

На правах рукописи



РУФОВ АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ

**Интерполяционные алгоритмы определения
параметров радиосигнала по ограниченному
массиву дискретных значений**

Специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир - 2015

Работа выполнена на кафедре радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВПО "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" (ВлГУ).

Научный руководитель: **Поздняков Александр Дмитриевич**
Доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и радиосистем ВлГУ

Официальные
оппоненты: **Цимбал Владимир Анатольевич**
Доктор технических наук, профессор кафедры "Автоматизированные системы управления" Военной академии РВСН имени Петра Великого, г. Серпухов

Карпенков Андрей Сергеевич
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматики и управления ФГБОУ ВПО "Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева", г. Ковров

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество "Конструкторское опытное бюро радиоаппаратуры" - ЗАО "КОБРА", г. Владимир

Защита диссертации состоится «22» сентября 2015 г. в 16³⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, корпус 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://www.vlsu.ru>.

Автореферат разослан «30» июня 2015 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Определение параметров гармонического сигнала является одним из самых распространенных видов измерений в радиотехнике, технике связи, электронике и системах автоматики. Задачи оперативной оценки частоты и среднеквадратического значения (СКЗ) короткого квазипериодического сигнала решаются при построении встроенной в аппаратуру системы контроля, измерений и мониторинга (СКИМ), а также при испытаниях радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в цифровой осциллографии, звуковой и радиолокации, телеметрии и навигации. Использование амплитудно-модулированных и амплитудно-манипулированных колебаний ограниченной длительности предполагает демодуляцию и оценку параметров радиосигнала по нескольким периодам частоты, которая в общем случае неизвестна.

Современная РЭА комплектуется встроенными аппаратно-программными средствами для цифровой обработки сигналов (ЦОС), а также для самоконтроля и самодиагностики. Развитие технологии виртуальных приборов (ВП) определяет пути эффективного решения специализированных задач измерения, контроля, мониторинга и диагностики РЭА.

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. Всё большее число задач решается не на аппаратном, а на алгоритмическом и программном уровне.

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 преобразования Фурье (алгоритм БПФ). Результаты исследований, представленные в литературе, показали, что погрешность определения параметров сигнала при объеме выборки $N < 32$ резко возрастает. Использование сглаживающих оконных функций повышает точность, однако уровень погрешности остается в диапазоне десятков и единиц процентов. Например, погрешность оценки СКЗ на 2-х периодах сигнала, восстановленного при объеме выборки $N=8$ и $N=16$, составляет 44% и 9.3% соответственно.

Во временной области ЦОС базируется на методах интегрирования, интерполяции, решении систем уравнений, аппроксимации, корреляционном анализе и др. Следует заметить, что в осциллографии для восстановления и оценки параметров сигнала все чаще применяют алгоритмы с интерполяцией $\sin(x)/x$. Однако, детального анализа факторов, определяющих методические

погрешности нет, что не позволяет определить границы целесообразного использования функций $\sin(x)/x$ в задачах ЦОС.

Огромный вклад в разработку методов определения параметров сигналов внесли: Котельников В.А., Василенко Г.И., Минц М.Я., Бушуев С.В., Мелентьев В.С., Гутников В.С., Кравченко В.Ф., Попов В.С., Желбаков И.Н., Стрелковская И.В., Оппегейн А.В., Шафер Р.В., Давыдов П.С., Rabiner R., Gold B., Harris F.J., Gibbons G., Betta G., а также другие отечественные и зарубежные ученые.

Целью исследования является разработка методик и алгоритмов определения совокупности параметров радиосигнала во встроенных системах контроля путем цифровой обработки во временной области ограниченного массива дискретных значений.

Основными **задачами исследования** являются:

1. Разработка методик и интерполяционных алгоритмов оценки во временной области параметров сигналов:

- частоты и среднеквадратического значения гармонического сигнала, ограниченного по длительности (1...3 периода) и числу дискретных отсчетов (от 4);
- параметров амплитудно-модулированных и амплитудно-манипулированных сигналов (СКЗ, коэффициента амплитудной модуляции, несущей и модулирующей частот).

2. Создание и апробация инженерных методик и программных средств определения совокупности параметров аналоговых радиосигналов, реализующих контрольно-измерительные процедуры на алгоритмическом уровне.

Объектом исследования являются методы цифровой обработки сигналов во временной области.

Предметом исследования являются методики и алгоритмы определения параметров радиосигналов, работающие во временной области и обеспечивающие точность, достаточную для практических применений в современных системах встроенного контроля.

Методы исследований. В работе использованы методы имитационного и натурального моделирования, цифровой обработки сигналов, интерполяции по Котельникову, применения оконных функций и численные методы решения задач.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны методика и алгоритм оценки СКЗ гармонического сигнала по ограниченному массиву дискретных значений с использованием временного сглаживающего окна, интерполяции и интегрирования.

2. Разработан алгоритм определения частоты гармонического сигнала во временной области с использованием метода двухступенчатой многоуровневой интерполяции функцией $\sin(x)/x$ и линейной.

3. Разработана методика и созданы алгоритмы оценки параметров амплитудно-модулированных и амплитудно-манипулированных сигналов:

- СКЗ, коэффициента амплитудной модуляции и частоты модулирующего сигнала методом скользящего окна, параметры которого адаптивно настраиваются в зависимости от вида оконной функции и периода несущей частоты сигнала;

- несущей частоты методом двухступенчатой одноуровневой интерполяции для нахождения положения нулей с последующим расчетом периода и частоты.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанный алгоритм определения параметров гармонического сигнала позволяет по малой выборке ($6 < N < 16$) за $1,5 \dots 2$ периода колебания, когда метод БПФ не работает, оценить СКЗ с приемлемой методической погрешностью ($0,05 \dots 0,5$)%.

2. Разработанный алгоритм определения частоты гармонического сигнала во временной области с использованием метода многоуровневой интерполяции по сравнению с методом дискретного счета позволяет снизить методическую погрешность оценки частоты более чем 10 раз.

3. Объединение алгоритмов оценки частоты и СКЗ гармонического сигнала во временной области на основе интерполяционного ряда Котельникова и выбора сглаживающей оконной функции позволило до 35% сократить общий программный код по сравнению с суммой отдельных кодов и повысить общее быстродействие на 28%.

4. Объединение алгоритмов определения СКЗ, коэффициента АМ, несущей и модулирующей частот амплитудно-модулированного и амплитудно-манипулированного сигналов позволило до 60% сократить общий программный код и на 40% повысить общее быстродействие.

5. Создан 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.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена данными имитационного полунатурного моделирования, показывающими эффективность предложенных методик и алгоритмов оценки параметров радиосигналов по ограниченному числу дискретных отсчетов, а также совпадением результатов моделирования с результатами, известными из литературы. Теория построена на известных и проверяемых данных, она согласуется с опубликованными экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика определения частоты и СКЗ гармонического сигнала по ограниченному массиву дискретных отсчетов с использованием временного сглаживающего окна, методов интерполяции, интегрирования и усреднения.

2. Методика оценки несущей частоты, коэффициента амплитудной модуляции и модулирующей частоты амплитудно-модулированного и амплитудно-манипулированного сигналов методом скользящего окна,

параметры которого адаптивно настраиваются в зависимости от вида окна и периода измеряемой в начале работы несущей частоты сигнала.

3. Алгоритмы:

- определения СКЗ гармонического сигнала с использованием методов временного сглаживающего окна и интегрирования;
- определения частоты и СКЗ гармонического сигнала во временной области с использованием методов многоуровневой интерполяции, сглаживающих окон, усреднения и интегрирования.
- определения несущей частоты АМ и АМн сигнала с использованием двухступенчатой одноуровневой интерполяцией для нахождения временного положения нулей с последующим расчетом периода.
- определения СКЗ, коэффициента амплитудной модуляции и частоты модулирующего сигнала во временной области с использованием методов многоуровневой интерполяции, скользящего окна и интегрирования.

4. Комплекс программ моделирования, позволяющий оптимизировать выбор алгоритмов и параметров обработки дискретных отсчетов для задач оценки параметров коротких гармонических и амплитудно-модулированных аналоговых сигналов во временной области.

5. Результаты моделирования, показывающие влияние вида окна, начальной фазы, длительности и объема выборки на точность определения параметров сигнала.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах различного уровня:

1. Семнадцатой Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2012)", г. Рязань, 2012 г.

2. Третьей Всероссийской научно-технической конференции "Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники", г. Владимир, 2012 г.

3. Всероссийской межвузовской научной конференции "Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. V Всероссийские научные Зворыкинские чтения", г. Муром, 2013 г.

4. Одиннадцатой международной научной конференции "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии ФРЭМЭ-2014", г. Владимир-Суздаль, 2014 г.

Результаты работы внедрены в ОАО "Владимирское КБ радиосвязи" (г. Владимир) при создании систем встроенного контроля радиоаппаратуры, а также используются в учебном процессе на кафедре радиотехники и радиосистем ВлГУ по дисциплине "Автоматизированные системы испытаний радиоустройств (АСИП)".

Публикации по работе. По тематике исследований опубликовано 20 научных работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 5

тезисов докладов, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 144 страницы основного текста, 53 рисунка, 16 таблиц, список литературы из 104 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность, научная новизна и практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, подтверждена апробация работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертации.

В первой главе рассмотрены возможности цифровой обработки сигналов (ЦОС), а также требования к методам, алгоритмам и программным средствам оценки параметров радиосигналов во встроенных системах контроля (ВСК) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Проведен аналитический обзор основных методов определения параметров радиосигналов. Сформулированы задачи уменьшения величины погрешности при определении частоты и среднеквадратического значения (СКЗ) радиосигнала во временной области с использованием методов интерполяции, интегрирования и сглаживающих оконных функций.

Во второй главе разработаны методики и алгоритмы определения по короткой выборке параметров гармонического сигнала во временной области, основанные на цифровой обработке массива данных мгновенных значений, с использованием интерполяционного ряда Котельникова. Для сокращения программного кода осуществлено объединение разработанных алгоритмов оценки частоты и СКЗ радиосигнала, в которых использованы методы сглаживающих оконных функций, интегрирования, усреднения и многоуровневого интерполирования при оценке частоты. Применено полунатурное имитационное моделирование, при котором имитируется измеряемый сигнал с искажениями или без них (формируется выборка, которая должна получаться на выходе АЦП). Измерительная часть реализует работу встроенной системы контроля в соответствии с разработанными алгоритмами.

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 $k=0.5, 1, \dots$, а 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. Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм с организацией циклов по длительности

интегрирования, начальным фазам 1-й, 2-й и 3-й гармоник [2]:

1. Задание и инициализация переменных: $m_{S.min}$ и $m_{S.max}$ - минимальное и максимальное число периодов; A_2 и A_3 - уровни 2-й и 3-й гармоник; φ_1 , φ_2 и φ_3 - начальные фазы 1-й, 2-й и 3-й гармоник.
2. Формирование массива данных $X_S[t]$ исходного аналогового сигнала $u(t)$ длительностью $t = m_{S.min}$.
3. Формирование массива данных выбранной оконной функции $X_W[t]$.
4. Формирование массива данных, соответствующего наложению окна на сигнал, т.е. $X_P[t] = X_W[t] \cdot X_S[t]$.
5. Определение СКЗ $U_{V.RMS}$ сигнала методом интегрирования.
6. Формирование массива $X_{RMS}[\Delta_{RMS}]$, соответствующего погрешности оценки СКЗ $\Delta_{RMS} = (k_W \cdot U_{V.RMS} - U_{RMS}) / U_{RMS} \cdot 100\%$, где U_{RMS} - истинное значение СКЗ, которое определяется как $U_{RMS} = \sqrt{(1^2 + A_2^2 + A_3^2) / 2}$.
7. Организация циклов по выбранным параметрам.
8. Индикация результатов и вывод графиков погрешностей.

Зависимости погрешностей оценки СКЗ от вида оконной функции в логарифмическом масштабе показаны на рисунке 1.

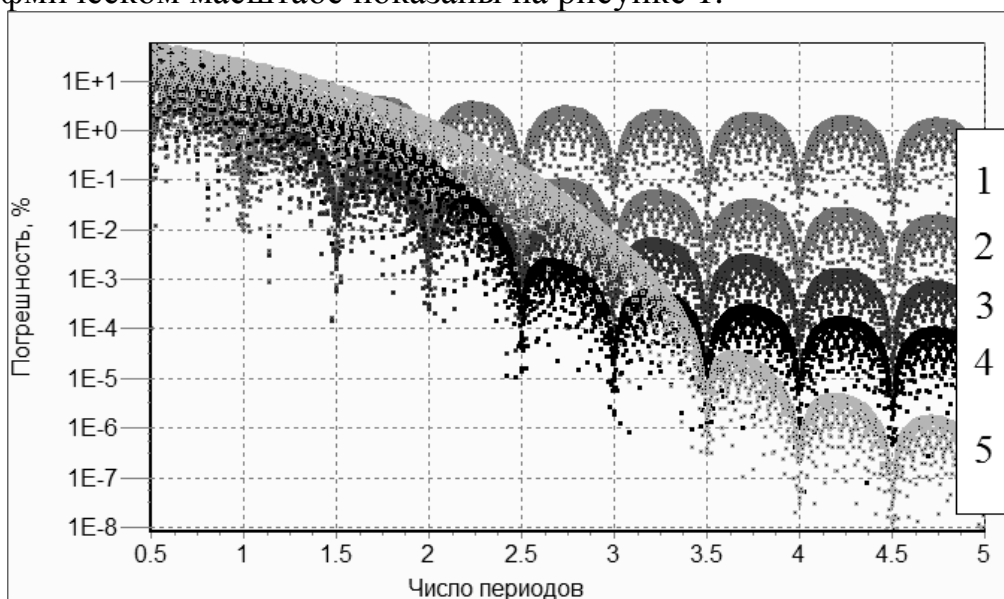


Рисунок 1. Зависимости погрешности оценки СКЗ сигнала от числа периодов

Прямоугольное окно (1) следует использовать, если известна частота сигнала, и можно выбрать время интегрирования кратным половине периода. Синусоидальное окно (2) обеспечивает приемлемые значения методической погрешности в диапазоне коротких и средних интервалов $[1; 2,5]T$. Оконную функцию Ханна (3) следует использовать в диапазоне средних интервалов $[1,5; 2,5]T$. При интервалах оценки, больших $2,5T$ следует использовать сглаживающие окна Блэкмана (4) и Наталла (5).

Для оценки СКЗ гармонического сигнала предлагается следующая методика, содержащая:

1. *Методы*: вычислительный, интегрирования и оконных функций.

2. *Аппаратные средства*: встроена в РЭА микропроцессорная система, одноплатный компьютер или на этапе моделирования ПК.
3. *Алгоритм*: с организацией циклов по выбранным параметрам (шаги 1-7 алгоритма “СКЗ”).
4. *Представление результатов*: в виде семейств графиков погрешностей в линейном и логарифмическом масштабе (шаг 8 алгоритма “СКЗ”).

Для восстановления сигнала с использованием преобразования Котельникова и последующей оценки параметров (частота и СКЗ) с учетом влияния интерполяции, был разработан единый комплексный алгоритм определения частоты и СКЗ, описанный в [4,5].

Базовый алгоритм восстановления гармонического сигнала (“Б”)

1. Задание и инициализация переменных.
2. Формирование массива данных $X_D[k]$ оцифрованного сигнала $u_D(t)$.
3. Формирование массива данных $X_V[t]$ восстановленного сигнала $u_V(t)$ с использованием ряда Котельникова.
4. Расчет промежуточных точек интерполяции τ_{INT} .
5. Формирование массива данных $X_{INT}[\tau_{INT}]$ интерполированного сигнала $u_{INT}(\tau_{INT})$ с учетом необходимого числа дополнительных интервалов

$$u_{INT}(\tau_{INT}) = \sum_{k=0}^{ent(m_s \cdot n)} \left\{ X_D[k] \cdot \frac{\sin[\pi \cdot (\tau_{INT} - k)]}{\pi(\tau_{INT} - k)} \right\},$$

где n - число отсчетов на периоде, а m_s - число периодов сигнала.

Дополнительные шаги для оценки частоты (“Ч”)

- Ч1. Нахождение ближайших точек снизу и сверху от нулевого уровня на начальном U_m и конечном U_{Nm} участках оценки с формированием соответствующих массивов $U_m[i]$ и $U_{Nm}[i]$.
- Ч2. Определение частоты методом многоуровневой интерполяции.
- Ч3. Определение отношения частот восстановленного сигнала по формуле $(f_D/f_S)_V = T_N/T_V$, где T_N - переменная - счетчик числа переходов через нулевой уровень для определения числа полупериодов сигнала.
- Ч4. Индикация результатов и вывод численных значений.

Приведенный алгоритм определения частоты сигнала позволяет получить значения методической погрешности до $10^{-6}\%$. Данная величина достигается при целом числе отсчетов (не менее 10) и величине коэффициента (КД) деления (интерполяции) не менее 20.

Семейства зависимостей погрешности оценки частоты от целого числа отсчетов (3,4,...,10) показаны на рисунке 2, из которого следует, что при повышении числа дополнительных интервалов интерполяции погрешность уменьшается.

Аналогичные зависимости погрешности наблюдаются при изменении числа уровней q . Например, увеличивая q с 2-х до 10-ти при оценке частоты сигнала, восстановленного 6-ю отсчетами на периоде, можно уменьшить величину методической погрешности почти на порядок, с $6 \cdot 10^{-6}\%$ до $4 \cdot 10^{-7}\%$.

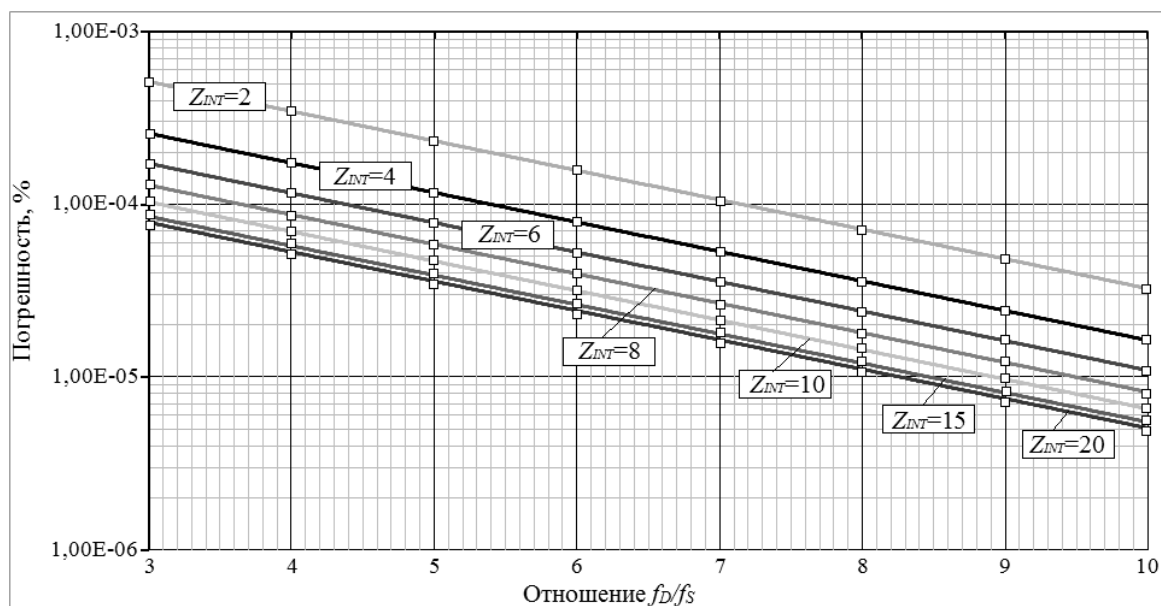


Рисунок 2. Зависимость погрешности оценки частоты от f_D/f_s для КД

Изменение числа периодов влияет в меньшей степени. Основное изменение погрешности связано с наличием искажений на краях восстановленного сигнала, сильно проявляющихся при малой выборке.

Величину методической погрешности можно уменьшить, сместив интервал оценки в центральную область сигнала. Для оценки частоты гармонического сигнала достаточно двух периодов, поэтому адаптивный рабочий интервал равен $[0.25m_s; 0.75m_s]$.

С учетом вышеизложенного для оценки частоты гармонического сигнала предлагается следующая методика, содержащая:

1. *Методы:* усреднения, интерполяции функцией $\sin(x)/x$, многоуровневой интерполяции линейной функцией.
2. *Аппаратные средства:* встроенная в РЭА микропроцессорная система, одноплатный компьютер или на этапе моделирования ПК.
3. *Алгоритм:* шаги 1-5 алгоритма “Б” и шаги Ч1-Ч3 алгоритма “Ч”.
4. *Представление результатов:* в виде численных значений частоты и величины погрешности (шаг Ч4 алгоритма “Ч”).

Дополнительные шаги для оценки СКЗ (“С”)

- S1. Формирование массива данных оконной функции $X_W[\tau_{INT}]$.
- S2. Формирование массива данных, соответствующего наложению окна на интерполированный сигнал, т.е. $X_P[\tau_{INT}] = X_W[\tau_{INT}] \cdot X_{INT}[\tau_{INT}]$.
- S3. Определение СКЗ сигнала $U_{V.RMS}$ методом интегрирования.
- S4. Формирование массива $X_{RMS}[\Delta_{RMS}]$, соответствующего погрешности оценки СКЗ $\Delta_{RMS} = (k_W \cdot U_{V.RMS} - U_{RMS}) / U_{RMS} \cdot 100\%$, где U_{RMS} - истинное значение СКЗ.
- S5. Организация циклов по интервалу интегрирования и начальной фазе.
- S6. Индикация результатов и вывод численных значений.

Применение сглаживающей оконной функции позволяет существенно

снизить погрешности и уменьшить время интегрирования. Уменьшить величину погрешности можно увеличением числа дискретных отсчетов сигнала и увеличением величины КД. При увеличении числа промежуточных точек происходит заметное уменьшение значений погрешности оценки СКЗ. Например, для окна Ханна на интервале $[2;2,5]T$ при $КД=1..6$ максимальная методическая погрешность оценки СКЗ уменьшается более чем в 4,5 раза, с 0,77% до 0,17% (максимальная теоретическая погрешность равна 0,05%).

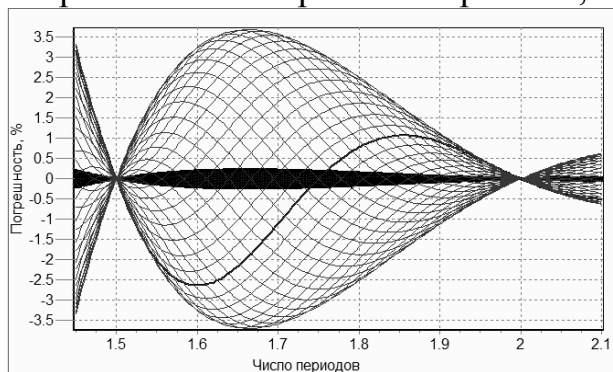


Рисунок 3. Погрешность оценки СКЗ без интерполяции для окна Ханна

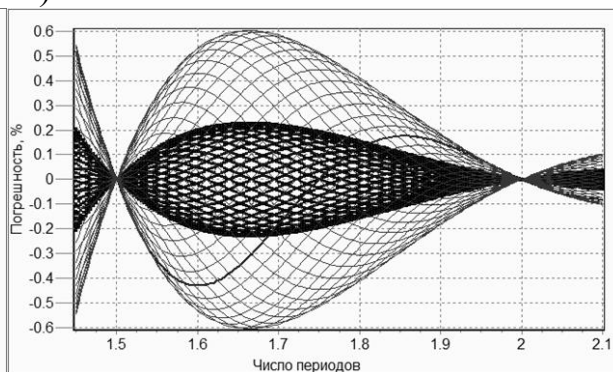


Рисунок 4. Погрешность оценки СКЗ сигнала для окна Ханна при $КД=10$

Рисунки 3 и 4 подтверждают, что увеличение КД существенно приближает результат оценки СКЗ к максимально достижимой точности, но снижает погрешность лишь до определенного уровня, который зависит от числа отсчетов и временного интервала оценки.

Нижняя граница работоспособности алгоритма восстановления сигнала находится при дискретных отсчетах на периоде в диапазоне (3...4).

Таблица 1. Погрешности оценки СКЗ при изменении числа отсчетов

Окно	Модуль максимальной погрешности (в %) для f_D/f_s					
	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Прямоугольное	3,25	3,01	2,91	2,80	2,72	2,68
Синусоидальное	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$
Ханна	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$

Увеличение числа дискретных отсчетов с 3,5 до 6,5 позволяют уменьшить величину погрешности оценки СКЗ в 1,5 раза: с 0,60% до 0,43%. Результаты для интервала $[3,5;4]T$ приведены в таблице 1. С учетом вышеизложенного для оценки СКЗ гармонического сигнала предлагается методика, содержащая:

1. *Методы*: вычислительный, интегрирования, интерполяции функцией $\sin(x)/x$ и оконных функций.
2. *Аппаратные средства*: встроенная в РЭА микропроцессорная система, одноплатный компьютер или на этапе моделирования ПК.
3. *Алгоритм*: с организацией циклов по выбранным параметрам (шаги 1-5 алгоритма “Б” и шаги С1-С5 алгоритма “С”).
4. *Представление результатов*: в виде семейств графиков погрешностей в линейном и логарифмическом масштабе (шаг С6 алгоритма “С”).

Таким образом, использование преобразования Котельникова позволяет повысить точность оценки СКЗ и частоты сигнала путем применения интерполяции между дискретными отсчетами с КД=2...20.

В третьей главе предложены методики и алгоритмы определения параметров амплитудно-модулированных и амплитудно-манипулированных колебаний во временной области, основанные 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/АМн сигналов по ограниченному массиву дискретных значений (от 2,5 на периоде) разработаны 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/АМн сигналов (“БА”)

1. Задание и инициализация переменных.
2. Формирование массива данных $X_D[k]$ оцифрованных АМ/АМн сигналов.
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. Расчет производится при значениях $t_I \in [z_{NACH} \cdot \Delta t / \tau_{INT}; ent(nm_S) - z_{KON} \cdot \Delta t / \tau_{INT}]$, где z_{NACH} и z_{KON} - соответственно число начальных и конечных интерполированных точек, отбрасываемых для исключения влияния искажений, Δt - расстояние между соседними отсчетами и t_I - положение промежуточной точки интерполяции на восстановленном сигнале.

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, $T_m = T_{NULL}[3]$.
 - 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 $T_{Nm} = T_{NULL}[T_N - 4]$, где T_N - переменная-счетчик числа переходов через нулевой уровень для определения числа полупериодов сигнала.

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.

Приведенный алгоритм определения несущей частоты сигнала позволяет получить значения методической погрешности до $10^{-4}\%$. При целом числе отсчетов на периоде погрешность принимает минимальное значение, уровень которой определяется только числом КД.

Число периодов сигнала практически не влияет на величину погрешности оценки частоты: отличия составляют десятые и сотые доли процента. Параметры модулирующего сигнала также не оказывают влияния, следовательно, измерения можно проводить в достаточно широком диапазоне частот, глубин модуляции и начальных фаз.

Погрешность можно уменьшить, ограничивая сигнал в начале и в конце, то есть, смещая рабочую область в центр. Для оценки частоты достаточно трех периодов, поэтому адаптивный рабочий интервал выбирается из диапазона значений $[(m_s - 3)/2; \text{ent}(f_D/f_S \cdot m_s) - (m_s - 3)/2]$.

С учетом вышеизложенного для оценки несущей частоты АМ/АМн сигналов предлагается следующая методика, содержащая:

1. *Методы*: интерполяции функцией $\sin(x)/x$ и многоуровневой интерполяции линейной функцией со смещением в нулевой уровень.
2. *Аппаратные средства*: встроенная в РЭА микропроцессорная система, одноплатный компьютер или на этапе моделирования ПК.
3. *Алгоритм*: шаги 1-4 алгоритма "БА" и шаги Н1-Н5 алгоритма "Н".
4. *Способы представления*: в виде численных значений для несущей частоты и величины погрешности (шаг Н6 алгоритма "Н").

Дополнительные шаги для оценки глубины амплитудной модуляции ("К")

К1. Формирование массива оконной функции $X_W[t_W]$, где $t_W \in [x; x + T_{w.f.}]$, где $T_{w.f.}$ - ширина скользящего окна.

К2. Формирование массива, соответствующего наложению окна на интерполированный сигнал, т.е. $X_P[t] = X_W[t] \cdot X_{INT}[t]$.

К3. Определение СКЗ сигнала $U_{V.RMS}$ методом интегрирования.

К4. Сдвиг окна на величину $n/\Delta T_{w.f.}$.

К5. Определение значений: $m_{a.V.}$ и погрешности оценки $\Delta m_{a.V.}$.

$$m_{a.V.} = \frac{\max(X_{RMS}[U_{V.RMS}]) - \min(X_{RMS}[U_{V.RMS}])}{\max(X_{RMS}[U_{V.RMS}]) + \min(X_{RMS}[U_{V.RMS}])}; \Delta m_{a.V.} = \frac{m_{a.V.} - m_a}{m_a} \cdot 100\% .$$

К6. Индикация результатов и вывод численных значений.

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

Число периодов сигнала не влияет на величину погрешности оценки коэффициента амплитудной модуляции. Параметры модулирующего сигнала также не оказывают влияния, следовательно, измерения можно проводить в достаточно широком диапазоне частот, глубин модуляции и начальных фаз. На рисунках 5 и 6 показаны АМ и АМн сигналы с линией скользящего СКЗ, по которой производится оценка глубины модуляции.

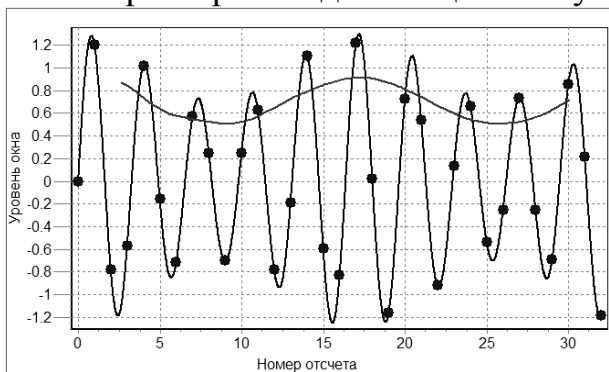


Рисунок 5. Демодуляция АМ сигнала при малом $f_D/f_S = 3,2$

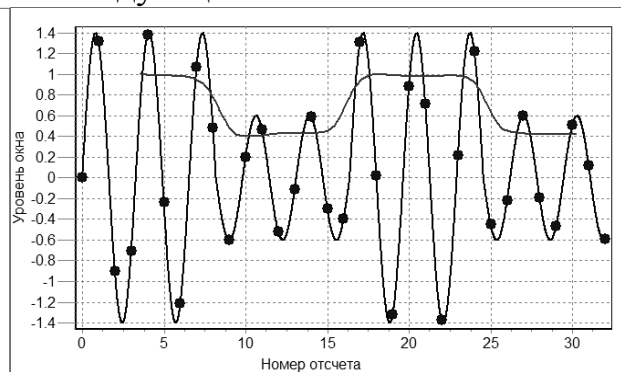


Рисунок 6. Демодуляция АМн сигнала при малом $f_D/f_S = 3,2$

Поскольку расчет ведется методом скользящего окна, то величина СКЗ смещена относительно начала и конца на величину половины ширины используемого окна. Погрешность можно дополнительно уменьшить, отбросив до 25% длительности сигнала в начале и в конце выборки. Для оценки СКЗ достаточно двух периодов огибающей, поэтому рабочий интервал равен $[0,25m_s; 0,75m_s]$ при $m_s/[f_s/f_M] \geq 2$.

С учетом вышеизложенного для оценки глубины амплитудной модуляции предлагается следующая методика, содержащая:

1. *Методы:* интегрирования, интерполяции функцией $\sin(x)/x$, скользящих оконных функций.
2. *Аппаратные средства:* встроенная в РЭА микропроцессорная система, одноплатный компьютер или на этапе моделирования ПК.
3. *Алгоритм:* шаги 1-4 алгоритма “БА” и шаги К1-К5 алгоритма “К”.
4. *Способы представления:* в виде численных значений для коэффициента модуляции и величины погрешности (шаг К6 алгоритма “К”).

Дополнительные шаги для оценки частоты модулирующего сигнала ("М")

М1. Определение среднего значения СКЗ RMS_R .

М2. Нахождение точек снизу и сверху относительно уровня RMS_R на начальном $U_m[k_2]$ и конечном $U_{Nm}[k_2]$ участках.

М3. Определение периода методом многоуровневой интерполяции

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

М4. Определение отношения частот восстановленного сигнала по формуле $(f_M/f_S)_V = 1/T_M$ и относительной погрешности.

М5. Индикация результатов и вывод численных значений

Использование алгоритма в задачах определения частоты модулирующего сигнала позволяет получить значения методической погрешности от 0,1%. Данная величина достигается при числе периодов несущей частоты более 20-ти, целом числе дискретных значений на периоде (но не менее 6-ти) и КД более 10-ти.

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 достаточно широком диапазоне частот, глубин модуляции и начальных фаз.

При $f_D/f_S > 7$ погрешность оценки модулирующей частоты практически не изменяется, поэтому, рекомендуемый диапазон выбора значений числа отсчетов на период составляет от 4 до 7. При значениях $z_{INT} > 6$ погрешность оценки частоты мало изменяется, поэтому, рекомендуемый диапазон составляет от 4 до 6.

С учетом вышеизложенного для оценки модулирующей частоты АМ/АМн сигналов предлагается следующая методика, содержащая:

1. *Методы*: интегрирования, интерполяции функцией $\sin(x)/x$, демодуляции по СКЗ.
2. *Аппаратные средства*: встроенная в РЭА микропроцессорная система, одноплатный компьютер или на этапе моделирования ПК.
3. *Алгоритм*: шаги 1-4 алгоритма "БА" и шаги М1-М4 алгоритма "М".
4. *Способы представления*: в виде численных значений для частоты несущего сигнала и величины погрешности (шаг М5 алгоритма "М").

Алгоритмы ("Б", "Ч", "С", "БА", "Н", "К" и "М") приведены в упрощенном виде, без описания задаваемых параметров, нахождения промежуточных точек и подробной организации циклов.

В четвертой главе рассматриваются моделирующие программы, реализующие описанные в главах 2 и 3 алгоритмы. Программы позволяют выбирать временное сглаживающее окно, интервал интегрирования, объем выборочных данных, начальные фазы оцениваемых 1-й, 2-й и 3-й гармоник, частоту дискретизации и параметры скользящего окна в зависимости от определяемых параметров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан комплекс методик, алгоритмов и программ моделирования для определения параметров гармонического сигнала, позволяющий по ограниченному массиву дискретных отсчетов выбрать временное сглаживающее окно, частоту дискретизации, объем выборочных данных и коэффициент интерполяции. Для инженерного применения построены графики и таблицы, разработаны рекомендации и показано, что наилучшие условия оценки СКЗ реализуются при использовании сглаживающих окон Ханна, Блэкмана и Наталла.

2. Выполнено объединение алгоритмов определения параметров гармонического сигнала во временной области, позволяющее полученные данные о частоте использовать для уменьшения методической погрешности оценки СКЗ менее 0,01% за счет интерполяции и адаптивного выбора массива данных, обрабатываемых в пределах целого числа полупериодов сигнала.

3. Предложена методика обработки короткого (до 3 периодов) дискретизированного сигнала с использованием временного окна, методов усреднения, интегрирования и интерполяции, которая позволяет по ограниченному массиву отсчетов (от 6 точек) определять СКЗ с методической погрешностью от 0,05 до 0,6%, а частоту - с методической погрешностью $10^{-6} \dots 10^{-5} \%$.

4. Разработана методика двухступенчатой одноуровневой интерполяции (рядом Котельникова и линейной) в задаче определения несущей частоты АМ и АМн сигнала, при этом погрешность уменьшается до $2 \cdot 10^{-2} \%$ для ограниченной выборки (4 и менее на периоде).

5. Разработана комплексная методика и апробированы программы оценки параметров АМ и АМн сигналов (СКЗ сигнала, коэффициента амплитудной модуляции, модулирующей и несущей частот) позволяющие адаптивно настраивать параметры скользящего окна.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Руфов А.А. Применение оконных функций для уменьшения погрешности определения среднеквадратического значения гармонического сигнала / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Глобальный научный потенциал. - 2014. - №5. - С. 45-47.
2. Руфов А.А. О выборе оконной функции при измерении среднеквадратического значения гармонического сигнала методом интегрирования / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2014. - №4(16). - С. 34-39.
3. Руфов А.А. Применение сглаживающего окна для повышения точности определения среднеквадратического значения гармонического сигнала на ограниченном интервале времени / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Проектирование и технология электронных средств. - 2014. - №2. - С. 8-11.

4. Руфов А.А. Интерполяционный алгоритм восстановления и измерения среднеквадратического значения гармонического сигнала при малом числе отсчетов / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Известия Института инженерной физики. - 2015. - №1. - С. 13-18.
5. Руфов А.А. Интерполяционный алгоритм определения гармонического сигнала по ограниченной выборке мгновенных значений / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Проектирование и технология электронных средств. - 2015. - №1. - С. 38-42.

Публикации в других изданиях

6. Руфов А.А. Сравнение алгоритмических методов оценки среднеквадратического значения дискретизированного сигнала / А.Д. Поздняков, В.А. Поздняков, А.А. Руфов // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах. - Рязань: РГРТУ, 2012. - С. 82-87.
7. Руфов А.А. Применение ряда Котельникова для восстановления сигнала при малом числе отсчетов / А.Д. Поздняков, А.А. Руфов // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах. - Рязань: РГРТУ, 2012. - С. 88-92.
8. Руфов, А.А. Оценка возможности применения ряда Котельникова для восстановления гармонического сигнала при малом числе отсчетов / А.А. Руфов А.Д. Поздняков // Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2012)". – Рязань, РГРТУ, 2012. - С. 55-56.
9. Руфов А.А. Теорема Котельникова и ее применение для восстановления гармонических сигналов / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Апробация. - 2012. - С. 10-13.
10. Руфов, А.А. Применение Delphi7 для реализации теоремы отсчетов и определения погрешности среднеквадратического значения сигнала / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Научная перспектива. - 2012. - №10. - С. 74-76.
11. Руфов А.А. Теорема отсчетов и ее применение для восстановления модулированных сигналов / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Приволжский научный вестник. - 2012. - №11(15). - С. 13-16.
12. Руфов А.А. Восстановление гармонических сигналов с амплитудной, фазовой и частотной модуляцией на основе базисной системы $\sin(x)/x$ / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Научный обозреватель. - 2012. - №11. - С. 74-76.
13. Rufov A.A. Sampling theorem and the problem of determining the error of the signal's mean-square value / A.A. Rufov, A.D. Pozdnyakov // Scientific enquiry in the con-temporary world: theoretical basics and innovative approach. Volume 4. Technical sciences. - Titusville, FL, USA, L&L Publishing, 2012. - P. 166-168.

14. Руфов А.А. Детерминированные сигналы. Их дискретизация и последующее восстановление функцией $\sin x/x$ / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Новый университет. Серия "Технические науки". - 2012. - №4(10). - С. 52-54.
15. Руфов А.А. Применение MathCAD и ряда Котельникова для восстановления гармонического синусоидального сигнала / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Материалы третьей Всероссийской научно-технической конференции "Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники", г. Владимир (ВлГУ), 14-16 ноября 2012 г. – М.: РАРАН, 2012. - С. 169-170.
16. Руфов А.А. Алгоритмические методы оценки уровня дискретизированного гармонического сигнала / А.Д. Поздняков, В.А. Поздняков, А.А. Руфов // Сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции "Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. V Всероссийские научные Зворыкинские чтения", г. Муром, 1 февр. 2013 г. - Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013. - С. 104-106.
17. Руфов А.А. Применение MathCAD и ряда Котельникова для восстановления гармонического синусоидального сигнала / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции "Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. V Всероссийские научные Зворыкинские чтения", г. Муром, 1 февр. 2013 г. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013. - С. 109-110.
18. Руфов А.А. Применение сглаживающих окон для уменьшения методической погрешности определения среднеквадратического значения гармонического сигнала на ограниченном временном интервале / А.А. Руфов, А.Д. Поздняков // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: материалы XI МНК, г. Суздаль, 1-3 июля 2014 - Владимир: изд-во ВлГУ, 2014. - С. 394-399.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

19. Руфов А.А., Поздняков А.Д. Программа для вычисления погрешности среднеквадратического значения (СКЗ) гармонического сигнала. Свидетельство №2014661500 от 30.10.2014.
20. Руфов А.А., Поздняков А.Д. Программа оценки погрешности определения среднеквадратического значения амплитудно-манипулированного (АМП) дискретизированного сигнала, восстановленного в скользящем окне с использованием ряда Котельникова. Свидетельство №2015615896 от 27.05.2015.

Подписано в печать: 22.06.2015 г.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____

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