2,5							
4 – 4,5							
8 – 8,5							
12 – 12,5							
16 – 16,5							
20 – 20,5							

2. Исследование погрешности оценки СКЗ сигнала при комплексном влиянии совокупности факторов (по выбору студентов).

Выберите комбинацию наиболее влияющих факторов и исследуйте границы максимальной погрешности для реальных условий работы.

4.7. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики и таблицы.
- Рекомендации и выводы по всем пунктам работы.

4.8. Контрольные вопросы к защите

1. Поясните практические результаты исследований.
2. Как зависит погрешность оценки частоты сигнала от длительности выборки?
3. Как зависит погрешность оценки частоты сигнала от объема выборки?
4. Как зависит погрешность оценки частоты сигнала от относительного уровня 2-й гармоники?
5. Как зависит погрешность оценки частоты сигнала от относительного уровня 3-й гармоники?
6. Что дает использование линейного и логарифмического масштаба?
7. Дайте рекомендации оценки частоты гармонического сигнала длительностью $0,5$ и $1,5T$.
8. Дайте рекомендации оценки частоты гармонического сигнала с неизвестной частотой и ожидаемой длительностью от $1,4$ до $2,2T$ и от $2,1$ до $3,4T$.
9. Как выбрать отношение частот дискретизации и сигнала?
10. Как влияет на погрешность нецелое число периодов сигнала?
11. Как влияет на погрешность начальная фаза оцифровки сигнала?
12. Как влияет на погрешность число уровней интерполяции?

13. Как выбрать число интервалов интерполяции?
14. Какое отношение сигнал/шум требуется для измерений с заданной методической погрешностью?
15. Как влияет нарастающий или спадающий рабочий фронт сигнала?
16. Поясните алгоритм оценки частоты сигнала.
17. Зачем нужна многоуровневая интерполяция?
18. Зачем нужна двухтактная интерполяция?
19. Какие метрологические характеристики может обеспечить исследуемый виртуальный прибор?

Исследовательская практическая работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА ДИСКРЕТИЗИРОВАННОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ ДВУХТАКТНОЙ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

5.1. Цели исследований

1. Изучение алгоритма работы программы моделирования и ее пользовательского интерфейса.
2. Исследование погрешности оценки сдвига фазы для различных условий дискретизации и интерполяции.
3. Исследование погрешности оценки фазового сдвига сигнала при комплексном влиянии нескольких факторов.

5.2. Теоретические сведения

Для нахождения методом одноуровневого или многоуровневого интерполирования при временной задержке или сдвиге фазы сигнала нужен двухканальный аналого-цифровой преобразователь и вычислитель, в качестве которого можно использовать ПК (рис. 5.1).

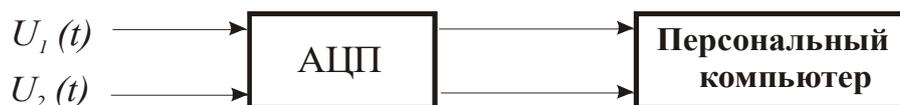


Рис. 5.1. Схема измерения разности фаз с помощью АЦП и ПК

По полученным данным на выходе АЦП необходимо провести нормировку мгновенных значений сигналов, при которой каждое значение делится на среднеквадратическое значение сигнала. После выполнения процедуры нормировки всех значений в обоих каналах временная задержка между двумя идентичными по форме сигналами может определяться на любом уровне. На рис. 5.2 показан принцип определения временного сдвига между двумя идентичными по форме сигналами.

При использовании линейной интерполяции между точками U_{20} (момент времени t_{20}) и U_{21} (момент времени t_{21}) задержку можно вычислить по формуле

$$\tau_0 = DT_\delta + T_\delta \frac{U_{10} - U_{20}}{U_{21} - U_{20}},$$

где $D = \text{ent}(\tau_0 / T_\delta)$ – целое число отсчетов (остаток отбрасывается) мгновенных значений сигнала, укладывающихся в интервале времени τ_0 ; U_{10} – минимальное мгновенное значение из массива дискретных данных, полученных на начальном участке изменения сигнала; U_{20} и U_{21} – ближайшие к U_{10} соответственно снизу и сверху мгновенные значения, выбранные из массива дискретных данных, полученных для второго канала.

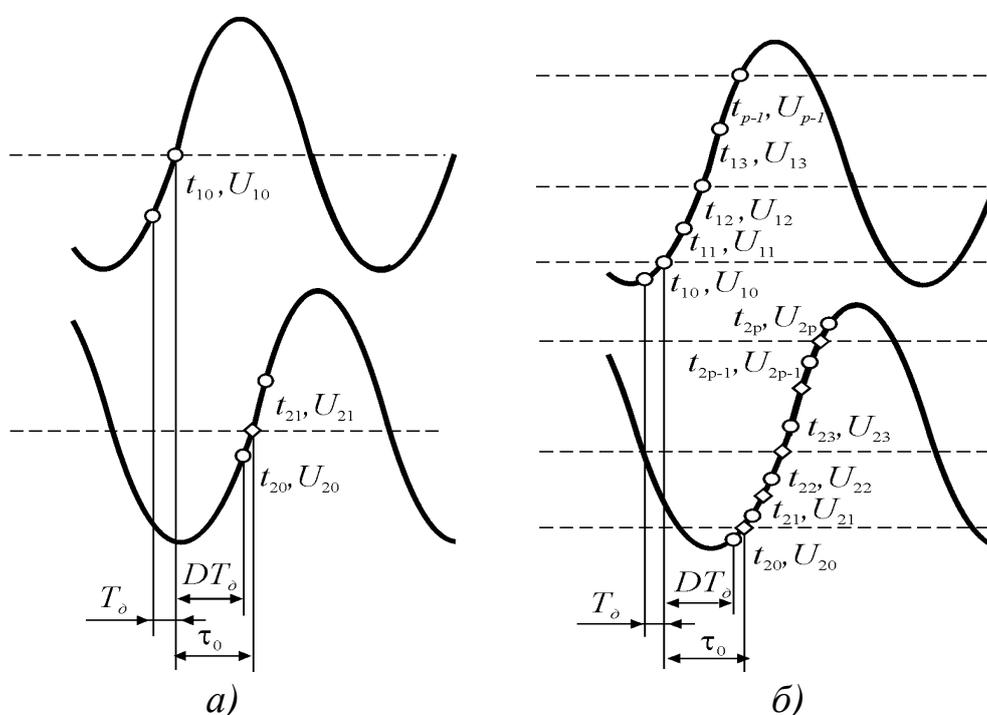


Рис. 5.2. Получение массива мгновенных отсчетов на выходе АЦП при одноуровневой (а) и многоуровневой (б) интерполяции

Среднее значение задержки можно найти по формуле

$$\bar{\tau} = DT_{\delta} + \frac{T_{\delta}}{q} \sum_m \frac{U_{1m} - U_{2m}}{U_{2m+1} - U_{2m}},$$

где $q = \text{round}(p/2)$ – количество уровней измерения, $m = 0, 2, 4 \dots 2(q-1)$.

Тогда разница фаз между сигналами будет находиться по выражению

$$\bar{\varphi} = 2\pi \frac{\bar{\tau}}{T} = 2\pi \left(\frac{NT_{\delta}}{T} + \frac{T_{\delta}}{Tq} \sum_m \frac{U_{1m} - U_{2m}}{U_{2m+1} - U_{2m}} \right). \quad (*)$$

5.3. Алгоритм и интерфейс программы моделирования измерения сдвига фазы дискретизированного сигнала

Алгоритм содержит следующие шаги:

1. В соответствии с задачами исследований формируются и оцифровываются два гармонических колебания с заданным сдвигом фаз, выбираются параметры.

2. Оцифровываются сигналы в измеряемом и опорном каналах.

3. Для получения промежуточных точек и повышения разрешающей способности во времени осуществляется 1-й такт интерполяции с использованием функции $\sin(x)/x$.

4. Формируются массивы данных опорного и восстановленного сигналов с включением дополнительных точек интерполяции.

5. Выбираются рабочие участки периодов для оценки сдвига фазы, а также число уровней и интервалов интерполяции.

6. Оценивается частота сигнала, и в обоих каналах вычисляется среднеквадратическое значение, производится нормировка значений (каждое значение делится на СКЗ, соответствующее данному каналу).

7. Находятся сдвинутые по фазе точки, расположенные снизу и сверху относительно исходного уровня.

8. Осуществляется 2-й такт линейной интерполяции с оценкой времени задержки на каждом рабочем уровне.

9. Определяется усредненный фазовый сдвиг многоуровневой интерполяции по формуле (*).

10. Оценивается погрешность измерения сдвига фазы относительно исходных данных.

На рис. 5.3 изображен интерфейс программы для моделирования алгоритма определения частоты методом многоуровневой двухтактной интерполяции.

Для трех выбранных периодов при отношении частоты дискретизации к частоте сигнала, равном 3,3, получим около 10 отсчетов в опорном и измеряемом каналах. Положение точек отсчетов совпадает с положением цифр 0 – 9 на графиках опорного и исследуемого сигнала. Каждый интервал между отсчетами разбит на 6 частей, т. е. на периоде с равномерным шагом расположено 20 точек. Получается шаг $360/20 = 18^\circ$. Между точками с шагом 18° осуществляется линейная интерполяция путем вычислений положения точки, сдвинутой по фазе.

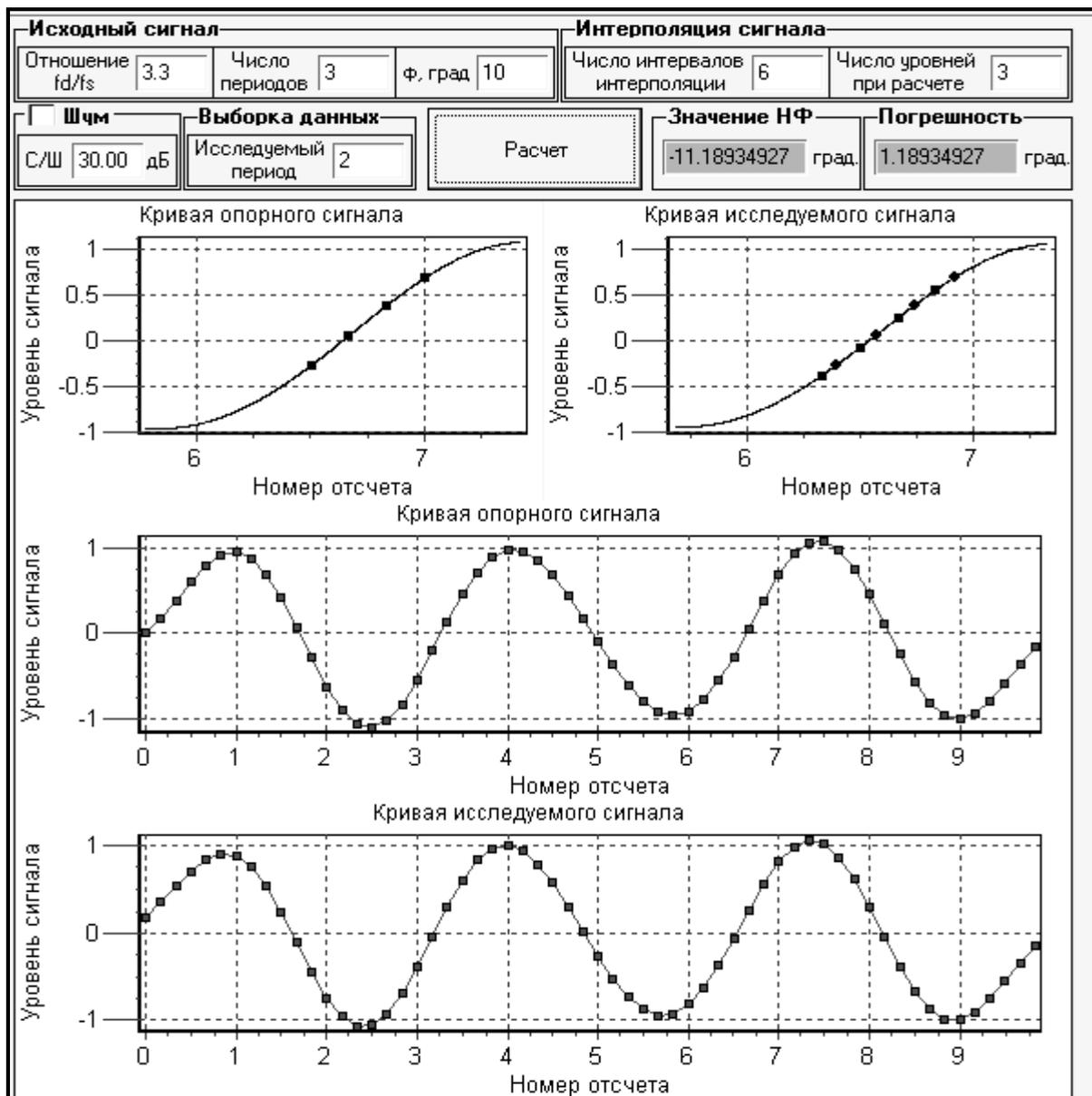


Рис. 5.3. Интерфейс программы моделирования

Основное меню разбито на блоки: "Исходный сигнал", "Интерполяция сигнала", "Шум", "Выборка данных (исследуемый номер периода)", "Значение фазы" (найденное) и "Погрешность" (в градусах) (рис. 5.4).

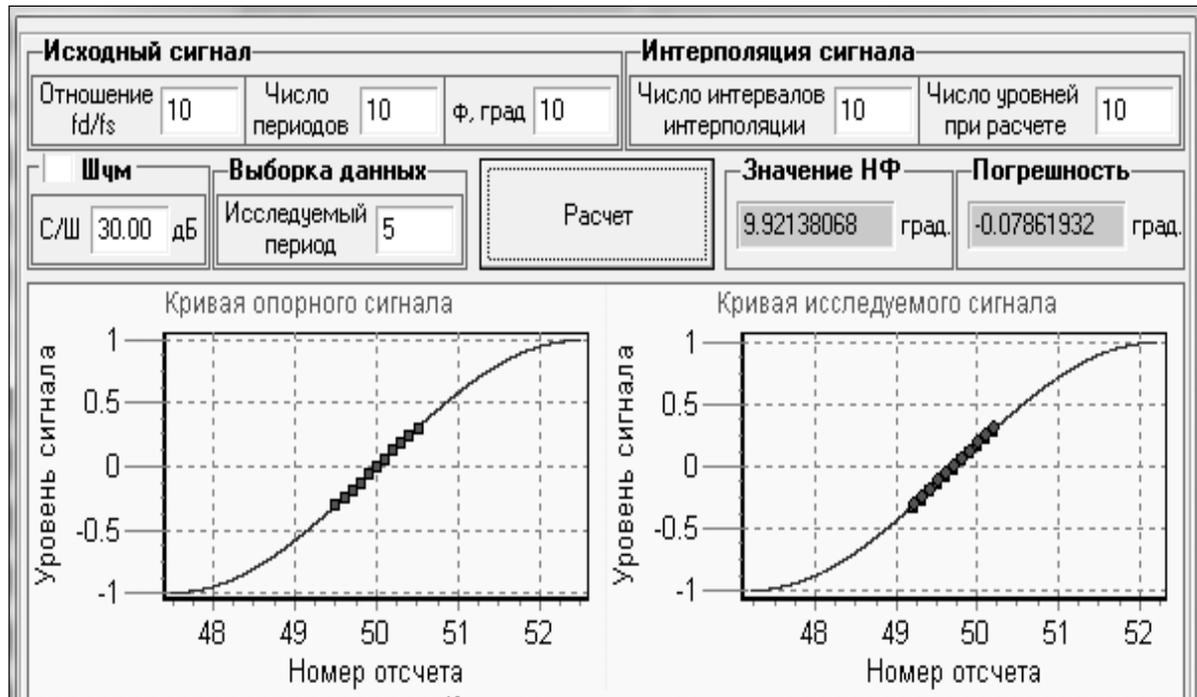


Рис. 5.4. Пример оценки сдвига фазы

В блоке "Исходный сигнал" расположены поля для ввода отношения частот дискретизации и сигнала f_D / f_s , числа периодов и исходное значение сдвига фазы сигнала. Отношение f_D / f_s и число периодов не обязательно должны быть целыми числами, они вводятся с точностью до третьего знака после запятой.

В блок "Интерполяция сигнала" заносятся значения числа интервалов интерполяций и числа уровней при расчете значений погрешности.

В блоке "Шум" задается отношение сигнал/шум в децибелах.

В основном меню находится кнопка "Расчет" для запуска программы и области вывода графиков. Если результаты погрешности имеют широкий диапазон значений, то встроенный *zoom* позволяет увеличить рабочую область, не повторяя эксперимент.

5.4. Подготовка и выполнение исследований

Подготовка к исследованиям осуществляется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить пользовательский интерфейс, его возможности и органы управления;
- составить план экспериментальных исследований для оценки влияния на погрешность, сдвига фазы сигнала частного и совместного влияния условий работы;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования. Типовые исследования проводятся для оценки влияния следующих факторов (табл. 5.1, 5.2):

- дробного и целого отношения f_D/f_s ;
- дробного и целого числа периодов сигнала;
- положения (номера) рабочего периода оцифрованного сигнала;
- исходного значения сдвига фазы сигнала;
- значения числа интервалов 1-го этапа интерполяции;
- значения числа уровней;
- отношения сигнал/шум;
- комплексного влияния нескольких факторов.

Таблица 5.1

Число периодов	Погрешность при $f_D/f_s = 3$ для числа интервалов интерполяции						
	3	5	7	10	15	20	30
2/2,5							
4/4,5							
8/8,5							
12/12,5							
16/16,5							
20/20,5							

Таблица 5.2

Число периодов	Погрешность при $f_D/f_S = 2,5 - 6,7$ для числа интервалов интерполяции						
	3,4	5,5	7,7	10,3	15,7	20,5	31,3
2/2,5							
4/4,5							
8/8,5							
12/12,5							
16/16,5							
20/20,5							

Исследование погрешности оценки СКЗ сигнала при комплексном влиянии совокупности факторов (по выбору студентов).

Выберите комбинацию наиболее влияющих факторов и исследуйте границы максимальной погрешности для реальных условий работы.

5.5. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики и таблицы.
- Рекомендации и выводы по всем пунктам работы.

5.6. Контрольные вопросы к защите

1. При каких условиях сигнал может быть полностью восстановлен из дискретных, одинаково расположенных отсчетов?
2. Как влияет на погрешность дробное и целое отношение f_D/f_S ?
3. Как влияет на погрешность дробное и целое число периодов сигнала?
4. Как влияет на погрешность положение (номер) рабочего периода оцифрованного сигнала?
5. Как влияет на погрешность исходное значение сдвига фазы сигнала?
6. Как влияет на погрешность значение числа интервалов 1-го этапа интерполяции?

7. Как влияет на погрешность значение числа уровней?
8. Как влияет на погрешность отношение сигнал/шум?
9. Поясните практические результаты исследований.
10. Как зависит погрешность оценки сдвига фазы сигнала от длительности выборки?
11. Как зависит погрешность оценки сдвига фазы сигнала от объема выборки?
12. Как зависит погрешность оценки сдвига фазы сигнала от относительного уровня 2-й гармоники?
13. Как зависит погрешность оценки сдвига фазы сигнала от относительного уровня 3-й гармоники?
14. Дайте рекомендации оценки сдвига фазы идеального гармонического сигнала с известной частотой и длительностью $0,5$ и $1,5T$.
15. Дайте рекомендации оценки разности фаз гармонических сигналов с неизвестной частотой и ожидаемой длительностью от $1,4$ до $2,2T$ и от $2,1$ до $3,4T$.
16. Как выбирается отношение частот дискретизации и сигнала?
17. Как влияет на погрешность выбор целого и нецелого числа периодов сигнала?
18. Как влияет на погрешность число уровней интерполяции?
19. Как выбрать число интервалов интерполяции?
20. Какое отношение сигнал/шум требуется для измерений с заданной методической погрешностью?

Исследовательская практическая работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО ДИСКРЕТИЗИРОВАННОГО СИГНАЛА

6.1. Цели исследований

1. Изучение алгоритма работы программы моделирования и ее пользовательского интерфейса.
2. Исследование методических погрешностей оценки параметров амплитудно-модулированного сигнала для разных окон и интервалов интегрирования с учетом погрешности дискретизации и интерполяции.
3. Исследование погрешностей оценки параметров АМ сигнала при комплексном влиянии совокупности факторов (по выбору студентов).

6.2. Методы определения параметров АМ колебаний

Известен метод определения глубины модуляции по огибающей путем выделения напряжений, пропорциональных максимальной и минимальной амплитудам сигнала с помощью функциональных преобразователей, в частности детекторов. Однако при реализации возникают трудности выделения огибающей АМ сигнала с малыми искажениями. Применение функциональных преобразователей обуславливает сложность схемы и низкую точность измерения.

В цифровых измерителях глубины модуляции выделяются моменты времени, соответствующие максимальному и минимальному значениям напряжения несущей частоты с запуском в эти моменты преобразователей аналог – код. Выделенные максимальные и минимальные значения напряжения (A_{\max} и A_{\min}) подаются на вычислительный блок, который осуществляет расчет глубины амплитудной модуляции m по формуле

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}.$$

Однако такой измеритель характеризуется недостаточной помехозащищенностью, поскольку для измерения глубины модуляции используются только два отсчета огибающей. При многократной оценке с усреднением устройство имеет сложную схему синхронизации и алгоритм плохо реализуется в виртуальном варианте.

Для оценки глубины модуляции применяется метод с использованием преобразования Гильберта, реализующий следующий алгоритм:

1. Измерение несущей частоты входного сигнала $f_{вч}$ и выбор частоты f_D дискретизации АЦП.

2. Дискретизация сигнала и нахождение максимального значения из массива $A_{\max} = \max(u[iT_D])$.

3. Наложение на дискретизированный массив временного окна и получение массива $u_w[iT_D]$ с реализацией преобразования Гильберта и нахождение огибающей $A[iT_D] = \sqrt{u_{w\perp}[iT_D]^2 + u_w[iT_D]^2}$.

4. Восстановление амплитуды, каждый элемент массива $A[iT_D]$ необходимо разделить на функцию накладываемого окна.

5. Для симметричной формы огибающей $A[iT_D]$ коэффициент амплитудной модуляции находится по формуле

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}, \text{ где } A_{\max} = \max(A[iT_D]) \text{ и } A_{\min} = \min(A[iT_D]).$$

Погрешность оценки коэффициента АМ сигнала находится на уровне $\pm 0,5\%$ при общем объеме отсчетов $N = 256$. Уменьшение числа дискретных отсчетов до минимального значения (например, шестнадцати) приведет к большему увеличению погрешности, что делает метод малоприменимым для оценки коэффициента модуляции по короткой реализации сигнала.

В методе вычислений по двум соседним отсчетам амплитудно-модулированный сигнал представляется в соответствии с выражением

$$A(t) = A_{\text{нч}}(t) \cos(\omega_{\text{вч}}t + \varphi_{\text{вч}}),$$

где $\omega_{\text{вч}}$ – несущая частота; $\varphi_{\text{вч}}$ – начальная фаза; $A_{\text{нч}}(t)$ – модулирующий низкочастотный сигнал.

Для оценки параметров модуляции реализуется решение системы уравнений. Так как максимальная частота низкочастотного сигнала $F_{\text{max}} \ll f_{\text{вч}}$, то изменением огибающей на участке времени соседних стробирующих отсчетов $(t_2 - t_1) \ll 1/F_{\text{max}}$ можно пренебречь. При таком допущении для нахождения $A_{\text{нч}}(t)$ можно решить систему из двух уравнений

$$\begin{cases} A_{\text{нч}}(t) \cos(\omega_{\text{вч}}t_1 + \varphi_{\text{вч}}) = A(t_1), \\ A_{\text{нч}}(t) \cos(\omega_{\text{вч}}t_2 + \varphi_{\text{вч}}) = A(t_2). \end{cases}$$

Отсюда значения начальной фазы и огибающей будут следующими:

$$\varphi_{\text{вч}} = -\omega_{\text{вч}}t_1 - \arctg \frac{A(t_1) \cos(\omega_{\text{вч}}t_1 - \omega_{\text{вч}}t_2) - A(t_2)}{A(t_1) \cos(\omega_{\text{вч}}t_1 - \omega_{\text{вч}}t_2)};$$

$$A_{\text{нч}}(t) = \frac{A(t_1) \cos(\omega_{\text{вч}}t_2 + \varphi_{\text{вч}})}{\cos(\omega_{\text{вч}}t_1 + \varphi_{\text{вч}})}.$$

Таким образом, если дискретизировать сигнал $A(t)$ с частотой $f_{\text{д}} \gg F_{\text{max}}$ и некротной несущей частоте, то, используя приведенные формулы, можно найти значение $A_{\text{нч}}(t)$ для каждой двух точек дискретизированного сигнала. Реализовав режим скользящей выборки в течение периода модуляции, можно найти максимальное A_{max} и минимальное A_{min} значения $A_{\text{нч}}(t)$ за интервал времени больше периода модулирующего сигнала и оценить глубину модуляции по формуле

$$m = \frac{A_{\text{max}} - A_{\text{min}}}{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}}.$$

Данный метод требует большого объема вычислений.

6.3. Алгоритм многоуровневой двухступенчатой интерполяции

Алгоритм работает во временной области, основан на ЦОС с использованием интерполяции и демодуляции сигнала с восстановлением огибающей по СКЗ, определяемому в пределах скользящего окна шириной от 0,5 периода несущей частоты («дифференциальному» СКЗ).

Для определения несущей частоты АМ/АМП сигналов по ограниченному массиву дискретных значений (от 2,5 на периоде) применяются методика и алгоритм с использованием двухступенчатой интерполяции: сначала функцией $\sin(x)/x$ с КД от 5 по всем интервалам, а затем линейной функцией внутри интервала, расположенного на пересечении линии нуля.

Базовый алгоритм восстановления АМ сигнала (БА)

1. Задание и инициализация переменных.
2. Формирование массива данных $X_D[k]$ АМ сигнала.
3. Формирование массивов восстановленного $X_V[t]$ и интерполированного $X_{INT}[\tau_{INT}]$ сигналов с учетом требуемого КД.
4. Отбрасывание крайних данных для уменьшения влияния искажений в начале и конце интервала восстановления сигнала.

Дополнительные шаги для оценки несущей частоты (Н)

Н1. Нахождение точек ($T_{NULL}[t_i]; X_{NULL}[X_{INT}]$) снизу и сверху от нулевого уровня.

Н2. Работа с начальным участком возрастания функции $u_{INT}(\tau_{INT})$.

Н2.1. Для минимизации искажений в начале и конце определяется точка на втором участке "нарастания" ниже нулевого уровня $T_m = T_{NULL}$.

Н2.2. Линейная интерполяция для смещения точки с координатами $T_{NULL}[3]; X_{NULL}[3]$ на нулевой уровень

$$T_R[1] = \tau_{INT} \frac{X_{NULL}[3]}{X_{NULL}[4] - X_{NULL}[3]}.$$

Н3. Работа с конечным участком возрастания функции $u_{INT}(\tau_{INT})$.

Н3.1. Определение положения конечной точки T_{Nm} , расположенной на предпоследнем фронте ниже нулевого уровня $T_{Nm} = T_{NULL}[T_N - 4]$.

Н3.2. Линейная интерполяция для смещения точки с координатами ($T_{NULL}[T_N - 4]; X_{NULL}[T_N - 4]$) на нулевой уровень

$$T_R[2] = \tau_{INT} \frac{X_{NULL}[T_N - 4]}{X_{NULL}[T_N - 3] - X_{NULL}[T_N - 4]}.$$

Н4. Определение расстояния T_V между точками, смещенными в ноль:

$$T_V = \frac{(T_{Nm} - T_m) + (T_R[2] - T_R[1])}{2T_N}.$$

Н5. Определение отношения частот $(f_D/f_S)_V = 1/T_V$.

Н6. Индикация результатов и вывод численных значений.

Использование приведенного алгоритма в задачах определения частоты сигнала позволяет получить значения методической погрешности $(10^{-4} \dots 1) \%$. При целом отношении f_D/f_S погрешность принимает минимальное значение, уровень которой определяется коэффициентом деления. Измерения можно проводить в достаточно широком диапазоне параметров: частоты, глубины модуляции и начальной фазы.

Дополнительные шаги для оценки глубины амплитудной модуляции (А)

А1. Формирование массива оконной функции $X_W[tw]$, где $tw \in [x; x + T_{w.f.}]$.

А2. Формирование массива, соответствующего наложению окна на интерполированный сигнал, т. е. $X_P[t] = X_W[t]X_{INT}[t]$.

А3. Определение СКЗ сигнала $U_{V.RMS}$ методом интегрирования.

А4. Сдвиг окна на величину $n/\Delta T_{w.f.}$.

А5. Определение значений $m_{a.V}$ и погрешности оценки $\Delta m_{a.V}$.

$$m_{a.V} = \frac{\max(X_{RMS}[U_{V.RMS}]) - \min(X_{RMS}[U_{V.RMS}])}{\max(X_{RMS}[U_{V.RMS}]) + \min(X_{RMS}[U_{V.RMS}])};$$

$$\Delta m_{a.V} = \frac{m_{a.V} - m_a}{m_a} 100 \%.$$

А6. Индикация результатов и вывод численных значений.

Использование приведенного алгоритма в задачах определения коэффициента амплитудной модуляции позволяет получить значения методической погрешности от $5 \cdot 10^{-3} \%$. Нижняя граница достигается при использовании скользящего окна Наталла, числе периодов более 15, целом числе дискретных значений на периоде (но не менее 6) и коэффициенте деления более 10.

Измерения можно проводить в достаточно широком диапазоне частот, глубин модуляции и начальных фаз. На рис. 6.1 показаны амплитудно-модулированный сигнал и график скользящего (дифференциального) СКЗ, по которому оценивается глубина модуляции.

Поскольку расчет ведется методом скользящего окна, то величина СКЗ не определена в начале и конце в пределах половины ширины используемого окна. Для оценки СКЗ достаточно двух периодов огибающей.

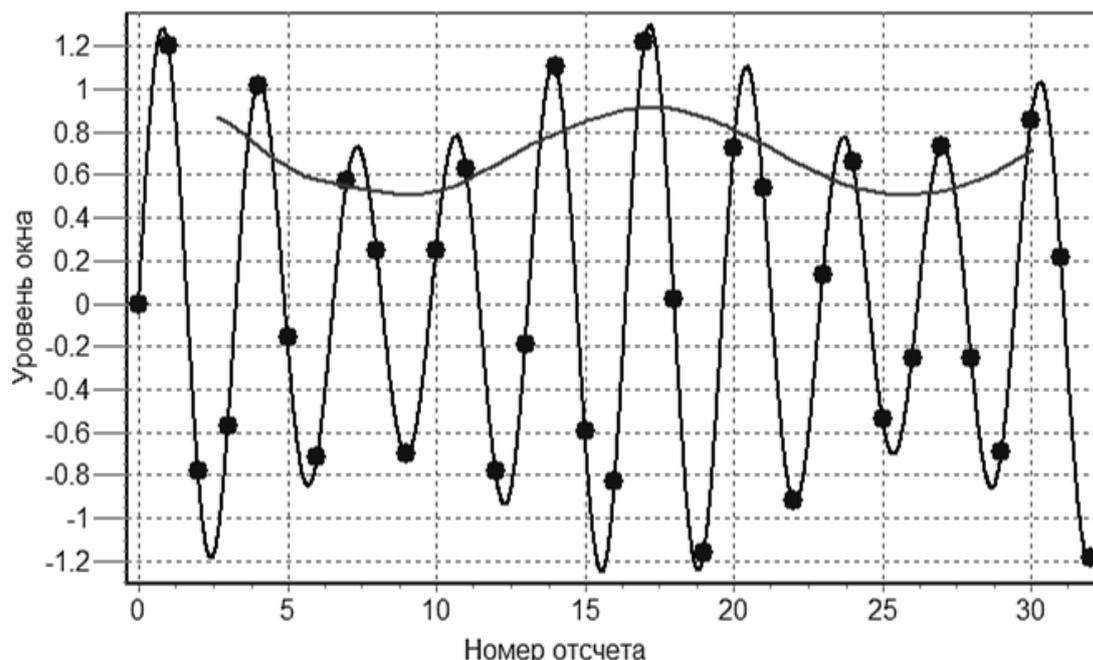


Рис. 6.1. Демодуляция АМ сигнала при $f_D/f_S = 3,2$

Дополнительные шаги для оценки частоты модулирующего сигнала (M)

M1. Определение среднего значения СКЗ (RMS_R).

M2. Нахождение точек снизу и сверху относительно уровня RMS_R на начальном $U_m[k_2]$ и конечном $U_{Nm}[k_2]$ участках.

M3. Определение частоты методом многоуровневой интерполяции

$$\Delta_F = \Delta_F + \frac{\Delta T_{w.f}}{q} \frac{U_m[i] - U_{Nm}[i]}{U_{Nm}[i+1] - U_{Nm}[i]}, \quad T_M = (T_m[2] - T_m[1]) + \Delta_F.$$

M4. Определение отношения частот восстановленного сигнала по формуле $(f_M/f_S)_V = 1/T_M$ и относительной погрешности.

Использование данного алгоритма для определения частоты модулирующего сигнала позволяет получить значения методической погрешности ($7 \cdot 10^{-2} \dots 1$) %. Нижняя граница $7 \cdot 10^{-2} \%$ достигается при числе периодов несущей частоты более 20, целом числе дискретных значений на периоде (но не менее 6) и КД более 10.

На рис. 6.2 приведены графики исходного АМ сигнала с единичной амплитудой несущей частоты и наложенный на исходный сигнал график «дифференциального» (скользящего) СКЗ.

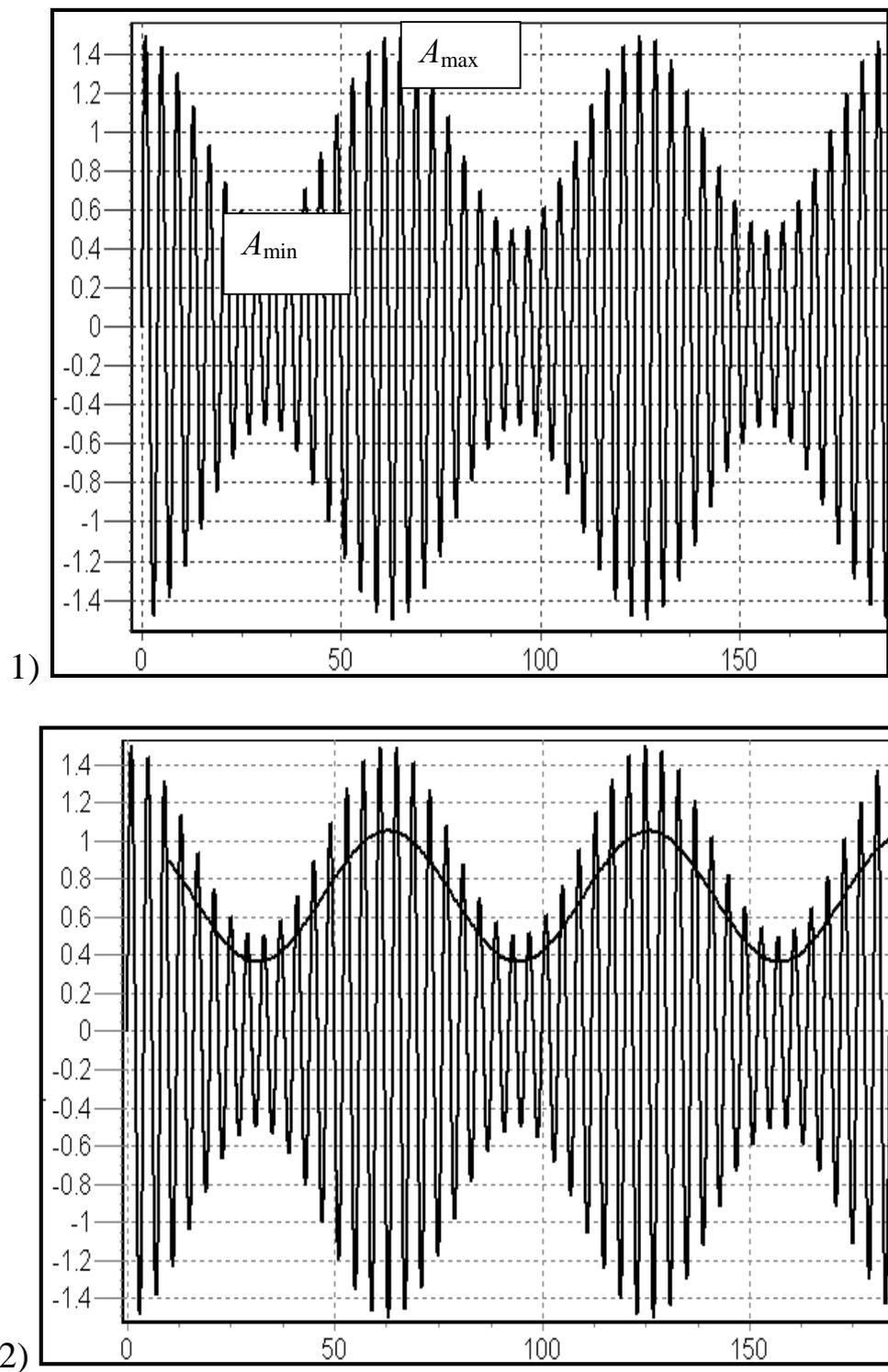


Рис. 6.2. Исходный сигнал (1) и график скользящего СКЗ, наложенный на исходный сигнал (2)

На рис. 6.3 приведены графики демодулированного сигнала в масштабе исходного сигнала и в интервале «минимум – максимум».

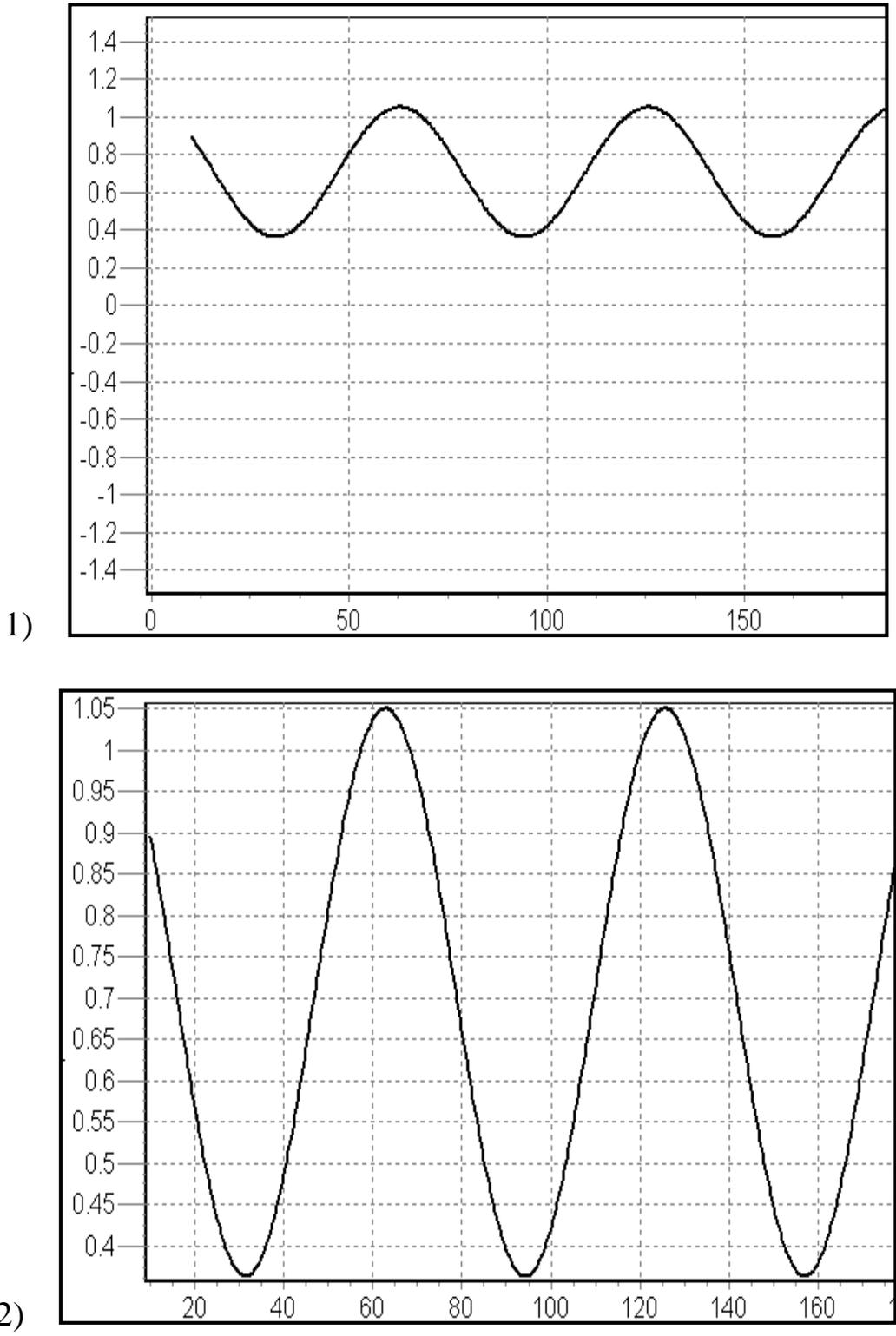


Рис. 6.3. Демодулированный сигнал в масштабе исходного (1) и в интервале «минимум – максимум» (2)

Первая точка демодулированного сигнала расположена на расстоянии 0,5 рабочей ширины окна от начала, а последняя – на расстоянии 0,5 рабочей ширины окна от конца.

Число периодов практически не влияет на изменение погрешности; частоты, определенные на различных интервалах, отличаются на десятые или сотые доли процента, поэтому измерения можно проводить в широком диапазоне частот, глубин модуляции и начальных фаз.

Рекомендуемый диапазон выбора значений числа исходных отсчетов на период составляет от 4 до 10. При значениях $z_{INT} > 6$ погрешность оценки частоты мало изменяется, поэтому рекомендуемый диапазон составляет от 4 до 6.

6.4. Комплексный алгоритм определения параметров модуляции

1. Задание и инициализация переменных.
2. Формирование массива данных $X_D[k]$ оцифрованного сигнала.
3. Формирование массива данных $X_V[t]$ восстановленного сигнала.
4. Поиск промежуточных точек интерполяции.
5. Формирование массива данных $X_{INT} [\tau_{INT}]$ с учетом необходимого числа дополнительных интервалов интерполяции.
6. Отбрасывание крайних данных для уменьшения влияния искажений в начале и конце интервала восстановления сигнала.
7. Нахождение ближайших точек снизу и сверху от нулевого уровня.
8. Работа с начальным и конечным участками возрастания функции $u_{INT} (\tau_{INT})$.
9. Смещение уровня оценки в ноль.
10. Определение значения частоты несущего сигнала методом одноуровневой двухступенчатой интерполяции между точками, смещенными в ноль.
11. Формирование массива данных скользящей оконной функции $X_W [\tau_{INT}]$ и массива $X_P [\tau_{INT}]$, соответствующего наложению окна на сигнал.
12. Определение СКЗ сигнала методом интегрирования.
13. Организация цикла по сдвигу окна.
14. Определение коэффициента АМ по максимальному и минимальному значениям СКЗ.

15. Определение среднего значения СКЗ (RMS_R).
16. Нахождение точек снизу и сверху относительно уровня RMS_R .
17. Определение значения частоты модулирующего сигнала методом многоуровневой интерполяции.
18. Индикация полученных результатов.

Объединенный алгоритм включает в себя реализацию нескольких алгоритмов, работающих с единым массивом дискретных отсчетов. Это алгоритмы определения:

- 1) коэффициента модуляции радиосигнала с демодуляцией по СКЗ со скользящим окном;
- 2) несущей частоты модулированного радиосигнала методом одноуровневой интерполяции;
- 3) частоты модулирующего сигнала по массиву среднеквадратических значений.

6.4. Программа моделирования и ее пользовательский интерфейс

На рис. 6.4 изображен интерфейс программ. На экране отображаются текущие параметры работы алгоритма, наборы сигналов (оцифрованный, восстановленный, интерполированный, окно и др.) и график среднеквадратического значения.

Основное меню разбито на 7 блоков: "Исходный сигнал", "Интерполяция сигнала", "Шум", "Параметры окна", "Параметры модуляции", "Ограничение сигнала" и "Уровни".

В блоке "*Исходный сигнал*" расположены поля для ввода отношения частот дискретизации и сигнала f_D/f_S (числа дискретных отсчетов), числа периодов и значения начальной фазы сигнала. Отношение f_D/f_S и число периодов не обязательно должны быть целыми числами, они вводятся с точностью до третьего знака после запятой.

В блок "*Интерполяция сигнала*" заносятся значения коэффициента деления между дискретными отсчетами. Изменение данного числа влияет на вид интерполированного сигнала.

В блоке "*Параметры окна*" задаются ширина и шаг сдвига окна. Параметр "*Ширина окна*" прямо влияет на интервал интегрирования, а "*Сдвиг*" – на количество точек при построении графика СКЗ. Чем ниже последнее значение, тем более точным будет значение СКЗ.

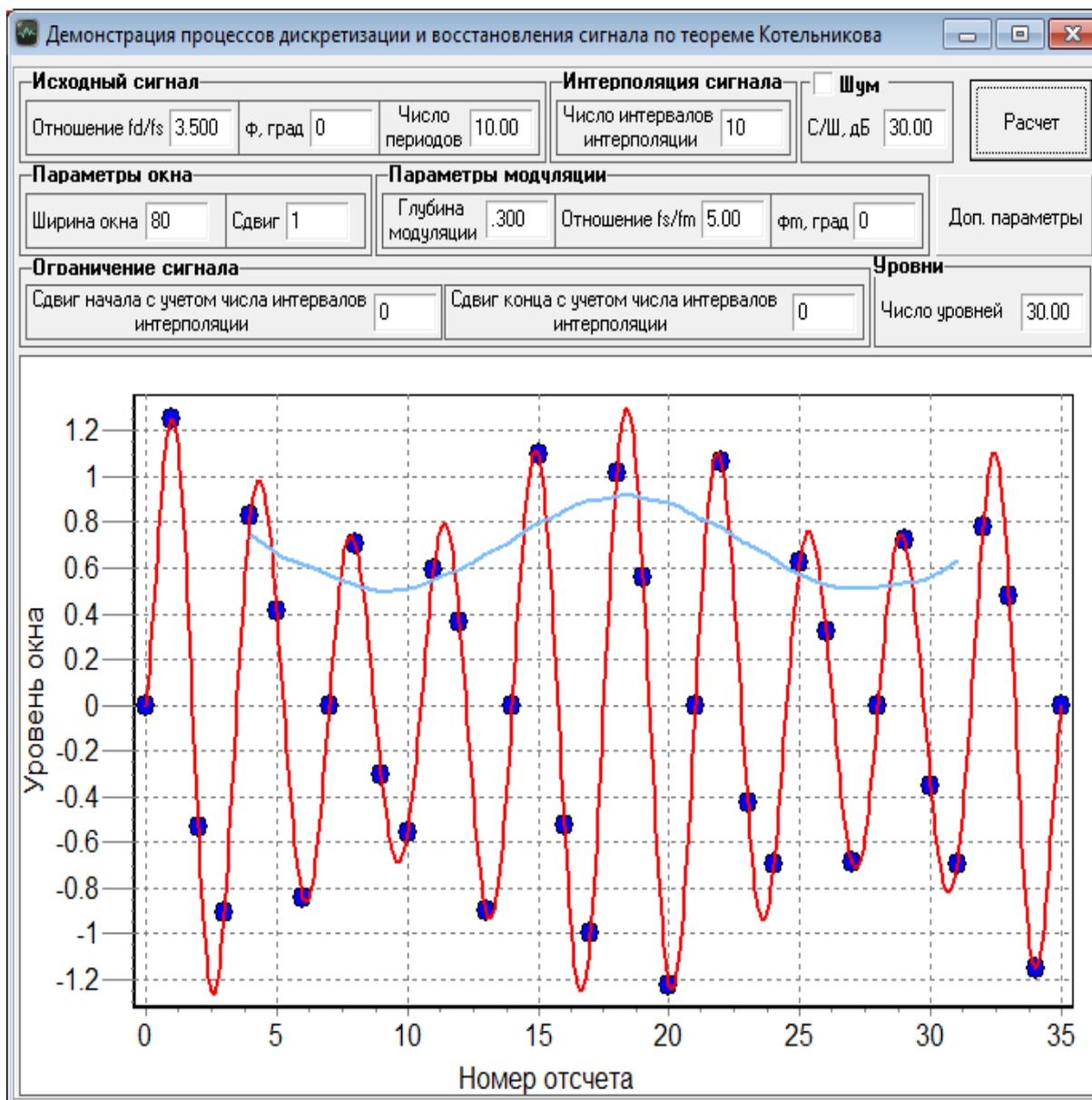


Рис. 6.4. Программа оценки параметров АМ-сигнала

В блоке "Параметры модуляции" задаются параметры модулирующего сигнала: глубина модуляции m_a , отношение частот f_s/f_M и значение начальной фазы φ_M . Для сигнала АМ задается начальная фаза огибающей.

Например, результаты моделирования для $m_a = 0,62$, $f_s/f_M = 7,35$ и $\varphi_M = 90^\circ$ представлены на рис. 6.5.

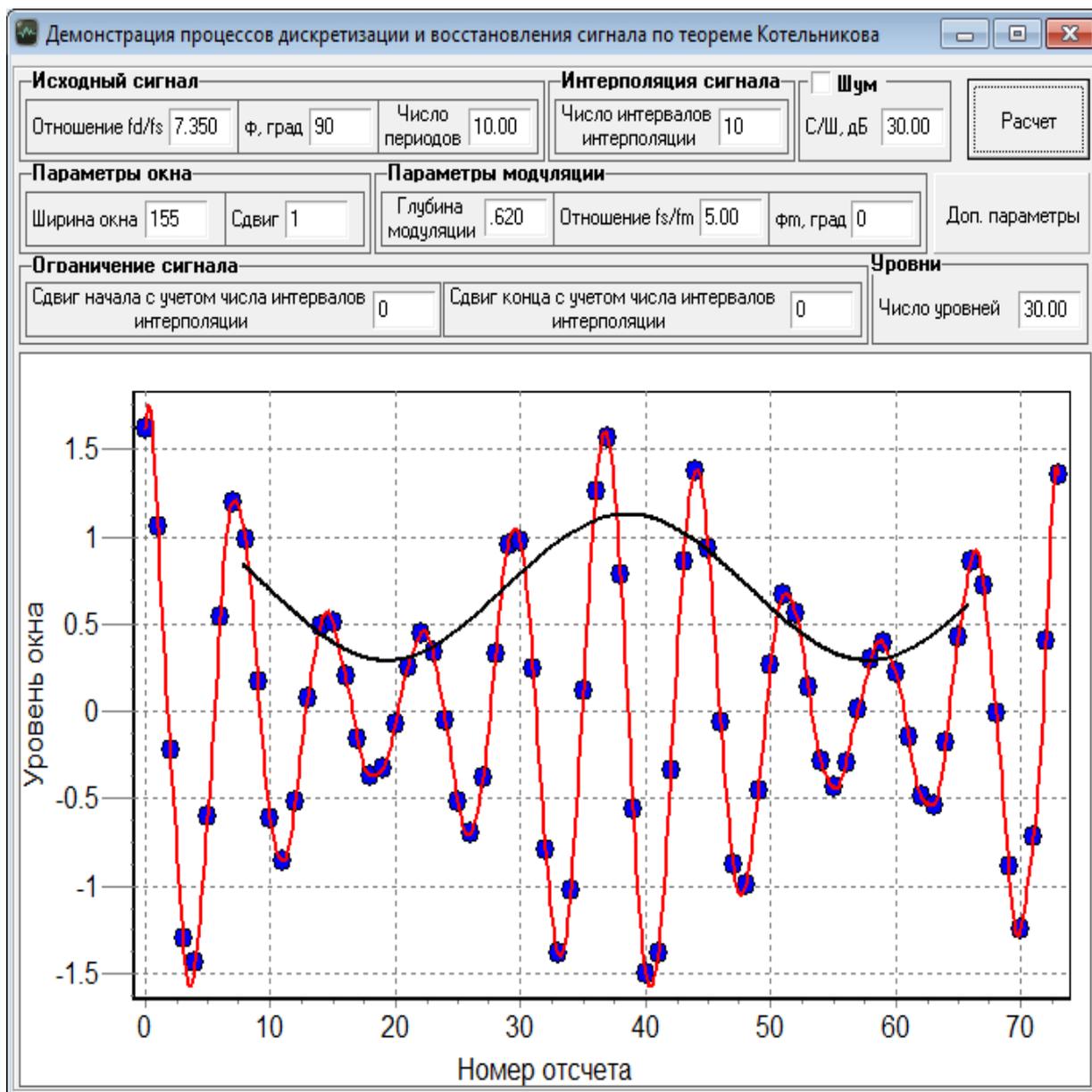


Рис. 6.5. Результаты моделирования для $m_a = 0,65$, $f_M / f_S = 7,35$ и $\phi_M = 90^\circ$

В блоке "Ограничение сигнала" задаются сдвиги начала и конца с учетом числа интервалов интерполяции. Данные параметры ограничивают оценку СКЗ сигнала, смещая его ближе к центру.

В блоке "Уровни" задается число уровней, по которым осуществляется многоуровневая интерполяция в задаче оценки частоты модулирующего сигнала по массиву данных среднеквадратического значения сигнала.

В основном окне находятся области вывода графиков, кнопки "Расчет" и "Доп. параметры". Встроенный *zoom* позволяет увеличить

рабочую область, не повторяя эксперимент. Выводятся графики исходного, интерполированного и восстановленного сигналов.

Меню дополнительных параметров (рис. 6.6), как и основное меню, состоит из блоков: "Масштаб", "Дополнительные графики сигналов", "Индикация" и модулей шести окон (прямоугольного, синусоидального, Ханна, Хэмминга, Блэкмана и Наталла).

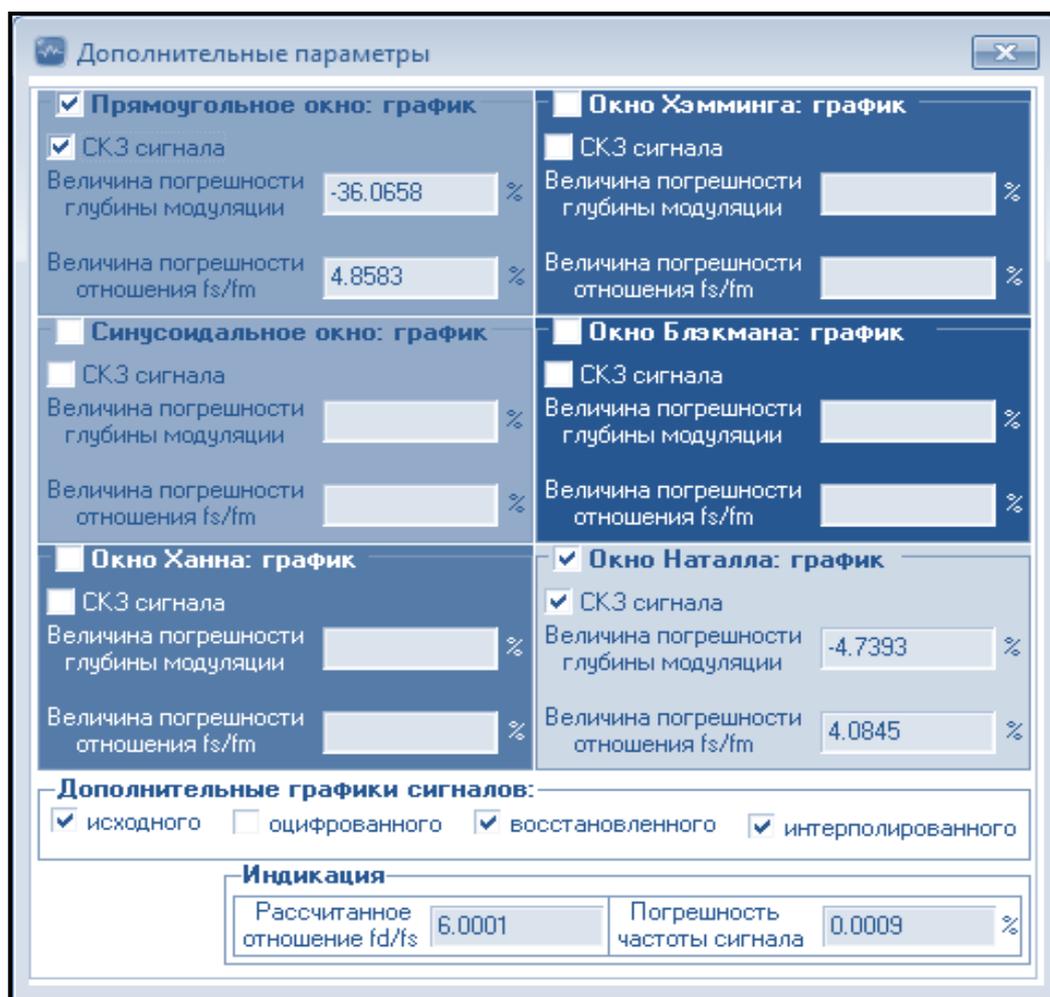


Рис. 6.6. Меню дополнительных параметров

Для каждого окна представлены два поля вывода результатов: погрешности оценки глубины модуляции и определения частоты модулирующего сигнала. Дополнительно реализован вывод графика СКЗ для каждого окна в отдельности.

В блоке "Дополнительные графики сигналов" реализованы графики исходного, оцифрованного, восстановленного и интерполированного сигналов. Вывод графиков – при нажатии на кнопку "Расчет".

В блоке "Индикация" реализованы два независящих от вида оконной функции поля для вывода результатов: рассчитанное отношение частот f_D/f_s и погрешность оценки частоты $\Delta(f_D/f_s)$.

6.5. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления моделирующей программы;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

6.6. Экспериментальные исследования

1. Типовые исследования погрешности оценки частоты сигнала

Программа позволяет строить графики исходного, восстановленного и интерполированного сигналов. В работе оценивается, как влияют:

- отношение частот дискретизации и несущей частоты сигнала (от 2,5);
- начальная фаза сигнала и число периодов сигнала;
- ширина и сдвиг скользящей оконной функции (от 0,5 периода несущей);
- глубина модуляции;
- отношение частоты несущей к модулирующей (от 5);
- начальная фаза модулирующего сигнала;
- начальный и конечный сдвиги;
- число интервалов КД и число уровней.

Оценка методических погрешностей осуществляется при граничных и средних значениях глубины модуляции, КД, для целых и дробных значений f_D/f_s и периодов (интервалов выборки отсчетов) с заполнением табл. 6.1 – 6.2.

Также исследуются погрешности в зависимости от вида окна, уровня шума и начальной фазы сигнала для разного числа уровней (от 2 до 20), располагаемых в диапазоне от $-0,6$ до $+0,6$.

Таблица 6.1

Число периодов огибающей	Погрешность при $f_D / f_S = 3$ для разных коэффициентов интерполяции						
	3	5	7	10	15	20	30
2 – 2,5							
4 – 4,5							
8 – 8,5							
12 – 12,5							

Таблица 6.2

Число периодов огибающей	Погрешность при $f_D / f_S = 4,3$ для разных значений f_S / f_M						
	2,5	3	4,5	5	7,5	9	9,5
2 – 2,5							
4 – 4,5							
8 – 8,5							
12 – 12,5							

2. Исследование погрешности оценки СКЗ сигнала при комплексном влиянии совокупности факторов (по выбору студентов).

Выберите комбинацию наиболее влияющих факторов и исследуйте границы максимальной погрешности для реальных условий работы.

6.7. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики и таблицы.
- Рекомендации и выводы по всем пунктам работы.

6.8. Контрольные вопросы к защите

1. При каких условиях АМ сигнал может быть полностью восстановлен из дискретных отсчетов?
2. Как расположены частотные компоненты для целого числа периодов АМ сигнала?

3. Охарактеризуйте алгоритм оценки несущей частоты АМ сигнала.
4. Поясните алгоритм оценки частоты модуляции АМ сигнала.
5. Приведите алгоритм оценки СКЗ несущей частоты АМ сигнала.
6. Поясните алгоритм оценки глубины модуляции АМ сигнала.
7. Каковы практические результаты исследований?
8. Как зависит погрешность оценки частоты сигнала от длительности выборки?
9. Как зависит погрешность оценки частоты сигнала от объема выборки?
10. Дайте рекомендации оценки глубины АМ сигнала с известной частотой и длительностью $1,5T$ и $3T$.
11. Дайте рекомендации оценки глубины АМ сигнала с неизвестной частотой и длительностью $2 - 3T$.
12. Дайте рекомендации оценки глубины АМ гармонического сигнала с неизвестной частотой и ожидаемой длительностью огибающей от 2 до $3T$ и от 5 до $10T$.
13. Как выбрать отношение частот дискретизации и сигнала?
14. Как выбрать отношение частот модуляции и сигнала?
15. Как влияет на погрешность выбор целого и нецелого числа периодов модулирующего сигнала?
16. Как влияет на погрешность число уровней интерполяции?
17. Как выбрать число интервалов интерполяции?
18. Какое отношение сигнал/шум требуется для измерений с заданной методической погрешностью?
19. Как выбрать нарастающий и/или спадающий рабочий фронт сигнала?

Исследовательская практическая работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АМПЛИТУДНО-МАНИПУЛИРОВАННОГО ДИСКРЕТИЗИРОВАННОГО СИГНАЛА

7.1. Цели исследований

1. Изучение методов определения параметров амплитудно-манипулированного сигнала, алгоритма работы программы моделирования и ее пользовательского интерфейса.

2. Исследование методических погрешностей оценки параметров амплитудно-манипулированного дискретизированного сигнала для разных окон и интервалов интегрирования с учетом погрешности дискретизации и интерполяции.

7.2. Методы определения параметров АМП сигнала

Известен метод определения глубины модуляции по огибающей путем выделения напряжений, пропорциональных максимальной и минимальной амплитуде сигнала с помощью функциональных преобразователей, в частности детекторов. Однако при реализации возникают трудности выделения огибающей АМП сигнала с малыми искажениями. Применение функциональных преобразователей обуславливает сложность схемы и низкую точность измерения.

В цифровых измерителях глубины модуляции выделяются моменты времени, соответствующие максимальному и минимальному значениям напряжения несущей частоты с запуском в эти моменты преобразователей аналог – код. Выделенные максимальные и минимальные значения напряжения (A_{\max} и A_{\min}) подаются на вычислительный блок, который осуществляет расчет глубины амплитудной модуляции m по формуле

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}.$$

Однако такой измеритель характеризуется недостаточной помехозащищенностью, поскольку для измерения глубины модуляции используются только два отсчета огибающей. При многократной оценке с усреднением устройство имеет сложную схему синхронизации и алгоритм плохо реализуется в виртуальном варианте.

Метод с использованием преобразования Фурье – Гильберта

Для оценки глубины модуляции применяется следующий алгоритм:

1. Измерение несущей частоты входного сигнала $f_{вч}$ и выбор частоты f_D дискретизации АЦП.

2. Дискретизация сигнала и нахождение максимального значения из массива $A_{\max} = \max(u[iT_D])$.

3. Наложение на дискретизированный массив временного окна и получение массива $u_w[iT_D]$ с реализацией преобразования Гильберта и

нахождение огибающей $A[iT_D] = \sqrt{u_{w\perp}[iT_D]^2 + u_w[iT_D]^2}$.

4. Для восстановления амплитуды каждый элемент массива $A[iT_D]$ необходимо разделить на функцию накладываемого окна.

5. Для симметричной формы огибающей $A[iT_D]$ коэффициент амплитудной модуляции находится по формуле

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}, \text{ где } A_{\max} = \max(A[iT_D]) \text{ и } A_{\min} = \min(A[iT_D]).$$

Погрешность оценки коэффициента модуляции АМП сигнала находится на уровне $\pm 0,5\%$ при общем объеме отсчетов $N = 256$. Уменьшение числа дискретных отсчетов до минимального значения (например, шестнадцати) приведет к большему увеличению погрешности, что делает метод с использованием преобразования Фурье малоприменимым для оценки коэффициента модуляции по короткой реализации сигнала.

7.3. Алгоритм многоуровневой двухступенчатой интерполяции

Алгоритм работает во временной области, основан на ЦОС с использованием интерполяции и демодуляции сигнала путем восстановления огибающей по СКЗ, определяемому в пределах скользящего окна шириной от 0,5 периода несущей частоты («дифференциальному» СКЗ).

Для определения несущей частоты амплитудно-манипулированных сигналов по ограниченному массиву дискретных значений (от 2,5 на периоде) используются методика и алгоритм с использованием двухступенчатой интерполяции: сначала функцией $\sin(x)/x$ с КД от 5 по всем интервалам, а затем линейной функцией внутри интервала, расположенного на пересечении линии нуля.

Базовый алгоритм восстановления АМП сигнала (БА)

1. Задание и инициализация переменных.
2. Формирование массива данных $X_D[k]$ оцифрованных АМП сигналов.
3. Формирование массивов восстановленного $X_V[t]$ и интерполированного $X_{INT}[\tau_{INT}]$ сигналов с учетом требуемого коэффициента деления.
4. Отбрасывание крайних данных для уменьшения влияния искажений в начале и конце интервала восстановления сигнала.

Дополнительные шаги для оценки несущей частоты (Н)

Н1. Нахождение точек ($T_{NULL}[t_1]; X_{NULL}[X_{INT}]$) снизу и сверху от нулевого уровня.

Н2. Работа с начальным участком возрастания функции $u_{INT}(\tau_{INT})$.

Н2.1. Для минимизации искажений в начале и конце определяется точка на втором участке "нарастания" ниже нулевого уровня $T_m = T_{NULL}$.

Н2.2. Линейная интерполяция для смещения точки с координатами $(T_{NULL}[3]; X_{NULL}[3])$ на нулевой уровень

$$T_R[1] = \tau_{INT} \frac{X_{NULL}[3]}{X_{NULL}[4] - X_{NULL}[3]}.$$

Н3. Работа с конечным участком возрастания функции $u_{INT}(\tau_{INT})$.

Н3.1. Определение положения конечной точки T_{Nm} , расположенной на предпоследнем фронте ниже нулевого уровня $T_{Nm} = T_{NULL}[T_N - 4]$.

Н3.2. Линейная интерполяция для смещения точки с координатами $(T_{NULL}[T_N - 4]; X_{NULL}[T_N - 4])$ на нулевой уровень

$$T_R[2] = \tau_{INT} \frac{X_{NULL}[T_N - 4]}{X_{NULL}[T_N - 3] - X_{NULL}[T_N - 4]}.$$

Н4. Определение расстояния T_V между точками, смещенными в ноль:

$$T_V = \frac{(T_{Nm} - T_m) + (T_R[2] - T_R[1])}{2T_N}.$$

Н5. Определение отношения частот $(f_D / f_S)_V = 1/T_V$.

Н6. Индикация результатов и вывод численных значений.

Использование приведенного алгоритма в задачах определения частоты сигнала позволяет получить результат с методической погрешностью $10^{-4} \dots 1\%$. При целом отношении f_D / f_S погрешность принимает минимальное значение, ее уровень определяется выбранным коэффициентом деления. Измерения можно проводить в широком диапазоне параметров: частоты, глубины модуляции и начальной фазы.

Дополнительные шаги для оценки глубины амплитудной модуляции (А)

А1. Формирование массива оконной функции $X_W[t_w]$, где $t_w \in [x; x + T_{w.f}]$.

А2. Формирование массива, соответствующего наложению окна на интерполированный сигнал, т. е. $X_P[t] = X_W[t]X_{INT}[t]$.

А3. Определение СКЗ сигнала $U_{V,RMS}$ методом интегрирования.

А4. Сдвиг окна на величину $n/\Delta T_{w.f}$.

А5. Определение значений: $m_{a,V}$ и погрешности оценки $\Delta m_{a,V}$

$$m_{a.V} = \frac{\max(X_{RMS}[U_{V.RMS}]) - \min(X_{RMS}[U_{V.RMS}])}{\max(X_{RMS}[U_{V.RMS}]) + \min(X_{RMS}[U_{V.RMS}])};$$

$$\Delta m_{a.V} = \frac{m_{a.V} - m_a}{m_a} 100 \% .$$

А6. Индикация результатов и вывод численных значений.

Использование приведенного алгоритма в задачах определения коэффициента амплитудной модуляции позволяет получить значения методической погрешности от $5 \cdot 10^{-3} \%$. Нижняя граница достигается при использовании скользящего окна Наталла, числе периодов более 15, целом числе дискретных значений на периоде (но не менее 6) и КД более 10.

Измерения можно проводить в достаточно широком диапазоне частот, глубин модуляции и начальных фаз. На рис. 7.1 показан АМП сигнал с линией значений скользящего СКЗ, по которой оценивается глубина модуляции.

Поскольку расчет ведется методом скользящего окна, то величина СКЗ не определена в начале и конце в пределах половины ширины используемого окна. Для оценки СКЗ достаточно двух периодов огибающей.

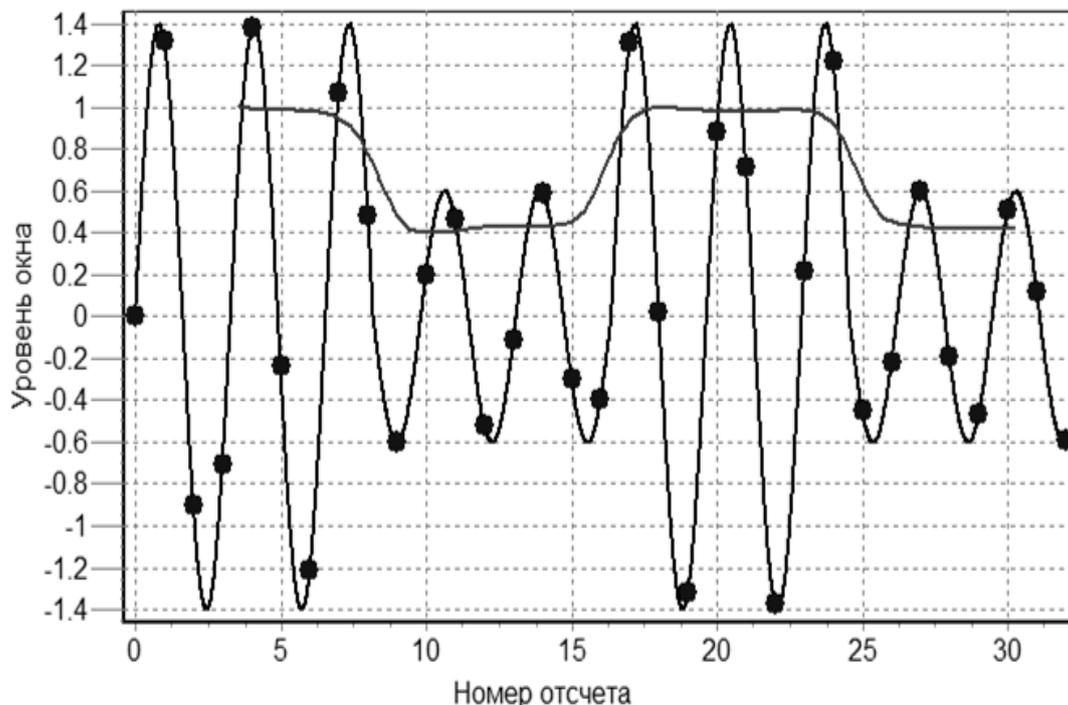


Рис. 7.1. Демодуляция АМП сигнала при малом $f_D / f_S = 3,2$

Дополнительные шаги оценки частоты модуляции (M)

M1. Определение среднего значения СКЗ RMS_R .

M2. Нахождение точек снизу и сверху относительно уровня RMS_R на начальном $U_m[k_2]$ и конечном $U_{Nm}[k_2]$ участках.

M3. Определение частоты методом многоуровневой интерполяции.

$$\Delta_F = \Delta_F + \frac{\Delta T_{w.f}}{q} \frac{U_m[i] - U_{Nm}[i]}{U_{Nm}[i+1] - U_{Nm}[i]}, \quad T_M = (T_m[2] - T_m[1]) + \Delta_F.$$

M4. Определение отношения частот восстановленного сигнала по формуле $(f_M / f_s)_V = 1/T_M$ и относительной погрешности.

Использование данного алгоритма для определения частоты модулирующего сигнала позволяет получить значения методической погрешности ($7 \cdot 10^{-2} \dots 1$) %. Нижняя граница $7 \cdot 10^{-2}$ % достигается при числе периодов несущей частоты более 20, при целом числе дискретных значений на периоде (но не менее 6) и КД более 10.

Число периодов практически не влияет на изменение погрешности; частоты, определенные на различных интервалах, отличаются на десятые или сотые доли процента, поэтому измерения можно проводить в широком диапазоне частот, глубин модуляции и начальных фаз.

Рекомендуемый диапазон выбора значений числа исходных отсчетов на период составляет от 4 до 10. При значениях $z_{INT} > 6$ погрешность оценки частоты мало изменяется, поэтому рекомендуемый диапазон составляет от 4 до 6.

7.4. Комплексный алгоритм определения параметров модуляции

1. Задание и инициализация переменных.
2. Формирование массива данных $X_D[k]$ оцифрованного сигнала.
3. Формирование массива данных $X_V[t]$ восстановленного сигнала.
4. Поиск промежуточных точек интерполяции.
5. Формирование массива $X_{INT} [\tau_{INT}]$ данных с учетом необходимого числа дополнительных интервалов интерполяции.
6. Отбрасывание крайних данных для уменьшения влияния искажений в начале и конце интервала восстановления сигнала.
7. Нахождение ближайших точек снизу и сверху от нулевого уровня.

8. Работа с начальным и конечным участками возрастания функции $u_{INT}(\tau_{INT})$.

9. Смещение уровня оценки в ноль.

10. Определение значения частоты несущего сигнала методом одноуровневой двухступенчатой интерполяции между точками, смещенными в ноль.

11. Формирование массива данных скользящей оконной функции $X_W[\tau_{INT}]$ и массива $X_P[\tau_{INT}]$, соответствующего наложению окна на интерполированный сигнал.

12. Определение среднеквадратического значения сигнала методом интегрирования.

13. Организация цикла по сдвигу окна.

14. Определение коэффициента амплитудной модуляции по максимальному и минимальному значениям массива СКЗ.

15. Определение среднего значения СКЗ RMS_R .

16. Нахождение точек снизу и сверху относительно уровня RMS_R .

17. Определение значения частоты модулирующего сигнала методом многоуровневой интерполяции.

18. Индикация полученных результатов.

Объединенный алгоритм включает в себя реализацию нескольких алгоритмов, работающих с единым массивом дискретных отсчетов. Это алгоритмы определения:

1) коэффициента модуляции радиосигнала с демодуляцией по СКЗ со скользящим окном;

2) несущей частоты модулированного радиосигнала методом одноуровневой интерполяции;

3) частоты модулирующего сигнала по массиву среднеквадратических значений.

7.5. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить пользовательский интерфейс, возможности и органы управления моделирующей программы;
- составить план экспериментальных исследований;

- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;

- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования.

7.6. Экспериментальные исследования

1. Изучение алгоритма работы программы моделирования и ее пользовательского интерфейса.

На рис. 7.2 изображен интерфейс программы. На экране отображаются текущие параметры работы алгоритма, наборы сигналов (оцифрованный, восстановленный, интерполированный, окно и др.) и график СКЗ.

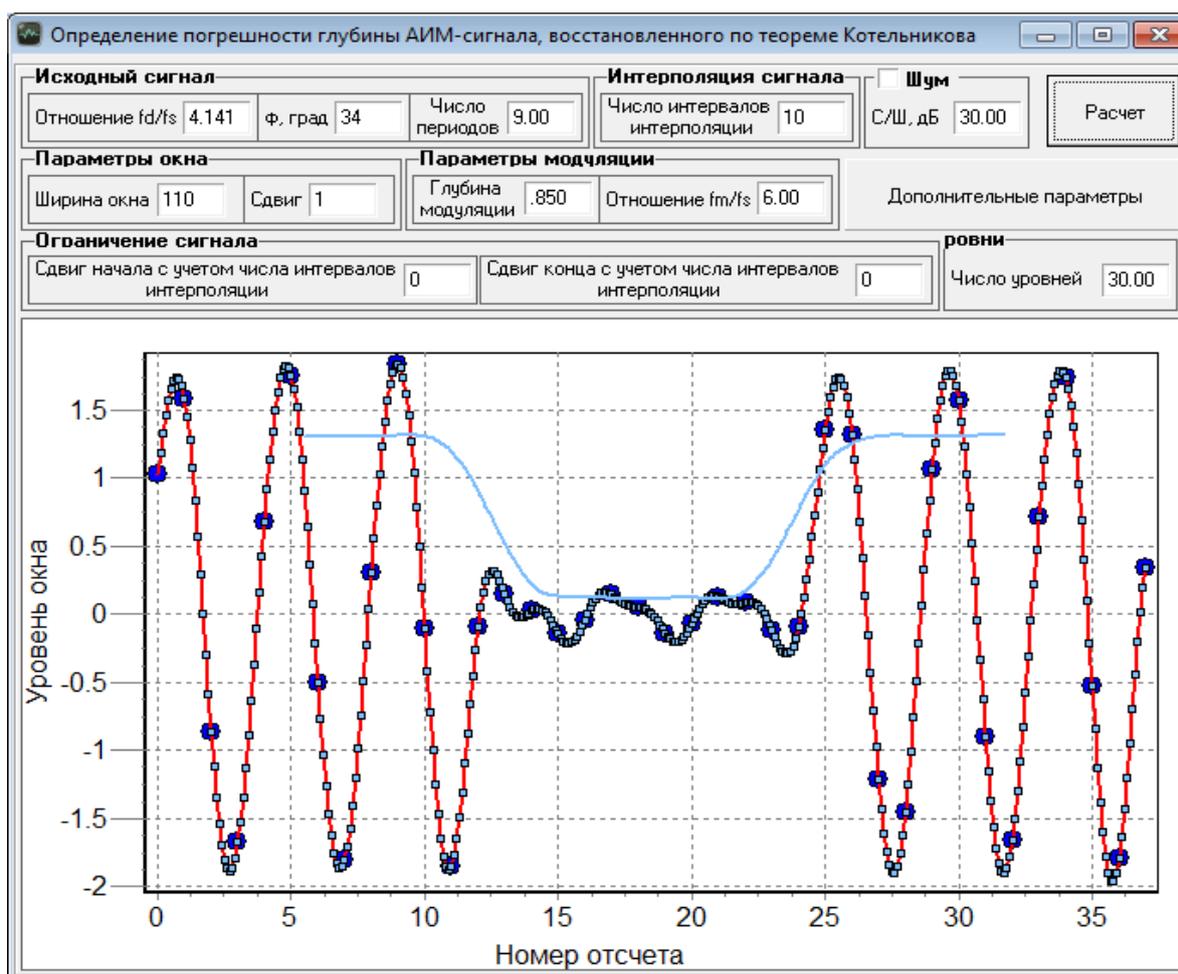


Рис. 7.2. Моделирование для $m_a = 0,85$, $f_s / f_M = 4,141$ и $\varphi_M = 34^\circ$

Основное меню разбито на 7 блоков: "Исходный сигнал", "Интерполяция сигнала", "Шум", "Параметры окна", "Параметры модуляции", "Ограничение сигнала" и "Уровни".

В блоке "*Исходный сигнал*" расположены поля для ввода отношения частот дискретизации и сигнала f_D/f_S (числа дискретных отсчетов), числа периодов и значения начальной фазы сигнала. Отношение f_D/f_S и число периодов не обязательно должны быть целыми числами, они вводятся с точностью до третьего знака после запятой.

В блок "*Интерполяция сигнала*" заносятся значения коэффициента деления между дискретными отсчетами. Изменение данного числа влияет на вид интерполированного сигнала.

В блоке "*Параметры окна*" задаются ширина и шаг сдвига окна. Параметр "Ширина окна" прямо влияет на интервал интегрирования, а "Сдвиг" – на количество точек при построении графика СКЗ. Чем ниже последнее значение, тем более точным будет значение СКЗ.

В блоке "*Параметры модуляции*" задаются параметры модулирующего сигнала: глубина модуляции m_a , отношение частот f_S/f_M и значение начальной фазы ϕ_M .

В блоке "*Ограничение сигнала*" задаются сдвиги начала и конца с учетом числа интервалов интерполяций. Данные параметры ограничивают оценку СКЗ сигнала, смещая его ближе к центру.

В блоке "*Уровни*" задается число уровней, по которым осуществляется многоуровневая интерполяция в задаче оценки частоты модулирующего сигнала по массиву данных среднеквадратического значения сигнала.

В основном меню находятся кнопки "Расчет" и "Доп. параметры" и области для вывода графиков. Встроенный *zoom* позволяет увеличить рабочую область, не повторяя эксперимент. Выбирается вывод графиков исходного, интерполированного и восстановленного сигналов.

Меню дополнительных параметров (рис. 7.3), как и основное меню, состоит из блоков: "Масштаб", "Дополнительные графики сигналов", "Индикация" и модулей шести окон (прямоугольного, синусоидального, Ханна, Хэмминга, Блэкмана и Наталла).

Для каждого окна представлены два поля вывода результатов: величина погрешности оценки глубины модуляции и величина погрешности определения частоты модулирующего сигнала. Дополнительно реализован опциональный вывод графика СКЗ для каждого окна в отдельности.

В блоке "Дополнительные графики сигналов" реализованы графики исходного, оцифрованного, восстановленного и интерполированного сигналов. Графики выводятся при нажатии на кнопку "Расчет".

В блоке "Индикация" реализованы два независящих от вида оконной функции поля для вывода результатов: рассчитанное отношение частот f_D / f_s и погрешность оценки частоты $\Delta(f_D / f_s)$.

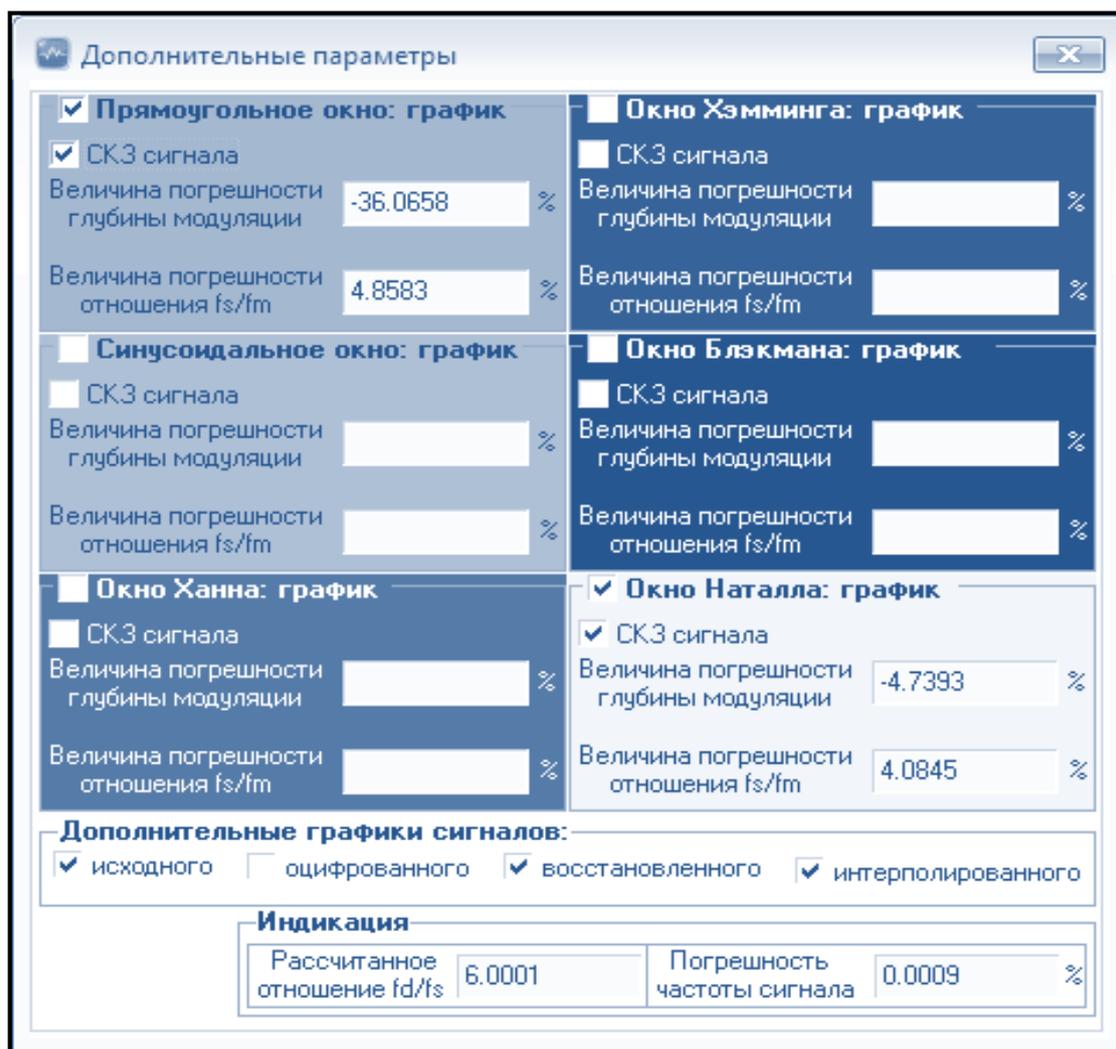


Рис. 7.3. Меню дополнительных параметров

2. Типовые исследования погрешности оценки частоты

Программа позволяет строить графики сигналов (исходный, восстановленный, интерполированный), а также задавать и оценивать влияние следующих параметров и условий работы:

- отношения частот дискретизации и несущей частоты сигнала;
- начальной фазы сигнала;

- числа периодов сигнала;
- глубины модуляции;
- ширины и сдвига скользящей оконной функции (от 0,5 периода несущей);
- отношения частоты несущей к модулирующей (от 5);
- начальной фазы модулирующего сигнала;
- начального и конечного сдвигов;
- числа интервалов КД и числа уровней.

Оценка методических погрешностей осуществляется при граничных и средних значениях глубины модуляции, КД, для целых и дробных значений f_D / f_s и периодов (интервалов выборки отсчетов) (табл. 7.1, 7.2).

Также исследуются погрешности в зависимости от вида окна, уровня шума и начальной фазы сигнала для разного числа уровней (от 2 до 20), располагаемых в диапазоне от $-0,6$ до $+0,6$.

Таблица 7.1

Число периодов огибающей	Погрешность при $f_D / f_s = 3$ для разных коэффициентов интерполяции						
	3	5	7	10	15	20	30
2 – 2,5							
4 – 4,5							
8 – 8,5							
12 – 12,5							

Таблица 7.2

Число периодов огибающей	Погрешность при $f_D / f_s = 4,3$ для разных значений f_s / f_M						
	2,5	3	4,5	5	7,5	9	9,5
2 – 2,5							
4 – 4,5							
8 – 8,5							
12 – 12,5							

3. Исследование погрешности оценки СКЗ сигнала при комплексном влиянии совокупности факторов (по выбору студентов).

Выберите комбинацию наиболее влияющих факторов и исследуйте границы максимальной погрешности для реальных условий работы.

7.7. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики и таблицы.
- Рекомендации и выводы по всем пунктам работы.

7.8. Контрольные вопросы к защите

1. Поясните алгоритм оценки несущей частоты АМП сигнала.
2. Раскройте алгоритм оценки частоты модуляции АМП сигнала.
3. Поясните алгоритм оценки глубины модуляции АМП сигнала.
4. Укажите практические результаты исследований.
5. Как зависит погрешность оценки частоты сигнала от длительности выборки?
6. Как зависит погрешность оценки частоты сигнала от объема выборки?
7. Дайте рекомендации оценки глубины АМП сигнала с известной частотой и длительностью $1,5T$.
8. Дайте рекомендации оценки глубины АМП сигнала с неизвестной частотой и длительностью $2 \dots 3T$.
9. Дайте рекомендации оценки глубины АМП гармонического сигнала с неизвестной частотой и ожидаемой длительностью огибающей от 2 до $3T$ и от 5 до $10T$.
10. Как выбирается отношение частот дискретизации и сигнала?
11. Как выбирается отношение частот модуляции и сигнала?
12. Как влияет на погрешность выбор целого и нецелого числа периодов модулирующего сигнала?
13. Как влияет на погрешность число уровней интерполяции?
14. Как выбрать число интервалов интерполяции?
15. Какое отношение сигнал/шум требуется для измерений с заданной методической погрешностью?
16. Как влияет нарастающий или спадающий рабочий фронт сигнала?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Виртуальные системы представляют собой гибкую совокупность аппаратно-программных средств, основой которых является персональный компьютер, обеспечивающий алгоритмические измерения, управление экспериментом, цифровую обработку данных, передачу и хранение информации. Результат получается путем вычислений, т. е. на программном уровне при минимуме аппаратных средств, главной задачей которых становится оцифровка или дискретизация сигналов. Основой становится ПК, который дополняется аналоговыми и цифровыми адаптерами ввода-вывода.

Современные компьютерные технологии позволяют с наименьшими затратами обеспечить высокое качество, точность и достоверность результатов испытаний. Простота интегрирования компьютерных систем с внешними устройствами предоставляет пользователю широкие возможности. Вычислительная мощь персонального компьютера позволяет подвергать собранные с его помощью данные практически любой, даже очень сложной обработке. Такой подход соответствует современным задачам технологического контроля и испытаний непрерывного эксплуатационного мониторинга, потребностям научных лабораторий в проведении длительных экспериментальных исследований.

Благодаря созданию высокоскоростных микропроцессоров, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, а также развитию методов ЦОС стала возможна практическая реализация методов оценки параметров дискретизированных сигналов путем алгоритмических измерений, которые ранее были недоступны. Современные методы ЦОС направлены на преобразование сигналов с заданной степенью точности при решении задач комплексной оценки частоты, СКЗ и других параметров. Преимущества цифровых систем проявляются в их быстродействии, достоверности и гибкости.

Приведенные в книге программные средства моделирования ЦОС во временной области зарегистрированы в государственной базе программ (см. приложение). Они позволяют исследовать следующие методы и алгоритмы:

1. Восстановление сигнала во временной области по дискретным отсчетам с использованием окон и интерполяции.

2. Определение СКЗ гармонического сигнала по малой выборке ($5 < N < 15$) за $1,5 - 2$ периода колебания с методической погрешностью $(0,05 - 0,5) \%$.

3. Определение частоты гармонического сигнала во временной области с использованием метода многоуровневой интерполяции, позволяющего снизить методическую погрешность более чем в 10 раз по сравнению с методом дискретного счета.

4. Определение сдвига фазы гармонического сигнала во временной области с использованием метода многоуровневой интерполяции, позволяющего снизить методическую погрешность по сравнению с методом дискретного счета.

5. Комплексную оценку частоты и СКЗ гармонического сигнала во временной области на основе интерполяционного ряда Котельникова и выбора сглаживающей оконной функции.

6. Комплексную оценку СКЗ, коэффициента АМ, несущей и модулирующей частот амплитудно-модулированного и амплитудно-манипулированного сигналов с повышением общего быстродействия.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АМ – амплитудная модуляция (амплитудно-модулированный)
АМП – амплитудная манипуляция (амплитудно-манипулированный)
АЦП – аналого-цифровой преобразователь
БПФ – быстрое преобразование Фурье
ВП – виртуальный прибор
ВСК – встроенные системы контроля
ДПФ – дискретное преобразование Фурье
КД – коэффициент деления
КВП – комплекс виртуальных приборов
ПК – персональный компьютер
СКЗ – среднеквадратическое значение
С/Ш – сигнал/шум (отношение в децибелах)
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь
ЦОС – цифровая обработка сигнала

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гелль, П. Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс : пер. с фр. / П. Гелль. – 2-е изд., испр. – М. : ДМК, 1999. – 144 с. – ISBN 5-89818-026-5.
2. Поздняков, А. Д. Автоматизация экспериментальных исследований, испытаний и мониторинга радиосистем / А. Д. Поздняков, В. А. Поздняков. – М. : Радиотехника, 2004. – 208 с. – ISBN 5-93108-066-Х.
3. Поздняков, А. Д. Алгоритмические методы определения параметров радиотехнических сигналов и цепей / А. Д. Поздняков ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2007. – 116 с. – ISBN 5-89368-736-1.
4. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2005. – 604 с. – ISBN 5-318-00666-3.
5. Степанов, А. В. Методы компьютерной обработки сигналов и систем радиосвязи / А. В. Степанов, С. А. Матвеев. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 208 с. – ISBN 5-98003-031-Х.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Программа для вычисления погрешности среднеквадратического значения гармонического сигнала / А. А. Руфов, А. Д. Поздняков. Свидетельство о государственной регистрации № 2014661500. Регистрация в реестре 30.10.2014 г.

2. Программа оценки погрешности определения среднеквадратического значения непрерывного гармонического сигнала с использованием интерполяционного ряда Котельникова / А. А. Руфов, А. Д. Поздняков. Свидетельство о государственной регистрации № 2015617318. Регистрация в реестре 7.07.2015 г.

3. Программа для вычисления частоты непрерывного гармонического сигнала методом многоуровневой интерполяции / А. А. Руфов, А. Д. Поздняков. Свидетельство о государственной регистрации № 2015617319. Регистрация в реестре 7.07.2015 г.

4. Программа оценки погрешности определения среднеквадратического значения амплитудно-манипулированного (АМП) дискретизированного сигнала, восстановленного в скользящем окне с использованием ряда Котельникова / А. А. Руфов, А. Д. Поздняков. Свидетельство о государственной регистрации № 2015615896. Регистрация в реестре 27.05.2015 г.

5. Программа оценки погрешности определения коэффициента амплитудной модуляции дискретизированного сигнала, восстановленного в скользящем окне с использованием ряда Котельникова / А. А. Руфов, А. Д. Поздняков. Свидетельство о государственной регистрации № 2015616323. Регистрация в реестре 5.06.2015 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
<i>Исследовательская практическая работа № 1</i> Восстановление сигнала во временной области по дискретным отсчетам с использованием окон и интерполяции	5
<i>Исследовательская практическая работа № 2</i> Определение среднеквадратического значения сигнала методом интегрирования во временном окне	16
<i>Исследовательская практическая работа № 3</i> Определение среднеквадратического значения дискретизированного сигнала методом интерполяции и интегрирования	27
<i>Исследовательская практическая работа № 4</i> Определение частоты дискретизированного сигнала методом двухтактной многоуровневой интерполяции	41
<i>Исследовательская практическая работа № 5</i> Определение фазового сдвига дискретизированного сигнала методом двухтактной многоуровневой интерполяции	53
<i>Исследовательская практическая работа № 6</i> Определение параметров амплитудно-модулированного дискретизированного сигнала	60
<i>Исследовательская практическая работа № 7</i> Определение параметров амплитудно-манипулированного дискретизированного сигнала	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	89
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	89
ПРИЛОЖЕНИЕ	90

Учебное издание

ПОЗДНЯКОВ Александр Дмитриевич

ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
НЕПРЕРЫВНОГО И АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Практикум

Редактор А. П. Володина

Технический редактор Ш. В. Абдуллаев

Корректор Н. В. Пустовойтова

Компьютерная верстка Е. А. Герасиной

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 09.08.21.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 5,35. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.