

В. С. Годлевский,  
В. В. Годлевский

# **ВОПРОСЫ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ**

*Монография*

Киев  
АЛЬФА РЕКЛАМА  
2020

УДК 621.37:517]:004.383.3  
Г59

**Годлевский В. С., Годлевский В. В.**

Г59 Вопросы точности при обработке сигналов : монография / В. С. Годлевский, В. В. Годлевский. — К.: Альфа Реклама, 2020. — 408 с.

ISBN 978-966-288-256-8

В книге рассмотрены методы анализа точностных характеристик цифровых и аналоговых средств обработки сигналов. Основное внимание уделено вычислению детерминированных и вероятностных показателей методических и обусловленных неточным заданием исходных данных погрешностей решения типовых задач обработки сигналов.

Книга рассчитана на специалистов в области разработки и применения численных методов, аппаратных цифровых и аналоговых средств обработки сигналов. Может быть полезной преподавателям, аспирантам и студентам вузов соответствующих специальностей.

УДК 621.37:517]:004.383.3

ISBN 978-966-288-256-8

© Годлевский В. С., 2020  
© Годлевский В. В., 2020

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Одними из основных требований, которые предъявляются к средствам обработки сигналов на всех этапах их исследования, проектирования, производства и применения, являются требования к показателям точности результатов обработки сигналов.

Аналоговые и цифровые вычислительные блоки и устройства, методы обработки сигналов нашли широкое применение не только в таких традиционных областях обработки сигналов, как радиотехника, радио- и гидролокация, звуковая акустика, навигация, связь. Эти вычислительные блоки и устройства являются составными частями многих современных систем автоматического управления техническими объектами, аппаратуры технической и медицинской диагностики; систем диспетчерского управления сложными многомерными объектами типа трубопроводных газотранспортных и электроэнергетических систем. Значения выходных сигналов встроенных в эти системы датчиков являются исходными данными при решении ряда задач расчета и оптимизации режимов систем. При обработке сигналов датчиков в таких системах выполняются решения задач фильтрации шумовых составляющих сигналов, решения систем уравнений различного типа, задач спектральной и корреляционной обработки сигналов, в ряде случаев — решения задач параметрической идентификации и оптимизации режимов и других задач. При этом размерности решаемых уравнений и количество датчиков, выходные сигналы которых являются независимыми параметрами в этих уравнениях, могут достигать больших величин. Например, при идентификации параметров и оптимизации режимов сложных магистральных газотранспортных систем для обеспечения автоматического и диспетчерского управления размерности решаемых нелинейных алгебраических уравнений и количество обрабатываемых сигналов датчиков физических величин могут достигать многих тысяч. В то же время на практике часто встречаются устройства и системы обработки сигналов, содержащие только несколько единиц датчиков. Например, в корреляционных приборах определения координат утечек жидкости и газа в напорных трубопроводах обычно используются сигналы только двух датчиков, установленных по концам участков диагностируемых трубопроводов.

Большое разнообразие встречающихся на практике устройств и систем, основанных на различных методах обработки сигналов, обуславливает также и большое разнообразие задач анализа и оценок показателей точности обработки сигналов. Эти показатели отражают степень близости реальных значений результатов обработки сигналов к идеальным результатам, условно полученным без учета влияния различных источников погрешностей. Отличительные особенности задач анализа точности обработки сигналов определяются не только применяемыми методами, но и многими видами источников погрешностей, которые для удобства анализа показателей точности обычно группируют в отдельные виды. Например, погрешности преобразования датчиками физических

величин в электрические сигналы обычно относят к погрешностям задания исходных данных при их использовании в расчетах режимов и выходных сигналов систем автоматического управления, диагностических, информационных и других систем.

Погрешности результатов решения различных задач, обусловленные погрешностями исходных данных, в вычислительной математике часто называют неустранимой погрешностью. Смысл этого термина, по-видимому, формируется назначением конкретного применяемого численного метода решения задачи и ее формулировкой. Однако данная составляющая погрешности результатов решения, в принципе, может быть в некоторых случаях уменьшена путем применения дополнительных алгоритмов и методов предварительной обработки и фильтрации исходных данных (некоторые из них рассмотрены в главе 8). Поэтому составляющие погрешности данного вида имеют также альтернативные названия — трансформированные или наследственные погрешности, которые конкретизирует происхождение и «механизм» проявления этих погрешностей решения. Близким по смыслу к трансформированным погрешностям являются погрешности решения, обусловленные неточностью математической модели, конечной разрядностью выполнения вычислений и преобразований, погрешностями операционных элементов аналоговых вычислительных блоков. От этих видов составляющих погрешностей выходных результатов обработки сигналов по своему смыслу и происхождению отличаются погрешности методов (или методические погрешности) — погрешности, обусловленные свойствами численных методов. К методическим погрешностям можно относить, кроме погрешностей численных методов, и некоторые другие, близкие по смыслу погрешности, например, погрешности аналоговых частотных фильтров, обусловленные неидеальными свойствами их передаточных функций, а также погрешности цифровых частотных фильтров. Методические погрешности цифровых фильтров имеют, в свою очередь, несколько составляющих, обусловленных неидеальными свойствами передаточных функций аналоговых фильтров-прототипов и погрешностями используемых методов цифровой или дискретной реализации передаточных функций аналоговых фильтров-прототипов.

В книге рассматриваются вопросы получения аналитических зависимостей, вероятностных и гарантированных оценок для показателей трансформированных и методических погрешностей решения типовых задач обработки сигналов, таких как: численные решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений; фильтрация сигналов аналоговыми и цифровыми средствами; спектральная и корреляционная обработка сигналов; обработка сигналов аналоговыми операционными блоками. В качестве методов решения этих задач рассматриваются стандартные аппаратные средства и численные методы, а также некоторые их развития. Основное внимание при этом уделяется получению линеаризованных зависимостей для погрешностей вычисления искомых функций входных сигналов, заданных в явном и неявном виде, путем, например, численного решения систем уравнений, выполнения последовательности

алгоритмов дискретных или аналого-цифровых преобразований аналоговых и цифровых сигналов автономными устройствами или сложными управляющими системами.

В книге — восемь глав. В первой главе приведены вводные сведения и основные положения, которые являются общими для решения многих задач анализа и оценки точности средств обработки сигналов. При этом приведены определения показателей для погрешностей, результатов обработки сигналов, представляющих собой скалярные или векторные функции аргументов — первичных погрешностей, для систематических и случайных погрешностей. Рассмотрен наиболее распространенный метод получения зависимостей для погрешностей определения искомым скалярных и векторных функций, заданных в явном или неявном виде. Это метод, основанный на линеаризации функций по параметрам, заданных с погрешностями. В этой же главе приведены наиболее распространенные виды одномерных законов распределения вероятностей для первичных погрешностей и методики нахождения вероятностных характеристик скалярных погрешностей результатов.

Во второй главе приведены приближенные линеаризованные зависимости и строгие оценки норм трансформированных погрешностей решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Приведенные оценки для норм относительных погрешностей имеют расширенные области своего существования по сравнению со стандартными оценками. В этой главе приведены оценки для трансформированных погрешностей решения СЛАУ с плохо обусловленными и вырожденными матрицами методом регуляризации Лаврентьева и его модификацией. Модификация состоит во введении в СЛАУ регуляризирующего вектора свободных членов дополнительно к диагональной матрице коэффициентов регуляризации. В этой же главе рассмотрены алгоритмы уменьшения методических погрешностей решения нелинейных алгебраических уравнений методом Ньютона путем улучшения его сходимости в «плохих» случаях, которые обусловлены погрешностями вычисления элементов матрицы Якоби или особенностями функций, создающих «ловушки» для метода.

Кроме решения задач получения аналитических зависимостей для детерминированных оценок и вероятностных характеристик показателей погрешностей, важными вопросами являются наличие возможности их нетрудоемких вычислений, поэтому приводимые зависимости для оценок и характеристик погрешностей сопровождаются изложением способов их вычисления. В отдельную главу — (третью главу) — выделены вопросы вычисления вероятностей для многомерных векторов погрешностей. Приведен метод быстрого вычисления многомерных нормальных интегралов путем их аппроксимации произведением интегралов малой размерности с учетом коэффициентов корреляционной матрицы. Способ основан на аппроксимации законов распределения сумм векторов с усеченными нормальными распределениями стандартными неусеченными законами распределения. Приведены также статистические методы вычисления вероятностей для погрешностей с помощью непараметрических

оценок плотностей распределения, которые характеризуются меньшими дисперсиями получаемых результатов по сравнению с методом Монте-Карло.

Четвертая глава посвящена анализу методических погрешностей и показателей устойчивости интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) и систем алгебро-дифференциальных уравнений (САДУ) экономичными неявными методами невысокого порядка. Рассмотрен также явно-неявный метод решения САДУ, согласно которому неявным методом интегрируется подсистема уравнений для быстрых переменных совместно с подсистемой алгебраических уравнений, а явным методом интегрируется подсистема уравнений для медленных переменных. Используется сведение дифференциального уравнения высокого порядка для объекта (например, фильтра) с известной передаточной функцией к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (СЛОДУ) первого порядка. Такой переход дает возможность для применения стандартных численных методов решения СОДУ для исследования во временной области характеристик объектов с заданными передаточными функциями. Из рассмотренных методов численного интегрирования СОДУ, заданных в нормальной форме, наиболее подходящим методом для управления объектами с разрывными входными сигналами (по показателям точности, устойчивости) является неявный метод трапеций, поскольку он относится к одношаговым методам.

В пятой главе рассмотрены свойства прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и их влияние на погрешности вычисления спектров сигналов, а также возможные способы уменьшения методических погрешностей ДПФ. Одним из таких способов является применение временных оконных функций к выборкам значений аналоговых сигналов. В этой главе рассмотрено применение оконных функций как при вычислении спектров сигналов, так и при комплексном последовательном применении прямого и обратного ДПФ. Такое комплексное применение оконных функций является полезным, например, в алгоритме цифровой фильтрации в частотной области конечных выборок сигналов, полученных прямым ДПФ, с последующим преобразованием результата фильтрации в аналоговую форму обратным ДПФ, а также при корреляционной обработке аналоговых сигналов.

В шестой главе рассмотрены методы анализа погрешностей типовых аналоговых фильтров в частотной и временной областях. Приведены зависимости и оценки для погрешностей фильтрации и воспроизведения аналоговыми фильтрами не только моногармонических сигналов, но и сигналов достаточно произвольного вида, являющимися дифференцируемыми во времени функциями. Рассмотрены так называемые «компенсированные» схемы фильтров нижних частот, характеризующиеся малыми погрешностями воспроизведения сигналов из области прозрачности. Такие фильтры целесообразно применять в качестве сглаживающих фильтров на выходах цифро-аналоговых преобразователей в различных системах с аналого-цифровыми устройствами. При этом приведены модели аналого-цифровых устройств, приемлемые для анализа методических

погрешностей цифровых фильтров аналоговых сигналов. В этой главе рассмотрены цифровые фильтры, которые сводятся к численному решению системы линейных обыкновенных уравнений первого порядка (СЛОДУ), являющейся эквивалентом дифференциального уравнения высокого порядка для аналогового фильтра-прототипа с заданной передаточной функцией. К достоинствам фильтров этого типа относится наличие возможности выполнения контроля точности интегрирования СЛОДУ на каждом шаге и минимальный объем необходимой выборки отсчетов значений входных сигналов, что является важным параметром при фильтрации разрывных во времени сигналов.

Седьмая глава посвящена рассмотрению аппаратных погрешностей типовых линейных и нелинейных операционных аналоговых блоков, применяемых в аналоговых и аналого-цифровых устройствах обработки сигналов. Приводятся аналитические зависимости для погрешностей выходных сигналов блоков от показателей точности задания параметров операционных элементов, от неидеальностей операционных усилителей. Достаточно большое внимание уделяется анализу точностных характеристик нелинейных функциональных преобразователей, схемы которых реализованы с помощью так называемых «идеальных диодов». Погрешности данных нелинейных схем в квазистационарных режимах или при относительно невысокочастотных сигналах зависят практически только от точностных характеристик линейных операционных элементов — усилителей и резисторов. С целью расширения частотного диапазона в стандартные нелинейные схемы преобразователей сигналов введены модификации. Достаточно высокие показатели точности современных аналоговых операционных элементов и блоков являются основанием для применения аналоговых вычислительных устройств в приложениях, где предъявляются повышенные требования к быстродействию процессоров. В качестве иллюстрации приведены сравнения оценок погрешностей выходных сигналов аналоговых и цифровых процессоров, выполняющих решения СЛАУ в замкнутых контурах управления динамических объектов.

В восьмой главе изложены несколько способов предварительной обработки исходных данных и сигналов с целью повышения их точности перед выполнением штатных расчетов и процессов обработки. Эти способы основаны на:

- применении статистической обработке исходных данных путем простого скользящего усреднения измерений входных данных и сигналов;
- выполнении параметрической идентификации моделей датчиков и рассчитываемых систем методом наименьших квадратов с ограничениями или без них;
- применении методов восстановления переменных входных сигналов инерционных датчиков;
- применении непараметрических оценок функций регрессии для идентификации состояния исследуемых объектов.

В этой же главе приводится способ компенсации смещения математического ожидания непараметрических оценок функций регрессии, позволяющий

увеличить их точность. Такой способ применим также и в других случаях, например, для компенсации смещения непараметрических оценок плотности распределения вероятности.

Книга не претендует на полноту рассмотрения широкого круга задач анализа и обеспечения точности обработки сигналов, возможных методов их решения. Остались незатронутыми большое количество практически и теоретически важных задач анализа точности обработки сигналов. Рассмотрению и решению этих задач посвящены многие статьи и монографии, небольшая часть которых приведена в списках цитированной литературы по главам.

По существу, в книгу вошли избранные вопросы точности при обработке сигналов, рассмотрением многих из которых авторам довелось заниматься в своей практической деятельности. Авторы благодарны всем сотрудникам ООО «ДИСИТ» и бывшего отдела точности моделирующих систем ИПМЭ НАНУ, в том числе, — Головченко В.П., Денисенко А.М., Лазарчуку Б.Л., Сквородневу В.В., Слезину О.А., Сторожуку Н.А., Ковалёву В.Н. и другим сотрудникам за плодотворные и многолетние работы над проектами, посвященными решению задач обработки сигналов. Точностные вопросы ряда из этих задач рассмотрены в книге. Авторы глубоко признательны бывшим сотрудникам ИПМЭ НАНУ в прошлые далекие годы — Заварину А.Н., Левитскому В.Г., а также Рачитскому Г.И. При этом авторы бесконечно благодарны также своим родителям и родственникам — Агарковым и Боевым.

## Заключение

В книге рассмотрены избранные вопросы анализа, оценок и обеспечения точности средств обработки сигналов, с которыми авторам приходилось встречаться в своей практической работе. Эти вопросы охватывают не только создание зависимостей для оценок методических и аппаратных составляющих погрешностей, но и разработки алгоритмов и способов увеличения точности численных методов и аналоговых операционных блоков обработки сигналов. Например, во второй главе приведен способ выбора шага метода Ньютона решения систем нелинейных алгебраических уравнений, направленный на обеспечение и увеличение скорости сходимости итерационных процессов, в третьей главе – способы вычисления вероятностных многомерных интегралов, а также другие численные алгоритмы и способы (приведенные в других разделах). Методики анализа показателей точности аналоговых блоков обработки сигналов (динамических и статических погрешностей) рассматриваются применительно как к стандартным блокам, так и к оригинальным линейным и нелинейным аналоговым вычислительным блокам, имеющим самостоятельное значение. В восьмой главе книги приведены некоторые способы уменьшения трансформированных (наследственных) погрешностей обработки сигналов. К таким способам относятся предварительная обработка исходных данных путем идентификации неизмеряемых и измеряемых параметров многосвязных систем, восстановление переменных входных сигналов инерционных датчиков по их выходным сигналам.

Совокупность рассмотренных в книге вопросов подтверждает известный факт, что разработка новых численных методов и аппаратных средств обработки сигналов с повышенной точностью неразрывно связана с анализом и оценкой показателей методических, трансформированных и аппаратных погрешностей средств обработки сигналов. С другой стороны, получение и анализ зависимостей для погрешностей известных методов и средств обработки сигналов открывают возможности для создания новых способов повышения показателей точности этих методов и средств. Примерами являются приведенные в гл. 3 способ компенсации погрешностей вычислений многомерных интегралов через непараметрические оценки подынтегральных функций и способы компенсации смещения математических ожиданий (повышения точности) непараметрических оценок плотности распределения вероятности и непараметрических оценок функций регрессий (гл. 8). К этим примерам относится также способ повышения точности расчетов и оптимизации режимов многосвязных сетевых трубопроводных газотранспортных систем (ГТС) путем решения дополнительной задачи идентификации измеряемых и неизмеряемых независимых и режимных параметров объектов ГТС. Параметрическая идентификация многосвязных систем типа ГТС основана на получении и использовании решений систем линейных алгебраических уравнений для коэффициентов влияния независимых параметров ГТС на зависимые параметры, то есть систем уравнений, типичных для линейной теории точности.

## Список литературы

### К главе 1:

1. Бахвалов Н., Жидков Н., Кобельков Г. Численные методы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 624 с.
2. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высш. школа, 2002. – 840 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высш. школа, 2000. – 480 с.
4. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1979. – 496 с.
5. Иванов В. В. Методы вычислений на ЭВМ (справочное пособие). – К.: Наукова думка, 1986. – 584 с.
6. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1969. – 511 с.
7. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. – М.: Наука, 1971. – 327 с.
8. Сухорученков Б.И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. – М.: Вузовская книга, 2010. – 384 с.
9. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970. – 664 с.
10. Петров И.Б., Лобанов А.И. Лекции по вычислительной математике. – М.: БИНОМ. Лаборатория Базовых Знаний, 2006. – 523 с.
11. Годлевский В.С. К анализу точности решения на АВМ некоторых систем конечных уравнений // Автоматика и телемеханика. 1974. № 1. С. 133 – 140.
12. Годлевский В.С. Анализ погрешностей расчета установившихся режимов нелинейных схем/ Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1977. № 6. С. 61 – 69.
13. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложение. Т. 2. – М.: Мир, 1984. – 738 с.
14. Ершов А.А. Стабильные методы оценки параметров // Автоматика и телемеханика. 1978. № 8. С. 67 – 100.
15. Tukey J.W. The future of data analysis. Ann. Math. Stat. v. 33.1967, pp. 1 – 67.
16. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. (Под редакцией Королюка В.С.). – К.: Наукова думка, 1978. – 582 с.
17. Заездный А.М. Основы расчетов по статистической радиотехнике. – М.: Связь, 1969. – 447 с.
18. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
19. Годлевский В.С. Об оценках законов распределений погрешностей решений систем линейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1974. № 5. С. 1084 – 1092.

- Петров Ю.В., Петров И.А. Введение в теорию инженерных расчетов, учитывающую вариацию параметров исследуемых объектов. – СПб: БХВ-Петербург, 2014. – 272 с.

### К главе 2:

- Петров И.Б., Лобанов А.И. Лекции по вычислительной математике. – М.: Бином. Лаборатория Базовых Знаний, 2006. – 523 с.
- Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 624 с.
- Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1977. – 880 с.
- Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
- Годлевский В.В., Годлевский В.С. Оценки трансформированных погрешностей решений СЛАУ с плохообусловленными матрицами // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2015. № 12. С. 1979 – 1985.
- Годлевский В.С. Об оценках законов распределений погрешностей решений систем линейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1974. № 5. С. 1084 – 1092.
- Лозинский С.М. Оценка погрешности численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений // Изв. вузов. Математика. 1958. № 5. С. 52–90.
- Лозинский С.М. К статье В.С. Годлевского // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1973. № 2. С. 455–456.
- Годлевский В.С. Об одной оценке точности решений некоторых систем линейных алгебраических уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1973. № 1. С. 233 – 237.
- Беллман Р. Введение в теорию матриц. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
- Годлевский В.С., Ефимов И.Е. Об одном признаке матриц монотонного вида и использование их свойств // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1973. № 2. С. 456 – 457.
- Волков Ю.С., Мирошниченко В.Л. Оценки норм матриц, обратных к матрицам монотонного вида и вполне неотрицательным матрицам // Сибирский математический журнал. 2009. № 6. С. 1248 – 1254.
- Varah J.M. A lower for the smallest singular value of a matrix. *Linear Algebra and its Applications*, V.11, № 1, 1975, pp. 3 – 5.
- Wilkinson J.H. A Piori Error Analysis of Algebraic Prozesses. *Pro. International Congress Math. Moscov 1966*, Mir Publishers, 1968, pp. 629 – 640.
- Уилкинсон Джо. Х., Райнш С. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра. – М.: Машиностроение, 1976. – 391 с.
- Лаврентьев М.М., Савельев Л.Я. Теория операторов и некорректных задач. Новосибирск, изд-во Ин-та математики, 2010. – 912 с.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 285 с.

18. Сизиков В.С., Кривых А.В. Восстановление непрерывных спектров методом регуляризации с использованием модельных спектров // Оптика и спектроскопия. 2014. 117. № 6. С. 1040 – 1048.
19. Сизиков В.С. О моделировании некорректных задач с использованием принципов подобия // Электронное моделирование. 1981. № 6. С. 3 – 8.
20. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику. – Долгопрудный: Издат. дом «ИНТЕЛЛЕКТ», 2008. – 503 с.
21. Деннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. – М.: Мир, 1988. – 440 с.
22. Ортега Дж., Рейнболт В. Итерационные методы решения систем уравнения со многими неизвестными. – М.: Мир, 1975. – 558 с.
23. Годлевский В.С. Способ выбора длины шага для метода Ньютона при моделировании существенно нелинейных систем // Электронное моделирование. 1995. № 4. С. 32 – 36.
24. Гловацкая А.П. Методы и алгоритмы вычислительной математики. – М.: Радио и связь, 1999. – 408 с.
25. Пухов Г.Е. Теория метода подсхем // Электричество. 1952. № 8. С. 65–73.
26. Гурарий М.М., Русаков С.Г. Машинный расчет сложных электронных схем методом подсхем // Изв. АН СССР Техническая кибернетика. 1977. № 1. С. 193–197.
27. Годлевский В.С. Анализ погрешностей расчета установившихся режимов нелинейных схем // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1977. № 6. С. 61–69.
28. Годлевский В.С. Блочный метод решения систем нелинейных конечных уравнений // Электронное моделирование. 1995. № 3. С. 3 – 6.
29. Годлевский В.С., Годлевский В.В. Блочный гибридный метод решения систем нелинейных конечных уравнений // Электронное моделирование. 2003. № 6. С. 99 – 109.

### **К главе 3:**

1. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. – М.: Наука, 1967. – 500 с.
2. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. Под ред.: В.С. Королюка. – К.: Наукова думка, 1978. – 582 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её приложения. – М.: Высшая школа, 2007. – 496 с.
4. Синицын И.Н. Фильтры Калмана и Пугачева. – М.: Логос, 2006. – 636 с.
5. Мартынов Г.В. Вычисление функции нормального распределения // Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. Т.17 (итоги науки и техники). 1979. С. 57 – 84.
6. Годлевский В.С., Заварин А.Н. Способ приближенного вычисления многомерных нормальных интегралов // В кн.: Точность и надежность кибернетических систем. К.: Наукова думка, 1976. Вып. 4. С. 30 – 34.

7. Годлевский В.С., Губренюк Т.А. К вычислению многомерных нормальных интегралов в задачах анализа точности электронных схем // В кн.: Электронные цепи, передача и обработка информации. – К.: Наукова думка, 1979. С. 135-147.
8. Годлевский В.С. Метод быстрого расчета вероятностей для векторов с нормальными распределениями и его применение // Электронное моделирование. 2008. № 5. С. 21 – 35.
9. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1962. – 884 с.
10. Голуб Дж., Ван-Лоун Ч. Матричные вычисления. – М.: Мир, 1999. – 548 с.
11. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества. – К.: Техника, 1981. – 152 с.
12. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. – М.: Наука, 1971. – 327 с.
13. Parzen E. On the estimation of a probability density function and the mode // Ann. Math. Statist., 1962, September, v. 33, pp. 1065 – 1076.
14. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применения. 1969. 14. Вып.1. С. 156 – 161.
15. Шапиро И.И. Непараметрические оценки плотности вероятности в задачах обработки результатов наблюдений // Зарубежная радиоэлектроника. 1976. № 2. С. 3 – 36.
16. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным плотности вероятности. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
17. Годлевский В.С., Заварин А.Н. Применение непараметрических оценок для вычисления многомерных интегралов // Журнал вычисл. математ. и математ. физики. 1979. № 5. С. 1118 –1126.
18. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
19. Батков А. М. Методы оптимизации в статистических задачах управления. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.
20. Полляк Ю. Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. – М.: Советское радио, 1971. – 400 с.
21. Заездный А. М. Основы расчетов по статистической радиотехнике. – М.: Связь, 1969. – 447 с.
22. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.

#### **К главе 4:**

1. Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. – М.: Наука, 1970. – 620 с.

2. Чуа А.О. Машинный анализ электронных схем (алгоритмы и вычислительные методы). – М.: Энергия, 1980. – 639 с.
3. Петров И.Б., Лобанов А.И. Лекции по вычислительной математике. – М.: Бином, 2006. – 522 с.
4. Dalgist G/ Convergence and stability in the numerical integrator of ordinary differential equations// Math. Scand. 1956, V.4, pp. 33 – 53.
5. Лозинский С.М. Оценка погрешности численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений // Изв. вузов. Математика. 1958. № 5. С. 52 – 90.
6. Годлевский В.С. Об оценках законов распределений погрешностей решений систем линейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1974. № 5. С. 1082 – 1092.
7. Бахвалов Н., Жидков Н., Кобельков Г. Численные методы. – М. СПб.: Физматлит, 2000. – 622 с.
8. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения). – М.: Высшая школа, 2000. – 266 с.
9. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
10. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. – М.: Наука, 1979. – 208 с.
11. Годлевский В.С. Методы точностного анализа и синтеза вычислительных устройств, систем управления и контроля. (Диссерт. на соискание ученой степени доктора техн. наук). – К.: ИПМЭ НАН УССР, 1980. – 398 с.
12. Брянских В.Е., Годлевский В.С., Заварин А.Н. и др. Диалоговый программный комплекс моделирования нестационарных режимов газотранспортных систем. К.: Препринт 89 – 6. ИПМЭ АН УССР, 1989. – 48 с.
13. Брянских В.Е., Кулик М.Н., Пухов Г.Е. Моделирование нестационарных режимов магистральных газопроводов методами повышенной точности // Электронное моделирование. 1984. № 3. С. 61 – 65.
14. Годлевский В.С., Ефимович Л.П. О расчете нестационарных режимов в трубопроводных сетях газотранспортных систем явно- неявным методом // Электронное моделирование. 2000. № 4. С. 104 – 114.
15. Молчанов И.Н. Машинные методы решения прикладных задач. Дифференциальные уравнения. – К.: Наукова думка, 1988. – 344 с.
16. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с.
17. Годлевский В.С. Некоторые способы цифрового моделирования динамических систем // Электронное моделирование. 1983. № 2. С. 7 – 13.
18. Беллман Р. Введение в теорию матриц. – М.: Наука, 1969. – 367 с.
19. Годлевский В.С. Экспоненциальный метод для решения систем обыкновенных дифференциальных и конечных уравнений при моделировании электрических цепей// Электронное моделирование. 1980. № 2. С. 60 – 65.

## К главе 5:

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 511 с.
2. Заездный А.М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. – Л.: Энергия, 1972. – 527 с.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
4. Умняшкин С.В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов. – М.: Техносфера, 2012. – 368 с.
5. Хэмминг Р.В. Численные методы. – М.: Наука, 1972. – 397 с.
6. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. – М.: Мир, 1982. – 427 с.
7. Хэррис Ф. Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978. № 1. С. 60 – 96.
8. Задирака В.К. Теория вычисления преобразования Фурье. – К.: Наукова думка, 1983. – 216 с.
9. Рабинер, Л., Гоулд, Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
10. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложение. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
11. Годлевский В.С., Денисенко А.М. Методические погрешности дискретного преобразования Фурье и способы их компенсации // Электронное моделирование. 2006. № 3. С. 83 – 98.
12. Дворкович В.П., Дворкович А.А. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. – М.: Техносфера, 2014. – 112 с.
13. Годлевский В.С., Денисенко А.М. Численный синтез оконных функций для дискретного преобразования Фурье // Электронное моделирование. 2006. № 4. С. 75 – 87.
14. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
15. Стивен Смит. Цифровая обработка сигналов. – М.: Додэка-XXI, 2012. – 720 с.
16. Гадзиковский В.И. Цифровая обработка сигналов. – М.: Салон-Пресс, 2013. – 763 с.
17. Ивашко А.В. Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов. Харьков. НТУ «ХПИ», 2003. – 233 с.
18. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
19. Методика применения корреляционного течеискателя «КОРШУН-12». Под редакцией Годлевского В.С. – К.: ООО «ДИСИТ», 2018. – 134 с.
20. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – М. – Л.: Гостехиздат, 1949. – 146 с.
21. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Изд-во «Судостроение», 1978. – 448 с.

22. Хилл К. (ред.) Применение ультразвука в медицине (Физические основы). – М.: Мир, 1989. – 431 с.
23. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара, справочник. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.
24. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. (ред.). Физические величины, справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
25. Годлевський В.С., Троїцький В.О., Бондаренко О.Г. Кореляційні методи й технології пошуку витоків у напорних трубопроводах. У зб.: «Проблеми ресурсу і безпеки і експлуатації конструкцій, споруд і машин». К.: Вид-во ІЕС ім. Патона Є.О., 2009. С. 525 – 530.
26. Методика применения корреляционного диагностического прибора «КОРШУН-11Д». Под редакцией Годлевского В.С. – К.: ГП «ДИСИТ» НАНУ, 2013. – 158 с.
27. Методика применения корреляционного течеискателя «КОРШУН-7». (Под редакцией Годлевского В.С.). – К.: ИПМЭ НАНУ, 1998. – 86 с.

### **К главе 6:**

1. Хьюлсман Л.П., Аллен Ф.Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров. – М.: Радио и связь, 1984. – 384 с.
2. Хьюлсман Л.П. Теория и расчет активных RC-цепей. – М.: Связь, 1973. – 240 с.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
4. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
5. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1989. – 304 с.
6. Васильев В.Г. Об оценке точности воспроизведения воздействий линейными следящими и регистрирующими системами // Автоматика и телемеханика. 1958. № 1. С. 26 – 48.
7. Годлевский В.С. К оценке погрешности восстановления непрерывных сигналов в импульсных системах // Кибернетика. 1970. № 6. С. 79 – 84.
8. Тетельбаум И.М., Тахванов Г.И., Беянина Н.В. О двух реализациях структурно-компенсированных сглаживающих устройств // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. 1977. Вып. 4. С. 78 – 83.
9. Годлевский В.С. Сглаживающий фильтр-сумматор // Авт. свид. № 726540 (СССР). Б.И. 1980. №13 (заявлено 10.06.1977).
10. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.
11. Достал И. Операционные усилители. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
12. Годлевский В.С., Левитский В.Г. Алгоритмы анализа и параметрического синтеза линейных аналоговых фильтров. – К.: Препринт-212 ИЭД АН УССР, 1979. – 50 с.

13. Баранчук Е.И. Взаимосвязанные и многоконтурные регулируемые системы. – Л.: Энергия, 1967. – 267 с.
14. Мееров М.В. Системы многосвязного регулирования. – М.: Наука, 1965. – 365 с.
15. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. – М.: Наука, 1981. – 797 с.
16. Годлевский В.С. К вычислению и оценке динамических погрешностей линейных многосвязных следящих систем // Известия вузов, Электромеханика. 1977. № 3. С. 331 – 337.
17. Годлевский В.С. К анализу и компенсации динамических погрешностей нелинейных многосвязных следящих систем // Известия вузов, Электромеханика. 1977. № 10. С. 1125 – 1129.
18. Гадзиковский В.И. Цифровая обработка сигналов. – М.: Солон-Пресс, 2013. – 766 с.
19. Сергиенко Б.А. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 751 с.
20. Умняшкин С.В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов. – М.: Техносфера, 2012. – 368 с.
21. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. М.: Физматгиз, 1963. – 968 с.
22. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. – М.: Физматгиз, 1963. – 456 с.
23. Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. – М.: Наука, 1970. – 620 с.

### **К главе 7:**

1. Справочник по аналоговой вычислительной технике. (Под редакцией Пухова Г.Е.). – К.: Техника, 1975. – 432 с.
2. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.
3. Годлевский В.С., Заброда А.М., Рысин В.С., Ткаченко В.А. Операционный усилитель // Авт. свид. № 1721614 (СССР). Б.И. 1992. № 11 (заявлено 15.06.1989).
4. Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. – М.: Атомиздат, 1980. – 256 с.
5. Якимов А.В. Физика шумов и флуктуации параметров. Нижн. Новгород, ННГУ, 2013. – 85 с.
6. ГОСТ 23089.1-83 – 23089.17-83. Микросхемы интегральные. Методы измерения параметров операционных усилителей. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1983.
7. Достал И. Операционные усилители. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
8. Грем Дж. Проектирование и применение операционных усилителей. – М.: Мир, 1974. – 510 с.
9. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС. – М.: Мир, 1985. – 573 с.

10. Волгин Л.И. Аналоговые операционные преобразователи для измерительных устройств и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
11. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
12. Пейт А., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. – М.: Бином, 1994. – 352 с.
13. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC. (Под редакцией У. Томкинса, Дж. Уэбстера). – М.: Мир, 1992. – 592 с.
14. Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
15. Радиотехника: Энциклопедия (Под ред.: Ю.А. Мазора, Е.А. Мачусского, В.И. Правды). – М.: Издательский дом «Додэка – XXI», 2002. – 944 с.
16. ГОСТ 16465-70. Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1971. – 34 с.
17. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике. – М.: Мир, 1991. – 445 с.
18. Годлевский В.С., Симоненко В.В. Методика анализа шумовых характеристик предварительных усилителей с датчиками // Электронное моделирование. 2004. № 6. С. 84 – 104.
19. Линейные схемы. Руководство по проектированию. (Под редакцией Х. Цумбалена). – Analog Devices. М.: Техносфера, 2011. – 1119 с.
20. Пухов Г.Е. Избранные вопросы теории математических машин. – К.: Изд-во АН УССР, 1964. – 269 с.
21. Годлевский В.С. К сравнению по быстродействию и точности ЦВМ и АВМ в контурах линейных систем управления // Автоматика и телемеханика. 1978. № 8. С. 169 – 177.
22. Беляков В.Г. Методика оценки эквивалентного быстродействия АВМ // Вопросы радиоэлектроники, электронная вычислительная техника. 1974. Вып. 2. С. 172 – 186.
23. Коган Б.Я. Использование потенциального быстродействия аналоговых вычислительных машин в гибридных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1976. № 12. С. 148 – 155.
24. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. – М.: Физматгиз, 1963. – 968 с.

### **К главе 8:**

1. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962. – 333 с.
2. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М. – К.: Диалектика, 2007. – 912 с.

3. Алберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. – М.: Наука, 1977. – 224 с.
4. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1988. – 552 с.
5. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: 1975. – 536 с.
6. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной оптимизации. – М.: Мир, 1972. – 240 с.
7. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Оптимизация систем транспорта газа. М.: Недра, 1975. – 276 с.
8. Сарданашвили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП «нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – 577 с.
9. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов (Под редакцией Селезнева В.Е.). М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.
10. Годлевский В.С., Головченко В.П. Математическая модель трубопроводных участков газотранспортных систем // Электронное моделирование. 2007. № 3. С. 55 – 70.
11. Годлевский В.С. Особенности, задачи и методы моделирования стационарных режимов сетевых магистральных газотранспортных систем // Электронное моделирование. 2008. № 1. С. 103 – 118.
12. Фридман В.Е. Математическое моделирование технологических объектов магистрального транспорта газа. – М.: Недра, 1988. – 192 с.
13. Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И. Информационно-вычислительные системы в диспетчерском управлении газопроводами. Л.: Недра, 1988. – 245 с.
14. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях. К.: Наукова думка, 1987. – 200 с.
15. Kasmarz, S. Angendherthe Auflosung von Systemen Linearer Gleichungen // Bulletin Internat Academe Polon. Sci. Lett. Gl. Sci. Math. Nat A.1937. P. 355 – 359.
16. Кононюк А. Е. Основы теории оптимизации. Безусловная оптимизация. Книга 2, ч. 4. Киев: Освіта України, 2012. – 512 с.
17. Годлевский В.С., Головченко В.П. Компьютерное планирование и оптимизация режимов сетевых газотранспортных систем// Функціонування та розвиток ринків електроенергії та газу. – К.: Збірник наукових праць ІПМЕ НАНУ, Наукова-практична конференція. 2003. С. 34 – 41.
18. Краснов М.П. Интегральные уравнения. – М.: Наука, 1975. – 301 с.
19. Годлевский В.С. Метод восстановления входных сигналов линейных динамических систем // Электронное моделирование. 2009. № 4. С. 89 – 98.
20. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – К.: Наукова думка, 1986. – 544 с.

21. Верлань А.Ф., Горошко И.О., Карпенко Е.Ю. и др. Методы и алгоритмы восстановления сигналов и изображений. – К.: НАН Украины, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова, 2011. – 368с.
22. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерения. – СПб.: Политехника, 2001. – 240 с.
23. Стогний Б.С., Годлевский В.С., Демин А.Е., Кириленко А.В. Структурные методы восстановления входного сигнала электроизмерительного преобразователя тока // Техническая электродинамика. 1985. № 1. С. 98–102.
24. Хардли В. Прикладная непараметрическая регрессия. – М.: Мир, 1993. – 349 с.
25. Анатольев С. Непараметрическая регрессия // Квантиль. 2009. № 7. С. 37 – 52.
26. Надарая Э.А. О непараметрических оценках плотности вероятности и регрессии // Теория вероятности и ее применение. 1965. Вып. 1. С. 72 – 81.
27. Watson G.S. Smooth regressio analysis // Sankhua, Series A, 26. 1964. С. 359 – 372.
28. Заварин А.Н. О вероятностных моментах непараметрической оценки функции регрессии // Автоматика и телемеханика. 1985. №5. С. 57 – 68.
29. Годлевский В.С., Заварин А.Н. Адаптивный вибрационный контроль турбогенераторов // Энергетика и электрофикация. – К.: Техніка. 1983. Вып. 3. С. 30 – 34.
30. Годлевский В.С. Об адаптивном контроле технических систем в рабочих режимах // Электрон. моделирование. 1996. № 4. С.70 – 73.
31. Безпрозванный А.А., Молодых С.А., Вова Н.И. и др. Структура подсистемы вибрационной диагностики конструктивных узлов статора турбогенератора ТГВ-300 // Энергетика и электрофикация. – К.: Техніка. 1983. Вып. 3. С. 28 – 31.
32. Кошкин Г.М., Тарасенко Ф.П. Рекуррентное оценивание плотности вероятности и линии регрессии по зависимой выборке. В кн.: Математическая статистика и ее приложения. Томск: изд., том. ун-та, 1976, вып. 4, с.122-138.
33. Епанечников В.А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применения. 1969. 14. Вып.1. С. 156 – 161.

## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Основные показатели и задачи теории точности</b> .....	9
1.1. Показатели и виды погрешностей .....	9
1.1.1. Показатели погрешности .....	10
1.1.2. Трансформированные, методические, приборные погрешности .....	13
1.1.3. Динамические и статические погрешности .....	14
1.1.4. Систематические и случайные погрешности .....	15
1.2. Типовые задачи анализа точности и методы их решения .....	16
1.2.1. Линеаризация функций по погрешностям аргументов, линейная теория точности .....	18
1.2.2. Погрешности численного дифференцирования при линеаризации .....	25
1.2.3. Линеаризация скалярных неявных функций по погрешностям аргументов .....	29
1.2.4. Линеаризация векторных явных функций по погрешностям аргументов .....	34
1.2.5. Детерминированные и вероятностные оценки погрешностей .....	37
1.2.6. Законы распределения вероятности погрешностей .....	40
1.3. Обратные задачи теории точности .....	50
1.4. Точностной параметрический синтез .....	53
<b>Глава 2. Оценки погрешностей решений систем алгебраических уравнений</b> .....	54
2.1. Погрешности решений систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) .....	54
2.1.1. Трансформированные погрешности решения СЛАУ .....	56
2.1.1.1. Системы уравнений и зависимости для погрешностей решений .....	57
2.1.1.2. Оценки норм погрешностей решения СЛАУ .....	60
2.1.1.3. Вероятностные оценки погрешностей решения СЛАУ .....	67
2.1.1.4. Коэффициенты влияния параметров на решение СЛАУ .....	71
2.1.1.5. Оценки и вычисление норм обратных матриц .....	74
2.1.2. Погрешности округления при решении СЛАУ .....	77
2.1.3. Об оценках погрешностей решения СЛАУ при регуляризации .....	81
2.1.4. Погрешности решения СЛАУ из-за неточности модели .....	89
2.2. Погрешности решений систем нелинейных конечных уравнений (СНКУ) ...	90
2.2.1. Трансформированные погрешности решения СНКУ .....	91
2.2.2. Методические погрешности решения СНКУ .....	95
2.3. Анализ погрешностей решений СНКУ блочным методом .....	98
2.4. Выбор длины шага в модифицированном методе Ньютона .....	100
2.5. Блочный вариант метода Ньютона решения СНКУ .....	105

<b>Глава 3. Оценки вероятностей для векторных функций погрешностей</b> ....	109
3.1. Вычисление вероятности при многомерном нормальном распределении ...	109
3.2. Вычисление вероятностей методами статистических испытаний .....	120
3.2.1. Вычисление вероятности для погрешностей методом Монте-Карло .....	121
3.2.2. Вычисление вероятностей для погрешностей по непараметрическим оценкам плотностей распределения .....	125
3.3. Вероятностные характеристики оценок норм погрешностей .....	130
<b>Глава 4. Погрешности решения систем обыкновенных дифференциальных уравнение (СОДУ)</b> .....	135
4.1. Трансформированные погрешности решения СОДУ .....	135
4.1.1. Системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений ...	135
4.1.2. Оценки трансформированных погрешностей решения СОДУ .....	140
4.2. Методические погрешности решения СОДУ .....	144
4.2.1. Точность решения СОДУ явным методом Эйлера .....	144
4.2.2. Правило Рунге оценки методических погрешностей на шаге .....	150
4.2.3. Точность и устойчивость решения неявным методом Эйлера СОДУ в нормальной форме .....	151
4.2.4. Точность и устойчивость неявного метода трапеции .....	156
4.2.5. Точность и устойчивость решения неявными методами СОДУ, заданных в неявной форме .....	160
4.2.6. Точность и устойчивость явно-неявных методов .....	166
4.3. Экспоненциальные методы решения линейных СОДУ .....	170
<b>Глава 5. О точности обработки сигналов с применением дискретного преобразования Фурье</b> .....	175
5.1. Ряд Фурье в тригонометрической и показательной форме .....	175
5.2. Методические погрешности непрерывного преобразования Фурье .....	179
5.2.1. Размытость спектра сигнала из-за ограниченного интервала наблюдения .....	180
5.2.2. Эффект Гибса при аппроксимации рядом Фурье разрывных функций .....	184
5.3. Методические погрешности дискретного преобразования Фурье .....	185
5.3.1. Неравномерность АЧХ блока ДПФ .....	186
5.3.2. Искажение спектра составляющими из высокочастотной области ...	192
5.4. Способы уменьшения методических погрешностей ДПФ .....	194
5.4.1. Дополнение выборки нулями .....	195
5.4.2. Применение временных оконных функций .....	197
5.4.2.1. Общие свойства и параметры оконных функций .....	199
5.4.2.2. Вычисление параметров оконных функций .....	205
5.4.2.3. Выбор параметров оконных функций .....	206
5.5. О точности фильтрации и корреляционной обработки аналоговых сигналов методами ДПФ и ОДПФ .....	209

5.5.1. Фильтрация аналоговых сигналов методами ДПФ и ОДПФ .....	211
5.5.2. О методических погрешностях вычисления корреляционных функций сигналов .....	217
5.5.3. Методические погрешности поиска утечек на трубопроводах корреляционными течеискателями .....	222
<b>Глава 6. Точность воспроизведения сигналов фильтрами и системами</b> ....	<b>232</b>
6.1. Частотные и мгновенные погрешности фильтров при гармонических сигналах .....	233
6.1.1. Погрешности фильтров нижних частот .....	235
6.1.2. Погрешности фильтров верхних частот .....	241
6.1.3. Погрешности полосовых фильтров .....	244
6.1.4. Погрешности фильтров при допустимых запаздываниях .....	247
6.2. Методические погрешности воспроизведения фильтрами произвольных дифференцируемых сигналов .....	253
6.2.1. Погрешности воспроизведения ФНЧ гладких сигналов .....	253
6.2.2. Погрешности воспроизведения ФВЧ гладких сигналов .....	259
6.3. Аппаратные погрешности аналоговых фильтров .....	262
6.4. Оценка погрешностей многосвязных воспроизводящих систем .....	271
6.5. Методические погрешности цифровых фильтров аналоговых сигналов ...	277
6.5.1. Модели цифровых фильтров для анализа методических погрешностей .....	281
6.5.2. Фильтры на основе численных решений СОДУ первого порядка ....	289
<b>Глава 7. Точность аналоговых операционных блоков и процессоров</b> .....	<b>293</b>
7.1. Источники первичных погрешностей операционных блоков .....	294
7.2. Точность типовых линейных операционных блоков .....	299
7.2.1. Точность инвертирующего масштабного блока .....	300
7.2.2. Точность инвертирующего сумматора .....	301
7.2.3. Точность сумматора-вычитателя .....	307
7.2.4. Влияние потенциалов и шумов земляных шин .....	311
7.3. Точность типовых нелинейных блоков .....	312
7.3.1. Детекторы однополярных и абсолютных значений сигналов .....	313
7.3.2. Детекторы средневыпрямленных значений сигналов .....	324
7.3.3. Функциональные преобразователи на детекторах с «идеальными» диодами .....	328
7.4. Погрешности первичных преобразователей сигналов датчиков .....	336
7.4.1. Нормированный коэффициент преобразования шума .....	337
7.4.2. Анализ точности схем предварительных усилителей сигналов датчиков .....	341
7.5. Погрешности решения систем алгебраических уравнений на аналоговых процессорах .....	351

7.6. Погрешности анализа устойчивости аналоговых процессоров .....	356
7.7. Сравнение показателей быстродействия аналоговых и цифровых процессоров .....	358
<b>Глава 8. О повышении точности входных данных</b> .....	<b>363</b>
8.1. Предварительная обработка входных данных .....	363
8.1.1. Усреднение измерений параметров и сигналов .....	363
8.1.2. Идентификация параметров одномерных датчиков .....	364
8.1.3. Идентификация параметров многосвязных систем .....	366
8.1.4. Вычислительные вопросы при идентификации систем .....	372
8.1.5. Восстановление входных сигналов инерционных датчиков .....	377
8.2. Идентификация состояния объектов с применением непараметрических оценок функций регрессии .....	382
<b>Заключение</b> .....	<b>389</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>390</b>

## **РЕКЛАМНАЯ ИНФОРМАЦИЯ** **Поисковые приборы для трубопроводов**

### **1. Корреляционный течеискатель «КОРШУН-12М»**



*На фотографии показан прибор КОРШУН-12М вместе с двухканальным вибростендом – «моделью трубопровода с утечкой».*

#### **1.1. Назначение**

Прибор для определения координат утечек в подземных напорных стальных, чугунных и пластмассовых трубопроводах систем тепло-, водо-, нефтепродуктоснабжения независимо от глубины их прокладки.

#### **1.2. Принцип действия**

Вытекаемая под давлением из трубопровода транспортируемая среда создает гидравлические осесимметричные поперечные волны и вибрации стенок трубопровода, которые преобразуются в электрические сигналы вибродатчиками, устанавливаемыми на трубу с помощью магнитных держателей или специальных механических держателей. Эти сигналы после обработки передаются в блок оператора по радио, где обрабатываются и используются для определения координаты утечки от одного из датчиков корреляционными и спектральными методами.

#### **1.3. Комплектность**

В базовый состав прибора входят: блок оператора; два выносных радиоблока с предварительным усилителем и фильтрами; три накладных вибродатчика с магнитным держателем и кабелем (6 м); кабельная катушка с предварительным усилителем и кабелем (100 м); два держателя датчиков на пластмассовые и немагнитные трубы; два переходника для установки датчиков на штоки задвижек в трубах; двухканальное зарядное устройство с источником 12В; прибор для экспрессного контроля параметров блоков течеискателя; диск с программой «ПТК» (протоколльно-трассо-картографический комплекс); три сумки-саквояжи.

Прибор имеет: встроенные адаптивные цифровые фильтры, которые «настраиваются» на частоты сигналов утечки при интенсивных «паразитных» шумах; автоматические регуляторы усиления; перестраиваемые аналоговые фильтры.

#### **1.4. Технические характеристики:**

Длина диагностируемого трубопровода стального — до 2000 м, пластмассового — до 300 м (зависит от давления и диаметра трубы); полоса рабочих частот — от 3 Гц до 4500 Гц; приборная точность —  $\pm 0.15$  м; минимальное давление в трубопроводах 1.8 – 2.5 Атм; температура работы выносных радиоблоков от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ , блока оператора: от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ , датчиков: от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+140^{\circ}\text{C}$ .

Приборы семейства «КОРШУН» успешно прошли сравнительные натурные испытания с лучшими зарубежными корреляционными течеискателями по показателям обнаружения и точности определения координат утечек на трубопроводах в условиях достаточно интенсивных шумовых помех.

## **2. Акустический течеискатель «АИСТ-7М»**



### **2.1. Назначение**

Течеискатель «АИСТ-7М» предназначен для определения места разгерметизации напорных трубопроводов систем водо-, тепло-, газо-, паро-, нефтепродуктоснабжения виброакустическим методом.

### **2.2. Принцип действия**

Принцип действия прибора основан на преобразовании вибраций грунта, возбуждаемых свищем утечки в электрические сигналы и последующей их линейной и нелинейной частотной с целью обнаружения и оценки параметров сигналов утечек на фоне посторонних шумов, создаваемых многочисленными источниками (транспортными средствами, ветром и т.д.). Прибор является переносным. Датчик прибора устанавливается на грунт над диагностируемым трубопроводом.

Линейная частотная фильтрация сигналов датчиков осуществляется линейными фильтрами верхних и нижних частот. Фильтрация ударных и продолжительных «импульсно-подобных» шумовых сигналов (которые создаются, например, порывами ветра, проезжающими автомобилями и т.д.) осуществляется нелинейными цифровыми фильтрами.

Слуховая индикация сигналов датчиков осуществляется посредством головных телефонов с регулировкой уровня громкости. Визуальная индикация отфильтрованных сигналов датчиков осуществляется с помощью двух линеек светодиодов.

### **2.3. Комплектность**

В базовый состав прибора входят: блок оператора; всегрунтовый датчик; головные наушники; зарядное устройство; два транспортных тубуса для датчика; сумка-саквояж.

### **2.4. Технические характеристики:**

Конструкция всегрунтового датчика обеспечивает возможность работы на травянистых, неровных, покрытых снегом и водой грунтах, а также на асфальте; температура работы блока оператора и датчика – от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , хранения — от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; максимальный коэффициент усиления – 90 дБ; регулируемый коэффициент усиления – до 42 дБ; шкала каждой светодиодной линейки индикатора имеет 32 градации; в приборе имеется память на 16 значений для фиксации и анализа распределения уровня вибрационных шумов грунта вдоль исследуемой трассы; датчик имеет узкую диаграмму направленности.

### **3. Блок контроля корреляционных течеискателей «БАКЛАН-4ДМ»**



#### **3.1. Назначение**

Прибор предназначен для контроля работоспособных параметров и качества корреляционных и акустических течеискателей с помощью встроенных в прибор источников синусоидальных сигналов, эталонных тестовых сигналов и двух вибростендов, генерирующих гармонические вибрации и сигналы утечек.

#### **3.2. Комплектность**

Прибор является двухканальным, содержит: два вибратора, генератор синусоидальных сигналов, электронный стереоплеер с записанными сигналами, которые были созданы реальной утечкой в трубопроводе, встроенный источник стабилизированного питания.

#### **3.3. Принцип действия**

Для моделирования работы с металлической трубой в прибор встроены два вибратора, на которые с плееров подаются записанные сигналы, созданные реальной утечкой в реальной трубе. В приборе имеются также и другие режимы: режим контроля сквозного коэффициента преобразования вибраций от вибродатчика до блока оператора корреляционного течеискателя включительно, а также до блока оператора акустического течеискателя; режимы контроля отдельных электронных блоков прибора.

#### **3.4. Технические характеристики**

Прибор дает возможность контролировать работоспособность корреляционных течеискателей (в составе блока оператора, выносных радиоблоков и кабельной катушки с усилителем, датчиков - акселерометров) путем контроля:

- основного параметра течеискателя (в полном составе) – точность определения координаты утечки, в качестве которой в приборе используется тестовая запись реальной утечки;
- контроля текущего состояния датчиков-акселерометров путем контроля сквозных коэффициентов преобразования сигналов вибраций вибраторов в выходные сигналы блока оператора;
- качества вычисления прибором спектральных характеристик эталонных тестовых записей;
- коэффициентов передачи отдельных блоков течеискателей (радиоканалов или кабельных катушек с предварительными усилителями, нормирующих и фильтрующих каналов блока оператора).

**ООО «ДИСИТ»**

03164, г. Киев, ул. Генерала Наумова, 17; (044)-422-96-22,  
e-mail: disit2007@gmail.com; www.disit.com.ua

*Монографія*

В. С. Годлевський,  
В. В. Годлевський

ВОПРОСЫ ТОЧНОСТИ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ  
(російською мовою)

Коректор *Дроботько Н. В.*  
Верстка *Ткаченко Є. С.*  
Дизайн обкладинки *Лисенко О. В.*

*Видано в авторській редакції*

Підп. до друку 10.01.20. Формат 70 × 100/16.  
Папір офсет. № 1. Гарнітура Times New Roman.  
Друк цифр. Ум. друк. арк. 14  
Тираж 100 пр.

Видавництво ТОВ «Альфа Реклама»  
Україна, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 1–5  
Тел.: (044) 272-00-30,  
(096) 218-99-63  
[www.izdat-knigu.com](http://www.izdat-knigu.com)  
[www.alphabook.com.ua](http://www.alphabook.com.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК №3421 від 11.03.2009  
Надруковано ТОВ «Альфа Реклама»